

Modélisation bidimensionnelle de la propagation ultrasonore dans le contexte d'un contrôle non destructif ultrasonore sur tubes sans soudure

Ecole doctorale Sciences de l'Ingénieur Université Lille-Nord-de-
France

Spécialité : ACOUSTIQUE

Fatima-Zahra SMIME

16/11/2018

François DENEUVILLE

Directeur industriel

Vallourec Drilling – Aulnoye
Aymeries

Mohammadi OUAFTOUH

Directeur universitaire

DOAE IEMN Valenciennes

Marc DUQUENNOY

Co-directeur universitaire

DOAE IEMN Valenciennes

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	17
<i>Chapitre 1 Caractérisation des défauts en contrôle non destructif par ultrasons sur tubes en acier sans soudure</i>	20
I. Introduction	20
II. Fabrication des tubes sans soudure chez Vallourec	21
III. Les défauts ciblés et leurs origines	23
IV. Contrôles Non Destructifs sur tubes sans soudure	24
1. Les méthodes CND pour les défauts surfaciques	25
2. Les méthodes CND pour les défauts volumiques	26
V. Le Contrôle Non Destructif ultrasonore sur tubes sans soudure	30
1. Généralités	30
2. Les configurations de contrôle ultrasonore par réflexion sur tube sans soudure	32
3. Appareillage et matériels de contrôle ultrasonore	35
4. Représentation des données ultrasonores	38
5. Détection des défauts en contrôle ultrasonore	41
VI. Méthodes d'identification des défauts suite à un contrôle ultrasonore	44
1. Méthodes classiques	45
2. Méthodes d'inversion basées sur une formulation mathématique	49
3. Méthodes d'inversion basées sur un modèle direct	50
4. Méthodes d'identification développées au centre de recherche VRCF	50
VII. Conclusion	52
<i>Chapitre 2 Modélisation de l'interaction entre le faisceau ultrasonore et une interface plane rigide -défaut débouchant</i>	54
I. Introduction	54
II. Modélisation de l'interaction acoustique entre un faisceau acoustique et un obstacle plan rigide	55
1. Modélisation selon les méthodes numériques et analytiques	56
2. Théorie des rayons pour la description de la propagation des ondes acoustiques	58
III. Formulation du problème de diffraction	61
1. Notions basiques des problèmes de diffraction en acoustique	61

2.	Les extensions asymptotiques de l'Optique pour la description des phénomènes de diffraction	64
3.	La Theorie Physique de la Diffraction – PTD.....	77
IV.	Réflexion et transmission d'une onde plane au niveau d'une interface	84
1.	Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Eau / Acier.....	84
2.	Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Acier / Air87	
3.	Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Acier / Eau.....	90
V.	Conclusion	94
<i>Chapitre 3 Implémentation logicielle du simulateur bidimensionnel du contrôle ultrasonore transversal du tube</i>		
<i>97</i>		
I.	Introduction.....	97
II.	Rappel du contrôle ultrasonore du tube pour la détection des défauts débouchants.	98
III.	Modèles directs pour la simulation d'une inspection ultrasonore.....	101
1.	Le logiciel d'expertise CIVA- le module inspection ultrasonore	101
2.	Le Simulateur VRCF : simulateur bidimensionnel de propagation ultrasonore	104
IV.	Implémentation logicielle du simulateur de propagation ultrasonore mono fréquentiel.....	106
1.	Synoptique global du modèle bidimensionnel pour la configuration transversal du contrôle ultrasonore sur tube.....	108
2.	Initialisation de la configuration du contrôle ultrasonore	109
V.	Calcul des temps vol et des amplitudes des rayons ultrasonores géométriques	117
1.	Calcul des temps de vol des rayons géométriques (TOF –Time Of Flight)	117
2.	Calcul des amplitudes portées par les rayons géométriques ultrasonores	118
3.	Extension du calcul mono-fréquentiel au calcul large-bande	124
VI.	Paramètres des images ultrasonores pour la validation du Simulateur VRCF	126
1.	Choix des données images pour la validation du Simulateur VRCF.....	126
2.	Routines de dépouillement des résultats expérimentaux et simulés.....	129
VII.	Conclusion.....	132
<i>Chapitre 4 Etude théorique et expérimentale du simulateur de propagation ultrasonore pour la configuration de contrôle transversale sur un tube</i>		
<i>134</i>		
I.	Introduction.....	134

II. Dispositif expérimental de l'inspection ultrasonore suivant la configuration transversale d'une plaque en immersion	135
1. Caractéristiques de la pièce test : plaque.....	135
2. Caractéristiques du dispositif expérimental	138
3. Caractéristiques du transducteur ultrasonore	144
III. Validation expérimentale de la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur défauts artificiels.....	148
1. Résultats de validation sur défauts artificiels droits	152
2. Résultats de validation sur défauts artificiels tiltés	164
IV. Discussion et Conclusion	186
<i>Chapitre 5 Perspectives d'amélioration du simulateur bidimensionnel du contrôle ultrasonore transversal du tube et prolongement pour le contrôle ultrasonore longitudinal</i>	<i>190</i>
I. Introduction.....	190
II. Perspective d'amélioration pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube	192
1. Interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut plan débouchant interne ciblé	192
2. Prolongement de la configuration transversale au défaut plan débouchant externe	200
III. Extension du Simulateur VRCF à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube	201
IV. Déduction du tilt et de l'extension du défaut détecté en fonction des temps de vol des trajets ultrasonores	205
V. Conclusion	207
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>210</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>213</i>

Liste des abréviations

VRCF	Vallourec R esearch C enter F rance
IEMN	Institut d' E lectronique, de M icroélectronique et de N anotechnologie
HF	H autes F réquences
CND	C ontrôle(s) N on D estructif(s)
PA	P hased A rray (Transducteurs Multiéléments)
DAG	D istance, A mplitude, G ain
SAFT	S ynthetic A perature F ocusing T echnique
FMC	F ull M atrix C apture
TFM	T otal F ocusing M ethod
DORT	D écomposition de l' O érateur de R etournement T emporel
BKF	B etter K nowledge of F laws
OG	O ptique G éométrique
GTD	G eometrical T heory of D iffraction (en français: Théorie Géométrique de la Diffraction)
OP	O ptique P hysique
PTD	P hysical T heory of D iffraction (en français: Théorie Physique de la Diffraction)
MTD	M athematical T heory of D iffraction (en français: Théorie Mathématique de la Diffraction)
KA	K irchhoff A pproximation (en français : Approximation de Kirchhoff)
KAR	K irchhoff A pproximation R affiné
TOFD	T ime O f F light D iffraction
SSD	S an S D iffraction (tient compte uniquement de la Réflexion & Réfraction)
TOF	T ime O f F light (en français: temps de vol)
FSH-	F ull S creen H eight (en français: Hauteur de l'écran de visualisation)
MEF	M éthode d' É léments F inis

Liste des Figures

Figure 1 : étapes de fabrications des tubes à partir d'une biellette pleine dans un laminoir Stiefel	22
Figure 2 : étapes de fabrications des tubes à partir d'une biellette pleine dans un laminoir à mandrin.....	22
Figure 3 : types de défauts sur tube en acier sans soudure	23
Figure 4 : a) banc de Magnétoscopie au VRCF. (b) défaut surfacique révélé par magnétoscopie.....	25
Figure 5 : (a) Création du champ magnétique le long du tube. (b) déviation des lignes de champ suite à la présence de défauts internes et externes. [10].....	27
Figure 6 : (a) Orientation des lignes de champ par rapport aux défauts ciblés. (b) Magnétisation longitudinale pour la détection des défauts transversaux. (c) Magnétisation circulaire pour la détection des défauts longitudinaux et obliques. [10]	28
Figure 7 : inspection ultrasonore par contact d'une pièce en présence d'un défaut et signaux recueillis par le transducteur [10]	28
Figure 8 : des ondes sonores. [10]	30
Figure 9 : comportement d'un spécimen piézoélectrique : l'application d'une contrainte mécanique crée un potentiel électrique et vice-versa. Illustration du comportement en vidéo disponible sur [12]	31
Figure 10 : de propagation des ondes longitudinales et transversales. [10].....	31
Figure 11 : moyens de couplage pour le contrôle ultrasonore. [10]	32
Figure 12 : principe de la mesure d'épaisseur par ultrasons. V (vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans l'acier) et Δt (différence de temps de parcours de l'onde ultrasonore entre deux échos de fond) [10].....	33
Figure 13 : ovalisation et excentration d'un tube	33
Figure 14 : réflexion et réfraction des ondes ultrasonores OL et OT suite à une incidence oblique. [10]	34
Figure 15 : plan de contrôle longitudinal du tube: coupe transversale. [15]	34
Figure 16 : plan de contrôle transversal du tube: coupe longitudinale [15].	35
Figure 17 : illustration de l'inclinaison du défaut dit tilté par rapport à un défaut droit.	35
Figure 18 : schéma d'un appareil à ultrasons. [16]	36
Figure 19 : séquençage des pastilles piézoélectriques du transducteur pour la commutation électronique. [10]	37
Figure 20 : d'application des lois de retard pour une déflexion ou une focalisation. [10]	38
Figure 21 : types de transducteurs multiéléments. [15]	38
Figure 22 : Ascan expérimental du signal réfléchi par le défaut plan droit de profondeur 0.75mm et débouchant sur la surface d'une plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Muti2000 (M2M).....	39

Figure 23 : Bscan expérimental du signal réfléchi par le défaut plan droit de profondeur 0.75mm et débouchant sur la surface d'une plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Muti2000 (M2M)	39
Figure 24 : Cscan expérimental du signal réfléchi par les défauts plans droits ou tiltés usinés sur la surface de plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Multi2000 (M2M)	40
Figure 25 : courbes écho-dynamique expérimentales des réponses acoustiques des entailles artificielles 1, 5 et 9 (Figure 24.). Relecture à l'aide de la routine de dépouillement développée « Relecture-essais » dans le cadre de ces travaux.....	41
Figure 26 : architecture « en poupées russes » d'un puit de production de Pétrole & gaz [20]	42
Figure 27 : caractéristiques dimensionnelles d'une entaille étalon longitudinale interne et sa réplique	43
Figure 28 : exemple de détection de défaut interne ou externe par seuillage suivant la configuration longitudinal du contrôle ultrasonore	44
Figure 29 : caractérisation des défauts détectés et représentation 3D du tube inspecté [1] .	45
Figure 30 : diagramme DAG mettant en relation la distance du défaut D, l'amplitude de l'écho du défaut G et la taille du défaut S (diagramme DAG ou DGS : Distance, Gain and Size) [14].....	46
Figure 31 : paramètres de la courbe écho-dynamique de la réponse acoustique d'un défaut permettant l'estimation de la profondeur du défaut suivant la méthode à -6dB.....	47
Figure 32 : schéma de la détermination de la profondeur du défaut à l'aide des échos provenant des deux bords du défaut plan (coin et sommet). [25].....	48
Figure 33 : schémas et signaux reçus par le transducteur en réception en contrôle suivant la méthode TOFD. (a) : mode TOFD à l'aide de transducteurs distincts. (b) : mode TOFD à l'aide de transducteurs tandem.	48
Figure 34 : schéma de la détermination de la profondeur du défaut à l'aide la méthode TOFD à l'aide de transducteurs distincts [25].	49
Figure 35 : synoptique de la méthode <i>BKF</i> pour l'identification des défauts [2]	51
Figure 36 : différents rayons générés (incident, réfléchis et transmis) suite à un rayon incident sur une interface lisse entre deux milieux homogènes.	59
Figure 37 : S_{il} est la partie illuminée de la surface de l'objet par les sources diffusantes aux points Q_1 et Q_2 . La partie sombre représente la région d'ombre géométrique de l'objet [39].	62
Figure 38 : surface de diffusion S . r est la distance entre le pont d'observation P situé dans le champ lointain et le point d'intégration Q situé sur la surface S . m vecteur unitaire directeur du trajet QP . [39].....	63
Figure 39 : trois types de diffraction prise en compte par la <i>GTD</i>	64
Figure 40 : schéma du problème canonique de la diffraction par un demi-plan	65
Figure 41 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence $(\mathbf{r}_0, \varphi_0)$ par un demi-plan $\varphi = 2\pi$	66

Figure 42 : les trois zones définies par la <i>GTD</i> pour le problème de diffraction par un demi-plan (Figure 41). Les rayons diffractés sont présents à toutes ces zones	66
Figure 43 : champ total selon la <i>GTD</i> pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.....	70
Figure 44 : surface du demi-plan $\Sigma +$ par une onde plane d'incidence φ_0	71
Figure 45 : contour d'intégration pour l'Équation 36	73
Figure 46 : champ total selon l'Approximation de Kirchhoff pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.....	74
Figure 47 : module du coefficient de correction <i>DKAR</i> pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.....	76
Figure 48 : champ total selon la solution exacte pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.....	80
Figure 49 : géométrie du problème de diffraction par un demi-plan.....	81
Figure 50 : champ total selon l'intégrale de Kirchhoff pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.....	82
Figure 51 : champs de franges pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $\nu t = 3230ms - 1$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde. Champ de franges selon les considérations asymptotiques (vert), champ de frange selon les considérations intégrales.....	83
Figure 52 : coefficients de réflexion et de transmission en énergie pour une incidence plane pour une interface plane séparant l'eau et l'acier	87
Figure 53 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion pour une incidence longitudinale sur une interface plane entre Acier/Air	88
Figure 54 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion pour une incidence transversale sur une interface plane entre Acier/Air	90
Figure 55 : modules des coefficients en amplitudes de déplacement de réflexion et transmission pour une incidence longitudinale sur une interface plane entre Acier/Eau	92
Figure 56 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion et transmission pour une incidence transversale sur une interface plane entre Acier/Eau	94
Figure 57 : réflexion et réfraction des ondes ultrasonores OL et OT suite à une incidence oblique [10].	98
Figure 58 : inspection à l'aide des ondes transversales sous incidence oblique. Propagation des ondes suivant un chemin en zigzag. [15]	99
Figure 59 : banc usine Saint-Saulve pour le contrôle ultrasonore des tubes de la division UpStream. Les transducteurs pour le contrôle transversal, longitudinal et le contrôle dimensionnel de l'épaisseur sont immergés dans le tank.....	99

Figure 60 : géométries du contrôle transversal du tube, inspection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif vis-à-vis du faisceau acoustique (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite)	100
Figure 61 : géométries du contrôle longitudinal du tube, inspection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite)	100
Figure 62: d'un pinceau provenant l'un point source P et de ses rayons : axial et paraxial. [64]	102
Figure 63 : discrétisation de la surface du défaut en plusieurs sources élémentaires pour le calcul des contributions élémentaires engendrées par l'interaction du faisceau ultrasonore avec un défaut plan selon l'approximation de Kirchhoff dans CIVA	103
Figure 64 : inspection d'un défaut dans la paroi en TOFD	103
Figure 65 : onde sphérique émise depuis la source P dans un milieu fluide homogène, isotrope et infini vue comme une onde plane au point M et au-delà.	104
Figure 66 : interactions de l'onde ultrasonore plane avec un défaut plan incliné (10°) débouchant sur la surface interne de la plaque selon une approche zonale	108
Figure 67 : schéma résumant les quatre sections composant le modèle direct mono-fréquentiel pour la simulation de la propagation d'un faisceau ultrasonore comportant plusieurs rayons ultrasonores pour la géométrie plaque présentant un défaut plan longitudinal droit ou incliné débouchant sur la surface interne	109
Figure 68 : Synoptique du modèle direct pour la simulation de l'interaction d'un faisceau comportant plusieurs rayons ultrasonores pour la géométrie plaque présentant un défaut plan droit ou incliné débouchant sur la surface interne	110
Figure 69 : interface graphique permettant à l'utilisateur de définir les paramètres d'entrée pour définir la configuration du contrôle ultrasonore à simuler	111
Figure 70 : caractéristiques relatives à la profondeur du défaut et à son tilt (angle, inclinaison) considérées par le <i>Simulateur VRCF</i>	112
Figure 71: répartition de l'énergie suivant la surface du transducteur en émission/réception selon le modèle : (a) Piston, (b) Hanning, (c) gaussienne.....	112
Figure 72: du type de simulation de contrôle ultrasonore à réaliser à l'aide du <i>Simulateur VRCF</i>	113
Figure 73 : différents types de bonds des rayons ultrasonores réfractés dans la pièce à inspecter. Le demi-bond permet la détection des défauts internes ou proches de la paroi interne. Le bond complet permet la détection des défauts externes ou proches de la paroi externe.....	113
Figure 74 : géométries du contrôle transversal du tube en demi-bond pour la détection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif vis-à-vis du faisceau acoustique (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite).....	114
Figure 75 : Approche zonale pour un défaut plan débouchant sur la surface interne de la plaque. La figure du dessus correspond à l'approche zonale pour un défaut de tilt positif	

(50°). La figure du dessous correspond à l'approche zonale pour un défaut de tilt négatif (-50°). Le balayage du transducteur est défini selon la longueur de la plaque	115
Figure 76 : interaction des rayons ultrasonores avec le défaut interne plan de tilt 50° et de profondeur 10mm débouchant sur la surface interne d'une plaque de dimension 275x175x30xmm. Génération de rayons réfléchis et diffractés au voisinage de l'extrémité non débouchante de ce dernier. Répartition des rayons diffractés en deux cônes de diffraction.....	117
Figure 77 : schéma correspondant au trajet géométrique ultrasonore C1S1DS2C2	119
Figure 78 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) sur un demi-plan	122
Figure 79: Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) sur un demi-plan	123
Figure 80 : Synoptique de la démarche d'extension du modèle mono fréquentiel au modèle large bande	125
Figure 81 : courbes écho-dynamique expérimentales des réponses acoustiques des entailles artificielles (1), (5) et (9). Extraction des courbes à l'aide de routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux.....	127
Figure 82 : écho de coin engendrant le maximum d'amplitude suite à l'interaction du rayon ultrasonore central (axe focale) rencontre l'intersection entre le défaut et le fond de la plaque	127
Figure 83: Ascan expérimental correspondant à l'amplitude maximale de la réponse acoustique d'un défaut plan droit d'extension 1mm débouchant sur la surface interne d'une plaque, la position de balayage ainsi que le temps de vol correspondants. Extraction à l'aide de routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux.	128
Figure 84: Bscan simulé à l'aide du <i>Simulateur VRCF</i> de la réponse ultrasonore d'un défaut plan droit d'extension 1mm débouchant sur la surface interne d'une plaque à l'aide de l'approche <i>SSD</i>	128
Figure 85 : l'interface utilisateur de la routine développée pour le dépouillement et comparaison des acquisitions ultrasonores simulées à l'aide de CIVA et Simulateur VRCF toute approche (<i>SSD, GTD, KA, KAR, SE et KI</i>).	130
Figure 86 : Cscan expérimental du signal réfléchi par les défauts plans droits ou tiltés usinés sur la surface de plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Multi2000 (M2M).....	131
Figure 87 : Interface utilisateur de la routine développée pour le dépouillement des acquisitions ultrasonores.....	131
Figure 88 : plan de contrôle transversal du tube	135
Figure 89 : Vue générale de la plaque	136
Figure 90 : Vues transversales des entailles artificielles	136
Figure 91 : relevé des côtes de l'entaille n°1 (0°x0.5mm) et photos sa réplique figurant dans le rapport de contrôle des entailles artificielles sur la plaque	137
Figure 92 : différentes formes d'entailles considérées pour l'étude de l'influence sur la réponse US : a)entaille carrée b) entaille carrée avec coin arrondie c) entaille arrondie.	138

Figure 93 : (a) Cuve d'inspection en immersion avec bras motorisé 3 axes. (b) Electronique M2M Multix 64voies.....	138
Figure 94 : définition des portes pour la détection des défauts internes et externes	139
Figure 95 : inspection de la plaque en immersion en cuve au VRCF	140
Figure 96 : réglage de l'inclinaison mécanique du transducteur à l'aide d'une cale à 17°. Vue du dessus (à gauche). Vue de côté (à droite)	141
Figure 97 : définition des portes correspondant à l'écho d'interface et à la porte interne permettant la détection des défauts internes.....	142
Figure 98 : configuration de contrôle d'une plaque en acier immergée dans l'eau. Le transducteur présente une inclinaison θ_i par rapport à la normale à la surface de la plaque et distant de la surface de la plaque de WP	142
Figure 99 : schéma et exemple d'un montage expérimental pour la détermination des caractéristiques du faisceau ultrasonore d'un transducteur en immersion à l'aide d'une cible et exemples de cibles utilisées. La détermination de la cible à utiliser obéit aux critères imposés par [75].....	145
Figure 100 : réponse impulsionnelle et fréquentielle du transducteur multiéléments (32elts) linéaire plan IMASONIC de fréquence nominale 5MHz	145
Figure 101 : cartographie du faisceau ultrasonore expérimental dans le plan d'incidence incliné de 17° (Transducteur IMASONIC multielements-32elts - de fréquence nominale 5MHz). (b) Amplitude du champ ultrasonore réfléchi par la cible à différentes position du plan d'incidence dans l'eau.....	146
Figure 102 : écho-dynamique horizontal de la largeur de la tache focale du faisceau ultrasonore à la distance focale.	147
Figure 103 : convention adoptée par le <i>Simulateur VRCF</i> pour l'orientation du tilt par rapport à un faisceau ultrasonore d'incidence oblique	147
Figure 104 : Vue générale de la plaque et Cscan expérimental du contrôle ultrasonore de la plaque suivant le sens1 du contrôle.....	150
Figure 105 : image Cscan expérimentale des entailles n°1, 2, 3 et 4 (à gauche) (Figure 104). Image Bscan expérimentale de l'entaille n°3 (à droite).	150
Figure 106 : images ultrasonores expérimentales de l'entaille de référence n°2 suivant le sens1 du balayage. (a) Cscan expérimental. (b) Bscan expérimental et pente de la réponse acoustique de l'entaille. (c) Ascan expérimental (amplitude et temps de vol de l'amplitude maximale). (d) largeur de la courbe écho-dynamique de la réponse acoustique de l'entaille à -6dB.....	151
Figure 107 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits (tilt=0°) et de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm ainsi que l'écart observé entre les deux sens de contrôle.	153
Figure 108 : approche zonale pour le calcul de l'interaction entre un rayon ultrasonore et un défaut plan droit (tilt=0°) débouchant sur la surface interne de la plaque. Zone 2 : effet de coin direct. Zone3 : effet de coin direct	154

Figure 109 : coefficient de réflexion en écho de coin suite à l'interaction d'une onde transversale et d'un coin droit (fond de la plaque + défaut droit débouchant)	155
Figure 110 : (a) coefficients de diffraction HF (GTD , KA , KAR), diffraction indirecte d'une onde transversale. (b) coefficients de diffraction hautes fréquences (GTD , KA , KAR), diffraction directe d'une onde transversale.	156
Figure 111 : courbes des rapports $K(TOF_{Amax})$ pour les différentes simulations et pour l'essai expérimental des réponses ultrasonores des défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm.....	157
Figure 112 : écarts de prédiction des temps de vol en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm.....	157
Figure 113 : largeurs des faisceaux ultrasonores transmis dans la plaque à inspecter selon la configuration de contrôle étudiée à l'aide de la simulation. (a) faisceau ultrasonore selon le modèle CIVA. (b) faisceau ultrasonore selon le modèle Simulateur VRCF	158
Figure 114 : écarts de prédiction largeurs des courbes écho-dynamiques à -6dB en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm	159
Figure 115 : (a) courbe-écho-dynamique de l'entaille de référence (relecture MultiX M2M). (b) superposition des courbes écho-dynamiques simulées (CIVA, Simulateur VRCF toutes approches) (Relecture, routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux).	160
Figure 116 : (a) courbe écho-dynamique du faisceau ultrasonore selon CIVA à la surface de la plaque ($z=29$ mm). (b) courbe écho-dynamique du faisceau ultrasonore expérimental à la distance focale ($z=25$ mm).	160
Figure 117 : Bscan simulé de la réponse acoustique de l'entaille de référence [0x0.75]mm à l'aide du Simulateur selon l'approche GTD.	162
Figure 118 : écarts de prédiction pentes des images Bscan en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm.....	163
Figure 119 : Cscans expérimentaux du contrôle ultrasonore en immersion de la plaque suivant les deux sens du balayage selon la configuration de contrôle de validation.	165
Figure 120 : courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB suivant les deux sens de contrôle ultrasonore 5MHz pour l'inspection des défauts plans tiltés de différentes extensions ainsi que l'écart observé entre ces deux sens.	166
Figure 121 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz	167
Figure 122 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz.	167
Figure 123 : trajets géométriques en retro-propagation vers la surface du transducteur suite à l'interaction d'un rayon ultrasonore et d'un défaut de tilt 50° selon le sens de balayage.	170

Figure 124 : géométrie du problème canonique de la diffraction d'une onde plane par un demi-plan	171
Figure 125 : trajets géométriques des rayons ultrasonores au voisinage d'un défaut plan de tilt 30° d'extension 0.75mm selon le sens du contrôle ultrasonore. A gauche : sens1 correspondant au tilt-30°. A droite : sens2 correspondant au tilt30.....	172
Figure 126 : Courbe du rapport $K(TOF)$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz	174
Figure 127 : Courbe du rapport $K(TOF)$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz	175
Figure 128 : Courbe du rapport $KL - 6dB$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz	177
Figure 129 : Courbe du rapport $KL - 6dB$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz	177
Figure 130 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (50°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.	179
Figure 131 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (30°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.	179
Figure 132 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (50°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.	180
Figure 133 : courbes écho-dynamiques expérimentales des défauts tiltés selon le sens1 du balayage. Extraction à l'aide de la retourne de dépouillement « Relecture-Essai »	180
Figure 134 : profil du faisceau ultrasonore réfléchi sur le fond de la plaque selon CIVA, simulation pour une configuration de contrôle en demi-bond et direction des ondes transversales réfractées dans la plaque à inspecter	181
Figure 135 : déviation de l'effet de coin en fonction du tilt du défaut	182
Figure 136 : pentes des images Bscan simulées selon CIVA (a) et le Simulateur VRCF selon les approches SE (b) et KI (c) pour le défaut 30°x0.75 suivant le sens1 du contrôle (tilt négatif)	183
Figure 137 : Courbe du rapport $K(Pente)$ des résultats simulés selon les différents modèles (CIVA, KI et SE) et l'essai expérimental suivant les deux sens du contrôle ultrasonore 5MHz	184
Figure 138 : courbe des rapports $G(Amax)$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 5MHz. ...	193
Figure 139 : courbe des rapports $G(Amax)$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 15MHz. .	194

Figure 140 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) par un demi-plan	194
Figure 141 : courbe des rapports $K(L - 6dB)$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 5MHz. ...	195
Figure 142 : courbe des rapports $K(L - 6dB)$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 15MHz. .	195
Figure 143 : zones d'interaction considérées par l'approche zonale du Simulateur VRCF entre le rayon transversal sous incidence oblique et le défaut débouchant	196
Figure 144 : les différentes zones géométriques pour un rayon d'onde ultrasonore sous incidence oblique en fonction de la zone d'interaction considérée	197
Figure 145 : Captures d'écran d'une simulation MEF (Athena2D)de la configuration suivante : interaction entre un champ ultrasonore sous incidence oblique 45° de fréquence 5MHz avec un défaut plan dont la hauteur est de 5mm ($kT * a = 25$). Les différentes captures d'écran considèrent différentes échelles [58].....	197
Figure 146 : contrôle des défauts internes et externes et portes de détection relatives à chacun de ces défauts.	200
Figure 147 : Antisymétrie entre le défaut interne et externe	201
Figure 148 : prolongement de l'approche zonale au cas du défaut plan débouchant sur la surface externe. (a) défaut plan externe de tilt positif. (b) défaut plan externe de tilt négatif	201
Figure 149 : plan de contrôle longitudinal du tube: coupe transversale. [15]	202
Figure 150 : architecture du simulateur VRCF pour la prise en compte de la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube.....	203
Figure 151 : initialisation des paramètres du contrôle ultrasonore pour la configuration longitudinale	204
Figure 152 : interface de la routine de dépouillement et comparaison des acquisitions ultrasonores simulées à l'aide de CIVA et Simulateur VRCF toute approche. Exemple étudié : défaut $-30^\circ \times 1\text{mm}$ selon l'approche KA, fréquence d'inspection 5MHz, pas de balayage 1mm	204
Figure 153 : les différents trajets ultrasonores considérés pour l'estimation du tilt et de l'extension du défaut.....	205
Figure 154 : extensions réelles et estimées depuis les résultats expérimentaux. Estimation basée sur les temps relatifs d'arrivée des rayons ultrasonores	206
Figure 155 : tilts réels et estimés depuis les résultats expérimentaux. Estimation basée sur les temps relatifs d'arrivée des rayons ultrasonores.	207

Liste des Tableaux

Tableau 1 : récapitulatif des différentes considérations prise en compte par le simulateur de propagation développé « <i>Simulateur VRCF</i> » et <i>CIVA</i> pour la modélisation de la propagation ultrasonore dans le cadre d'un contrôle non destructif ultrasonore	106
Tableau 2 : récapitulatif des différents parcours géométriques du rayon ultrasonore pris en compte par le <i>Simulateur VRCF</i>	116
Tableau 3 : caractéristiques de la plaque inspectée	136
Tableau 4 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque	137
Tableau 5 : Caractéristiques des contrôles ultrasonores à l'aide du transducteur 5MHz pour l'inspection de la plaque	140
Tableau 6 : influence des paramètres d'entrée (angle d'incidence- θ_i , hauteur du couplant- WP) sur les temps de vol d'un demi-bond pour des vitesses de propagation : $v_L = 1483m.s - 1$ dans l'eau et $v_t = 3230m.s - 1$	143
Tableau 7 : amplitudes maximales relevées suite à 10 contrôles successifs des entailles n° 2 et 4 à l'aide du dispositif expérimental de validation suivant un sens du contrôle.	143
Tableau 8 : récapitulatif des entailles artificielles usinées dans la plaque pour le besoin de validation du simulateur de propagation VRCF suivant le sens de balayage pour le contrôle ultrasonore expérimental	147
Tableau 9 : comparatif des paramètres utilisés pour la simulation et pour le contrôle expérimental	148
Tableau 10 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque	149
Tableau 11 : Rapports des extensions des défauts ciblés par rapport à l'épaisseur de la pièce inspectée en % et par rapport à la longueur d'onde transversale à 5MHz.....	149
Tableau 12 : Données images expérimentales de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz selon les deux sens de balayage.....	152
Tableau 13 : Données images relatives G(Amax) [dB] Essai et simulations (CIVA et simulateur VRCF) pour les réponses en Amplitude de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz	153
Tableau 14 : Ecart en [dB] observé entre l'essai expérimental et les simulations (CIVA et simulateur VRCF toute approche) pour les réponses en Amplitude de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz.....	154
Tableau 15 : rapports $K(L - 6dB)$ pour les différentes simulations et pour l'essai expérimental des réponses ultrasonores des défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm.....	159
Tableau 16 : temps de calcul selon l'extension du défaut droit pour les différentes approches considérées par le Simulateur VRCF.....	164
Tableau 17 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque	164
Tableau 18 : tilt de l'entaille selon le sens du balayage considéré	165

Tableau 19 : trajets géométriques suite à l'interaction entre un rayon ultrasonore et un défaut plan tilté selon le sens de balayage considéré	168
Tableau 20 : Amplitudes maximales en %FSH des réponses acoustiques des défauts tiltés selon le sens de balayage ainsi que l'écart en dB entre les amplitudes en considérant uniquement le mode transversal et en considérant le mode transversale et les conversions de mode. Résultats simulés à l'aide de CIVA.	169
Tableau 21 : validation du critère d'acceptation sur l'écart en dB des amplitudes normalisées obtenus à l'aide des différents modèles de simulation par rapport à l'essai expérimental ..	173
Tableau 22 : Ecart en % des TOFs normalisés obtenus à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz	176
Tableau 23 : Ecart en % des L-6dB normalisées obtenues à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz	178
Tableau 24 : Ecart en % des Pentés normalisées obtenues à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz	185
Tableau 25 : temps de calcul selon l'extension du défaut tilté et suivant le sens de balayage considéré pour les différentes approches considérées par le simulateur VRCF	185

Introduction générale

Ces travaux de thèse ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE entre le **Vallourec Research Center France-VRCF** et l'Institut d'Electronique, de **Microélectronique** et de **Nanotechnologie-IEMN** de Valenciennes.

Vallourec est producteur mondial des solutions tubulaires premium destinées principalement aux marchés de l'énergie ainsi qu'à d'autres applications industrielles. Ces solutions sont utilisées dans des conditions toujours plus difficiles (pression, température, milieu corrosif) et doivent répondre à des cahiers des charges de plus en plus contraignants (normes, spécifications...). Pour garantir le respect de ces spécifications, une multitude de contrôles destructifs (bancs d'épreuves) et non destructifs est mise en œuvre.

Nous allons dans ce mémoire nous intéresser plus particulièrement au contrôle non destructif par ultrasons et à l'interprétation de ses résultats. Ce contrôle permet la classification des tubes contrôlés bons ou défectueux suite à une calibration (seuillage). Cette dernière permet de distinguer les tubes conformes ou acceptables (sans défauts) des tubes défectueux. Les exigences accrues dans la qualité des contrôles ainsi que l'évolution des performances des moyens de contrôle font tendre le besoin vers une caractérisation des défauts détectés. L'objectif principal de ces travaux est de modéliser les phénomènes physiques à l'origine de la formation des échos ultrasonores des défauts d'orientation longitudinale ou transversale proches de la paroi interne de tubes en acier sans soudure de dimensions variables. Le but étant d'affiner l'interprétation des signaux expérimentaux pour extraire les caractéristiques des défauts détectés compte tenu des configurations de contrôle déployées dans les usines **Vallourec**. Plus précisément, ces travaux portent sur le développement d'un simulateur bidimensionnel de propagation ultrasonore permettant d'obtenir des images ultrasonores simulées compatibles avec celles obtenues expérimentalement. Le but *in fine* sera de comparer les images simulées et expérimentales afin d'extraire les paramètres aidant à la caractérisation tridimensionnelle du type et de la taille des défauts détectés sur les tubes (profondeur, longueur, tilt et position sur le tube) lors de leur contrôle sur banc automatique. Cette caractérisation permettra d'évaluer la criticité des indications détectées, de statuer sur la pertinence d'une réparation des tubes en ligne et à terme atteindre le point d'équilibre entre contrôle et productivité.

Ce manuscrit est organisé comme suit. Le premier chapitre présente le contexte de notre problématique. Nous passerons en revue les différents processus de fabrication des tubes sans soudure et leurs incidences sur la formation d'éventuels défauts. Ensuite, nous aborderons les méthodes de contrôle non destructif dans le domaine industriel tubulaire et plus particulièrement le contrôle non destructif par ultrasons. Enfin, nous étudierons les méthodes de caractérisation des défauts en contrôle non destructif par ultrasons en s'appuyant sur les travaux précédemment menés au centre de recherche Vallourec-**VRCF** pour proposer une approche susceptible de répondre à notre problématique.

Le second chapitre s'intéresse aux méthodes de modélisation de l'interaction entre un faisceau ultrasonore et une interface ou un défaut débouchant sur la paroi interne. Nous étudierons à la fois la modélisation du faisceau ultrasonore réfracté dans la pièce à contrôler et l'interaction de ce faisceau avec un obstacle plan rigide avec prise en compte notamment des phénomènes de réflexion et de diffraction. Nous détaillerons notre démarche décomposant le modèle en sous modèles étudiés selon des méthodes analytiques et d'approximations *Hautes Fréquences* pour une modélisation simple mais complète des configurations de contrôle ultrasonore déployées en usines et au **VRCF**.

Le troisième chapitre est consacré à la description de l'implémentation logicielle de l'inspection du tube selon la configuration transversale du contrôle en vue de détecter les défauts dits transversaux. Pour cette configuration, le plan de contrôle inclut la génératrice du tube, ainsi la géométrie du tube peut être réduite à celle d'une plaque. De plus, nous étendrons la démarche de modélisation développée dans le second chapitre à l'ensemble des fréquences du spectre fréquentiel du transducteur afin d'obtenir des images ultrasonores comparables à l'expérience. Puis, nous présenterons les principales différences entre les deux modèles de simulation utilisés dans le cadre de ces travaux. Il s'agit du **Simulateur VRCF** développé pour ces travaux ainsi que la plate-forme d'expertise **CIVA** considérée comme une référence en simulation des configurations de contrôles non-destructifs. Enfin, nous dresserons la liste des paramètres définis pour la comparaison des images simulées et celles expérimentales pour la validation des approches développées dans le cadre de ces travaux.

Le quatrième chapitre présente une étude comparative entre les résultats simulés et ceux issus de l'expérience pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube. Cette étude comparative nous permettra d'évaluer la fiabilité de notre approche géométrique de modélisation de la propagation ultrasonore ainsi que les différentes approches étudiées pour la modélisation de l'interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut plan débouchant sur la paroi interne droit ou incliné (tilté). L'étude comparative s'intéresse aux différents paramètres définis pour le processus de caractérisation des défauts. Ces différents paramètres sont extraits des images ultrasonores simulées et expérimentales à l'aide de routines de dépouillement développées dans le cadre de ces travaux. Nous aborderons également l'influence des inclinaisons (tilts) et extensions (profondeurs) des défauts étudiés sur les réponses acoustiques simulées.

Enfin le cinquième chapitre est consacré à une discussion autour des perspectives d'amélioration pour pallier les limitations identifiées du **Simulateur VRCF** ainsi que son prolongement en vue de considérer un contrôle ultrasonore complet du tube. Un contrôle complet du tube implique deux configurations de contrôle : la configuration transversale, dont les travaux présentés dans ce document y sont consacrés et la configuration longitudinale pour détecter les défauts longitudinaux et pour laquelle le plan de contrôle est perpendiculaire à l'axe du tube. Nous présenterons également une extension afin de tenir

compte des défauts débouchant sur la paroi externe du tube. Enfin, nous discuterons une méthode développée en vue d'estimer le tilt et les extensions des défauts détectés à partir des temps de vol d'arrivée des trajets ultrasonores impliqués.

Chapitre 1 Caractérisation des défauts en contrôle non destructif par ultrasons sur tubes en acier sans soudure

I.Introduction

La caractérisation des défauts détectés suite à un contrôle non destructif ultrasonore requiert l'interprétation des signaux acoustiques générés par ces défauts. En effet, ces signaux acoustiques contiennent des informations sur des paramètres permettant l'identification des défauts. Il s'agit d'un processus inverse où accéder aux paramètres d'intérêt (en l'occurrence, les caractéristiques du défaut) implique l'observation et l'interprétation des signaux acquis. Une bonne interprétation de ces signaux requiert non seulement de l'expertise mais aussi une bonne compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors d'une inspection ultrasonore. La simulation s'avère un outil puissant pour l'industrie pour l'analyse des données d'acquisition, la modélisation des configurations d'inspection, la détermination des géométries des transducteurs ...etc. Par conséquent, la modélisation de la configuration de contrôle souhaitée, permet une aide à l'évaluation des grandeurs d'intérêt ciblées. Différentes études menées auparavant au **VRCF** ont montré l'intérêt d'un processus d'inversion basé sur un simulateur de propagation ultrasonore pour accéder aux caractéristiques du défaut détecté suite à un contrôle non-destructif ultrasonore.

L'objectif de ces travaux de thèse est de développer un modèle de simulation large-bande (spectre fréquentiel du transducteur de contrôle) des différents phénomènes de propagation dans le tube (comprenant les phénomènes de diffraction) ainsi que leurs interactions avec des défauts débouchants ou proches de la paroi interne. Toutefois, Le mode de construction du simulateur doit prendre au mieux en compte la forme et les limitations des données (stratégie d'acquisition des données ultrasonores) tout en restant applicable aux différentes configurations de contrôle déployées dans les usines **Vallourec** (temps d'inversion limité).

Dans ce chapitre, nous nous intéressons brièvement aux différentes étapes de fabrication des tubes sans soudure à **Vallourec** et leurs susceptibles implications dans la formation d'imperfections ciblées par ces travaux. Nous exposerons les différents procédés de contrôle non destructifs déployés dans les usines **Vallourec** et plus particulièrement le contrôle non destructif par ultrasons appliqué aux tubes. Puis, nous aborderons les différentes méthodes de caractérisation des défauts à partir des données ultrasonores de contrôle en s'appuyant sur les travaux précédemment menés au **VRCF** pour proposer une solution permettant de répondre à notre besoin en simulation de la propagation acoustique dans le cadre d'une inspection ultrasonore sur tube [1] [2].

II.Fabrication des tubes sans soudure chez Vallourec

La fabrication d'un tube sans soudure peut se décliner selon différents processus et comporte différentes étapes majeures depuis l'élaboration de la matière jusqu'à l'étape de finition. Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéressons à un processus particulier déployés dans certaines usines de production de **Vallourec**. Il compte 5 étapes majeures [3] [4]: élaboration de la matière, chauffage, perçage, laminage et calibrage. Au cours de ces différentes étapes, le produit subit des transformations chimiques, thermiques et mécaniques qui vont influencer son homogénéité au stade de produit final.

La première étape du processus est l'élaboration de la matière première ferrière en coulée de métal liquide et sa transformation en produits pleins. Cette transformation intervient à l'étape de coulée de l'acier dans une lingotière et selon la forme du produit à fabriquer (brame pour les produits plats et billette ou barre pour les produits longs). On distingue deux procédés de coulée de l'acier: la coulée en lingots et la coulée continue. Cette dernière est largement répandue dans les aciéries **Vallourec** ou dans les aciéries partenaires. A l'issue de cette étape, les produits pleins obtenus consistent en des ébauches de produits longs (barres ou billettes cylindriques) qui nécessitent une mise en forme en tube. Cette mise en forme du tube consiste à passer d'une ébauche pleine à une ébauche creuse. C'est ainsi qu'interviennent les étapes de chauffage, perçage, laminage et calibrage. Une succession d'étapes où le passage des dimensions entrée/sortie (ébauche pleine/tube semi fini ou fini) est le résultat d'un compromis entre la capacité d'écoulement du matériau, la productivité, la précision géométrique, la qualité de surface et plus particulièrement les propriétés recherchées pour le tube [5]. Au stade du chauffage, la billette cylindrique est placée dans un four à sole tournante où elle est chauffée jusqu'à 1200 à 1300 °C selon le matériau. La billette chauffée est ensuite dirigée vers un mandrin de perçage. Elle est entraînée par des cylindres coniques dont le mouvement crée un écoulement de la billette à haute température au contact du mandrin. Il s'agit du procédé de **Mannesmann** inventé en 1886 par les frères **Mannesmann** [4]. Puis la billette après perçage, passe par l'étape de laminage. Différents procédés de laminage existent dans les usines **Vallourec**. Ils se distinguent par le procédé d'étirage utilisé. La majorité des laminoirs de **Vallourec** sont des Stiefels ou des laminoirs continus. Nous pouvons distinguer les deux procédés comme suit :

- **Laminage dans un laminoir Stiefel** (Figure 1): dans un laminoir Stiefel (également appelé « plug »), l'ébauche est insérée dans une cage de laminage à l'aide d'un poussoir, puis laminée par les cylindres. Les diamètres internes et externes sont ajustés ainsi que l'épaisseur des parois. Le tube est ainsi allongé.
- **Laminage dans un laminoir à mandrin** (Figure 2Erreur! Source du renvoi introuvable.): selon ce procédé l'allongement du tube est effectué à l'aide de plusieurs cages de laminage

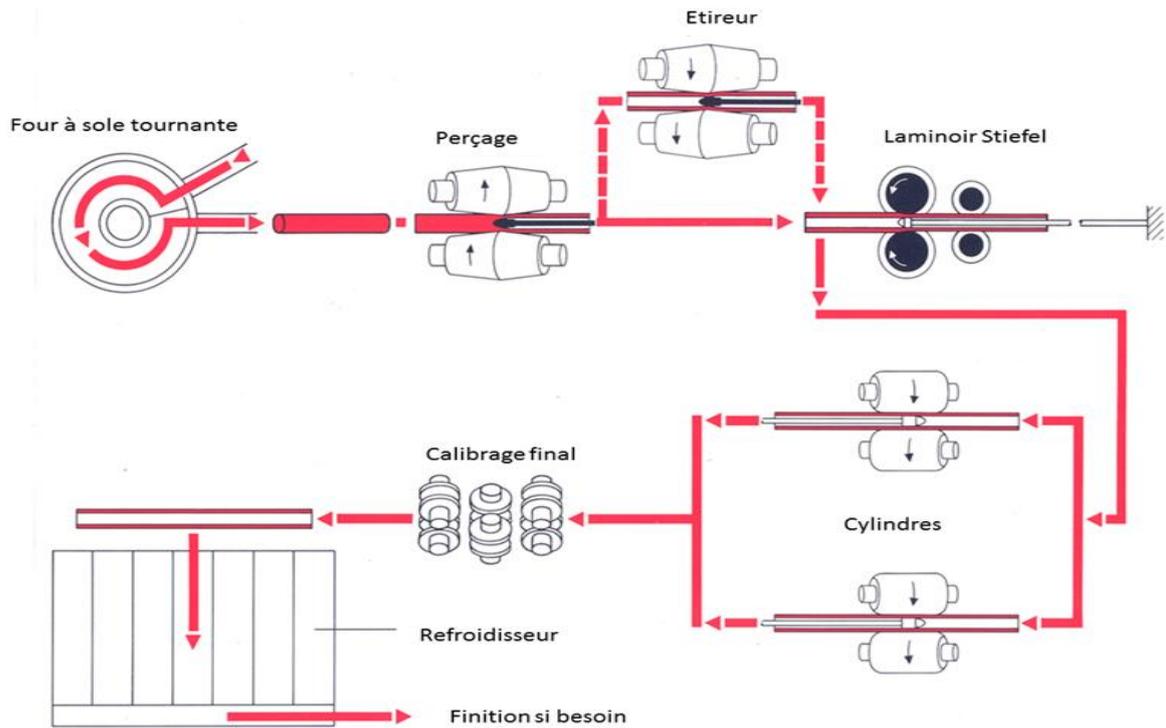


Figure 1 : étapes de fabrications des tubes à partir d'une bielle pleine dans un laminoir Stiefel

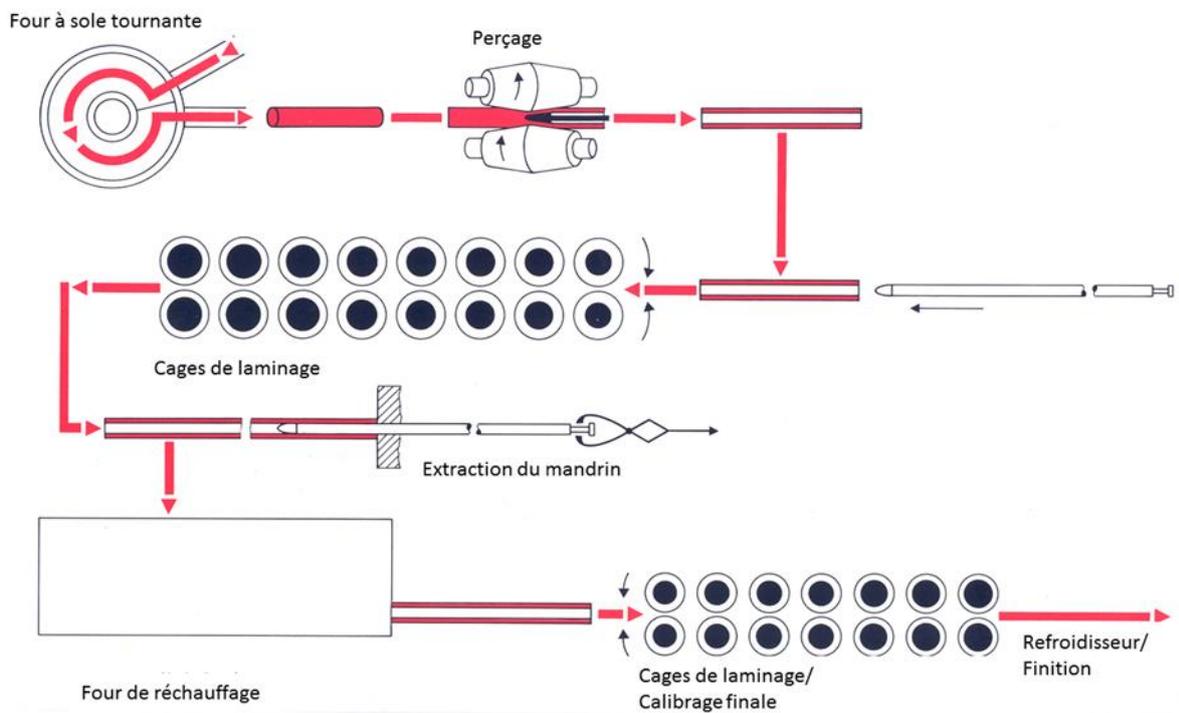


Figure 2 : étapes de fabrications des tubes à partir d'une bielle pleine dans un laminoir à mandrin

Enfin, une dernière étape de laminage et/ou calibrage est requise afin d'obtenir l'épaisseur de la paroi et le diamètre finaux. Après les différentes étapes de changement de section à chaud, le tube n'est souvent qu'un demi-produit. Pour le transformer en produit, il doit subir des traitements thermiques et des procédés à froid (étirage, cintrage, dressage... etc.) pour

obtenir une géométrie précise, des caractéristiques mécaniques élevées et un bon état de surface.

III. Les défauts ciblés et leurs origines

À travers les différentes étapes évoquées dans le précédent paragraphe, l'ébauche a subi des transformations et des sollicitations qui peuvent occasionner un changement brusque de sa structure et donc conduire à sa non-conformité. Nous entendons par changement brusque de structure, la présence d'un défaut. Les défauts recherchés peuvent être débouchants ou proches de la paroi interne ou externe du tube. Ceux débouchants sur la paroi présentent des orientations préférentielles illustrées dans la Figure 3, qui peuvent être :

- a. *Longitudinales* : parallèles à l'axe du tube
- b. *Transversales* : perpendiculaires à l'axe du tube
- c. *Obliques* : inclinées par rapport à l'axe du tube

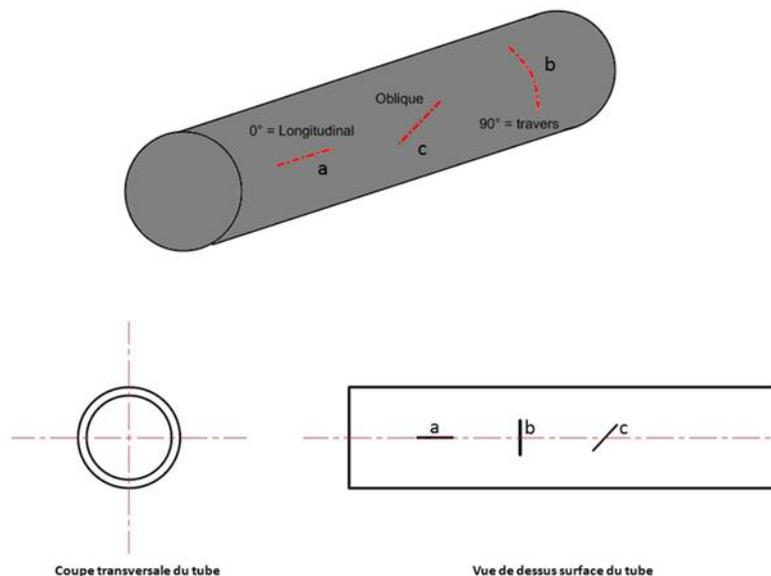


Figure 3 : types de défauts sur tube en acier sans soudure

La présence de ces défauts pousse les différents pôles de compétences du **VRCF** en collaboration avec les centres de production **Vallourec** à mener des expertises non seulement dans le but d'identifier l'origine de ces défauts, mais de proposer des solutions d'amélioration continue en vue d'aboutir à la maîtrise des différents procédés de fabrication s'assurant ainsi de la qualité optimale des produits. Ces expertises incluent les méthodes de **Contrôles Non Destructifs (CND)** ainsi que l'analyse des aspects métallurgique, chimique, thermique et mécanique afin d'identifier l'élément ou l'ensemble des éléments à l'origine de ces défauts et par conséquent l'élément ou l'ensemble des éléments défectueux dans le cycle de fabrication.

Les différentes expertises menées au **Vallourec Research Center France (VRCF)** dans le cadre des analyses de défaillance, nous indiquent que les défauts longitudinaux, voire obliques sont fréquemment dus au processus de formage du tube tandis que les défauts transversaux sont généralement provoqués par des chocs mécaniques ou par l'accumulation de contraintes résiduelles lors des procédés de finition.

Pour se prémunir de la présence de ces défauts sur les produits finis, des normes et des spécifications clients déterminent des seuils à partir desquels ces imperfections sont préjudiciables à l'usage final des produits, nous parlons alors de défauts. En effet, pour les méthodes de **CND** dont la sanction est basée sur un seuillage, le terme défaut désigne donc toute imperfection dont l'indication résultant de son excitation dépasse les seuils d'acceptation. L'enjeu de ces méthodes **CND** est de classer les produits selon des seuils fixés à partir de signaux provenant d'entailles de référence [6].

Dans un premier temps, ces travaux s'intéresseront aux défauts de type transversal, puis nous proposerons par la suite une extension aux défauts de type longitudinal. Dans la suite, nous nous intéressons aux principales techniques **CND** industrielles permettant de détecter les défauts proches de la paroi interne ou externe du tube et plus particulièrement le **CND** par ultrasons.

IV. Contrôles Non Destructifs sur tubes sans soudure

Le **Contrôle Non Destructif** est un ensemble de procédés permettant de fournir des informations sur la conformité de la pièce contrôlée sans altérer sensiblement son aspect ni modifier les caractéristiques requises pour son usage ultérieur. En ce sens, le **Contrôle Non Destructif** apparaît comme un élément incontournable du contrôle de la qualité des tubes pétroliers [7].

L'évolution des moyens de contrôle pousse les industriels et les chercheurs à mettre au point différentes méthodes afin de répondre aux contraintes dues à la nature du défaut ciblé, de la pièce à contrôler ainsi que de la nature du contrôle (contrôle en cours de fabrication, contrôle avant expédition au client, contrôle en service). Par ailleurs, le **Contrôle Non Destructif** à l'échelle industrielle est soumis à d'autres impératifs tels que le rendement, la reproductibilité et la fiabilité de ses résultats afin que le nombre des produits injustement sanctionnés soit faible [8].

Les différentes méthodes de **CND** classiquement utilisées pour l'inspection des tubes se basent sur le même principe; qui est d'exciter le défaut et de recueillir sa réponse. Elles se distinguent principalement par la source d'excitation utilisée et le phénomène physique exploité [9]. Nous pouvons les classer selon deux catégories comme celles permettant la détection des défauts surfaciques et celles permettant la détection des défauts volumiques. Nous détaillerons les différentes méthodes déployées dans les entités **Vallourec** dans la section suivante.

1. Les méthodes CND pour les défauts surfaciques

i. Ressuage

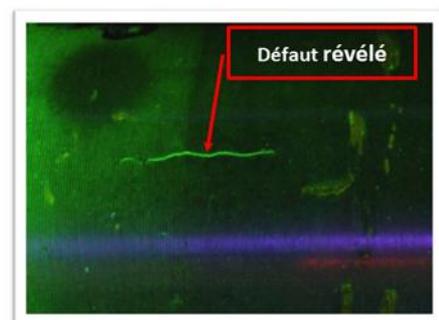
Contrôle de surface adapté à la détection de discontinuités ouvertes débouchantes sur la surface contrôlée. Le principe de révélation des défauts par ressuage consiste en l'application et l'imprégnation d'un fluide pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler. L'application par la suite d'un révélateur conduit à une variation de couleur ou de luminance au niveau des discontinuités imprégnées de pénétrant. Toutefois, cette méthode présente des limitations. Les défauts obturés peuvent ne pas ou partiellement être détectés. Elle suppose un état de surface parfait et n'est pas adaptée à des surfaces peintes ou revêtues. En résumé, il s'agit d'une méthode basée sur un examen visuel pour détecter des défauts surfaciques sans indication quantitative sur les caractéristiques des défauts observés (largeur, profondeur...etc.).

ii. Magnétoscopie

Contrôle de surface supposant que la pièce à contrôler est ferromagnétique. En effet, la magnétisation de la pièce à contrôler et l'application d'un révélateur permet de détecter les défauts superficiels favorablement orientés par rapport au champ appliqué. Les particules contenues dans le révélateur sont attirées par les défauts qui constituent des pôles locaux après magnétisation de la pièce comme le montre la (Figure 4, b). Pour détecter tous les défauts quel que soit leur orientation, il est nécessaire d'appliquer un champ magnétisant en changeant son orientation. Il s'agit également d'une méthode basée sur un examen visuel pour détecter des défauts surfaciques sans indication quantitative sur les caractéristiques des défauts observés (largeur, profondeur...etc.).



(a)



(b)

Figure 4 : a) banc de Magnétoscopie au VRCF. (b) défaut surfacique révélé par magnétoscopie

La magnétoscopie et le ressuage font appel à des produits pouvant contenir des composants actifs nocifs, des études sont menées afin de remplacer ces deux procédés par d'autres plus

soucieux de l'environnement. Outre l'aspect environnemental, ces procédés présentent un inconvénient commun qui est leur manque de sélectivité quant à la profondeur des défauts détectés.

2. Les méthodes CND pour les défauts volumiques

Le point commun à ces méthodes est la comparaison des signaux de défauts artificiels présents dans un tube de référence, présentant les mêmes nuance et dimensions que les tubes à contrôler. Si elles sont trop différentes, les performances du contrôle peuvent être altérées. Trois méthodes sont grandement employées en industries et sont : les Courants de Foucault, les Flux de Fuite Magnétique et les Ultrasons. Parmi ces méthodes, certaines sont adaptées à la détection de défauts superficiels, d'autres englobent la détection des défauts superficiels et dans le volume. Pour le besoin d'inspection des tubes destinés aux marchés du pétrole et du gaz, les méthodes déployées dans les usines **Vallourec** sont essentiellement les flux de fuite magnétiques et les ultrasons. En effet, sur l'ensemble des installations automatiques au sein de **Vallourec**, 25% de ces installations reposent sur les flux de fuite et 60% sur les ultrasons.

i. Flux de fuite magnétique

Procédé permettant de détecter les défauts surfaciques ou volumiques proches de la paroi externe d'une pièce ferromagnétique. Un champ magnétique est créé par 2 masses polaires. Ces masses polaires consistent en deux bobines d'Helmholtz permettant d'avoir un champ magnétique constant et uniforme entre les deux bobines [10]. Le champ autour du tube est mesuré par le biais de sondes (à effet Hall ou inductive) comme illustré (Figure 5, a). En présence d'un défaut, la distribution du flux magnétique varie autour de la zone du défaut comme illustré (Figure 5, b).

L'orientation du flux magnétique doit être perpendiculaire à celle des défauts à détecter (Figure 6, a). Pour cela on distingue deux types de magnétisation :

- **Magnétisation longitudinale** (Figure 6, b): le flux magnétique est généré par deux bobines placées de manière stationnaire dans le sens de la longueur afin de favoriser la détection des défauts transversaux. Les capteurs de champ magnétiques disposés autour de la circonférence de manière stationnaire aussi, absorbent le flux de fuite résultant au niveau du défaut.
- **Magnétisation circulaire** (Figure 6, c): le flux magnétique est créé de manière circulaire pour favoriser la détection des défauts longitudinaux et obliques à l'aide de deux culasses rotatives. Des capteurs de champ magnétique rotatifs recueillent le flux de fuite survenant au niveau du défaut.

La sensibilité aux défauts internes est plus faible qu'aux défauts externes. La détection de défauts internes pour des tubes de plus de 15mm d'épaisseur devient plus difficilement

exploitable car la pénétration du champ magnétique est limitée en flux de fuite à des tubes moins épais [10].

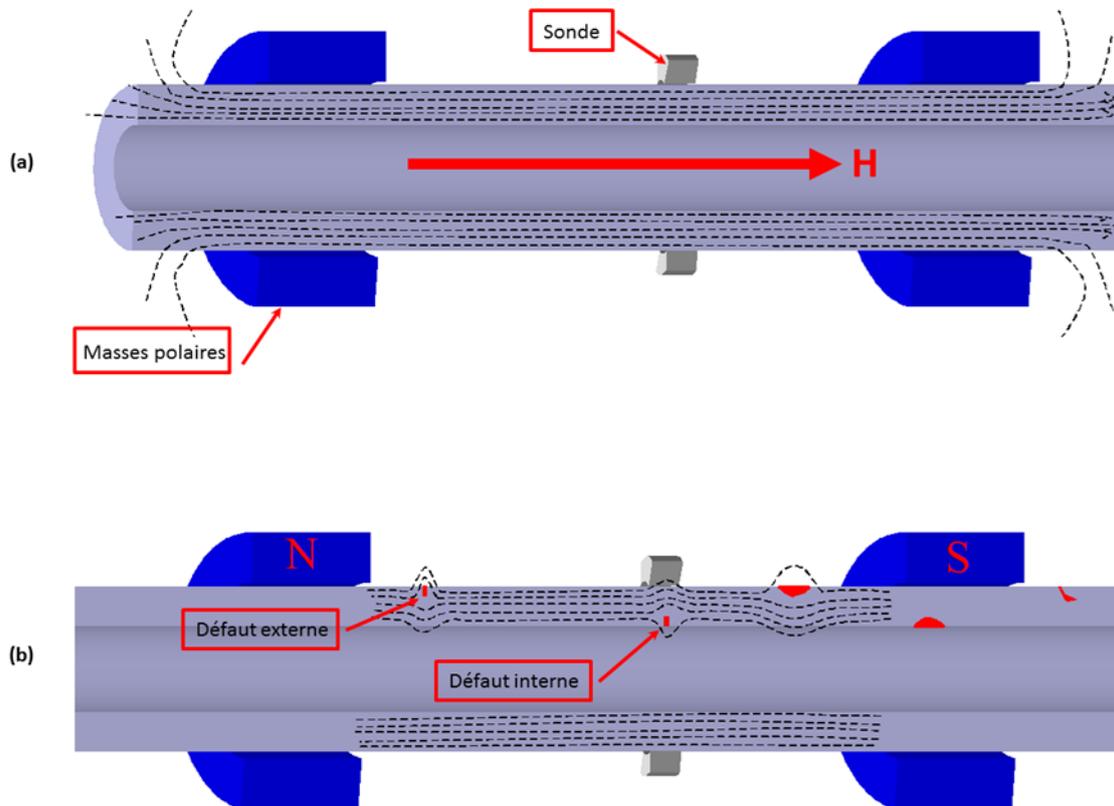


Figure 5 : (a) Création du champ magnétique le long du tube. (b) déviation des lignes de champ suite à la présence de défauts internes et externes. [10]

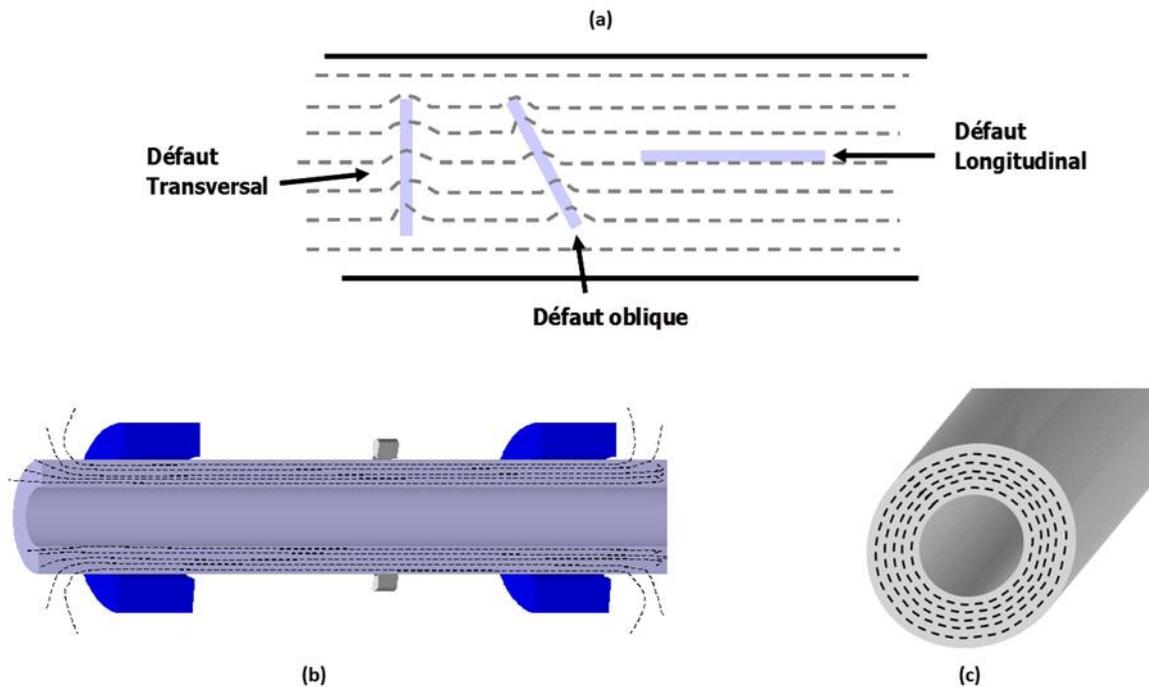


Figure 6 : (a) Orientation des lignes de champ par rapport aux défauts ciblés. (b) Magnétisation longitudinale pour la détection des défauts transversaux. (c) Magnétisation circulaire pour la détection des défauts longitudinaux et obliques. [10]

ii. Ultrasons

Le principe de cette méthode consiste à générer des ondes ultrasonores à l'aide d'un émetteur dans la pièce à inspecter et de les recueillir après leur interaction avec un défaut ou une interface à l'aide d'un récepteur, très souvent fonctionnant également en émetteur. L'utilisation d'un émetteur/récepteur confondus désigne la méthode « **pulse-écho** ». La présence d'un défaut dans la pièce à contrôler modifie la propagation de ces ondes comme illustré dans la Figure 7 .

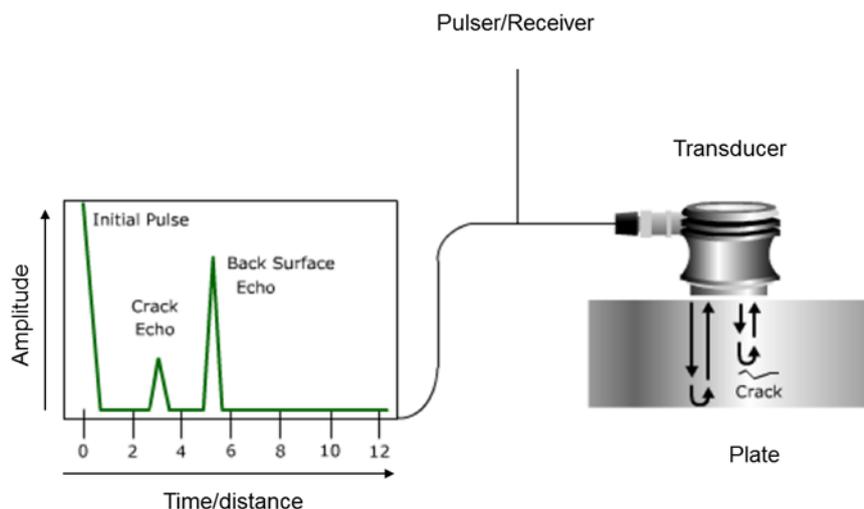


Figure 7 : inspection ultrasonore par contact d'une pièce en présence d'un défaut et signaux recueillis par le transducteur [10]

Il s'agit d'une technique largement employée en industrie pour le besoin de détection des défauts, de mesures dimensionnelles ou de caractérisation de matériaux [11]. Les principaux avantages de cette technique en comparaison avec d'autres techniques de contrôle non destructif sont :

- Méthode sensible aux défauts de surface ainsi qu'aux défauts dans la paroi de la pièce à inspecter. Elle est applicable à tout matériau.
- Méthode permettant de déterminer la localisation et la profondeur des défauts détectés.
- Méthode délivrant des résultats instantanés et très précis particulièrement sur les défauts volumiques et plans débouchants sur la surface.
- Accès à des images ultrasonores détaillées en cas d'automatisation des contrôles.

Toutefois, elle présente des inconvénients qui sont :

- Risque de signaux parasites, de masquage d'un défaut par un autre ou de non détection d'un défaut s'il est orienté parallèlement au faisceau ultrasonore.
- Etalonnage préalable et périodique de l'équipement de mesure ultrasonore ainsi que la nécessité de standards de référence pour l'étalonnage et pour la caractérisation des défauts.
- La nécessité d'un couplant entre le transducteur et la pièce à inspecter afin d'assurer le transfert d'énergie entre le transducteur et la pièce.
- La présence parfois d'une zone morte notamment en contrôle automatisé qui nécessite des méthodes de contrôle non destructif complémentaires ou la coupe de ces zones non vues.

Malgré ses inconvénients, le contrôle ultrasonore reste une méthode de choix car permet à la fois d'effectuer des mesures dimensionnelles, de détecter les défauts superficielles et dans la paroi ainsi que d'obtenir des informations utiles permettant de classer les défauts selon leur criticité et parfois de les caractériser (position, longueur, profondeur et orientation). Pour pallier certains des inconvénients cités précédemment, les transducteurs multiéléments apportent des solutions notamment en termes de recouvrement et de précision. Nous aborderons en détails le **CND** par ultrasons appliqué aux tubes sans soudure dans la section suivante.

V. Le Contrôle Non Destructif ultrasonore sur tubes sans soudure

1. Généralités

Le **Contrôle Non Destructif** par ultrasons est une méthode permettant la détection de défauts présents à la surface ou dans la pièce inspectée ainsi que ses mesures dimensionnelles. Des ondes ultrasonores sont émises, transmises dans la pièce à inspecter et recueillies sous forme d'échos traduisant l'état de santé de celle-ci. Les ultrasons sont des ondes de vibrations mécaniques de fréquences supérieures à la limite audible pour l'Homme [20Hz à 20KHz] [10] comme illustré dans la Figure 8.



Figure 8 : des ondes sonores. [10]

Classiquement, la gamme de fréquence utilisée en **CND** est très étendue [100KHz à 50MHz]. Dans la majorité des cas et plus particulièrement chez **Vallourec**, le **CND** ultrasonore appliqué aux aciers requiert des fréquences de l'ordre du MHz générant ainsi des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre. Le choix de cet ordre de fréquence relève d'un compromis entre la résolution spatiale et le pouvoir de pénétration des ondes ultrasonores. Notre étude porte sur des fréquences variant de 2 à 5MHz. Il s'agit des fréquences déployées sur les bancs de contrôles automatiques dans les usines **Vallourec**.

La production d'ondes ultrasonores se fait en transformant une tension électrique en vibrations mécaniques. Leur réception se fait selon le procédé réciproque, i.e. conversion des vibrations mécaniques émergentes de la pièce inspectée en oscillations électriques comme illustré Figure 9. Les appareils permettant de passer ainsi d'une forme d'énergie à une autre sont appelés **transducteurs**. La méthode la plus répandue pour la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa est la **piézoélectricité** [9].

Le phénomène de piézoélectricité est le plus exploité et il repose sur un principe simple. Selon ce principe, un spécimen piézoélectrique plan génère une tension électrique sous l'effet d'une contrainte mécanique (compression, extension ou cisaillement). Inversement, l'application d'une tension électrique aux bornes de ce même spécimen induit une vibration mécanique : c'est l'effet piézoélectrique inverse. Cette vibration mécanique représentative d'un déplacement de particules, dépend des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du milieu de propagation. Cette dépendance se traduit par le mode de vibration des

particules au cours de la propagation de l'onde. En supposant le milieu fluide ou solide homogène et isotrope, on distingue alors différents types d'onde :

- **Ondes longitudinales (L) ou de compression (P)** (Figure 10): la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Ces ondes se propageant dans un fluide donnent lieu à des ondes de compression (**P**). Dans un solide homogène et isotrope, on parle d'ondes longitudinales (**L**).
- **Ondes transversales ou de cisaillement (T)** (Figure 10): la direction de propagation des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Ce type d'onde se propage dans les solides ainsi que les liquides visqueux.

Ces deux types d'onde communément appelés **ondes de volume** sont les plus utilisées. On constate que la vitesse des ondes **T** est toujours inférieure à la vitesse des ondes **L**. Cette différence permet de distinguer en pratique les deux types d'ondes lors d'un contrôle ultrasonore.

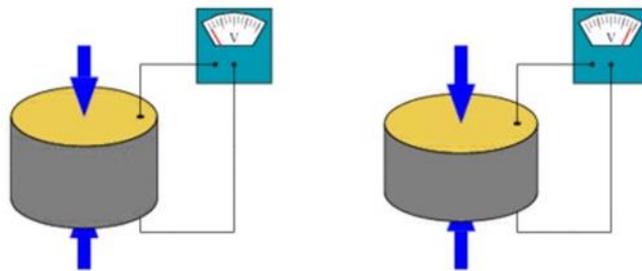


Figure 9 : comportement d'un spécimen piézoélectrique : l'application d'une contrainte mécanique crée un potentiel électrique et vice-versa. Illustration du comportement en vidéo disponible sur [12]

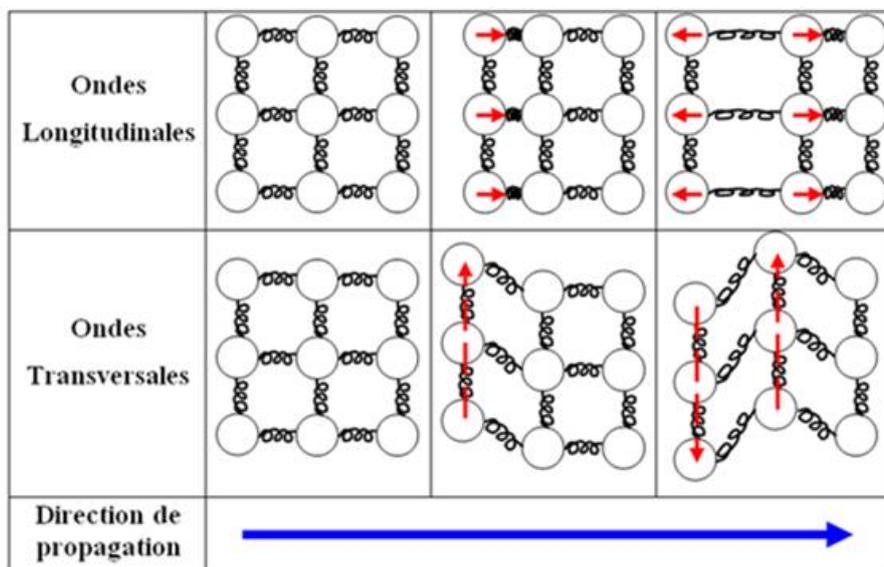


Figure 10 : de propagation des ondes longitudinales et transversales. [10]

Aux fréquences envisagées de 2 à 5 MHz, la transmission des différents modes dans la pièce à inspecter nécessite l'utilisation d'un couplant entre la surface du transducteur et celle de la pièce à inspecter car l'air constitue un milieu non propice à la propagation des ondes ultrasonores. Deux moyens de couplage existent : par immersion ou par contact comme l'illustre la Figure 11

- **Couplage par contact** : le transducteur est en contact avec la surface du tube et séparé de celle-ci par un film de couplant (eau, gel, miel, couplant visqueux) ou par un couplant élastomère (Aqualene) [13].
- **Couplage par immersion** : le transducteur est immergé dans un couplant (généralement l'eau) et séparé du tube selon une distance telle que la forme et l'orientation du faisceau ultrasonore favorisent la détection des défauts recherchés. Pour un souci de cadence, le couplage par immersion est le plus répandu.

Pour sa facilité de mise en place, la méthode pulse-écho est la plus répandue. Les défauts et les interfaces agissent comme une discontinuité d'impédance acoustique. La propagation des ondes ultrasonores couplée à une différence d'impédances acoustiques renvoie vers le transducteur des échos réfléchis d'intensités différentes permettant ainsi la distinction entre les échos issus de l'interaction avec la pièce à contrôler et ceux issus de l'interaction avec un défaut présent dans la pièce.

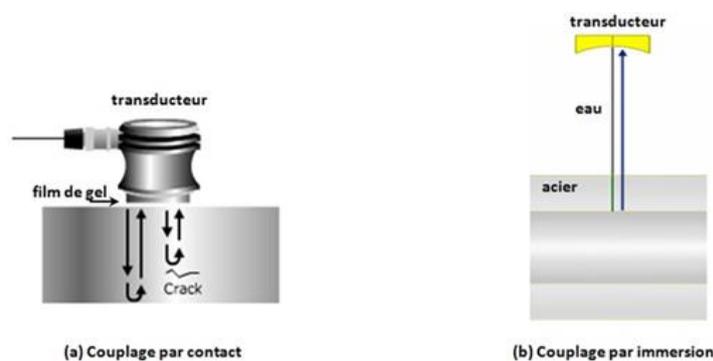


Figure 11 : moyens de couplage pour le contrôle ultrasonore. [10]

2. Les configurations de contrôle ultrasonore par réflexion sur tube sans soudure

Le choix des modes dépend de la nature du contrôle à réaliser, de la géométrie de la pièce à inspecter et de l'orientation des défauts recherchés. Globalement, on distingue deux types de contrôles : contrôle sous incidence normale et contrôle sous incidence oblique.

i. Contrôle sous incidence normale

Ce contrôle est principalement utilisé pour mesurer l'épaisseur de la pièce inspectée. Lorsqu'une onde longitudinale arrive en incidence normale en couplage par immersion sur une interface, seules les modes longitudinaux sont générés dans la pièce. Connaissant la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans l'acier et en distinguant l'écho

correspondant au fond de la pièce, il est possible de déterminer l'épaisseur de la pièce comme le montre la Figure 12. Cette mesure d'épaisseur est systématique car elle permet de détecter des anomalies géométriques telles que l'ovalisation ou l'excentration illustrées Figure 13.

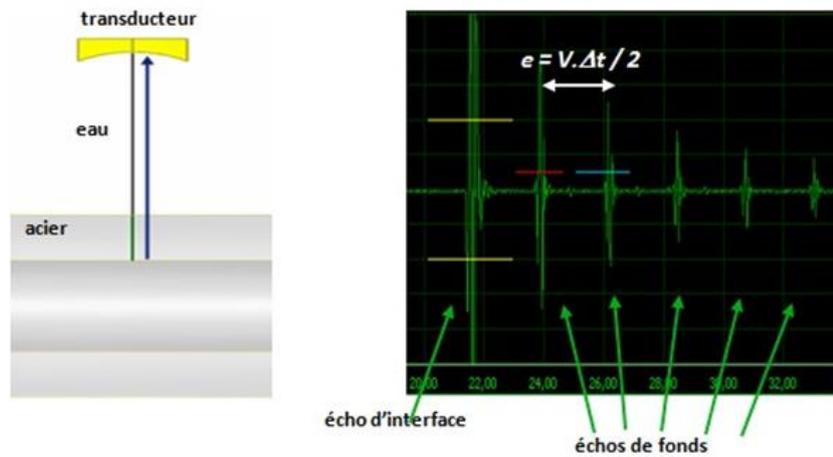


Figure 12 : principe de la mesure d'épaisseur par ultrasons. V (vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans l'acier) et Δt (différence de temps de parcours de l'onde ultrasonore entre deux échos de fond) [10]

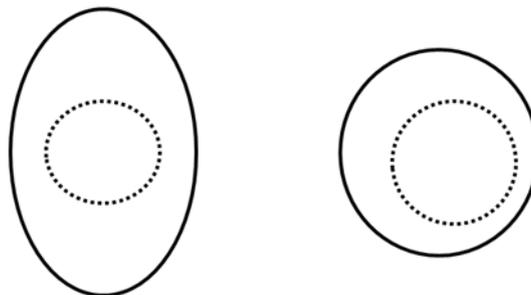


Figure 13 : ovalisation et excentration d'un tube

Le contrôle sous incidence normale permet également la détection des défauts parallèles à l'interface comme illustré dans la Figure 11.

ii. Contrôle sous incidence oblique

L'incidence oblique permet de générer les modes longitudinaux et transversaux dans la pièce comme le montre la Figure 14.

Ces modes en cas d'interaction avec un défaut génèrent de nombreux échos difficiles à interpréter. Pour rendre ces échos facilement exploitables et favoriser le contrôle de la surface interne et externe de la pièce à inspecter, une incidence oblique est définie de manière à ne générer que les ondes transversales dans la pièce [14]. Ce contrôle sur tube se décline sous deux configurations selon que le défaut ciblé soit de type longitudinal ou transversal.

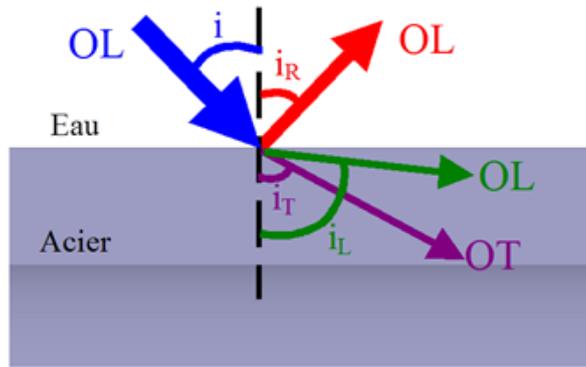


Figure 14 : réflexion et réfraction des ondes ultrasonores OL et OT suite à une incidence oblique. [10]

a. Configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube

Pour la détection des défauts longitudinaux, le contrôle a lieu dans le plan transversal du tube suivant une incidence oblique autour de 17° dans ce plan comme illustré Figure 15. On parle alors de contrôle longitudinal ou de contrôle du tube suivant la configuration longitudinale.

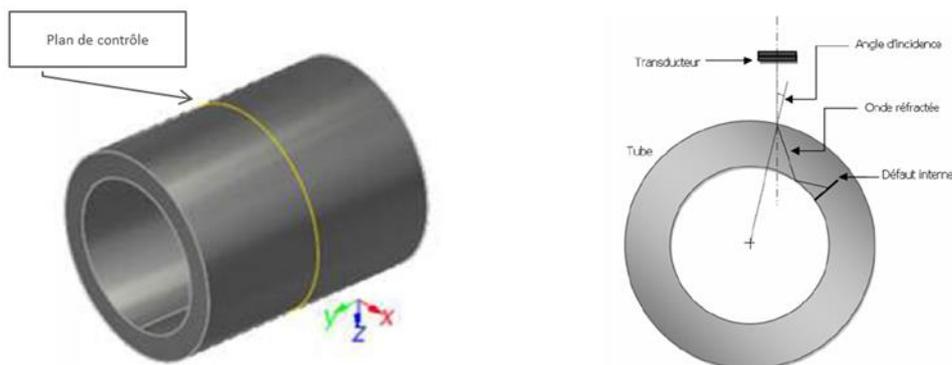


Figure 15 : plan de contrôle longitudinal du tube: coupe transversale. [15]

b. Configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube

Pour la détection des défauts transversaux, le contrôle a lieu dans un plan longitudinal (plan contenant l'axe du tube) suivant une incidence oblique autour de 17° par rapport à la normale au tube au point d'impact comme illustré Figure 16. On parle alors de contrôle transversal ou de contrôle du tube suivant la configuration transversale.

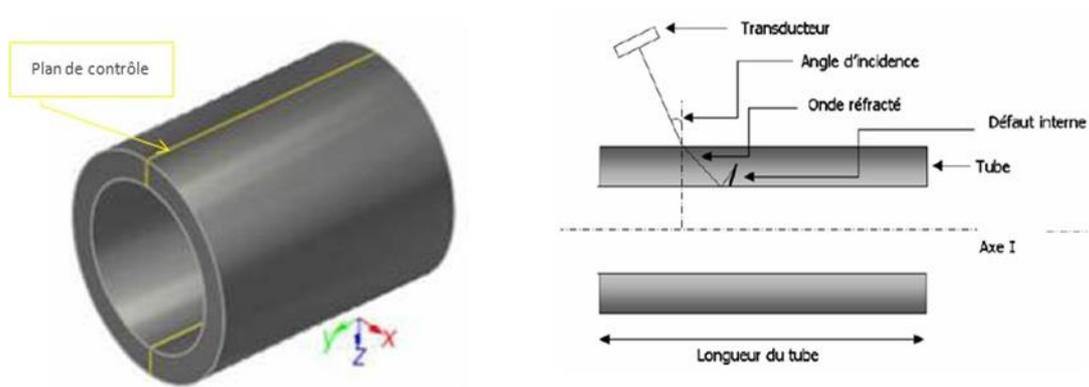


Figure 16 : plan de contrôle transversal du tube: coupe longitudinale [15].

Le contrôle sous incidence oblique favorise un flanc du défaut par rapport à un autre particulièrement pour les défauts inclinés (tiltés) illustrés dans la Figure 17. De ce fait, il est nécessaire de l'appliquer suivant deux sens de balayage.

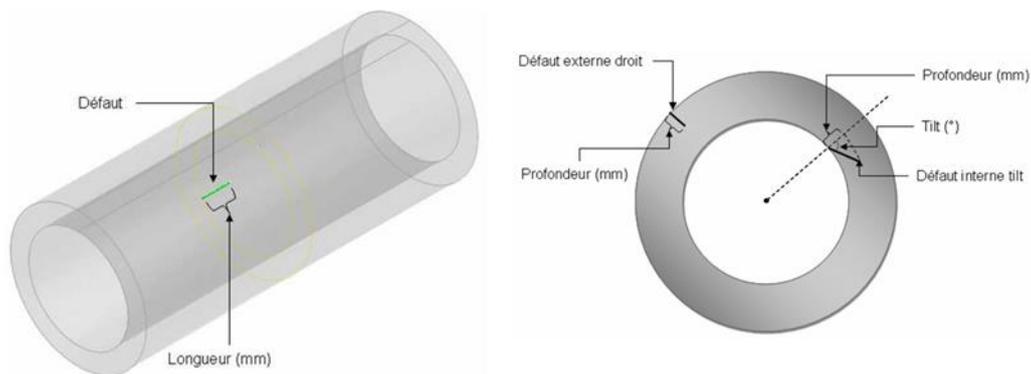


Figure 17 : illustration de l'inclinaison du défaut dit tilté par rapport à un défaut droit.

3. Appareillage et matériels de contrôle ultrasonore

Les appareils à ultrasons permettent de visualiser sur un écran le parcours des ultrasons entre deux impulsions successives. Un appareil à ultrasons est constitué de différents systèmes comme l'illustre le synoptique de la Figure 18 [16] :

- Générateur d'impulsions électriques brèves pour exciter l'élément ou les éléments piézoélectriques.
- Horloge de fréquence f . L'horloge commande à la fois le générateur d'impulsions et la base de temps du dispositif de visualisation.
- Système d'amplification des signaux électriques des échos de retour au transducteur. Ces signaux étant faibles, un amplificateur disposant d'un faible bruit, d'une bande réglable et d'une bonne linéarité est indispensable pour leur visualisation.
- Démodulateur et un écran de visualisation pour afficher l'échogramme en fonction du temps ou de la distance de parcours des ultrasons dans la pièce inspectée.

- Transducteur d'émission et de réception des échos ultrasonores. Pour répondre à différentes exigences de contrôle, des transducteurs multiéléments ont été développés et sont désormais présents dans les contrôles industriels.

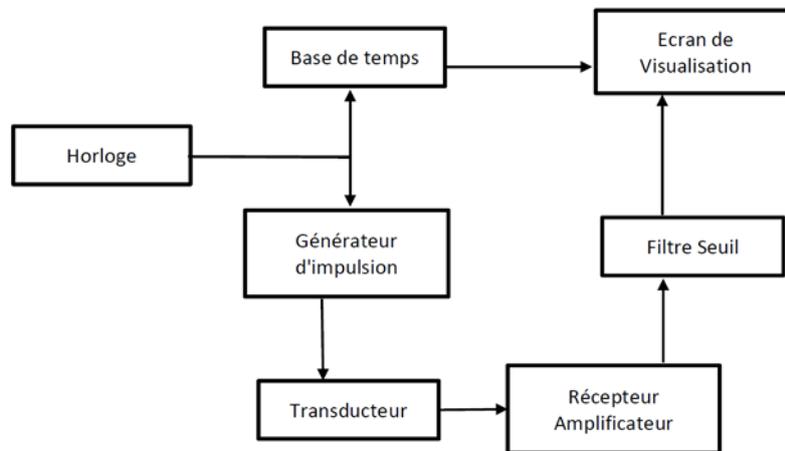


Figure 18 : schéma d'un appareil à ultrasons. [16]

a. Les transducteurs multiéléments (Phased Array – PA)

Les transducteurs multiéléments (ou *Phased Array-PA*) sont des transducteurs d'émission-réception multivoies offrant la possibilité de générer un faisceau ultrasonore dont les caractéristiques sont ajustables selon la configuration de contrôle souhaitée. Ces transducteurs se distinguent des transducteurs mono-éléments grâce à leur :

- Flexibilité et adaptabilité à des configurations de contrôles complexes.
- Performance en détection (meilleure sensibilité donc meilleure efficacité du contrôle).
- Développement de nouvelles possibilités dans le domaine de l'imagerie ultrasonore.
- Accélération de la cadence des contrôles.

Le principe d'un transducteur multiélément est basé sur la segmentation de la surface de ce dernier en un réseau de pastilles piézo-électriques indépendantes les unes des autres. Il est ainsi possible d'exciter chaque pastille séparément, en phase (**commutation électronique** : Figure 19) (**application de retards électroniques** : Figure 20) En agissant sur le déphasage entre les éléments et le nombre d'éléments, nous pouvons générer un faisceau avec des sources de taille variable (capteurs virtuels), avec une déflexion ou une focalisation variables. La focalisation permet de concentrer l'énergie du faisceau dans une région définie facilitant la détection de certains défauts parfois peu échogènes (défauts inclinés) ou la distinction entre deux défauts proches. Il est également possible de détecter ces défauts en appliquant des lois de retard en émission différentes de celles en réception.

Cette adaptabilité des transducteurs multiéléments permet d'envisager certaines inspections considérées auparavant délicates avec des transducteurs mono-éléments. Parmi

lesquelles, le contrôle de pièces présentant des géométries complexes [17] ainsi que la possibilité de contrôler des défauts d'orientations différentes à l'aide d'un seul et même transducteur [18].

Différents types de transducteurs multiéléments ont été ainsi développés comme illustré Figure 21. Ils peuvent être linéaires, matriciels, annulaires, circulaires ou conformables (pouvant épouser la surface inspectée de la pièce).

Actuellement, seuls les transducteurs linéaires et matriciels sont utilisés sur les bancs de contrôle automatique des usines **Vallourec** :

- **Linéaire** : les pastilles sont alignées suivant un axe. Ils permettent d'effectuer des contrôles dans le plan azimutal du transducteur.
- **Matriciel** : les pastilles sont placés suivant la longueur et la largeur du transducteur sous forme de damiers, d'anneaux sectorisés. Ils permettent d'effectuer des contrôles en 3D.

Ils permettent de combiner le contrôle longitudinal et le contrôle transversal par le biais d'un balayage circonférentiel et longitudinal du tube. Une synchronisation de ces deux balayages avec les tirs des transducteurs multiéléments permet d'aboutir à une inspection complète du tube.

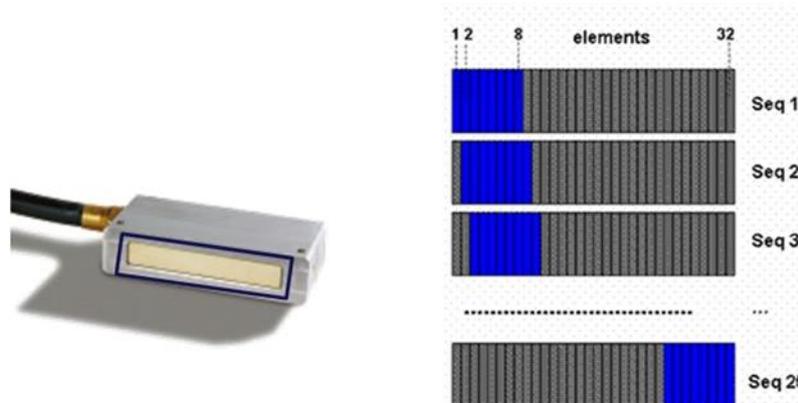


Figure 19 : séquençage des pastilles piézoélectriques du transducteur pour la commutation électronique. [10]

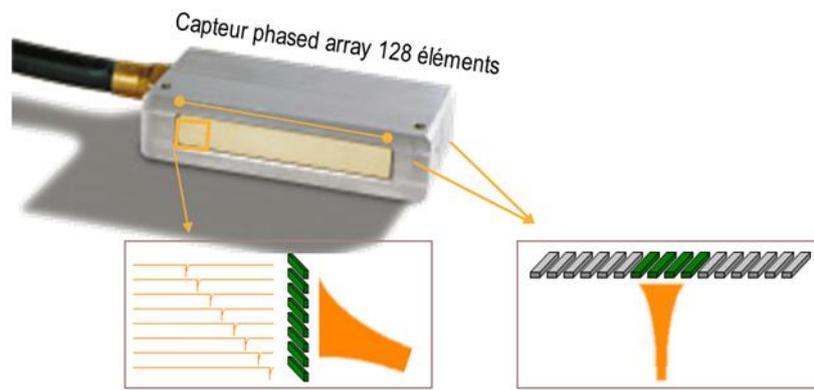


Figure 20 : d'application des lois de retard pour une déflexion ou une focalisation. [10]

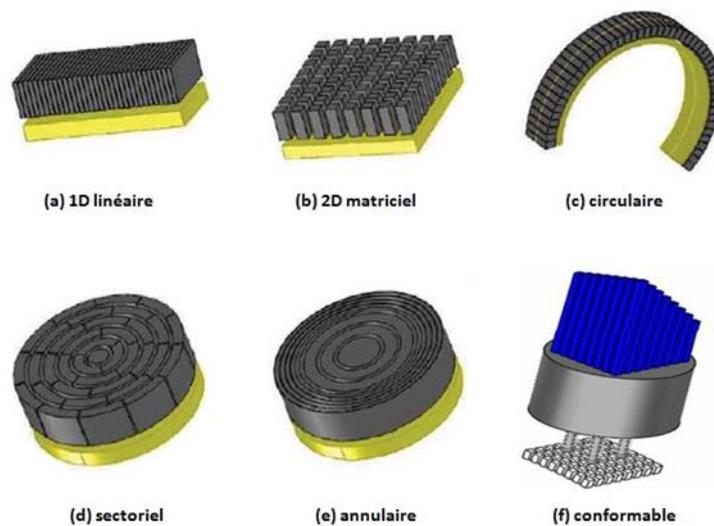


Figure 21 : types de transducteurs multiéléments. [15]

4. Représentation des données ultrasonores

Comme nous l'avons précédemment évoqué, les transducteurs multiéléments permettent une inspection en longueur et en circonférence du tube. Cette inspection délivre des signaux mesurés qui peuvent être représentés de différentes manières dans le but faciliter leur interprétation. Les représentations les plus répandues à **Vallourec** sont :

- **Ascan** : consiste à afficher l'amplitude du signal recueilli par le transducteur en fonction du temps (et donc de la profondeur) comme illustré Figure 22.

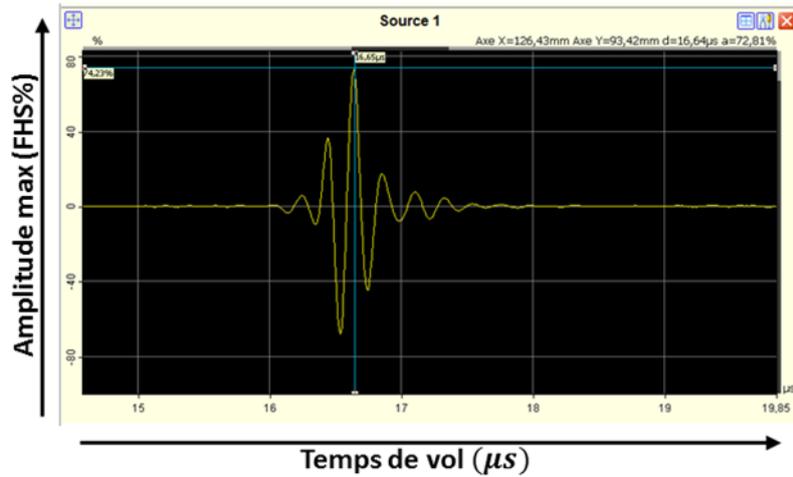


Figure 22 : Ascan expérimental du signal réfléchi par le défaut plan droit de profondeur 0.75mm et débouchant sur la surface d'une plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Muti2000 (M2M).

- **Bscan** : consiste à représenter l'intensité du signal par la brillance d'un point sur l'écran (selon une échelle de couleur). Plus le point est brillant, plus l'écho est intense comme le montre la Figure 23. L'image Bscan est formée en juxtaposant les signaux Ascans issus d'un balayage linéaire ou circonférentiel (séquences Ascans). Il s'agit d'une coupe de la zone inspectée où l'axe des abscisses représente le balayage et l'axe des ordonnées représente le temps.

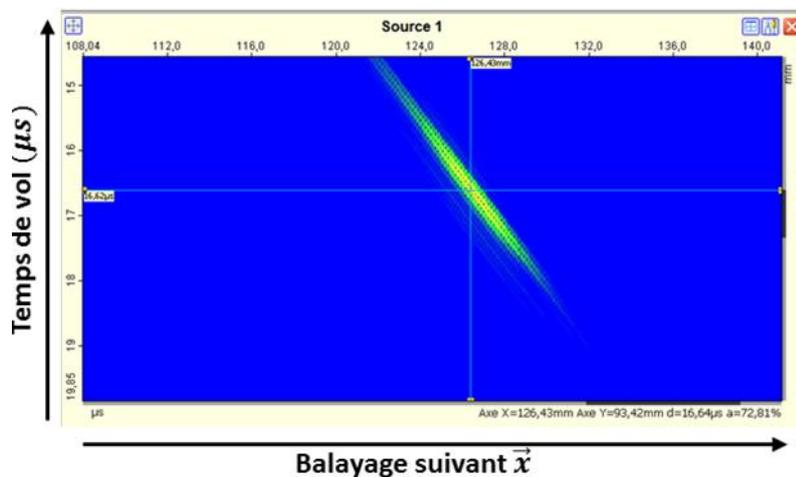


Figure 23 : Bscan expérimental du signal réfléchi par le défaut plan droit de profondeur 0.75mm et débouchant sur la surface d'une plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Muti2000 (M2M)

- **Cscan** : consiste à représenter selon les deux axes de balayages, l'amplitude maximale de l'Ascan reçu en chaque position du transducteur. Cette image correspond à une coupe dans un plan parallèle au balayage du transducteur. L'intensité est représentée selon une échelle de couleur comme illustré Figure 24.

- **Courbe Écho-dynamique** : consiste à représenter le maximum d'amplitude détecté pour chaque position du balayage sur les signaux Ascans. Elle décrit l'enveloppe de ces signaux comme le montre la Figure 25.

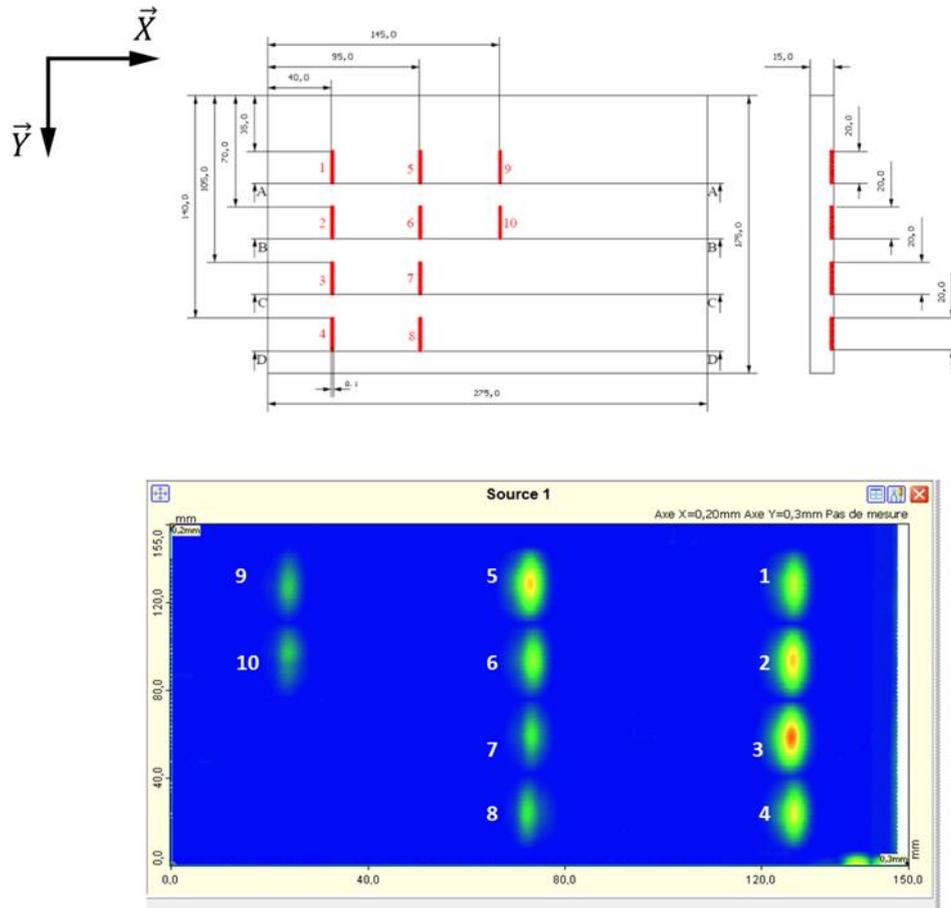


Figure 24 : Cscan expérimental du signal réfléchi par les défauts plans droits ou tiltés usinés sur la surface de plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Multi2000 (M2M)

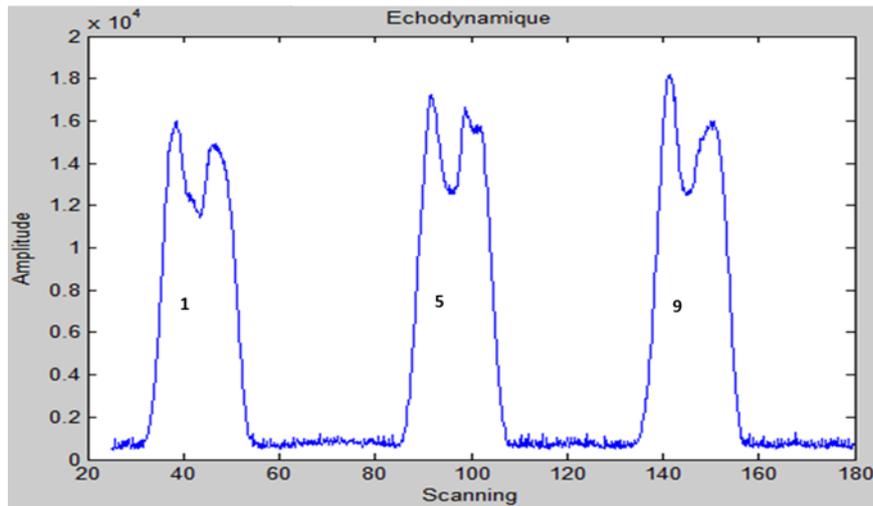


Figure 25 : courbes écho-dynamique expérimentales des réponses acoustiques des entailles artificielles 1, 5 et 9 (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Relecture à l'aide de la routine de dépouillement développée « Relecture-essais » dans le cadre de ces travaux

5. Détection des défauts en contrôle ultrasonore

A l'issue du contrôle ultrasonore, une interprétation des indications présentes sur les représentations ultrasonores délivrées par le banc de contrôle aboutit à l'acceptation ou à la non-conformité du tube. Elle tient compte des tolérances en accord avec le client ou des seuils consignés dans les spécifications ou les normes. Dans le secteur du pétrole, on se base essentiellement sur la norme **API-5CT** [19] ainsi que la norme européenne **NF EN ISO 10893-10** [6]. Elles fixent le seuil d'acceptation en termes de profondeur du défaut à 5% de l'épaisseur nominale du tube pour la catégorie des tubes correspondant au Casing¹ et Tubing² illustrés Figure 26.

¹ Casing : tube en acier permettant de consolider les puits de production de Pétrole & gaz.

² Tubing : Tube en acier de production.

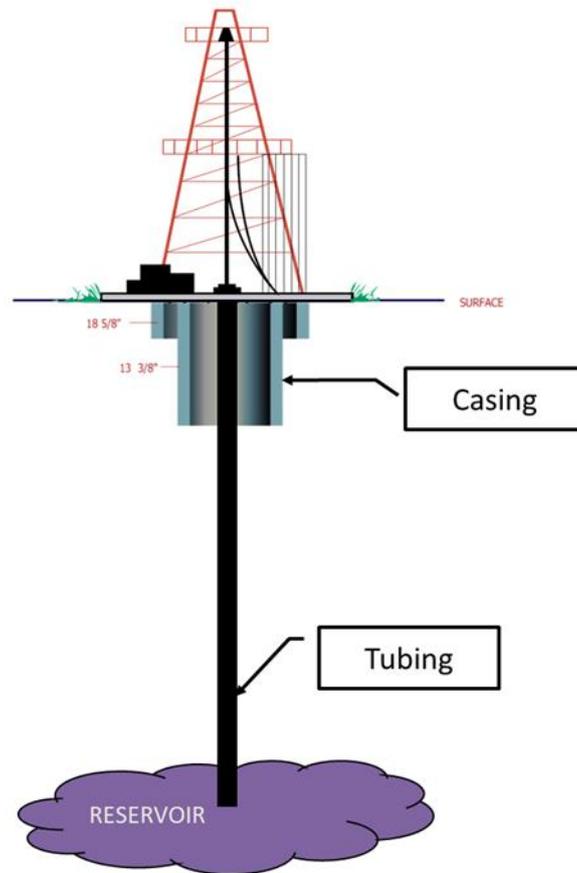


Figure 26 : architecture « en poupées russes » d'un puit de production de Pétrole & gaz [20]

Pour déterminer ce seuil, les normes citées précédemment, indiquent qu'il est nécessaire d'obtenir des indications références provenant d'un tube avec un défaut artificiel appelés tube et défaut étalons. Le tube étalon doit avoir les mêmes nuance et dimensions que le lot de tubes à contrôler. Le défaut étalon doit être du même type que les défauts recherchés, i.e. internes ou externes et longitudinaux ou transversaux. Il doit avoir une profondeur égale à la tolérance requise exprimée en pourcentage de l'épaisseur du produit contrôlé. La vérification des dimensions et de la forme de l'entaille étalon est nécessaire selon une technique adéquate, notamment par la réalisation d'une réplique³ comme illustré Figure 27.

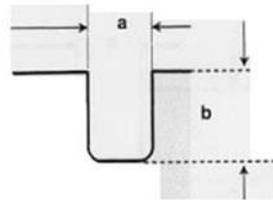
Pour s'assurer de la reproductibilité des résultats, les procédures de contrôle imposent le passage du tube étalon régulièrement sur le banc de contrôle durant l'inspection d'un lot de tubes. Le but étant de prévenir la modification des conditions de contrôle (problème de réglage ou usure du matériel par exemple).

³ Empreinte en résine de l'entaille étalon usinée.

Support du défaut	TUBE ETALON	Ø6 x 1,85 mm
Profil du défaut	en "U"	
Type du défaut	ENTAILLE LONGITUDINALE INTERNE N° 1	
Position du défaut	40 mm du bord	
Dimensions du défaut	Longueur 10,0 mm; Largeur 0,3 mm; Profondeur 0,1 mm	

Relevé des cotes

(Tolérances d'usinage : ± 0,02 ; Tolérances de lecture : ± 0,02)



a = 0,32 mm
b = 0,23
Long = 10,00

Réplique du défaut



Photo de la réplique



Figure 27 : caractéristiques dimensionnelles d'une entaille étalon longitudinale interne et sa réplique

Une indication inacceptable est traduite par une indication supérieure ou égale au seuil de déclenchement et d'alarme fixés comme le montre la Figure 28. Elle est révélatrice d'une anomalie nécessitant une levée de doute ou d'un défaut impliquant le rejet ou la réparation du tube si cette dernière est possible. Les seuils de déclenchement sont définis à l'aide d'une amplitude et d'un intervalle dits porte de détection. Ainsi pour la détection des défauts proches des parois du tube, une porte interne (respectivement externe) est définie pour la détection des défauts internes (externes) ou proches de la paroi interne (externe) comme illustré Figure 28.

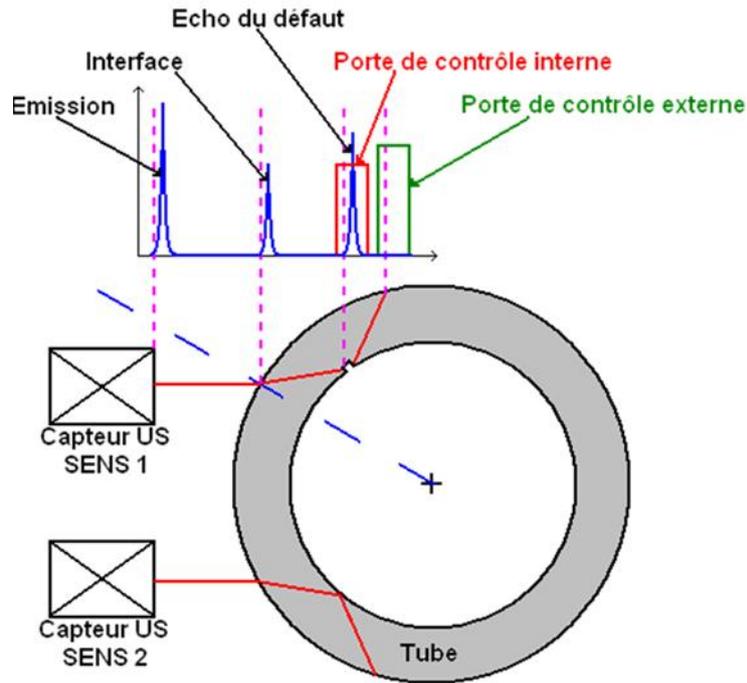


Figure 28 : exemple de détection de défaut interne ou externe par seuillage suivant la configuration longitudinal du contrôle ultrasonore

En cas de réparation possible, une levée de doute est effectuée pour vérifier le respect des tolérances exigées. Dans la pratique, il est souvent admis que l'amplitude des signaux ultrasonores est proportionnelle à la criticité du défaut, c'est à dire à sa profondeur. La décision alors de la conformité ou de la non-conformité du tube se base sur cette hypothèse de proportionnalité de la profondeur du défaut et de sa criticité. Or, Les différentes expertises **CND** menées au centre de recherche **VRCF** nous ont montré que cette corrélation est très faible de l'ordre de (0.3 à 0.4) [21]. Par ailleurs, le contrôle ultrasonore sur tube implique deux sens de balayage comme illustré dans la Figure 28, afin de s'assurer de la détectabilité des défauts inclinés.

De ce fait, il est indispensable d'identifier les défauts détectés et avoir une meilleure estimation de leur criticité. Pour ce faire, des méthodes d'identification et de dimensionnement des défauts ont été développées.

VI.Méthodes d'identification des défauts suite à un contrôle ultrasonore

Ces méthodes visent la détermination des paramètres pertinents à la reconnaissance des défauts. N'étant pas accessibles après l'acquisition des signaux ultrasonores, l'observation d'autres quantités liées à ces paramètres par les lois physiques permet de les identifier indirectement. Cette logique introduit la notion de problème inverse, où il s'agit d'inverser les lois physiques pour accéder indirectement à la quantité ou aux quantités d'intérêt. Les

quantités d'intérêt permettant une meilleure estimation de la criticité d'un défaut à l'issue d'un contrôle ultrasonore sont : la position, la profondeur, l'orientation et la longueur du défaut détecté [10] [1] comme illustré Figure 29.

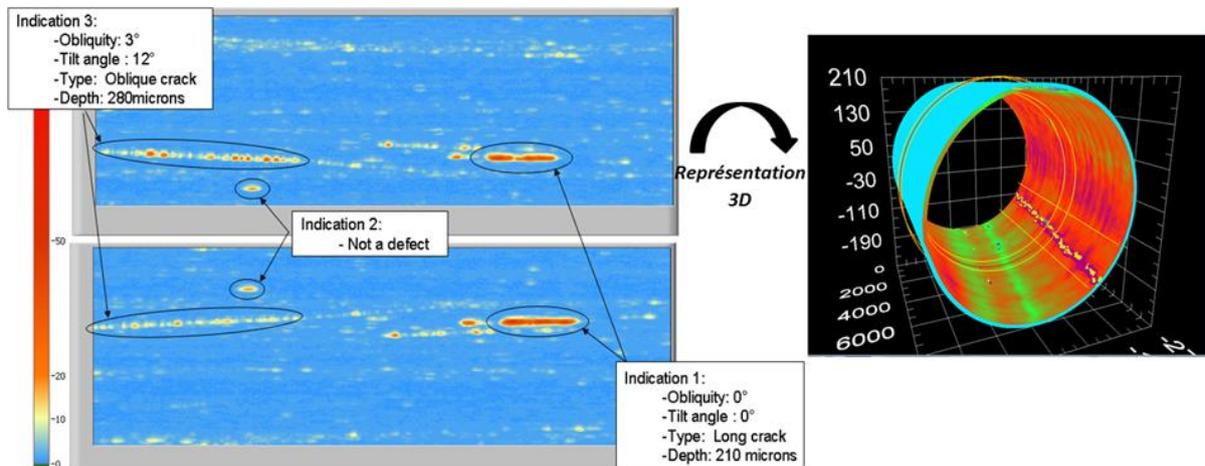


Figure 29 : caractérisation des défauts détectés et représentation 3D du tube inspecté [1]

Dans un premier temps, nous étudierons les principales méthodes permettant d'identifier une ou un ensemble de ces quantités. Ensuite, nous proposerons une méthode permettant de répondre à notre problématique.

Il est possible de distinguer trois familles de méthodes d'identification [22] :

- **Méthodes classiques** : basées sur l'expertise humaine. Cette expertise intervient dans l'interprétation de l'amplitude ou le temps de vol des échos.
- **Méthodes externes** : inversion basée sur une formulation mathématique.
- **Méthodes internes** : inversion basée sur un modèle direct.

1. Méthodes classiques

L'apparition d'un écho permet de statuer sur une éventuelle présence d'un défaut. Or, elle ne permet pas d'extraire directement des informations sur sa localisation, sa forme ou ses dimensions. La localisation d'un défaut est déterminée par la mesure du temps de vol de l'écho reçu. La connaissance de la vitesse des ondes dans le matériau et du trajet effectué est indispensable. Afin de progresser dans l'interprétation de ces échos, différentes méthodes ont été développées pour permettre une estimation des dimensions du défaut.

i.Méthode DAG (Distance, Amplitude et Grandeur du défaut)

Méthode basée sur un modèle simplifié de la formation des échos et mise au point par Krautkramer [14]. Cette méthode permet de relier les caractéristiques du transducteur utilisé, au trois grandeurs suivantes :

- La distance entre le réflecteur et le transducteur
- L'amplitude relative du signal

- La taille du réflecteur

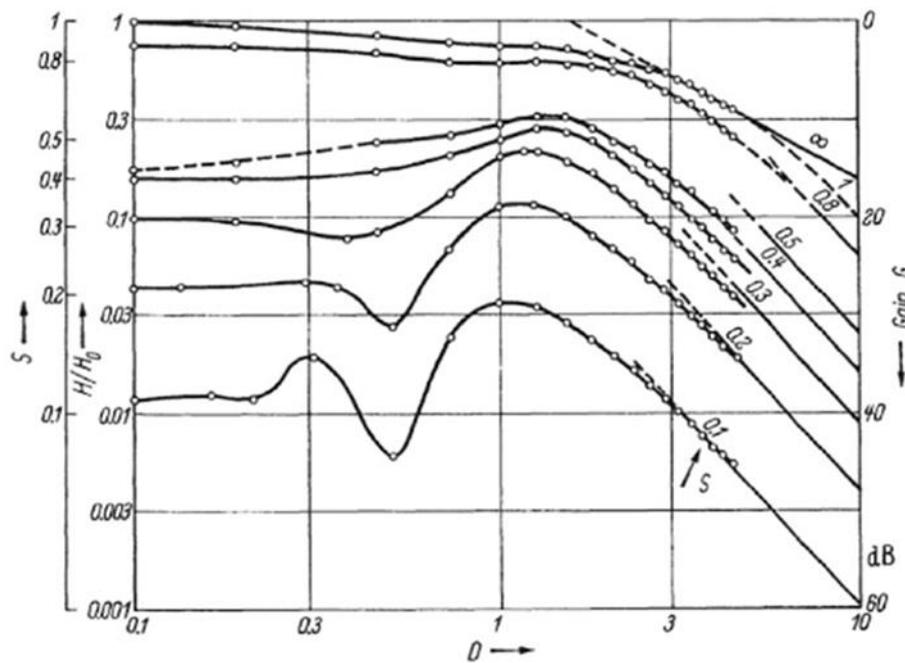


Figure 30 : diagramme DAG mettant en relation la distance du défaut D, l'amplitude de l'écho du défaut G et la taille du défaut S (diagramme DAG ou DGS : Distance, Gain and Size) [14]

Cependant, cette méthode suppose que le réflecteur est circulaire (Trou à Fond Plat). En effet, elle compare l'amplitude reçue avec l'amplitude équivalente d'un réflecteur circulaire. De plus, pour obtenir une bonne estimation des dimensions du réflecteur circulaire équivalent au défaut, ce dernier doit être orienté perpendiculairement à l'axe du faisceau et situé dans la zone de Fraunhofer (champ lointain). Ainsi, la principale limitation de cette méthode est que la forme et l'état de surface du défaut doivent être les plus proches possibles de ceux du réflecteur circulaire équivalent. Par ailleurs, il existe un diagramme **DAG** selon Krautkramer [14] comme illustré Figure 30 ainsi que des diagrammes **DAG** propres aux transducteurs [23].

ii.Méthode à 6dB

Le principe consiste à effectuer un balayage du transducteur suivant la longueur de la pièce à inspecter jusqu'à observation d'une chute d'amplitude de -6dB sur l'écho réfléchi. Cette chute d'amplitude, illustrée Figure 31, permet de déterminer le contour du défaut détecté. Ainsi, la profondeur du défaut est estimée suivant l'Équation 1 :

$$profondeur (defaut) = K * A_{max}(defaut) * [x_2(defaut) - x_1(defaut)],$$

$$K = \frac{profondeur(defaut_{etalon})}{A_{max}(defaut_{etalon}) * [x_2(defaut_{etalon}) - x_1(defaut_{etalon})]}$$

Équation 1

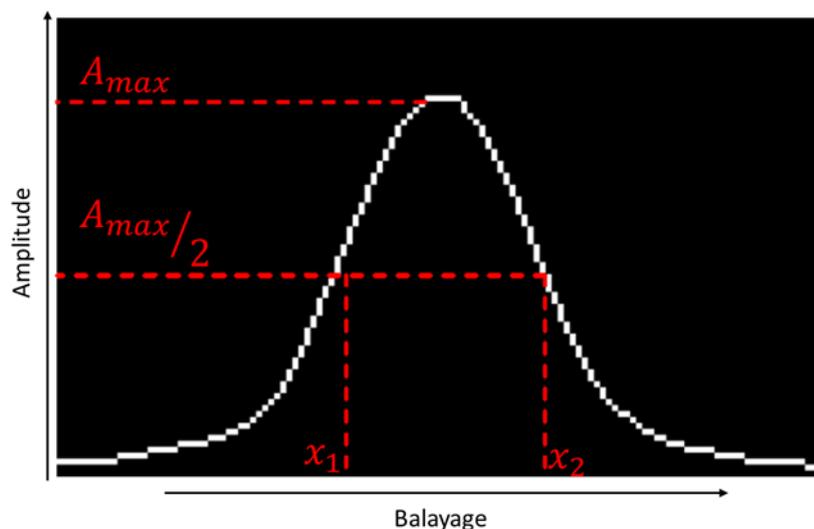


Figure 31 : paramètres de la courbe écho-dynamique de la réponse acoustique d'un défaut permettant l'estimation de la profondeur du défaut suivant la méthode à -6dB

L'amplitude de référence étant celle obtenue par la réflexion de la totalité du faisceau ultrasonore sur la surface du défaut, ceci constitue une limitation de la méthode car conduit nécessairement à surestimer la dimension de défauts plus petits que le diamètre du faisceau ultrasonore.

Une extension de cette méthode de détection des défauts en réflexion pure consiste à relever plusieurs cartographies successives autour du défaut ciblé avec une sensibilité croissante sur chaque mesure de l'écho réfléchi (réception) de $6dB$. Elle suppose que, si dans une direction donnée, la distance séparant deux contours successifs est égale à la moitié du diamètre focal du faisceau utilisé, alors les dimensions estimés du défaut sont celles données par le premier contour. Si cette distance est supérieure, cette évaluation est répétée entre le 2eme et le 3eme contour. L'utilisation d'un transducteur focalisé améliore la résolution de la mesure (diamètre du faisceau ultrasonore).

L'inconvénient de ces deux techniques de dimensionnement est qu'elles sont valables pour des défauts perpendiculaires à la direction de propagation du faisceau. De plus, elles ne permettent pas d'aboutir aux informations précises relatives à la position et à la forme du défaut détecté.

iii.Méthodes basées sur le temps de vol de l'écho

Ces méthodes sont basées sur la mesure des temps de vol séparant les échos de diffraction générés sur les sommets d'un défaut plan. Afin de distinguer un écho provenant d'un défaut plan de celui provenant de deux défauts volumiques voisins, on montre que les échos sont en opposition de phase et qu'ils sont reliés à un écho de réflexion par une relation de dérivation temporelle. Dans l'industrie nucléaire, cette méthode est employée pour le dimensionnement de fissures.

a. Méthodes de diffraction de bord

La détection des échos de diffraction utilise un transducteur en émission/réception. La taille du défaut est obtenue en mesurant l'écart en temps séparant les échos provenant des sommets proche et lointain du défaut comme le montre la Figure 32. L'avantage de cette méthode réside dans sa précision essentiellement pour des défauts plans droits [24]. Toutefois, l'amplitude issue des échos de diffraction en comparaison à celle issue des échos spéculaires est faible. Il est donc difficile de discerner les différents échos quand le SNR (signal/bruit) est trop faible.

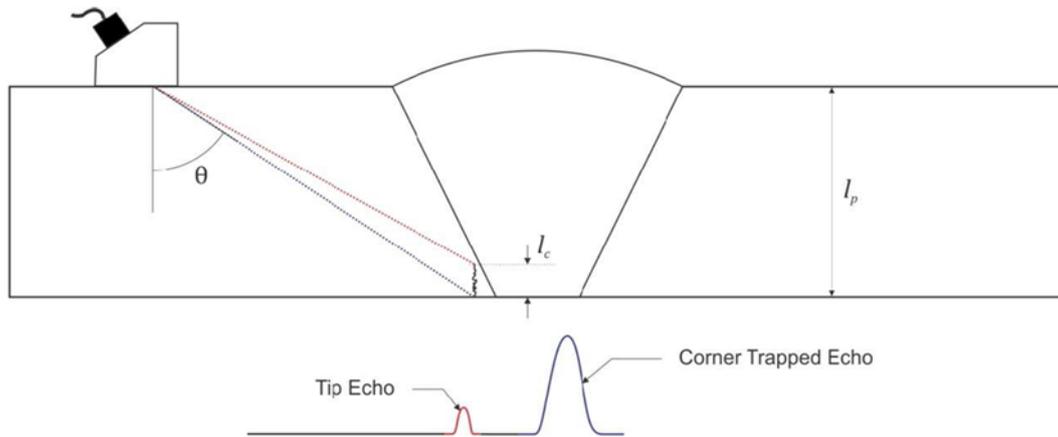


Figure 32 : schéma de la détermination de la profondeur du défaut à l'aide des échos provenant des deux bords du défaut plan (coin et sommet). [25]

b. Méthode « Time of Flight Diffraction – TOFD »

Cette méthode utilise un transducteur émetteur et un transducteur récepteur distincts ou en mode tandem et se base également sur les échos de diffraction générés par les deux sommets du défaut (généralement plan) comme illustré Figure 33.

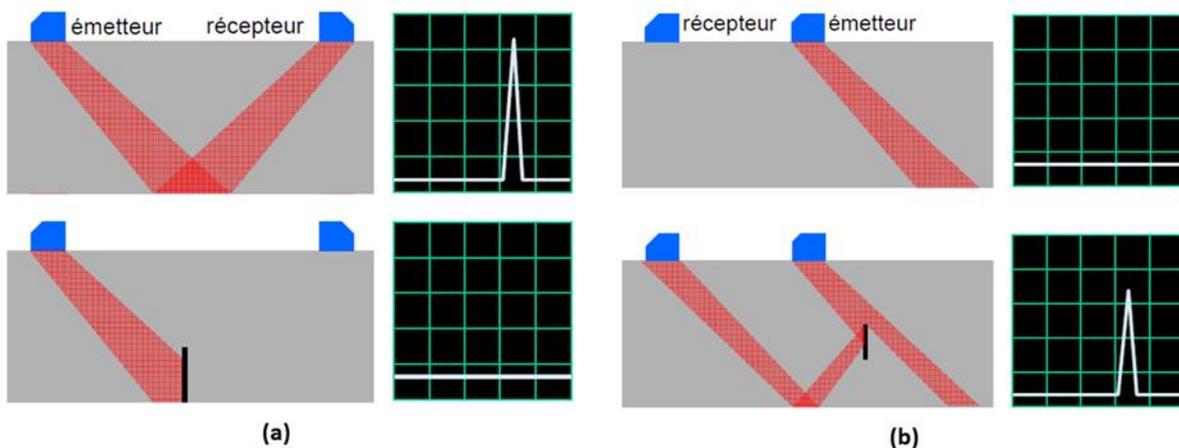


Figure 33 : schémas et signaux reçus par le transducteur en réception en contrôle suivant la méthode TOFD. (a) : mode TOFD à l'aide de transducteurs distincts. (b) : mode TOFD à l'aide de transducteurs tandem.

La taille du défaut est déduite de la distance entre les deux transducteurs, des différents temps de vol détectés par le transducteur en réception et des vitesses de propagation dans le matériau à inspecter comme le montre la Figure 34.

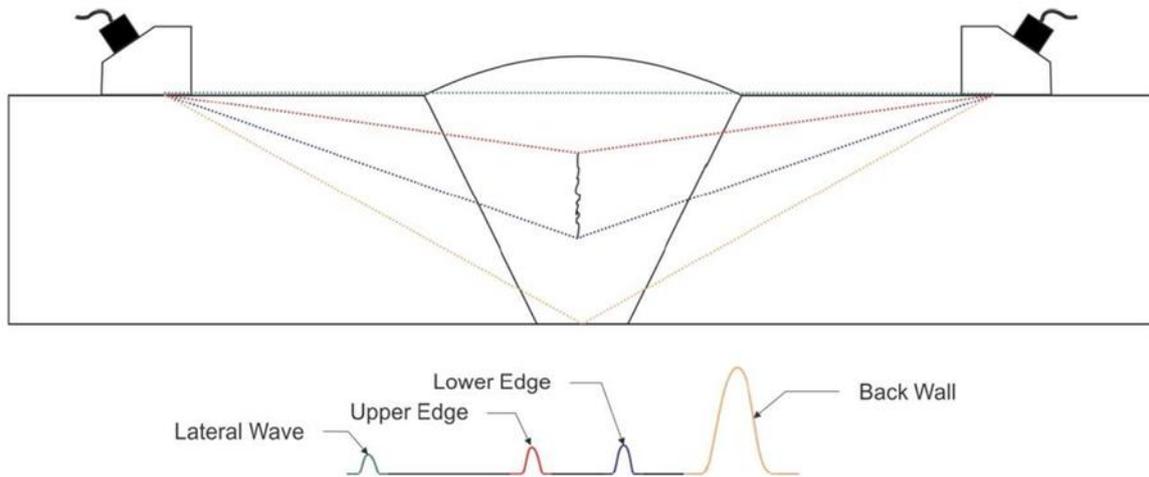


Figure 34 : schéma de la détermination de la profondeur du défaut à l'aide la méthode TOFD à l'aide de transducteurs distincts [25].

Ces méthodes basées sur les temps de vol sont les plus utilisées dans les contrôles industriels. L'essor des technologies *Phased Array (PA)* de plus en plus présentes en industrie et le développement de méthodes de traitement du signal permettent de pallier certaines de ces limitations afin d'obtenir une meilleur estimation de la position ainsi que de la profondeur des défauts [26, 27, 28, 29].

Par ailleurs, des méthodes externes et internes ont été développées en vue de mettre en place des procédures d'identification automatiques sans faire appel à l'expertise humaine.

2. Méthodes d'inversion basées sur une formulation mathématique

Le principe de cette méthode consiste à déterminer une formule pour décrire le lien de cause à effet entre les caractéristiques du défaut et du contrôle et les échos observés à l'issue de ce dernier [30]. Cette formule est ensuite inversée permettant de remonter directement aux caractéristiques souhaitées. Cette démarche implique des hypothèses de linéarité, de continuité et d'unicité entre les échos observés et les paramètres du défaut et du contrôle rendant ainsi la formulation mathématique inversible. Or, le contrôle fait appel à plusieurs paramètres (appareillages électroniques, outils mécaniques, phénomènes de propagation...etc) susceptibles de créer des perturbations pouvant conduire à de larges variations des paramètres obtenus par formulation inverse [31]. Partant de ce constat, le problème d'identification des paramètres du défaut devient un problème inverse non linéaire où des approximations simplificatrices permettent d'approcher le problème linéairement [32]. Parmi ces approximations, les méthodes Born, Kirchhoff ou séparation des variables sont les plus utilisées [33].

L'utilisation de ces méthodes reste limitée et requiert un solide retour d'expérience. L'obtention d'une relation de dépendance inversible est restreinte à des configurations de contrôle bien particulières.

3. Méthodes d'inversion basées sur un modèle direct

Ces méthodes reposent sur un processus d'inversion de différentes étapes [1, 30, 34] :

- Choix des paramètres de départ (configuration de contrôle et défaut cible).
- Résolution du problème direct et obtention des caractéristiques simulées.
- Mesure de l'écart entre les caractéristiques mesurées et celles solutions du modèle direct.
- Schéma itératif d'optimisation en vue de minimiser l'écart et application de critères de sélection pour l'obtention d'une solution optimale.

Autrement dit, le modèle direct fournit des représentations ultrasonores comparables aux représentations expérimentales à inverser. La mesure de l'écart entre ces représentations permet de mettre en œuvre des algorithmes afin d'aboutir à une image simulée la plus proche de celle à inverser. Ces algorithmes font appel à des techniques d'imagerie et de traitement de signal. En effet, l'essor des transducteurs **PA** a vu apparaître de nouvelles techniques d'imagerie, notamment la focalisation synthétique telle que la méthode **SAFT** (**S**ynthetic **A**perature **F**ocusing **T**echnique) et ses différentes déclinaisons **FMC** (**F**ull **M**atrix **C**apture) ou **TFM** (**T**otal **F**ocusing **M**ethod) [29, 35, 36], et le retournement temporel telle que la méthode **DORT** (**D**écomposition de l'**O**érateur de **R**etournement **T**emporel) [37, 38]. Ces méthodes nécessitent des stratégies d'acquisition plus ou moins complexes et des post-traitements de quantité de données conséquente. Ces considérations limitent l'application de ces méthodes aux études de laboratoire. Toutefois, la combinaison de certains aspects de ces méthodes avec des méthodes du traitement du signal reste envisageable pour des contrôles industriels ciblés qui ne nécessitent pas une cadence industrielle.

4. Méthodes d'identification développées au centre de recherche VRCF

Une première méthode d'identification partielle de défauts dans le tube a été développée dans le centre de recherche Vallourec-**VRCF**. La méthode **Better Knowledge of Flaws (BKF)** permet d'estimer la criticité selon la profondeur et de classer les défauts selon les types les plus rencontrés (illustrés Figure 3, p 23) dans nos processus de fabrication par réseaux de neurones. La méthode est automatisée et a fait l'objet d'un brevet [2].

Le synoptique de cette méthode d'identification est détaillé ci-dessous:

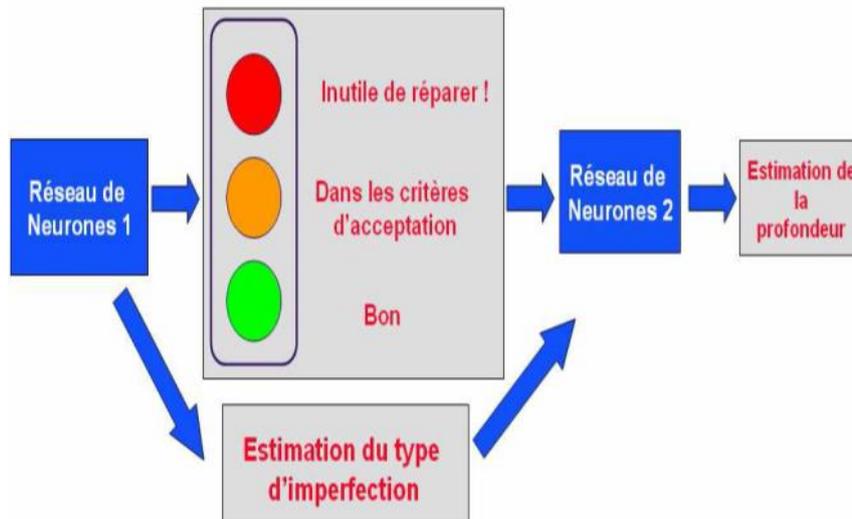


Figure 35 : synoptique de la méthode *BKF* pour l'identification des défauts [2]

Une évolution de cette technique d'identification partielle vers une classification par des techniques en imagerie tridimensionnelle pour aboutir à la forme réelle des défauts a été développée. Compte tenu de la pertinence et de l'efficacité des méthodes d'inversion basée sur un modèle direct, cette évolution a permis de mettre en œuvre une méthode de caractérisation des défauts comportant trois modules :

- **Module de traitement** : sélection des zones potentielles des défauts en analysant les images Bscans et Cscans et estimation de la position et de la longueur du défaut à partir de celles-ci.
- **Module d'interprétation** : Mise en place de la stratégie d'inversion en utilisant le modèle direct développé *RAYO* et estimation du tilt (inclinaison) et de la profondeur du défaut [1].
- **Module de reconstruction principale** : Visualisation tridimensionnelle de la forme du défaut.

Si cette évolution a montré des résultats satisfaisants pour les défauts droits, elle a tout de même montré des résultats aberrants pour les défauts inclinés. Ces résultats sont expliqués par les lacunes du modèle direct *RAYO* détaillés ci-dessous :

- Les lois physiques prises en compte pour décrire les phénomènes de propagation dans *RAYO* sont appliquées au cas simple d'une onde monochromatique (fréquence unique). Or, la réalité du contrôle ultrasonore fait appel à plusieurs fréquences. En effet, les transducteurs génèrent des fronts d'ondes correspondant à un spectre de fréquence dont la forme et l'étendue sont plus au moins connues. Cette considération est indispensable à la bonne compréhension des phénomènes mis en

jeu dans tout contrôle ultrasonore et à l'obtention d'images ultrasonores comparables avec l'expérience.

- Les lois physiques prises en compte pour décrire les phénomènes de propagation dans **RAYO** négligent le phénomène de diffraction sur le défaut. Or, ce sont les échos issus de la diffraction directe ou indirecte sur le défaut qui sont déterminants pour la détection des défauts inclinés.

Dans la suite, nous nous intéresserons aux méthodes de modélisation de la propagation ultrasonore basées sur la théorie des rayons afin de proposer une solution permettant de pallier les limitations du modèle **RAYO** et d'aboutir à des images ultrasonores simulées comparables aux images ultrasonores expérimentales. Le nouveau simulateur de propagation proposé dans le cadre de ces travaux est un modèle de simulation large-bande (spectre fréquentiel du transducteur de contrôle). Il considère une approche géométrique pour la modélisation des différents phénomènes de propagation dans le cadre d'une inspection ultrasonore sur tube en présence d'un défaut plan débouchant ou proche de la paroi interne du tube. Le but étant d'aboutir à un modèle simple permettant la simulation complète du contrôle ultrasonore sur tube sans soudure en tenant compte des phénomènes opérant dans ce contexte qui sont essentiellement la réflexion et la diffraction ultrasonore.

VII. Conclusion

La fabrication des tubes sans soudure est une succession d'étapes pendant lesquelles peuvent apparaître des défauts rédhibitoires à leurs usages. En ce sens, le **CND** est indispensable pour s'assurer de la conformité des tubes.

Dans ce premier chapitre, nous avons passé en revue les principales étapes de fabrications de tube et leurs éventuelles implications dans l'apparition des défauts ciblés par notre problématique. Nous avons abordé les différentes techniques de contrôles non destructifs appliqués aux tubes et plus particulièrement la technique ultrasonore. Le contrôle par ultrasons consiste à générer une onde ultrasonore dans la pièce à inspecter et de la recueillir après propagation et interaction avec la structure inspectée. La présence d'un défaut dans la pièce à contrôler modifie la propagation de l'onde. Ainsi, le but est de détecter la présence d'un défaut, de l'identifier et d'en estimer les dimensions et la localisation si possible. Or, en **CND** par ultrasons, les caractéristiques du défaut sont déduites de la représentation des phénomènes physiques opérant lors du contrôle. Généralement, cette représentation est une image ou un signal pouvant contenir plusieurs échos dont l'interprétation peut s'avérer complexe. Cette complexité, nous a permis d'identifier le caractère inverse de notre problématique.

Ces échos sont issus des différentes interactions avec le défaut et la géométrie de la pièce (réflexion spéculaire, diffraction, conversion de mode, réflexion sur le fond...etc.). Par

conséquent, la localisation et la caractérisation du défaut nécessitent des traitements des données ultrasonores acquises et une bonne connaissance des phénomènes de propagation.

Les progrès importants accomplis ces dernières années dans les domaines de traitement des signaux et des images, ainsi que l'évolution des performances des moyens de contrôle permettent d'augmenter l'intelligibilité des données acquises. Nous avons ainsi abordé les différentes méthodes d'identification des défauts à partir de ces données ultrasonores. La méthode d'inversion basée sur un modèle direct a montré sa pertinence lors des travaux précédemment menés au centre de recherche **VRCF** [1] C'est donc cette méthode qui a été retenue pour résoudre notre problématique. Si le modèle **RAYO** présentait des limitations en particulier pour les défauts tiltés, il a néanmoins montré l'intérêt d'une approche géométrique simple pour la modélisation de l'interaction d'un faisceau ultrasonore et d'un défaut plan. Pour pallier les limitations que présente le modèle **RAYO**, l'objectif de cette thèse est de développer un modèle de simulation large-bande (spectre fréquentiel du transducteur de contrôle) des différents phénomènes de propagation dans le tube (comprenant les phénomènes de diffraction) ainsi que leurs interactions avec des défauts plans débouchants ou proches de la paroi interne. Le mode de construction du simulateur doit prendre au mieux en compte la forme et les limitations des données (stratégie d'acquisition des données ultrasonores) tout en restant applicable aux différentes configurations de contrôle déployées dans les usines **Vallourec**.

Le chapitre suivant s'intéressera au modèle direct et aux méthodes compatibles avec une approche basée sur l'acoustique géométrique pour la modélisation de la réponse du transducteur à l'émission et à la réception.

Chapitre 2 Modélisation de l'interaction entre le faisceau ultrasonore et une interface plane rigide -défaut débouchant

I.Introduction

Les **CND** constituent une phase importante dans le processus de fabrication des tubes chez **Vallourec**. Différentes techniques **CND** sont effectuées à différentes étapes du processus de fabrication afin d'assurer la conformité des produits. En conséquence, différentes analyses de ces contrôles permettent d'améliorer les processus de fabrication et de répondre au mieux aux besoins des clients. Ainsi, dans un souci d'amélioration continue, le **VRCF**, plus particulièrement le département des **CND** en partenariat avec d'autres départements et usines **Vallourec**, a initié différents projets pour une meilleure évaluation quantitative des défauts détectés.

Le but ultime de ces divers projets, est une meilleure évaluation des caractéristiques des défauts détectés à la suite d'un contrôle non destructif ultrasonore afin de juger de sa criticité sur l'usage final du produit et/ou au mieux agir sur son étape d'apparition dans le processus de fabrication.

Nous avons présenté dans le précédent chapitre, deux projets phares conduits au **VRCF** pour une classification des défauts [2] ainsi qu'une méthode simple de résolution du problème inverse de la caractérisation des défauts détectés suite à un contrôle non destructif ultrasonore [1]. La résolution de ce problème inverse est basée sur un modèle direct consistant en un simulateur de propagation d'ondes ultrasonores et leur interaction avec un défaut connu présent dans une pièce inspectée dont les caractéristiques sont connues et une configuration connue du contrôle ultrasonore. Ainsi, la méthode d'inversion développée permet de comparer les données images issues d'un simulateur de propagation et celles issues de l'expérience et d'aboutir aux caractéristiques recherchées du défaut détecté qui sont : la position, l'inclinaison, la longueur aussi bien que la profondeur de ce dernier.

D'autre part, ces projets nous ont également permis de constater la rançon de la simplification dans la modélisation des phénomènes complexes de la propagation des ondes ultrasonores et leur interaction avec un défaut plan. Les solutions proposées dans [2] et [1] décrivaient le faisceau ultrasonore à l'aide des rayons en se basant sur l'**Optique Géométrique (OG)**. En revanche, dans un souci de simplification, elles tenaient uniquement compte des phénomènes de réflexion et de l'amplitude absolue du champ. Les rayons incidents, réfléchis et réfractés ne suffisant pas pour une description complète de la propagation des ondes et leur interaction avec un défaut, il est donc indispensable de tenir compte de la diffraction [32]. L'extension de la solution proposée dans le cadre de ces

travaux vers un modèle large-bande(spectre fréquentiel du transducteur) sera abordé dans le chapitre suivant.

Dans ce chapitre, nous présenterons les méthodes de modélisation de la diffraction par un obstacle rigide. Nous nous focaliserons principalement sur les théories applicables à notre domaine de fréquences. Plusieurs théories sont disponibles dans la littérature pour traiter ce problème. Elles se classent essentiellement dans deux grandes catégories [39] : les méthodes dites de rayons telles que l'Optique Géométrique (**OG**) ou la Théorie Géométrique de la Diffraction (communément appelée **GTD** comme **Geometrical Theory of Diffraction**) [32] [40], et les méthodes dites de sources telles que l'Optique Physique (**OP**) ou la Théorie Physique de la Diffraction (communément appelée **PTD** comme **Physical Theory of Diffraction**) [39]. Nous présenterons les approches susceptibles de répondre à notre problématique. Puis, nous détaillerons les formulations mathématiques mises en jeu pour rendre possible la résolution de notre problématique et rendre compte des phénomènes complexes de la propagation des ondes acoustiques. Enfin, nous exposerons la solution proposée, traitant la propagation de l'onde ultrasonore dans des milieux homogènes et isotropes en présence d'interfaces, et son interaction avec un défaut plan en décomposant le problème en sous problèmes indépendants pour une modélisation simple mais plus proches des configurations de contrôle ultrasonore déployées en usine et au **VRCF**.

II. Modélisation de l'interaction acoustique entre un faisceau acoustique et un obstacle plan rigide

Notre problématique est basée sur la diffusion des ondes acoustiques (ultrasonores) par un défaut dans un solide homogène et isotrope. L'augmentation d'intérêt pour la théorie de diffusion des ondes élastiques en raison des besoins dans les techniques d'évaluation non destructive a permis le développement de différentes méthodes pour décrire la diffusion de ces ondes par des cavités, des fissures et des inclusions dans les solides [32]. L'imagerie à ondes diffractées est un exemple de la diffusion des ondes acoustiques dans les solides inspectés [30]. Elle constitue aussi un problème inverse non linéaire car il n'existe pas de relation de dépendance explicite entre les champs observés et les paramètres de l'objet observé. De ce fait, le but est d'approcher ce problème par un modèle choisi pour décrire une configuration réelle. Ainsi, des approximations peuvent être considérées pour l'inversion afin d'approcher les configurations réelles par le biais de modèles linéaires. Ces approximations sont considérées connaissant la longueur d'onde de l'onde ultrasonore et les caractéristiques dimensionnelles du défaut.

Une littérature considérable aborde la théorie de la diffusion des ondes acoustiques et les méthodes développées pour traiter ce phénomène. Une grande partie de ce travail est résumée dans [41]. Une étude complète de la diffusion acoustique et électromagnétique par des disques et autres formes simples a été compilée dans [42]. Ainsi, connaissant l'onde

incidente et les caractéristiques de l'objet, il est possible de déterminer l'onde résultante suite à une interaction à l'aide de méthodes que nous aborderons dans la section suivante et qui peuvent être classées en deux grandes catégories.

- Les méthodes numériques
- Les méthodes analytiques

1. Modélisation selon les méthodes numériques et analytiques

i. Les méthodes numériques

Deux ingrédients sont nécessaires pour la modélisation numérique de la propagation et la diffraction des ondes acoustiques : un schéma d'intégration des lois de conservation (conditions aux limites, conditions initiales..) et une méthode de discrétisation des interfaces. En effet, ces méthodes proposent de résoudre la formulation différentielle de l'équation d'onde en termes de déplacement en l'absence de forces extérieures dans un solide isotrope et homogène, en discrétisant des équations dans lesquelles les valeurs de champ sont définies sur des nœuds de maillages. En cas de présence de défaut, les conditions aux limites sont définies sur les nœuds voisins du défaut. Parmi ces méthodes les plus répandues, il y a les méthodes de différences finies et les méthodes des éléments finis [32] [43]. En outre, les méthodes dites aux frontières connaissent un essor car proposent de résoudre les intégrales aux frontières en découpant la frontière en éléments de surface. Ces méthodes permettent de décrire des obstacles et des interfaces de géométries de forme quelconque. De plus, elles peuvent définir des conditions de contact imparfait linéaire ou non linéaire entre les différentes interfaces mises en jeu, notamment grâce au développement des méthodes d'interfaces [44] [45]. Elles permettent ainsi de décrire des modèles plus fins et des représentations plus précises.

En revanche, la précision des résultats dépend du choix des conditions aux limites et de la notion d'ordre élevé. Cette notion d'ordre est relative à l'ordre du développement asymptotique et aux termes utilisés pour résoudre le problème mathématique [46]. En effet, toutes les méthodes numériques employées pour décrire un modèle doivent avoir des ordres de précision identiques, la différence maximale acceptable étant d'un ordre. Autrement, la méthode d'ordre le plus bas dégrade la qualité globale des résultats. De même que la stabilité du modèle, cette dernière doit être observée à travers de multiples expériences numériques ou au mieux démontrée. Dans le cas contraire, les simulations sont inutilisables. Enfin, le respect de tous ces critères implique des contraintes matérielles, notamment la mémoire informatique requise et la possibilité de parallélisation des algorithmes pour diminuer le coût de calcul qui peut devenir considérable avec les ordres de précision envisagés. Ceci nous a donc amené à considérer d'autres méthodes avec des temps de calcul plus acceptables.

ii. Les méthodes analytiques

Il est difficile de définir une frontière entre les méthodes numériques et les méthodes analytiques. En effet, toutes les méthodes nécessitent une étude analytique pour aboutir à des calculs numériques. La motivation cruciale pour le développement des méthodes analytiques est la rapidité des calculs analytiques. Un autre intérêt pour le choix de ces méthodes est l'analyse théorique des solutions qui permettent parfois de déduire de ces dernières des propriétés générales du problème étudié, plus particulièrement leur comportement asymptotique. Les méthodes analytiques en acoustique sont adaptées à l'étude de la propagation des ondes dans les milieux homogènes et isotropes, elles sont classées dans la littérature en différentes catégories : les méthodes basées sur les représentations intégrales, les méthodes de perturbation, les méthodes de matrice de transfert, les méthodes asymptotiques, et la méthode de Wiener-Hopf [47] sont parmi les plus répandues.

Les méthodes basées sur les représentations intégrales considèrent que les ondes acoustiques sont créées par des sources d'extension finie, le champ émis est un faisceau incluant les effets de la diffraction. Ce dernier peut être modélisé par une source ponctuelle ou une superposition d'ondes planes. Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons à la représentation basée sur la superposition d'ondes planes car bien adaptées à l'étude des champs ultrasonores réfléchis et transmis au passage d'une interface [48].

Les méthodes de perturbation sont particulièrement adaptées à l'acoustique non linéaire ou des cas pour lesquels la propagation suit une direction privilégiée [49]. Quant aux méthodes de matrices de transfert, elles sont plus adaptées à la résolution du problème de propagation des ondes dans les milieux multicouches. Pour ces milieux, il est plus facile d'introduire une matrice globale qui est le produit de matrices locales permettant ainsi d'exprimer la continuité des contraintes et des déplacements aux interfaces [50].

Les méthodes asymptotiques sont particulièrement pertinentes pour une évaluation mathématique des intégrales ayant un caractère oscillant. Elles se classent principalement en deux grandes catégories; les méthodes de rayons comme l'**OG** ou la **GTD**, et les méthodes des sources comme l'**OP** ou la **PTD**.

Ces méthodes ont été développées pour étudier différents problèmes de diffusion des ondes acoustiques, en l'occurrence pour traiter l'interaction entre une onde et un défaut. Celles-ci conduisent à des solutions approchées aux équations intégrales en fonction du domaine de fréquence considéré. En effet, ces méthodes font souvent appel à des approximations connues lorsque les longueurs d'ondes sont grandes, petites ou du même ordre de grandeur devant la taille du défaut à étudier.

Notre problématique concerne les tubes pour le secteur du pétrole, les gammes dimensionnelles de ces produits varient entre 39 et 440 mm pour le diamètre externe et entre 4 et 30 mm pour l'épaisseur. La norme **API 5CT** [19] qui régit le secteur du pétrole, fixe

la profondeur maximale acceptable pour un défaut détecté à 5% de l'épaisseur nominale du tube inspecté. Ainsi la profondeur des défauts à identifier varie tel que le décrit l'Équation 2 :

$$5\% * [4; 30]mm = [0.2; 1.5]mm \quad \text{Équation 2}$$

Les fréquences de contrôle ultrasonore usuelles sur les bancs de contrôle automatiques dans les usines **Vallourec** varient de 2 à 5MHz. La longueur d'onde et la fréquence étant liées (Équation 3), il nous est donc possible selon la nature de l'onde (longitudinale ou transversale) dans les milieux de propagation considérés de statuer sur l'usage des approximations appropriées à l'aide de l'Équation 3 tel que :

$$D = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad \text{Équation 3}$$

Avec

- D Facteur relatif aux fréquences employées
- λ Longueur d'onde de l'onde longitudinale ou transversale
- a Grandeur caractéristique du défaut

La norme NF EN ISO 10893-10 [6] précise que le contrôle des tubes doit être effectué par une technique ultrasonore avec des ondes transversales. En considérant uniquement ces ondes transversales dans l'acier, nous constatons qu'au vue des fréquences d'inspection considérées, le facteur relatif au domaine de fréquences impliquées pour ce type d'onde varie entre 1 et 14.6 selon l'Équation 3. Nous pouvons considérer que le domaine de variation du facteur D donné par l'Équation 3 correspond aux **Hautes Fréquences (HF)** comme $D \geq 2\pi$.

2. Théorie des rayons pour la description de la propagation des ondes acoustiques

En optique, les rayons désignent les chemins parcourus par la lumière. Le principe fondamental de cette théorie, communément appelé « Principe de Fermat », stipule que la lumière se propage d'un point source P à un point d'observation O suivant un parcours qui minimise l'intégrale du chemin optique entre ces deux points [32]. Autrement dit, le chemin optique parcouru le long d'un trajet est stationnaire :

$$L(OP) = \int_P^O n(s). ds \quad \text{Équation 4}$$

Avec

- ds élément de longueur d'arc
- n indice de réfraction du milieu de propagation

Cette stationnarité des chemins optiques permet de définir des règles simples pour la géométrie des rayons en présence de frontières lisses ou d'interfaces lisses entre deux milieux différents. L'application de ces règles aboutit à la solution du problème de propagation des ondes selon l'Optique Géométrique (**OG**). Dans un milieu homogène régit par une équation de propagation unidimensionnelle, la propagation des ondes est simple et directe car l'indice de réfraction est constant. D'un point de vue mathématique, l'**OG** délivre une approximation asymptotique **HF** aux problèmes de propagation des ondes [39]. De ce fait, le rayon le plus simple reliant les points P et O est un rayon direct. Dans un milieu homogène, les rayons directs sont des lignes droites. C'est ainsi que Le rayon réfléchi, généré par un rayon incident sur une surface donnée, est également une ligne droite et appartient au plan défini par le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante au point d'impact. L'angle entre le rayon réfléchi et la normale est identique à celui entre le rayon incident et cette dernière. Le(s) rayon(s) réfracté(s) apparaît (apparaissent) quand un rayon incident dans le milieu (1) arrive(ent) sur l'interface le séparant du milieu (2) . Si ce dernier est homogène, alors le rayon réfracté est une ligne droite situé dans le plan défini par le rayon incident et la normale à l'interface [32] comme illustré dans la Figure 36. En résumé, l'**OG** est régie par les règles de Snell-Descartes.

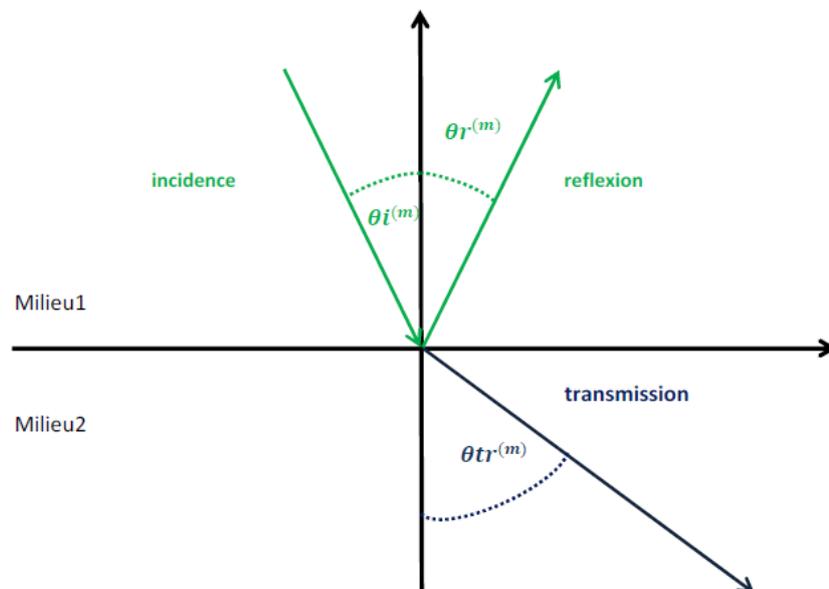


Figure 36 : différents rayons générés (incident, réfléchis et transmis) suite à un rayon incident sur une interface lisse entre deux milieux homogènes.

Selon l'**OG**, le problème de détermination du champ généré par des sources données peut être décomposé en deux parties :

1. La détermination des rayons définissant la phase indépendamment de son amplitude.
2. La détermination de l'amplitude.

La détermination de l'amplitude peut être réalisée, par des considérations physiques, en suivant la variation de l'intensité de l'onde le long du rayon sans tenir compte des rayons voisins comme définit dans l'Équation 5

$$\mathbf{u}(x) = \mathbf{u}_0(x)e^{ik\psi(x)} \quad \text{Équation 5}$$

Avec

$\psi(x)$ Terme de la phase
 $\mathbf{u}_0(x)$ Terme d'amplitude

Les concepts de base de la théorie des rayons sont également applicables à la propagation des ondes acoustiques dans les solides. Les détails de la théorie des rayons en elastodynamique ont été présentés [51]. De plus, plusieurs techniques mathématiques pertinentes pour obtenir des solutions ont été étudiées en détails par Achenbach [46]. Dans les solides, plusieurs types d'ondes peuvent se propager. Les ondes longitudinales peuvent coexister avec les ondes transversales qui dépendent de la résistance aux contraintes de cisaillement et sont donc des déformations propres à l'état solide. Dans un milieu solide homogène et isotrope, le vecteur déplacement peut être exprimé en termes de potentiel scalaire ψ^L , et un potentiel vecteur $\boldsymbol{\psi}^T$ suivant la relation :

$$\mathbf{u} = \nabla\psi^L + \nabla \wedge \boldsymbol{\psi}^T \quad \text{Équation 6}$$

Avec la condition de jauge suivante :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\psi}^T = 0 \quad \text{Équation 7}$$

Ainsi, lorsqu'une perturbation est appliquée à la surface d'un solide, les rayons relatifs aux ondes longitudinales et transversales sont générés. Après impact sur une interface, des rayons réfléchis et réfractés sont générés. Ces problèmes de réflexion et de réfraction sont bien compris. En revanche, la description de l'**OG** faisant appel aux rayons incidents, réfléchis et réfractés n'est pas suffisante pour une analyse complète des problèmes de propagation (diffusion) des ondes. En effet, L'**OG** n'est valable que dans les directions de réflexion spéculaire. Elle se montre en difficulté dans les problèmes où on est en présence d'obstacles ce qui est contraire à la réalité physique. Des théories plus élaborées permettent de pallier à ces insuffisances en introduisant des rayons de type plus complexes notamment les rayons diffractés.

En outre, d'un point de vue analytique, un défaut correspond à une fissure plate (surface plane) à travers laquelle le déplacement peut être discontinu [32]. La formulation exacte du champ généré par la présence d'une fissure est un problème de valeurs aux limites fixes, dont la solution exacte répond à une ou généralement plusieurs équations intégrales singulières des discontinuités du déplacement. En revanche, pour une fissure semi-infinie

une solution analytique peut facilement être obtenue. La seconde partie de ce chapitre s'attarde sur la formulation du problème canonique bien connu de la diffraction par un demi-plan semi-infini.

III. Formulation du problème de diffraction

1. Notions basiques des problèmes de diffraction en acoustique

Tout d'abord, rappelons qu'une onde diffusée est générée lorsqu'un obstacle de dimensions finies est placé dans un champ d'ondes incidentes. La diffusion est un phénomène important de la propagation des ondes. Dans l'approche classique pour un problème de diffusion du champ, le champ diffusé est la différence entre le champ total ψ^t , et le champ incident ψ^i tel que :

$$\psi = \psi^t - \psi^i \quad \text{Équation 8}$$

L'**OG** a été initialement utilisée pour la description des phénomènes optiques, puis prolongée à la description des phénomènes de propagation des ondes acoustiques. Les trajets acoustiques suivent le principe de Fermat. Les angles de réflexion et de réfraction sur une interface illustrés dans la Figure 36 sont obtenus par la loi de Snell-Descartes tel que :

$$k_{\text{incidente}}^{(m)} \sin(\theta_{\text{incidente}}) = k_{\text{reflechie}}^{(m)} \sin(\theta_{\text{reflechie}}^{(m)}) = k_{\text{transmise}}^{(m)} \sin(\theta_{\text{transmise}}^{(m)}); m = L, T \quad \text{Équation 9}$$

Avec

- m Indice désignant le type d'onde (longitudinale ou transversale) se propageant dans le milieu considéré.
- $k_j^{(m)}$ vecteur d'onde du type d'onde considérée.
- $\theta_j^{(m)}$ Angle entre le vecteur d'onde du type d'onde considérée et la normale à la surface d'impact.

Les amplitudes sont associées aux rayons et respectent la loi de conservation de l'énergie. Ainsi selon l'**OG**, le champ total ψ^t s'écrit en fonction du champ incident ψ^i , réfléchi ψ^r et transmis ψ^{tr} tel que :

$$\psi^t = \psi^i + \psi^r + \psi^{tr} \quad \text{Équation 10}$$

En revanche, l'**OG** ne peut pas tenir compte des phénomènes liés à la diffraction. En effet, pour des ondes longitudinales et transversales, incidentes avec un angle d'incidence arbitraire sur la surface d'un plan libre de contraintes, le champ diffusé (généré) contient en

plus des trois types de rayons considérés par l'OG, des rayons diffractés et/ou des rayons complexes observés expérimentalement (ondes rampantes et ondes de tête) [52] [53]. Dans la suite, nous nous intéresserons uniquement à la description des rayons diffractés. Le terme de rayons complexes désignent une description des rayons selon des courbes complexes et ou l'indice de réfraction est formulé de manière analytique ou analytique par morceaux [32]. Nous avons donc décidé de s'affranchir de ces rayons complexes pour des raisons de simplification des calculs.

En résumé, lorsqu'une onde acoustique rencontre un obstacle impénétrable (aux points d'impact Q_1, Q_2 illustrés dans la Figure 37), l'OG prédit la présence derrière celui-ci d'une ombre où la pression acoustique est nulle. Or, l'expérience montre qu'il existe des rayons diffractés qui pénètrent dans cette zone d'ombre. Selon l'Équation 8, le champ diffusé peut comprendre selon la zone d'observation le champ généré par l'onde réfléchi par le côté éclairé de l'obstacle considéré, le champ annulant le champ généré par l'onde incidente dans la zone d'ombre ainsi que le champ de l'onde diffractée dans la zone d'ombre illustrée Figure 37.

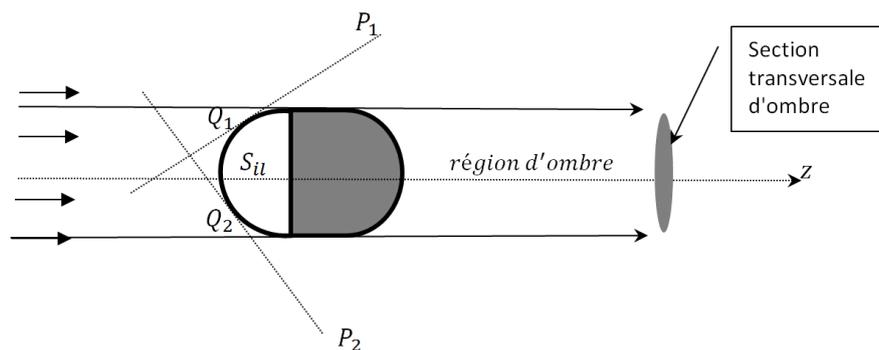


Figure 37 : S_{ill} est la partie illuminée de la surface de l'objet par les sources diffusantes aux points Q_1 et Q_2 . La partie sombre représente la région d'ombre géométrique de l'objet [39].

En considérant l'approximation linéaire, le potentiel de vitesse des ondes acoustiques satisfait l'équation suivante [39]

$$\nabla^2 u + k^2 u = I \quad \text{avec} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad \text{Équation 11}$$

Avec

- k Nombre d'onde
- λ Longueur d'onde
- ω Fréquence angulaire
- c Célérité du son
- I Source de contraintes

La dépendance par rapport au temps $e^{-i\omega t}$ est omise dans la suite. La pression acoustique et la vitesse \vec{v} des particules dans le fluide, causée par les ondes acoustiques sont déterminées à travers le potentiel de vitesse :

$$p = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega\rho u, \quad \vec{v} = \nabla u \quad \text{Équation 12}$$

Avec

ρ Masse volumique du fluide

La condition aux frontières imposées sur la surface d'un objet parfaitement réfléchissant et de surface rigide est la condition de Neumann donnée par l'Équation 13:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \hat{n} \cdot \nabla u = 0 \quad \text{Équation 13}$$

Où u est le champ total qui est la somme des ondes incidentes et diffusées. L'opérateur gradient ∇ est appliqué aux coordonnées d'intégration du Point source Q . \hat{n} désigne un vecteur unitaire normal à la surface de diffusion comme l'illustre la Figure 38 [39].

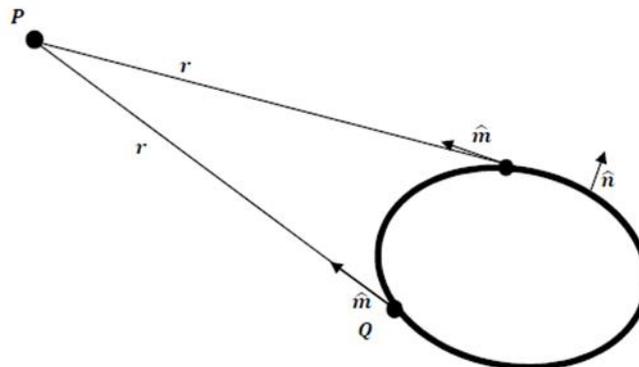


Figure 38 : surface de diffusion S . r est la distance entre le pont d'observation P situé dans le champ lointain et le point d'intégration Q situé sur la surface S . \hat{m} vecteur unitaire directeur du trajet \overrightarrow{QP} . [39]

Pour finaliser la formulation du problème de diffraction et pour s'assurer de l'unicité de ces solutions, les équations précédentes et la condition aux frontières sont complétées par la condition de radiation de Sommerfeld pour le champ diffusé [54].

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left(\frac{\partial u}{\partial r} - iku \right) = 0 \quad \text{Équation 14}$$

Par ailleurs, Cette condition de radiation figure dans la **Théorie Mathématique de Diffraction** (communément appelée **MTD** comme **Mathematical Theory of Diffraction**) introduite par Sommerfeld [55]. Grâce à cette théorie, des solutions exactes aux problèmes de diffraction

ont été établies pour des géométries canoniques telles que : sphère, cylindre infini, dièdre ou encore son cas particulier le demi-plan.

2. Les extensions asymptotiques de l'Optique pour la description des phénomènes de diffraction

Comme vu précédemment, les rayons réfléchis, réfractés ne sont pas suffisants pour décrire les problèmes de diffusion des ondes acoustiques, car ils ne peuvent pas tenir compte du phénomène de diffraction. Des extensions nécessaires à l'**OG** ont été étudiées. Nous présenterons dans la suite les différentes approches que nous avons étudiées pour la prise en compte du phénomène de la diffraction d'un faisceau ultrasonore composés de rayons et leur interaction avec un obstacle plan rigide.

i. La théorie géométrique de la diffraction – GTD

Keller s'est appuyé sur les travaux réalisés par Sommerfeld dans sa **Théorie Mathématique de la Diffraction (MTD)** [55] pour introduire une extension de l'**OG** connue sous la **Théorie Géométrique de la Diffraction (GTD)** [40]. Il s'agit du développement asymptotique de la solution exacte introduite par Sommerfeld.

Le principe de base de la **GTD** est que les ondes se propagent le long de rayons comme dans le cas de l'**Optique Géométrique**. Cependant, cette théorie ajoute aux trois types de rayons de l'**OG**, les rayons diffractés et les rayons complexes (non étudiés dans le cadre de ces travaux). La **GTD** distingue trois types de diffraction illustrés dans la Figure 39 :

1. Diffraction par une arête.
2. Diffraction par une pointe.
3. Diffraction par une surface régulière.

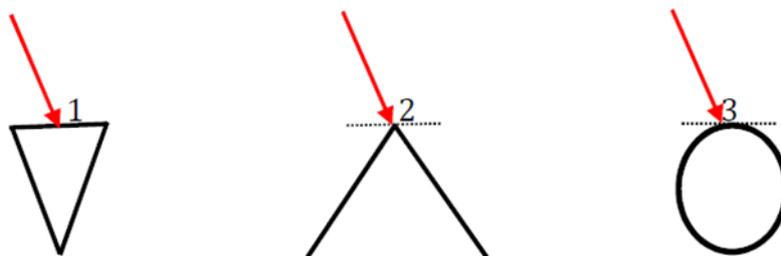


Figure 39 : trois types de diffraction prise en compte par la **GTD**

Dans la suite, il est implicite que les ondes acoustiques (ultrasonores) sont harmoniques. Toutefois, le terme $e^{-i\omega t}$ sera omis.

Comme précisé précédemment, la **GTD** s'appuie sur le développement asymptotique de la solution exacte donnée par la **MTD**. Cette théorie a permis l'obtention de solution exacte pour des géométries canoniques. Le cas du dièdre ainsi que son cas particulier le demi-plan illustré dans la Figure 40, pour lequel $\alpha = 2\pi$, constituent des problèmes canoniques de la diffraction des ondes acoustiques par des obstacles de ces géométries [46, 39].

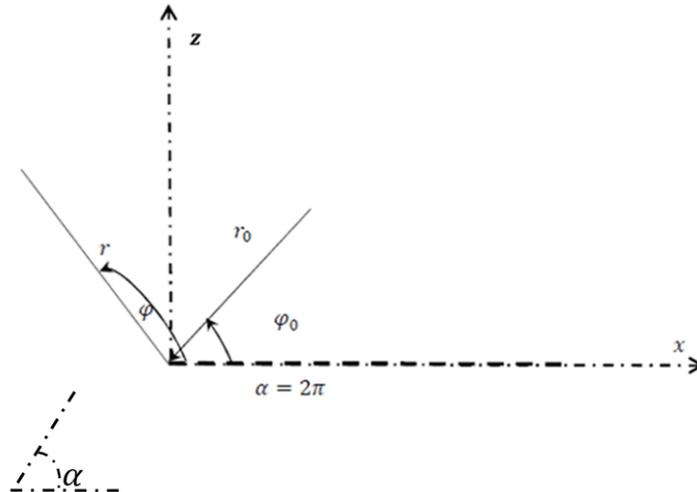


Figure 40 : schéma du problème canonique de la diffraction par un demi-plan .

La Figure 40 illustre le schéma du problème de diffraction pour le cas du demi-plan. Nous nous intéressons particulièrement au cas du demi-plan car d'un point de vue analytique, un défaut de type fissure peut être considéré comme un plan semi-infini pour lequel des solutions analytiques sont connues. Ceci se justifie par un second principe sur lequel est basée la **GTD**, à savoir que les rayons diffractés ne dépendent que des propriétés locales du rayon incident ainsi que du point de l'objet où opère la diffraction.

Considérons donc le problème illustré dans la Figure 41 : une onde acoustique plane est incidente sur un demi-plan. La surface supérieure de ce dernier est éclairée par l'onde incidente u^i avec un angle d'incidence φ_0 . Une partie de l'énergie de l'onde incidente est réfléchiée u^r sur la surface supérieure du demi-plan et se propage suivant la direction $\varphi = \pi - \varphi_0$. Une autre partie de l'énergie de cette onde incidente est transmise à travers la zone limite du demi-plan suivant la direction $\varphi = \pi + \varphi_0$.

De ce fait, la **GTD** distingue trois zones différentes illustrées Figure 42:

- Zone éclairée par la présence de l'onde incidente et en présence de l'onde réfléchiée.
- Zone éclairée uniquement par l'onde incidente, cette zone est également appelée zone d'ombre de l'onde réfléchiée.
- Zone d'ombre absolue, cette zone est également appelée zone d'ombre de l'onde transmise.

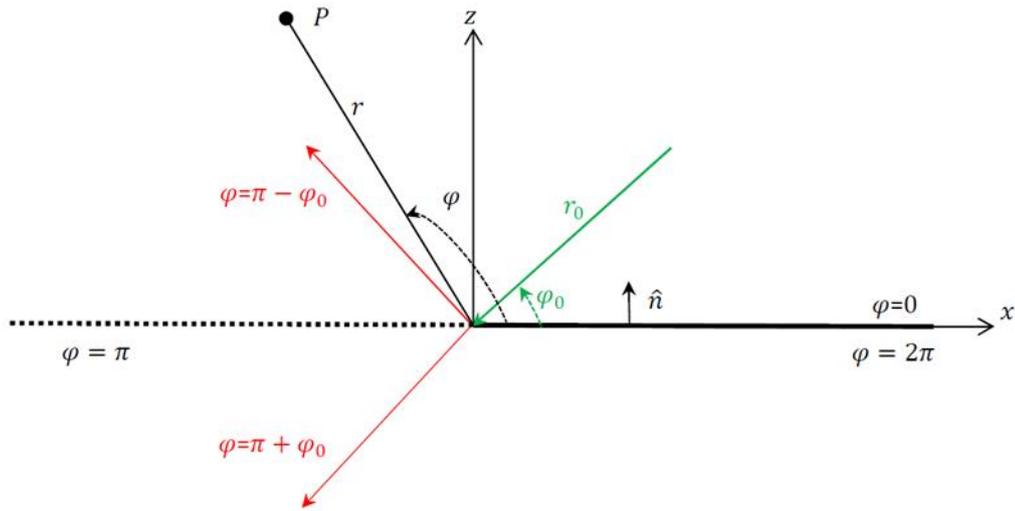


Figure 41 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) par un demi-plan $\varphi = 2\pi$

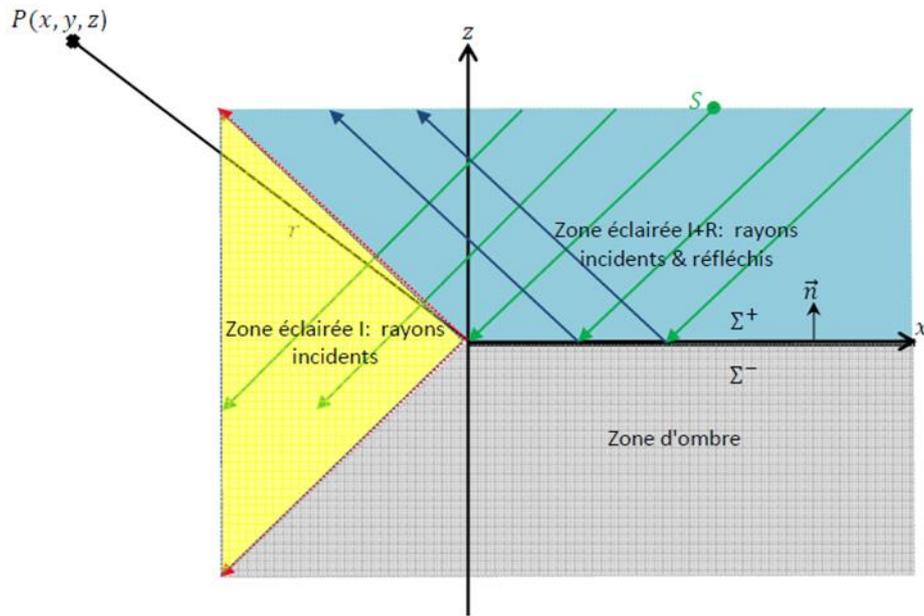


Figure 42 : les trois zones définies par la **GTD** pour le problème de diffraction par un demi-plan (Figure 41). Les rayons diffractés sont présents à toutes ces zones

La direction $\varphi = \pi - \varphi_0$ représente la limite de la zone éclairée par l'onde réfléchie et constitue ainsi la première frontière d'ombre. Quant à la direction $\varphi = \pi + \varphi_0$, elle constitue la seconde frontière d'ombre entre le champ incident et la zone d'ombre absolue. De ce fait, la **GTD** propose de prolonger l'**OG** en rajoutant aux rayons prédits par cette dernière, des rayons diffractés lorsque les rayons géométriques interagissent avec l'extrémité, l'arête, ou la courbure d'un objet. Le champ total u^t est la somme du champ selon l'**OG** et du champ diffracté tel que définit Équation 15 :

$$u^t = u^{OG} + u^d \quad \text{Équation 15}$$

La nature des composantes de u^d dépend de la discontinuité de l'objet sur laquelle l'onde plane est incidente. Ainsi, une onde incidente sur une pointe génère des rayons diffractés formant une onde sphérique. L'interaction d'une onde incidente sur une arête génère des rayons diffractés repartis autour d'un cône dont l'axe est l'arête et dont le demi-angle au sommet est égal à l'angle que forment le rayon incident et l'arête. Enfin, l'interaction entre une onde et une surface régulière génère des rayons rampants aux frontières d'ombre [39]. Ces mêmes rayons rampants donnent naissance à des rayons diffractés dans le volume [32]. Nous rappelons, que dans le cadre de ces travaux nous nous intéressons uniquement aux rayons diffractés.

Le sous problème consistant en l'interaction d'un faisceau ultrasonore et d'un défaut plan pourra donc être étudié à l'aide du problème de l'interaction d'une onde plane et d'un demi-plan est illustré Figure 41. Le demi plan dont les surfaces sont planes et semi-infinies ($\varphi = 0$ et $\varphi = 2\pi$), est situé dans un milieu homogène est excité par une onde plane incidente suivant la direction $\varphi = \varphi_0$, la source de l'onde est située à $r = r_0$. En champ lointain, le champ satisfait l'Équation 16 tel que :

$$\Delta u + k^2 u = 0$$

Équation
16

Pour une onde plane incidente, le champ incident depuis la direction $\varphi = \varphi_0$ au point d'observation P situé à une distance r du bord éclairé (Figure 41) s'écrit :

$$u^{inc} = u_0 e^{-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)}$$

Équation
17

Le champ diffracté généré par une onde plane incidente sur un demi-plan rigide découle de l'expression du champ total généré par un coin rigide parfaitement réfléchissant donnée par Sommerfeld [39] :

$$u = u_0 [u(kr, \varphi - \varphi_0) + u(kr, \varphi + \varphi_0)]$$

Équation
18

Avec pour le cas du demi-plan [39], la fonction $u(kr, \psi)$ s'écrit à l'aide de la fonction de Bessel $J_{\frac{l}{2}}(kr)$ tel que:

$$u(kr, \psi) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon_l e^{-i\frac{\pi}{4}l} J_{\frac{l}{2}}(kr) \cos \frac{l}{2} \psi$$

Équation
19

Et

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2}, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = 1$$

Équation
20

Ainsi, Le champ diffracté généré par une onde plane incidente en présence d'un demi-plan parfaitement réflecteur et rigide s'écrit au moyen de séries [39]. Le développement asymptotique au 1er ordre donne la formule suivante :

$$u_d = u_0[v(kr, \varphi - \varphi_0) + v(kr, \varphi + \varphi_0)]$$

Équation
21

Où

$$v(kr, \varphi \pm \varphi_0) = -\frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \frac{e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\cos(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2})} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-krs^2} ds$$

Équation
22

La fonction $v(kr, \varphi \pm \varphi_0)$ peut-être évaluée asymptotiquement à l'aide de la méthode du point de col [39] et sous réserve de respect de la condition suivante $\sqrt{kr} \left| \cos\left(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2}\right) \right| \gg 1$. Ainsi, l'expression asymptotique de l'Équation 22 s'écrit :

$$v(kr, \varphi \pm \varphi_0) = -\frac{1}{2\sqrt{2\pi kr}} \frac{e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\cos(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2})}$$

Équation
23

Par conséquent, le champ diffracté selon l'Équation 21 peut s'écrire

$$u_d \sim u_0 g(\varphi, \varphi_0) \frac{e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2\pi kr}}$$

Équation
24

Où pour le cas du demi-plan, la fonction $g(\varphi, \varphi_0)$ s'écrit:

$$g(\varphi, \varphi_0) = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right)} \right)$$

Équation
25

La fonction $g(\varphi, \varphi_0)$ décrit diagramme de directivité des « edge waves » [39]. L'expression asymptotique (Équation 24) découle de l'expression asymptotique introduite par Sommerfeld, pour le cas particulier du demi-plan. Elle vérifie la condition aux frontières selon Newmann $\frac{\partial u_h}{\partial n} = 0$. Nous pouvons ainsi constater que pour le cas du demi-plan la

fonction g aboutit à l'aide de développement asymptotique au coefficient de diffraction présenté par Keller [40] (Équation 26).

$$D_{GTD} = -\frac{1}{2} \frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi k}} \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right)} \right) \quad \text{Équation 26}$$

Par conséquent, le champ total selon la **GTD** (Équation 15) généré par une onde plane incidente sur un demi-plan peut être exprimé asymptotiquement tel que :

$$u^t = u^{OG} + u_{GTD}^d = u^{OG} + u_0 * D_{GTD} * \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \quad \text{Équation 27}$$

Avec

u_0 Amplitude du champ incident
 r Distance d'observation au point de diffraction

L'expression asymptotique (Équation 25) désigne un ensemble continu de rayons diffractés. Ils apparaissent à cause de la diffraction mais se propagent à partir du bord selon l'approximation asymptotique du premier ordre comme des rayons ordinaires [39] [32]. Toutefois, cette expression asymptotique présente un inconvénient, elle n'est pas valide à proximité des frontières d'ombre illustrées Figure 41 et qui sont $\varphi \approx \pi + \varphi_0$ et $\varphi \approx \pi - \varphi_0$. En effet, comme le montre la Figure 43, les amplitudes du champ total selon (Équation 26) divergent au voisinage de ces zones. De plus, l'expression asymptotique du champ total selon la **GTD** (Équation 27) implique la vérification de la condition $\sqrt{kr} \left| \cos\left(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2}\right) \right| \gg 1$ [39].

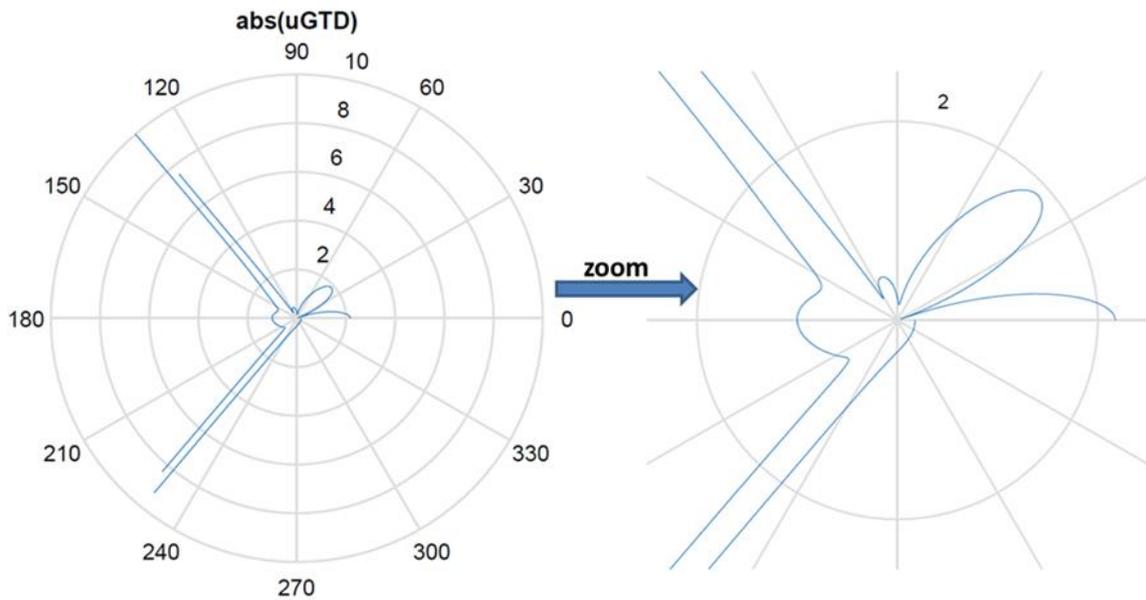


Figure 43 : champ total selon la GTD pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230\text{ms}^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5\text{MHz}$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.

ii.Approximation scalaire de l'Optique Physique – l'Approximation de Kirchhoff

La théorie scalaire de l'Optique Physique (OP) suggérée par [56] est applicable aux ondes acoustiques et est connue en acoustique comme l'Approximation de Kirchhoff [39]. L'Approximation de Kirchhoff est une méthode asymptotique dite méthode sources. Contrairement à la GTD qui est une méthode dite rayons, l'Approximation de Kirchhoff est basée sur une approche de champ généré par des sources surfaciques situées sur la surface de l'obstacle illuminé par une onde incidente. En acoustique, le champ de surface selon la condition de Neumann (obstacle rigide) est égal à la pression acoustique sur la surface de l'objet illuminé. Le potentiel de vitesse s'exprime comme suit [39] :

$$u_0 = 2 * u^i \quad \text{Équation 28}$$

En considérant que le champ u_0 rerayonne ensuite un champ diffusé u^{diff} dans l'espace. Ainsi, le champ total u^t s'exprime :

$$u^t = u^i + u^{diff} \quad \text{Équation 29}$$

Où u^i est le champ incident, généré par une onde plane d'incidence φ_0 sur la surface éclairée Σ^+ du demi-plan illustrée Figure 44 tel que :

$$u^i = A_0 e^{-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)}$$

Équation
30

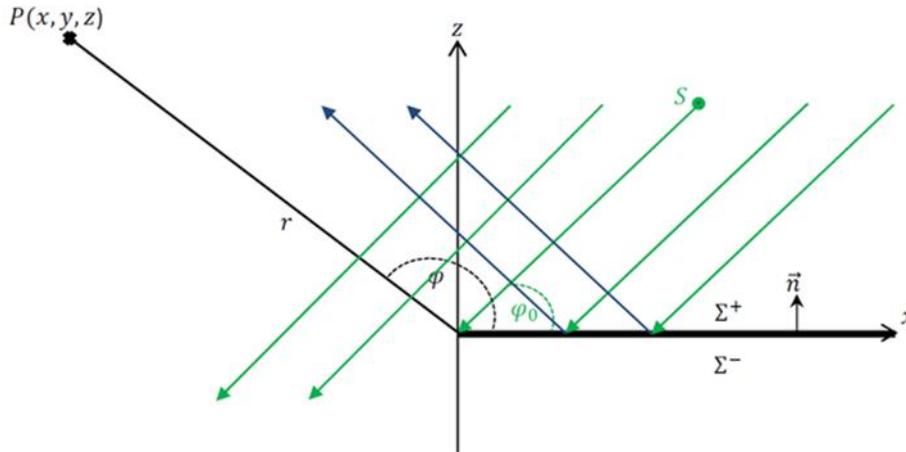


Figure 44 : surface du demi-plan Σ^+ par une onde plane d'incidence φ_0 .

Par application de l'Approximation de Kirchhoff, le champ total (champ de surface) est nul sur la surface ombrée Σ^- : $u^t(\Sigma^-) = 0$, et le champ total sur la surface éclairée Σ^+ est obtenu en appliquant l'OG (Figure 44). En appliquant le théorème de Green, nous pouvons calculer le champ diffusé u^{diff} en un point d'observation $x(x, y = 0, z)$ de l'espace par l'intégrale suivante [39] :

$$u^{diff}(x) = \int_{\Sigma} (u_0(x') \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(x, x') - \frac{\partial u_0(x')}{\partial \mathbf{n}} G(x, x')) d\Sigma$$

Équation
31

Avec

$x'(\xi, \zeta, 0)$ Variable d'intégration qui désigne le point courant sur la surface Σ^+ selon l'axe x et l'axe z

$G(x, x')$ est la Fonction de Green et s'exprime suivant [39] :

$$G(x, x') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{ik|x-x'|}}{|x-x'|}$$

Équation
32

Avec

$|x - x'|$ Distance entre le point d'observation et le point courant sur la surface Σ .

$$|x - x'| = \sqrt{(x - \xi)^2 + \zeta^2 + z^2}$$

Pour un demi plan rigide, $\frac{\partial u_0(x')}{\partial \mathbf{n}}$ est nul, et par application de l'OG selon l'Équation 28, le champ de surface sur la surface éclairée Σ^+ devient :

$$u_0(x') = 2u^i(\varphi = 0) = 2A_0 e^{-ik\xi \cos\varphi_0}$$

Équation
33

L'Équation 31 s'exprime donc sous la forme suivante où l'intégration s'effectue sur la surface éclairée du demi-plan Σ^+ avec $0 < \xi < +\infty$ (Figure 44).

$$u^{diff}(x) = \int_{\Sigma^+} 2A_0 e^{-ik\xi \cos\varphi_0} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} G(x, x') d\Sigma^+ \quad \text{Équation 34}$$

$$= \frac{A_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} e^{-ik\xi \cos\varphi_0} d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{e^{ik(\sqrt{(x-\xi)^2+z^2+\zeta^2})}}{\sqrt{(x-\xi)^2+z^2+\zeta^2}} d\zeta$$

Où l'intégration sur la variable ζ peut être exprimée via la fonction de Hankel [39] :

$$H_0^{(1)}(kd) = \frac{1}{i\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{ik\sqrt{d^2+\zeta^2}}}{\sqrt{d^2+\zeta^2}} d\zeta, \quad \text{Équation 35}$$

$$d = (x - \xi)^2 + z^2$$

Au moyen de différents changements de variables, il est possible d'obtenir les expressions asymptotiques du champ diffracté de l'**OP**. Le détail des calculs est disponible dans [39]. Ainsi, le champ diffusé par une onde incidente plane sur un demi-plan peut s'écrire selon la région d'observation illustrée dans la Figure 41 comme suit (Équation 36) :

$$u^{diff} = \begin{cases} u_0 v^+(kr, \varphi, \varphi_0) + \begin{cases} u_0 e^{-ikr \cos(\varphi + \varphi_0)}, & 0 < \varphi \leq \pi - \varphi_0 \\ 0, & \pi - \varphi_0 < \varphi < \pi \end{cases} \\ u_0 v^-(kr, \varphi, \varphi_0) + \begin{cases} 0, & \pi \leq \varphi < \pi + \varphi_0 \\ -u_0 e^{-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)}, & \pi + \varphi_0 < \varphi < 2\pi \end{cases} \end{cases} \quad \text{Équation 36}$$

L'expression du champ diffusé selon l'Équation 36 désigne le champ diffusé selon l'**OP** depuis la surface éclairée du demi-plan (Σ^+ : $\varphi_0 = 0$). Les fonctions $v^\pm(kr, \varphi, \varphi_0)$ dans l'Équation 36 sont des fonctions intégrales [39] définies sur un contour D_0 illustré Figure 45. Pour le cas d'un obstacle rigide, ces fonctions sont définies selon l'Équation 37 :

$$v^\pm(kr, \varphi, \varphi_0) = \pm \frac{1}{2\pi i} \int_{D_0} \frac{e^{ikr \cos\zeta} \sin(\zeta \pm \varphi)}{\cos(\zeta \pm \varphi) + \cos\varphi_0} d\zeta \quad \text{Équation 37}$$

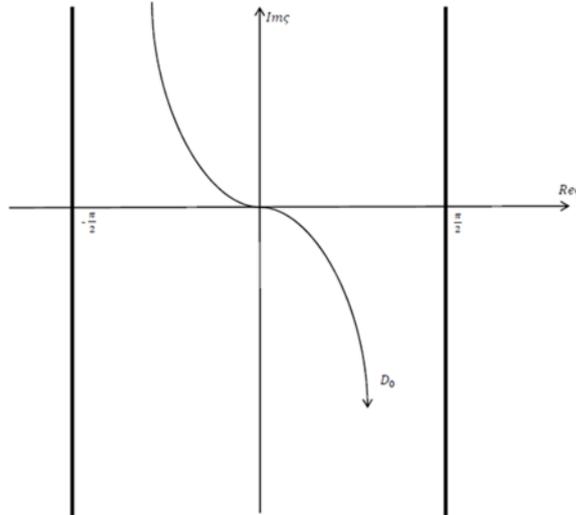


Figure 45 : contour d'intégration pour l'Équation 36

À partir de l'Équation 37, un développement asymptotique peut être réalisé afin d'aboutir au coefficient de diffraction de Kirchhoff [39]. En introduisant le changement de variable = $\sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}}\sin\frac{\zeta}{2}$, l'Équation 37 peut s'écrire sous la forme:

$$v^{\pm}(kr, \varphi, \varphi_0) = \mp \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{i(kr + \frac{\pi}{4})} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(\zeta \pm \varphi) e^{-krs^2}}{[\cos(\zeta \pm \varphi) + \cos\varphi_0] \cos\frac{\zeta}{2}} ds \quad \text{Équation 38}$$

Puis la méthode de la descente rapide conduit à l'expression asymptotique suivante [39] :

$$v^{\pm}(kr, \varphi, \varphi_0) \sim - \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi + \cos\varphi_0} \frac{e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2\pi kr}} \quad \text{Équation 39}$$

Cette expression asymptotique (Équation 39) est valide sous la condition $\sqrt{kr} |\cos(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2})| \gg 1$.

En effet, elle est valable en dehors des frontières de l'**OG**, où le champ diffracté a une structure de rayons et peut être interprété en termes de rayons diffracté par une arête

Ainsi, le champ total selon l'Approximation de Kirchhoff devient :

$$u^t = u^i + u^{diff} = u^{OG} + u_{KA}^d = u^{OG} + u_0 * D_{KA} * \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \quad \text{Équation 40}$$

Où le coefficient de Diffraction selon l'Approximation de Kirchhoff (**KA**) D_{KA} dans l'Équation 40 est obtenu à partir de l'Équation 39 et s'écrit :

$$D_{KA} = -\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi + \cos\varphi_0} \frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi k}}$$

$$= -\frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{2\pi k}} * \left[\tan\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right) \right]$$

Équation
41

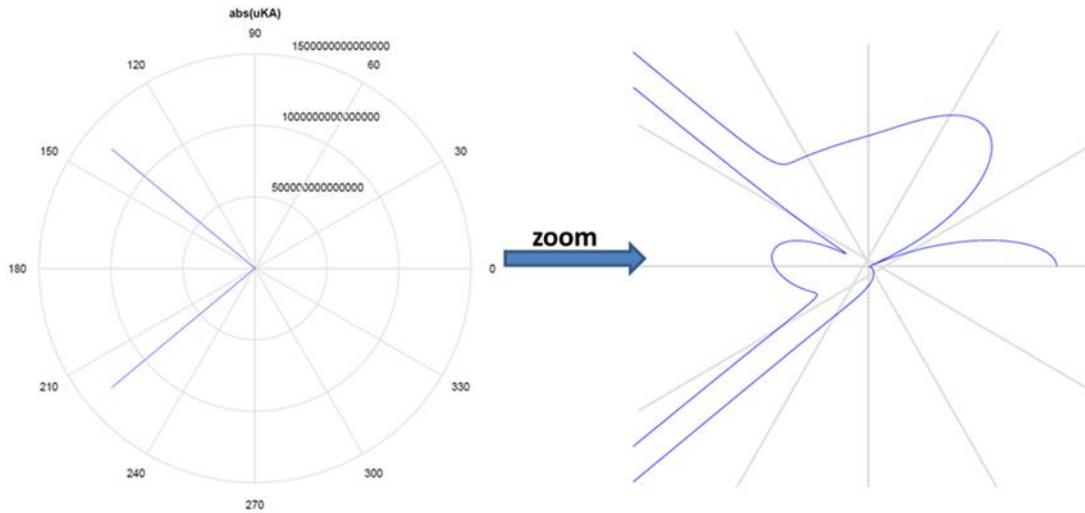


Figure 46 : champ total selon l'Approximation de Kirchhoff pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230\text{ms}^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5\text{MHz}$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde.

A l'instar de la **GTD**, L'Approximation de Kirchhoff selon son expression asymptotique (que nous appellerons **KA** dans la suite de ce document) présente un inconvénient, elle n'est pas valide à proximité des frontières d'ombre $\varphi \approx \pi + \varphi_0$ et $\varphi \approx \pi - \varphi_0$. Comme le montre la Figure 46, le champ total prédit selon **KA** présente des amplitudes très importantes au voisinage de ces régions. Or, ces prédictions d'amplitudes ne correspondent pas à la réalité quand les conditions de validité de cette approximation $\sqrt{kr}|\cos(\varphi \pm \varphi_0)/2| \gg 1$ ne sont pas vérifiées.

Une correction de cette erreur a été proposée dans [57] en s'inspirant des travaux d'UFIMTSEV et sa **Théorie Physique de la Diffraction** [39]. En effet, Bo Lu dans [57] propose d'estomper les singularités de la **GTD** à l'aide de celles de l'Approximation de Kirchhoff. Cette correction est étudiée dans le paragraphe suivant.

iii.Approximation issue de la Théorie Physique de la Diffraction – Kirchhoff Raffiné

Comme constaté dans les paragraphes précédents, les expressions asymptotiques issues de la **GTD** et de l'**OP**, présentent toutes les deux des singularités au niveau des frontières d'ombre identifiées comme $\varphi \approx \pi + \varphi_0$ et $\varphi \approx \pi - \varphi_0$. De ce fait, Bo Lu [57] en s'inspirant

des travaux de UFIMTSEV [39] propose une correction de l'erreur de L'Approximation de Kirchhoff pour la prédiction du champ diffracté en ajoutant à ce dernier un facteur correcteur issu d'une combinaison des coefficients de la **GTD** et de **KA**. Rappelons que pour ces deux approximations, le champ total diffusé est donné par les expressions suivantes (Équation 27) et (Équation 40). Ainsi, [57] propose de réécrire le champ total diffusé comme suit :

$$u^t = u^{OG} + u_{GTD}^d = (u^{OG} + u_{KA}^d) + u_{GTD}^d - u_{KA}^d = u_{KA}^t + u_{GTD}^d - u_{KA}^d$$

$$= u_{KA}^t + u_{KAR}^d$$
Équation 42

L'Équation 42 aboutit à la réécriture du champ total à l'aide du terme de correction D_{KAR} proposé par [57] tel que :

$$u^t = u_{KA}^t + u_0 \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} D_{KAR}$$
Équation 43

Cette réécriture peut être justifiée car la contribution du champ diffracté dans l'intégrale de Kirchhoff (Équation 34) a la même structure que celle du champ diffracté selon la **GTD**. De plus, ces deux approximations possèdent les mêmes frontières d'ombre. Ainsi, cette correction D_{KAR} consiste en la soustraction des deux coefficients de diffraction D_{GTD} et D_{KA} tel que :

$$D_{KAR} = D_{GTD} - D_{KA}$$

$$= \frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{2\pi k}} * \left[\tan\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right) \right]$$

$$- \frac{1}{2} \frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi k}} \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2}\right)} + \frac{1}{\cos\left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2}\right)} \right)$$

$$= \frac{e^{i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{2\pi k}} \left[\frac{\sin\left(\frac{(\varphi - \varphi_0)}{2}\right) - 1}{\cos\left(\frac{(\varphi - \varphi_0)}{2}\right)} + \frac{\sin\left(\frac{(\varphi + \varphi_0)}{2}\right) - 1}{\cos\left(\frac{(\varphi + \varphi_0)}{2}\right)} \right]$$
Équation 44

La Figure 47 illustre le module du coefficient correcteur D_{KAR} en fonction de l'angle d'observation. Ce module peut être considéré comme l'approximation asymptotique de la composante non-uniforme du champ diffusé, introduit par UFIMTSEV dans sa **Théorie Physique de Diffraction (PTD)**, comme le champ de franges [39].

Si cette solution appelée par [57] **Kirchhoff Approximation Raffiné (KAR)** propose de corriger les singularités des deux précédentes méthodes asymptotiques, elle reste également valable sous la condition $\sqrt{kr} \left| \cos\left(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2}\right) \right| \gg 1$. Par ailleurs, cette correction ne permet pas

vraiment de s'affranchir de ces singularités comme le montre la Figure 47 pour des angles d'observation correspondants aux deux pôles $\varphi = \pi \pm \varphi_0$. Ces singularités au niveau des pôles sont dues à la construction des coefficients de diffraction selon la **GTD** et **KA**. En effet, ces approximations font appel à la méthode de la descente rapide. Or cette méthode est valable uniquement en dehors des pôles.

Les travaux présentés dans [57] ont été repris dans [58]. La continuité de ces travaux ont permis d'aboutir à un modèle permettant la prédiction des échos provenant d'un défaut de taille finie ($\geq 2\text{mm}$) débouchant ou situé dans la paroi interne de la pièce à inspecter, droits ou inclinés, pour des configurations de contrôle variées. Cette correction donne des résultats finis dans quasiment toutes les directions. En revanche, la taille des défauts à caractériser pour notre problématique est de dimension inférieure à 2mm (Équation 2, p 58). Cette dernière est de l'ordre de 0.2 à 1.5mm. De ce fait, nous avons choisi de nous intéresser plus particulièrement à la **PTD** et certaines solutions étudiées par UFIMTSEV [39]. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons la particularité de la **PTD** et nous détaillerons les calculs adoptés pour proposer les deux solutions découlant de cette théorie et que nous avons choisis d'intégrer à notre modèle en plus des approximations asymptotiques présentées précédemment.

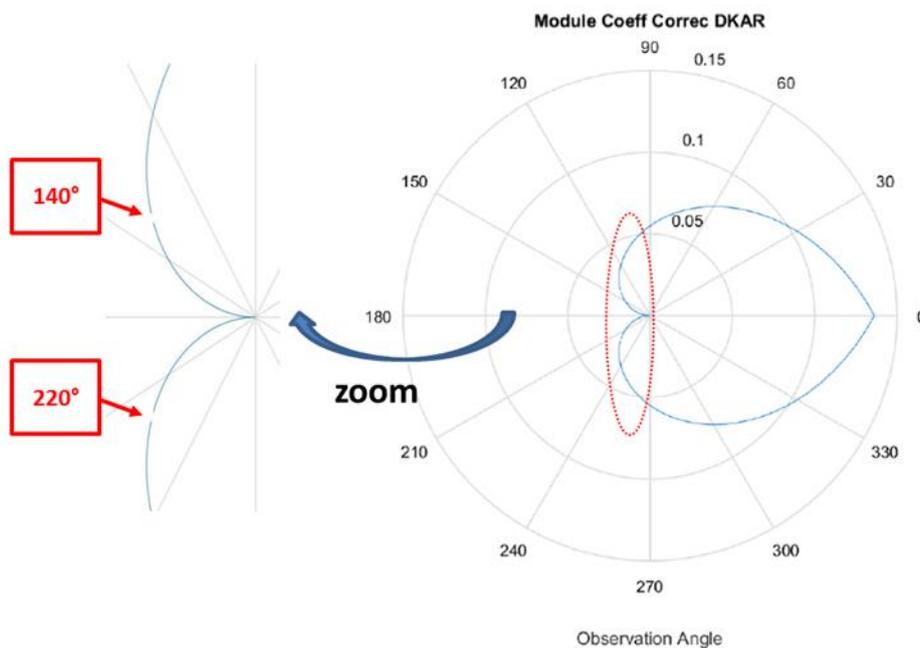


Figure 47 : module du coefficient de correction D_{KAR} pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230\text{m.s}^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5\text{MHz}$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde

3. La Théorie Physique de la Diffraction – PTD

La **Théorie Physique de la Diffraction – PTD (Physical Theory of Diffraction)** [39] appartenant à la catégorie des théories basées sur des sources, est fondée sur deux principes importants qui sont: le principe physique et le principe géométrique. Le principe physique considère que le champ diffusé en un point en dehors du corps diffusant peut être déterminé au moyen d'une intégrale de quantités appropriées sur la surface du corps. En acoustique et pour notre problématique, ces quantités correspondent à la pression sur une surface rigide. Quant au principe géométrique, il atteste qu'à **Hautes Fréquences**, quand la longueur d'onde est du même ordre ou assez petite devant le corps diffusant, en l'occurrence un défaut plan, les intégrales de surfaces peuvent être évaluées asymptotiquement pour aboutir à une description du champ total en dehors du corps en termes de rayons géométriques y compris les rayons diffractés. L'évaluation de l'amplitude le long d'un rayon est calculée géométriquement en considérant la divergence ou la convergence d'un faisceau de rayon excepté les régions entourant les frontières d'ombres géométriques et, pour lesquelles le tracé de rayon prédit une discontinuité du champ à travers la frontière et une caustique, pour laquelle le tracé de rayon prévoit un champ infini. La valeur correcte du champ dans ces régions peut être déterminée en utilisant des méthodes asymptotiques uniformes pour évaluer les intégrales de surface.

Une des caractéristiques importantes de la **PTD** est sa capacité à calculer le champ correctement dans la frontière d'ombre et les régions des caustiques. Celle-ci est particulièrement importante dans la modélisation de petits observables car nous sommes souvent intéressés par la mesure du champ diffusé d'une onde plane incidente sur un corps avec des bords droits ou légèrement incurvés. Une configuration pour laquelle des parties du champ lointain se trouvent dans les régions des caustiques. De plus, cette théorie permet de générer des rayons diffractés dans toutes les directions plutôt que dans des directions bien connues sur le cône de diffraction. En comparaison avec des techniques basées sur des rayons, la **Théorie Physique de la Diffraction** permet de calculer le champ diffusé en tout point de l'espace, y compris dans les régions de diffraction où le champ diffracté n'a pas une structure de rayons. La particularité de la **PTD** est qu'elle considère la séparation des sources de surface en composantes uniformes et en composantes non uniformes. La composante uniforme est définie comme le champ par un plan tangent à la face illuminée de l'arête diffusante (défaut plan) et l'arête elle-même. La composante non uniforme quant à elle, elle peut être définie comme étant la différence entre le champ exacte et la composante uniforme.

i. Solution exacte et extension de Pauli

Reprenons la géométrie du problème illustrée dans la Figure 41. Le champ diffracté par une onde plane sur un demi-plan parfaitement réfléchissant selon l'expression classique de Sommerfeld [39] s'écrit :

$$u_d = u_0[v(kr, \varphi - \varphi_0) + v(kr, \varphi + \varphi_0)]$$

Équation
45

Pour le cas d'un demi-plan rigide, la fonction $v(kr, \psi)$ est définie suivant le contour D_0 (Figure 45) s'écrit:

$$v(kr, \psi) = -\frac{i}{4\pi} \int_{D_0} \frac{e^{ikr \cos \zeta}}{\cos\left(\frac{\zeta + \psi}{2}\right)} d\zeta$$

Équation
46

Une approximation asymptotique a été suggérée par Pauli pour la fonction $v(kr, \psi)$ qui est valide aux frontières de l'**OG** $\varphi \approx \pi + \varphi_0$ et $\varphi \approx \pi - \varphi_0$ et la transforme selon l'expression asymptotique de Sommerfeld en dehors de ces frontières [39]. Dans la suite, nous nous intéressons uniquement au premier ordre de cette extension. En effectuant le changement de variable suivant [39] :

$$s = \sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}} \sin \frac{\zeta}{2} \text{ et donc } s^2 = i(1 - \cos \zeta)$$

Équation
47

En multipliant et en divisant l'intégrande de l'Équation 46 par :

$$\cos \psi + \cos \zeta = i(s^2 - s_0^2) \text{ avec } s_0^2 = 2i \cos^2 \frac{\psi}{2}$$

Équation
48

Nous obtenons alors la nouvelle expression de la fonction $v(kr, \psi)$ [39] tel que :

$$v(kr, \psi) = \frac{e^{i(kr - \frac{\pi}{4})}}{2\sqrt{2}\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(s, \psi) \frac{e^{-krs^2}}{(s^2 - s_0^2)} ds$$

Équation
49

Où les pôles $s = \pm s_0 = \pm \sqrt{2}e^{i\frac{\pi}{4}} \cos \frac{\psi}{2}$ sont en dehors du contour d'intégration et approchent le pôle $s=0$ quand $\psi \rightarrow \pi$. La fonction $f(s, \psi)$ dans l'Équation 49 ne possède pas de pôle $s = 0$ ($\zeta = 0$) quand $\psi = \varphi \pm \varphi_0 \rightarrow \pi$ comme le montre l'Équation 50.

$$f(s, \psi) = -\frac{\cos \psi + \cos \zeta}{\cos\left(\frac{\zeta + \psi}{2}\right) \cos \frac{\zeta}{2}}$$

Équation
50

Ainsi, la fonction $f(s, \psi)$ peut être exprimée selon des séries de Taylor régulières. En intégrant ces séries terme par terme, Pauli obtient l'expansion asymptotique de la fonction

$v(kr, \psi)$ pour l'argument $kr \gg 1$ très grand (point d'observation bien éloigné). Le premier terme de cette extension pour le cas du demi-plan rigide est déterminé [39] par

$$v(kr, \psi) = -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cos \frac{\psi}{2} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})} \int_0^\infty \frac{e^{-krs^2}}{(s^2 - s_0^2)} ds \quad \text{Équation 51}$$

L'intégrale dans l'Équation 51 peut être représentée sous la forme :

$$\int_0^\infty \frac{e^{-krs^2}}{(s^2 - s_0^2)} ds = e^{-krs_0^2} \int_0^\infty ds \int_{kr}^\infty e^{-(s^2 - s_0^2)t} dt \quad \text{Équation 52}$$

De plus, en changeant l'ordre d'intégration [39] et en imposant le changement de paramètre suivant $q = |s_0| \sqrt{t}$, l'Équation 52 devient :

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{e^{-krs^2}}{(s^2 - s_0^2)} ds &= e^{-krs_0^2} \int_{kr}^\infty e^{s_0^2 t} \frac{dt}{\sqrt{t}} \int_0^\infty e^{-x^2} dx \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{-krs_0^2} \int_{kr}^\infty e^{i|s_0|^2 t} \frac{dt}{\sqrt{t}} = \frac{\sqrt{\pi}}{|s_0|} e^{-ikr|s_0|^2} \int_{\sqrt{kr}|s_0|}^\infty e^{iq^2} dq \end{aligned} \quad \text{Équation 53}$$

De ces changements en résulte l'expression suivante pour la fonction $v(kr, \psi)$:

$$\begin{aligned} v(kr, \psi) &= -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cos \frac{\psi}{2} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})} * \frac{\sqrt{\pi}}{|s_0|} e^{-ikr|s_0|^2} \int_{\sqrt{kr}|s_0|}^\infty e^{iq^2} dq \\ &= -\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cos \frac{\psi}{2} \frac{1}{|s_0|} e^{-i\frac{\pi}{4}} e^{-ikr(|s_0|^2 - 1)} \int_{\sqrt{kr}|s_0|}^\infty e^{iq^2} dq \\ &= -\frac{\cos \frac{\psi}{2}}{|\cos \frac{\psi}{2}|} \frac{e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} e^{-ikr \cos \psi} \int_{\sqrt{2kr} |\cos \frac{\psi}{2}|}^\infty e^{iq^2} dq \\ &= \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{|\cos \frac{\psi}{2}|} \frac{e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} e^{-ikr \cos \psi} \int_\infty^{\sqrt{2kr} |\cos \frac{\psi}{2}|} e^{iq^2} dq \\ &= \frac{e^{-i\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} e^{-ikr \cos \psi} \int_\infty^{\sqrt{2kr} |\cos \frac{\psi}{2}|} e^{iq^2} dq \end{aligned} \quad \text{Équation 54}$$

L'expression de la fonction $v(kr, \psi)$ obtenue dans l'Équation 54 désigne l'extension de Pauli pour le cas du demi-plan et elle délivre la solution exacte au problème de diffraction par un demi-plan [39]. La fonction $v(kr, \psi)$ dans l'Équation 54 peut être résolue au moyen des intégrales de Fresnel [39]. Par conséquent, l'extension de Pauli propose de s'affranchir des singularités observées dans les régions d'ombre en considérant la fonction de Fresnel comme une fonction de transition dans ces zones. Le champ diffracté peut s'exprimer au

moyen de la solution exacte dans les régions d'ombres et au moyen des coefficients de la **GTD** en dehors de ces dernières tel que

$$u_d = \begin{cases} u_0 \left[F \left(\sqrt{kr} \cos \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right) \right) e^{-ikr \cos(\varphi - \varphi_0)} + F \left(\left(\sqrt{kr} \cos \left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2} \right) \right) e^{-ikr \cos(\varphi + \varphi_0)} \right) \right] & \varphi = \pi \pm \varphi_0 \\ -\frac{1}{2} u_0 \frac{e^{i(kr + \frac{\pi}{4})}}{\sqrt{2\pi kr}} \left(\frac{1}{\cos \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right)} + \frac{1}{\cos \left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2} \right)} \right), & \varphi \neq \pi \pm \varphi_0 \text{ et } \sqrt{kr} \left| \cos \left(\frac{\varphi \pm \varphi_0}{2} \right) \right| \gg 1 \end{cases} \quad \text{Équation 55}$$

champ total genere par une incidence plane sur un demi-plan selon la solution exacte

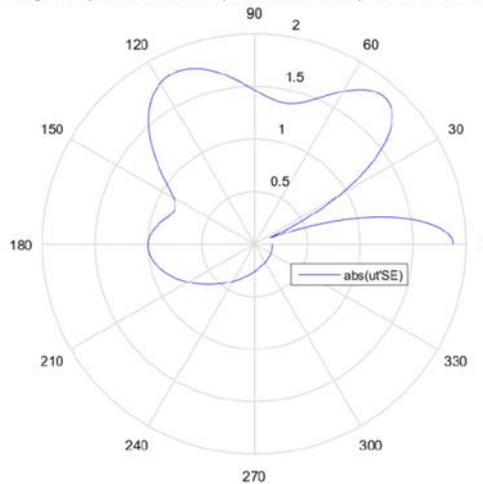


Figure 48 : champ total selon la solution exacte pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230 \text{ms}^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5 \text{MHz}$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde

La Figure 48 illustre le champ total obtenu à l'aide de la solution exacte pour une incidente plane sur un demi-plan. Nous observons que le champ total possède des valeurs finies quel que soit la direction d'observation. Comme nous avons fait le choix de faire appel à l'extension de Pauli pour l'expression classique de Sommerfeld [39], nous avons opté pour étudier une formulation de l'expression classique de Kirchhoff. Afin d'aboutir à la composante uniforme du champ diffusé. Nous présentons la démarche considérée pour cette dernière dans le paragraphe suivant.

ii. Intégrale de Kirchhoff

En considérant la géométrie du problème illustrée dans la Figure 49, le champ diffusé suite à l'interaction d'une onde plane et la surface éclairée d'un obstacle rigide que soit la distance

d'observation selon l'Optique Physique (OP) est déterminé [39] à l'aide de l'intégrale suivante :

$$u_{diff} = \frac{1}{2\pi} \int_S u_0 e^{-ikxc\cos\varphi_0} \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{ikr}}{r} ds \quad \text{Équation 56}$$

L'Équation 56 désigne le champ diffusé par la composante dite uniforme selon la *PTD* [39] des sources à la surface de l'obstacle rigide. Elle représente l'approximation dite scalaire de l'OP et également connu sous l'Approximation de l'Intégrale de Kirchhoff en acoustique. L'intégrale de surface dans l'Équation 56 peut être réécrite sous la forme [39] :

$$u_{diff} = \frac{1}{2\pi} u_0 \frac{\partial}{\partial n} \int_0^\infty e^{-ikxc\cos\varphi_0} d\xi \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2+z^2}}}{\sqrt{(x-\xi)^2+z^2}} d\zeta \quad \text{Équation 57}$$

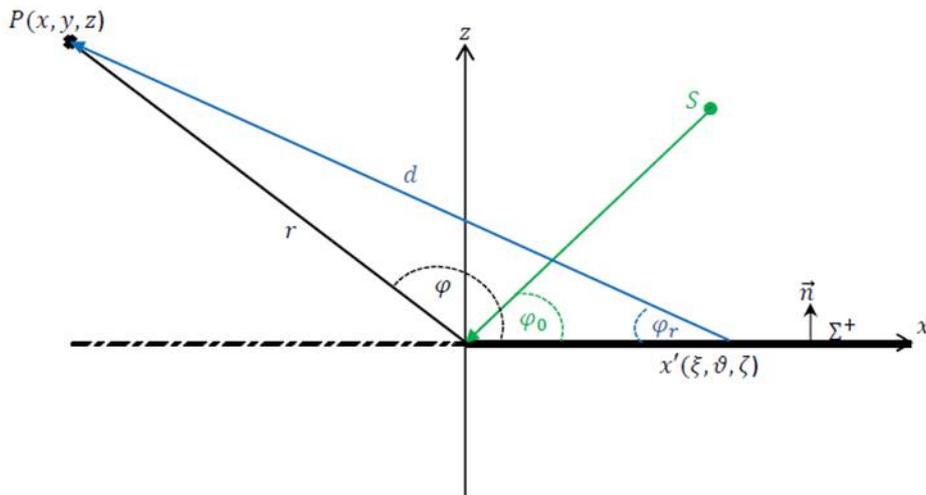


Figure 49 : géométrie du problème de diffraction par un demi-plan

Dans l'Équation 57, l'intégrale relative à la variable ζ peut-être réécrite à l'aide de la fonction de Hankel [39] tel que :

$$H_0^{(1)}(kd) = \frac{1}{i\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{ik\sqrt{d^2+\zeta^2}}}{\sqrt{d^2+\zeta^2}} d\zeta \quad \text{Équation 58}$$

Ainsi l'Équation 57 peut être réécrite sous la forme :

$$u_{diff} = \frac{i}{2} u_0 \frac{\partial}{\partial n} \int_0^\infty e^{-ikxc\cos\varphi_0} H_0^{(1)}(kd) d\xi \quad \text{Équation 59}$$

Pour $d = (x - \xi)^2 + z^2$, l'Équation 59 devient

$$u_{diff} = \frac{i}{2} u_0 \int_0^{\infty} e^{-ikx \cos \varphi_0} \frac{\partial}{\partial n} (H_0^1(kd)) d\xi \quad \text{Équation 60}$$

Et en calculant la dérivée de la fonction de Hankel $H_0^1(kd)$ tel que :

$$\frac{\partial}{\partial n} (H_0^1(kd)) = k \frac{z}{d} \frac{\partial}{\partial n} (H_0^1(kd)) = -k \sin \varphi_r (H_1^1(kd)) \quad \text{Équation 61}$$

En réinjectant le résultat de l'Équation 61 dans l'Équation 60, nous obtenons :

$$u_{diff} = \frac{-iu_0 * k}{2} \int_0^{+\infty} e^{-i*k*\xi*\cos\varphi_0} * \sin\varphi_r * H_1^1(kd) d\xi \quad \text{Équation 62}$$

Une méthode de résolution numérique de cette intégrale a été proposée par [59]. La Figure 50 illustre le champ total obtenu à l'aide de cette méthode de résolution numérique. Nous pouvons ainsi constater que le champ total possède des valeurs finies quel que soit la direction d'observation.

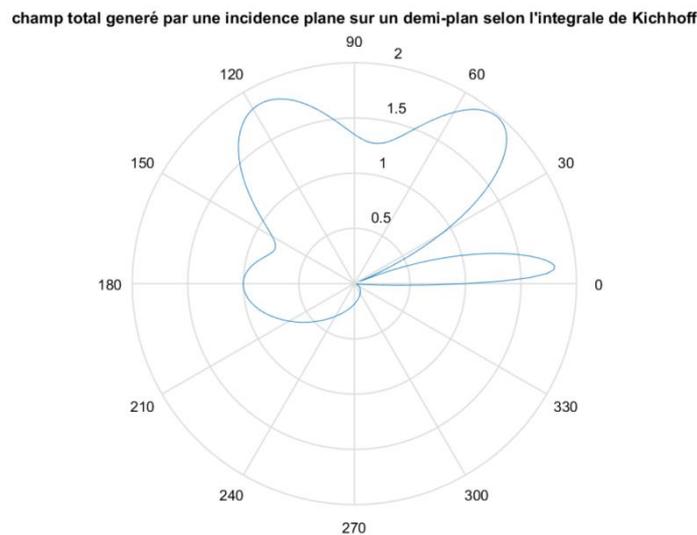


Figure 50 : champ total selon l'intégrale de Kirchhoff pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230 \text{ms}^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5 \text{MHz}$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde

Il est difficile de relever expérimentalement le champ total diffusé par l'interaction d'une incidence plane sur un demi-plan. De plus, nous avons évoqué dans ce chapitre que la diffusion des ondes ultrasonores génère en plus des ondes réfléchies, réfractés et diffractées

des ondes de nature complexes que nous n'avons pas étudié dans le cadre de ces travaux. Ainsi, il est difficile de distinguer expérimentalement le champ dû à chacune de ces composantes. Dans le cadre de la *PTD*, UFIMTSEV aborde le champ de franges [39]. Ce champ est équivalent entre les approximations asymptotiques et les formulations intégrales. Le paragraphe suivant, présente la démarche adoptée pour la validation théorique des différentes approches étudiées dans ce chapitre pour la prise en compte de la diffraction.

iii. Le champ de franges

Le champ de frange peut être obtenu par la différence de la solution exacte et l'intégrale de Kirchhoff. Or, les solutions asymptotiques *GTD* et *KA* découlent de ces deux premières. Ainsi, la *PTD* affirme que leur différence est équivalente à celle issue des formulations intégrales. De ce fait, nous avons décidé de valider théoriquement ces approches car leur validation de manière expérimentale s'avère délicate.

La Figure 51 illustre les champs de franges obtenus pour une incidence plane sur un demi-plan rigide. Ce résultat nous rassure dans notre choix d'implémenter les différentes approches présentées dans ce chapitre pour la prise en compte de la diffraction.

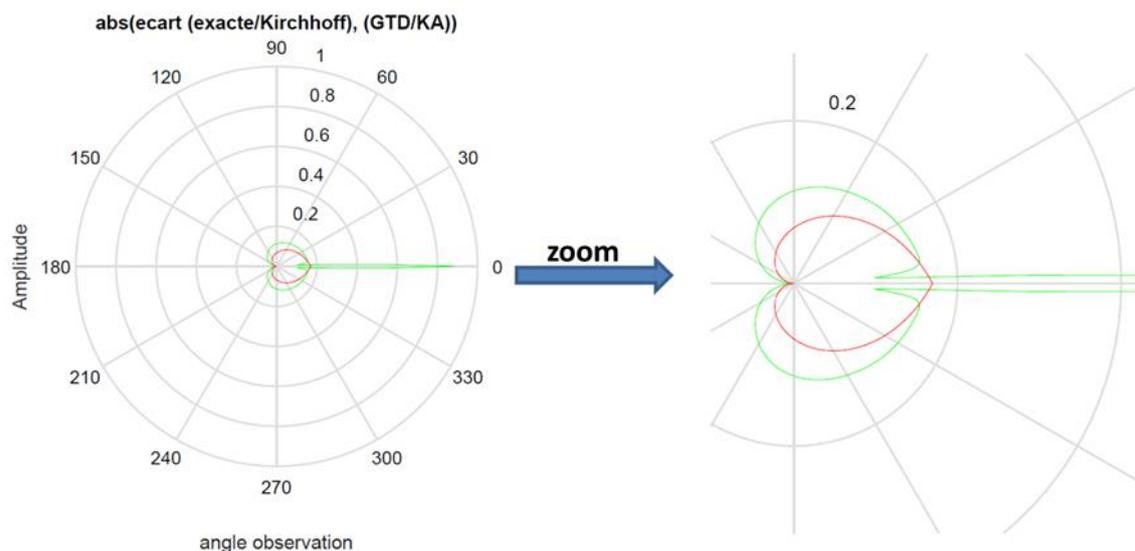


Figure 51 : champs de franges pour une onde plane incidente sous $\varphi_0 = 40^\circ$ dans l'acier $v_t = 3230m.s^{-1}$, une fréquence de contrôle $f_0 = 5MHz$ et une distance d'observation de l'ordre d'une longueur d'onde. Champ de franges selon les considérations asymptotiques (vert), champ de frange selon les considérations intégrales

Nous disposons donc de cinq approches différentes, trois approches issues des approximations asymptotiques et deux approches basées sur des formulations intégrales. Ces approches nous permettent en partie d'étudier l'interaction entre une onde plane et un obstacle plan rigide et plus précisément la diffraction. Or, cette interaction génère également le phénomène de réflexion et conversion de mode. Le paragraphe suivant s'intéresse à la réflexion et transmission d'une onde plane en présence d'une interface.

IV. Réflexion et transmission d'une onde plane au niveau d'une interface

La modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le cadre d'un contrôle non destructif ultrasonore d'un tube fait appel à différents milieux et par conséquent à différentes interfaces :

- **Eau / Acier** : interface entre le couplant (eau) et la surface externe du tube dans le cadre de la propagation depuis le transducteur.
- **Acier / Air** : interface entre la surface interne du tube et le creux du tube ou l'interface entre la peau du tube et le défaut.
- **Acier / Eau** : interface entre la surface externe du tube et le couplant dans le cadre de la retro propagation vers le transducteur.

Dans ce paragraphe nous nous intéressons aux différents coefficients régissant l'évolution de l'énergie en fonction des différentes interfaces [14].

Rappelons que dans les milieux fluides, seules les ondes longitudinales se propagent. Dans l'acier, les ondes longitudinales peuvent coexister avec les ondes transversales. L'air constitue un atténuateur à la propagation des ondes longitudinales.

1. Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Eau / Acier

Le coefficient de réflexion R_{ll} d'une onde incidente L en une onde réfléchie L est défini selon l'Équation 63

$$R_{ll} = \frac{(\cos(2 * \theta_t))^2 * \cos(\theta_i) + \left(\frac{Z_{1T}}{Z_{1L}}\right)^2 * \sin(2 * \theta_l) * \sin(2 * \theta_t) * \cos(\theta_i) - \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \cos(\theta_i)}{D_{com}}$$

Equation 63

Le terme D_{com} dans l'Équation 63 désigne le dénominateur commun aux différents coefficients de réflexion et transmission pour une interface **Eau / Acier**. Il est défini selon l'Équation 64

$$D_{com} = (\cos(2 * \theta_t))^2 * \cos(\theta_i) + \left(\frac{Z_{1T}}{Z_{1L}}\right)^2 * \sin(2 * \theta_l) * \sin(2 * \theta_t) * \cos(\theta_i) + \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \cos(\theta_l)$$

Équation 64

Avec

- θ_i angle d'incidence de l'onde plane longitudinale sur l'interface eau(0) / acier(1)
- θ_l angle de transmission de l'onde plane longitudinale en onde longitudinale dans le milieu acier(1)
- θ_t angle de transmission de l'onde plane longitudinale en onde transversale dans le milieu acier(1)
- Z_0 impédance acoustique dans l'eau = $\rho_{eau} * v_0$
- Z_{1L} impédance acoustique de l'onde L dans l'acier = $\rho_{acier} * v_l$
- Z_{1T} impédance acoustique de l'onde T dans l'acier = $\rho_{acier} * v_t$

Le coefficient de transmission T_{ll} d'une onde longitudinale en onde longitudinale dans l'acier s'écrit :

$$T_{ll} = \frac{2 * \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \cos(2 * \theta_t)}{D_{com}}$$

Équation
65

Enfin, Le coefficient de transmission T_{lt} d'une onde longitudinale en onde transversale dans l'acier s'écrit :

$$T_{lt} = \frac{-2 * \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \left(\frac{Z_{1T}}{Z_{1L}}\right) * \sin(2 * \theta_l)}{D_{com}}$$

Équation
66

LES INCIDENCES DITES « CRITIQUES » POUR UNE INTERFACE EAU / ACIER

Pour une interface **Eau / Acier**, deux incidences critiques sont connues θ_{cl} et θ_{ct} .

Le premier angle $\theta_{cl} \sim 14.56^\circ$ désigne l'angle critique des ondes longitudinales dans l'eau. Pour des incidences supérieures à θ_{cl} , la réflexion des ondes longitudinales est totale et donc aucune transmission de ce type d'onde n'opère dans l'acier. A vrai dire, l'onde longitudinale transmise dans l'acier est une onde du même type mais se propageant le long de la surface, elle est dite rampante ($\sin(\theta_l) = 1 \rightarrow \theta_l = \frac{\pi}{2}$).

Par conséquent :

$$\text{Pour } \theta > \theta_{cl} \text{ tel que } \theta_{cl} = \arcsin\left(\frac{v_0}{v_l}\right) \rightarrow \begin{cases} R_{ll} \rightarrow 1 \\ T_{ll} \rightarrow 0 \end{cases} \quad \text{Équation 67}$$

Le second angle $\theta_{ct} \sim 27.33^\circ$ désigne l'angle critique des ondes transversales dans l'eau. Pour des incidences supérieures à θ_{ct} , aucune transmission d'onde transversale n'opère. En revanche, une onde de surface est observée à cette incidence et parcourt la surface de l'interface impactée par cette incidence θ_{ct} .

$$\text{Pour } \theta > \theta_{ct} \text{ tel que } \theta_{ct} = \arcsin\left(\frac{v_0}{v_t}\right) \rightarrow T_{lt} = 0 \quad \text{Équation 68}$$

LES COEFFICIENTS DE REFLEXION ET DE TRANSMISSION EN ENERGIE

Les coefficients de réflexion et de transmission en énergie découlent de ceux en déplacement tels que :

$$r_{ll} = |R_{ll}|^2$$

$$t_{ll} = |T_{ll}|^2 * \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \frac{\cos(\theta_l)}{\cos(\theta_i)}$$

$$t_{lt} = |T_{lt}|^2 * \left(\frac{Z_{1T}}{Z_0}\right) * \frac{\cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i)}$$

Équation 69

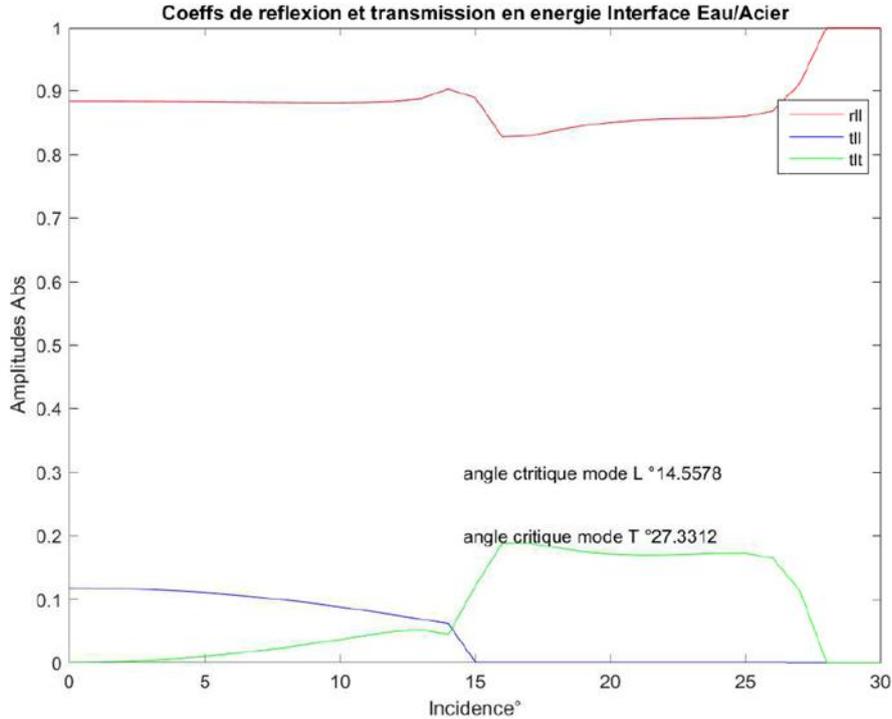


Figure 52 : coefficients de réflexion et de transmission en énergie pour une incidence plane pour une interface plane séparant l'eau et l'acier

La Figure 52 illustre les coefficients de réflexion et de transmission en énergie pour l'interface **Eau / Acier** ainsi que les deux angles critiques discutés précédemment pour cette interface.

2. Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Acier / Air

Pour l'interface **Acier / Air** nous allons distinguer l'incidence d'une onde longitudinale de celle d'une onde transversale. En effet, la transmission de ces deux ondes dans l'acier s'effectue tant que l'angle d'incidence n'est pas supérieur à l'angle critique des ondes longitudinales.

i. Incidence d'ondes longitudinales

Le coefficient de réflexion d'une onde L en L sur une interface entre l'acier et l'air illustré dans la Figure 53, s'écrit :

$$R_{ll} = \frac{N_{ll}}{D_{com}} = \frac{Z_t^2 * \sin(2 * \theta_l) * \sin(2 * \theta_t) - Z_l^2 * (\cos(2 * \theta_t))^2}{Z_t^2 * \sin(2 * \theta_l) * \sin(2 * \theta_t) + Z_l^2 * (\cos(2 * \theta_t))^2} \quad \text{Équation 70}$$

D_{com} désigne le dénominateur commun aux différents coefficients de réflexion.

Le coefficient de réflexion d'une onde L en T suite à une conversion de mode sur une interface entre l'acier et l'air (Figure 53) s'écrit :

$$R_{lt} = \frac{2 * Z_l * Z_t * \sin(2 * \theta_l) * \cos(2 * \theta_t)}{D_{com}} \quad \text{Équation 71}$$

Avec

θ_l angle d'incidence/réflexion de l'onde plane longitudinale en onde longitudinale dans le milieu acier.

θ_t angle de transmission de l'onde plane longitudinale en onde transversale dans le milieu acier.

Z_l impédance acoustique de l'onde L dans l'acier = $\rho_{acier} * v_l$

Z_t impédance acoustique de l'onde T dans l'acier = $\rho_{acier} * v_t$

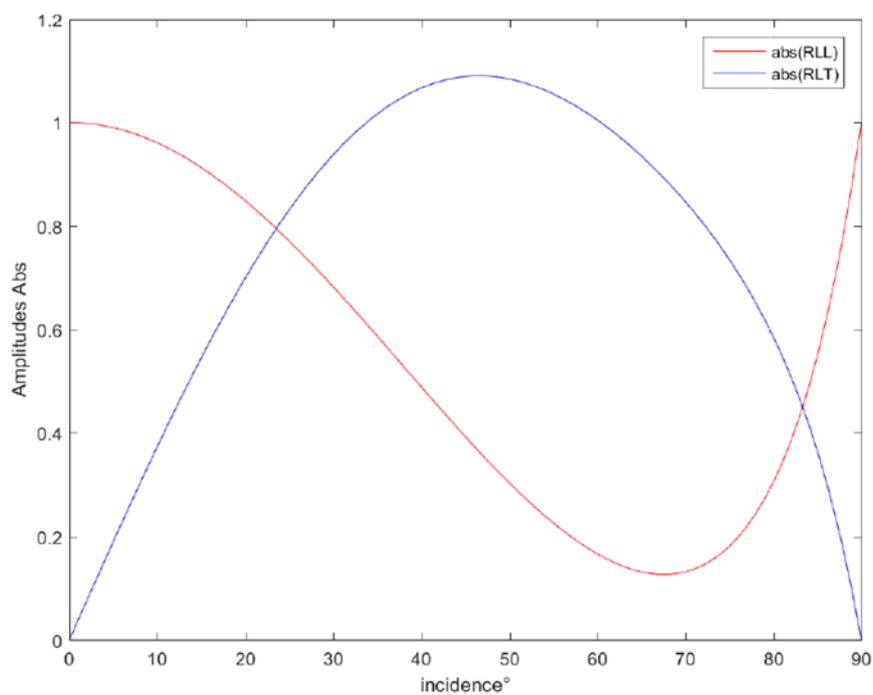


Figure 53 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion pour une incidence longitudinale sur une interface plane entre Acier/Air

ii. Incidence d'ondes transversales

Le coefficient de réflexion d'une onde T en T sur une interface entre l'acier et l'air illustré Figure 54 s'écrit :

$$R_{tt} = \frac{N_{tt}}{D_{com}}$$

$$= \frac{-Z_t^2 * \sin(2 * \theta_l) * \sin(2 * \theta_t) + Z_l^2 * (\cos(2 * \theta_t))^2}{\left(\frac{Z_{1T}}{Z_{1L}}\right)^2 * \sin(2 * \theta_{lr}) * \sin(2 * \theta_i) + (\cos(2 * \theta_i))^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_{1L}}\right) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_l)}}$$

Équation
72

D_{com} désigne le dénominateur commun aux différents coefficients de réflexion pour une interface **Acier / Air**

Le coefficient de réflexion d'une onde T en L sur une interface entre l'acier et l'air illustré Figure 54, s'écrit :

$$R_{tl} = \frac{2 * Z_l * Z_t * \sin(2 * \theta_l) * \cos(2 * \theta_t)}{D_{com}}$$

Équation
73

INCIDENCE CRITIQUE POUR L'INTERFACE ACIER-AIR

Pour une interface **Acier / Air**, une incidence critique est connue θ_{ct} et est donnée par l'Équation 74 .Pour une incidence supérieure à cet angle $\theta_{ct} \sim 33.2^\circ$, la réflexion des ondes transversales est dite totale et aucune conversion de mode en onde longitudinale n'opère comme l'illustre la Figure 54.

$$\theta_{ct} = \arcsin\left(\frac{v_t}{v_l}\right)$$

Équation
74

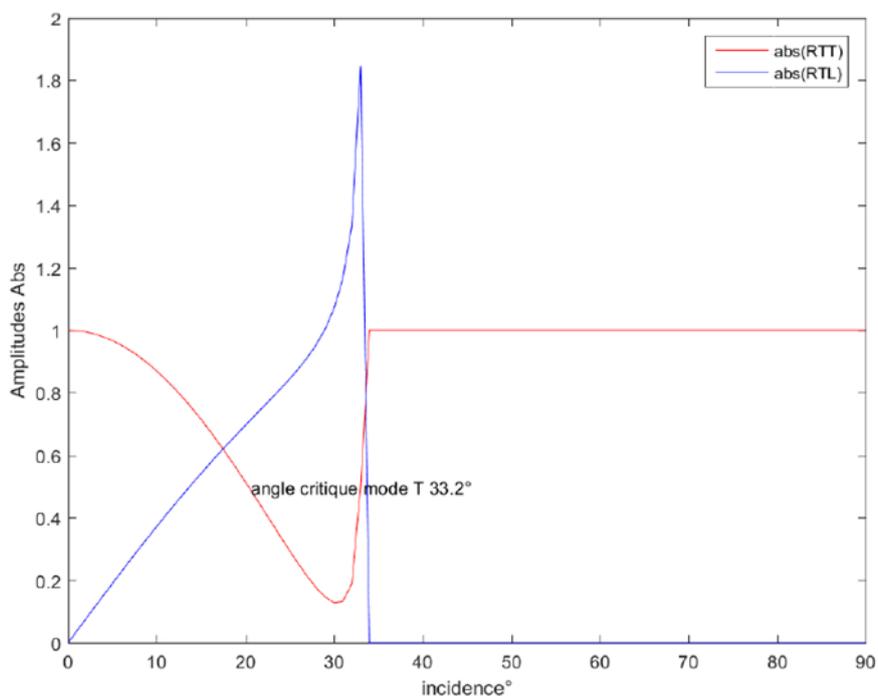


Figure 54 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion pour une incidence transversale sur une interface plane entre Acier/Air

3. Coefficient de réflexion et de transmission en déplacement pour une interface Acier / Eau

De la même manière que pour une interface **Acier / Air**, nous allons distinguer l'incidence d'une onde longitudinale de celle d'une onde transversale pour l'interface **Acier / Eau**. Par ailleurs, nous rappelons que seules les ondes longitudinales sont transmises dans l'eau.

i.Incidence d'ondes longitudinales

Le coefficient de réflexion d'une onde L en L sur une interface entre l'acier et l'eau s'écrit :

$$R_{ll} = \frac{N_{ll}}{D_{com}} = \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_i) * \sin(2 * \theta_t) - (\cos(2 * \theta_t))^2 + \frac{Z_0}{Z_l} * \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_l)}}{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_i) * \sin(2 * \theta_t) + (\cos(2 * \theta_t))^2 + \frac{Z_0}{Z_l} * \frac{\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_l)}} \quad \text{Équation 75}$$

D_{com} Désigne le dénominateur commun aux différents coefficients de réflexion et transmission pour une interface **Acier / Eau**.

Le coefficient de réflexion d'une onde T en L sur une interface entre l'acier et l'eau s'écrit :

$$R_{lt} = \frac{-2 * \left(\frac{Z_t}{Z_l}\right) * \sin(2 * \theta_i) * \cos(2 * \theta_t)}{D_{com}} \quad \text{Équation 76}$$

Le coefficient de réflexion d'une onde T en L sur une interface entre l'acier et l'eau s'écrit :

$$T_{ll} = \frac{2 * \cos(\theta_i) * \frac{\cos(2 * \theta_t)}{\cos(\theta_l)}}{D_{com}} \quad \text{Équation 77}$$

L'ensemble de ces coefficients sont illustrés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable**.

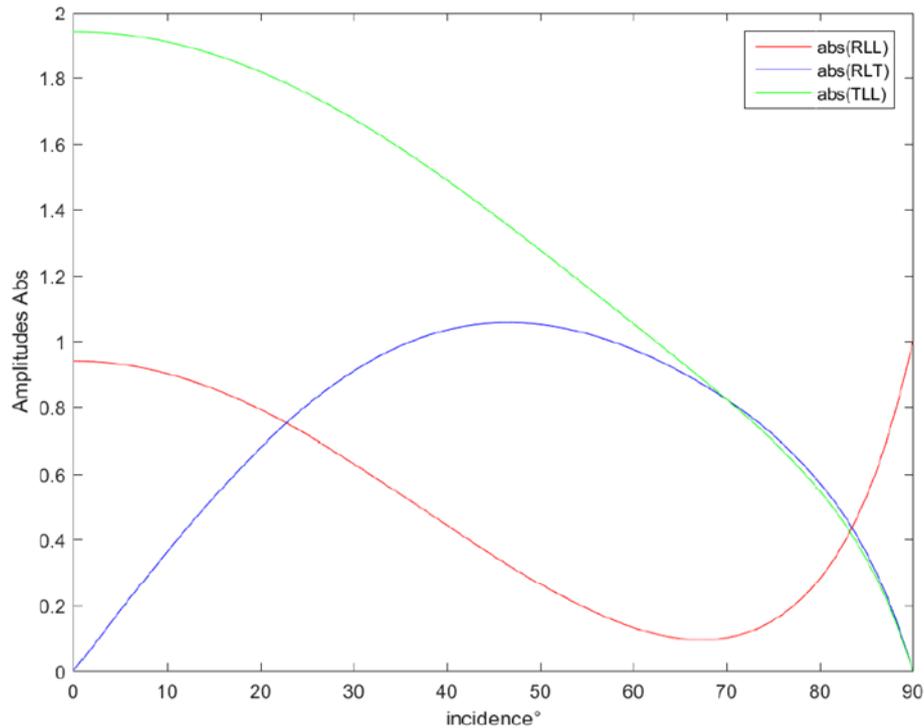


Figure 55 : modules des coefficients en amplitudes de déplacement de réflexion et transmission pour une incidence longitudinale sur une interface plane entre Acier/Eau

ii. Incidence d'ondes transversales

Le coefficient de réflexion d'une onde T en T sur une interface entre l'acier et l'eau s'écrit

$$R_{tt} = \frac{N_{tt}}{D_{com}} = \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_{lr}) * \sin(2 * \theta_i) - (\cos(2 * \theta_i))^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_l}\right) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_i)}}{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_{lr}) * \sin(2 * \theta_i) + (\cos(2 * \theta_i))^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_l}\right) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_i)}} \quad \text{Équation 78}$$

Avec

- θ_l angle de l'onde longitudinale transmise dans l'eau
- θ_{lr} angle de l'onde longitudinale réfléchie dans l'acier
- Z_l impédance acoustique de l'onde L dans l'acier = $\rho_{acier} * v_l$
- Z_t impédance acoustique de l'onde T dans l'acier = $\rho_{acier} * v_t$
- Z_0 impédance acoustique dans l'eau = $\rho_{eau} * v_0$

D_{com} Désigne le dénominateur commun aux différents coefficients de réflexion et transmission.

Le coefficient de réflexion d'une onde T en L sur une interface entre l'acier et l'eau s'écrit :

$$R_{tl} = \frac{-\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right) * \sin(4 * \theta_i)}{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_{lr}) * \sin(2 * \theta_i) + (\cos(2 * \theta_i))^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_l}\right) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_i)}} \quad \text{Équation 79}$$

Enfin, le coefficient de transmission d'une onde transversale en onde longitudinale après passage de l'interface **Acier / Eau** s'écrit :

$$T_{tl} = \frac{2 * \left(\frac{Z_t}{Z_l}\right) * \sin(2 * \theta_i) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_i)}}{\left(\frac{Z_t}{Z_l}\right)^2 * \sin(2 * \theta_{lr}) * \sin(2 * \theta_i) + (\cos(2 * \theta_i))^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_l}\right) * \frac{\cos(\theta_{lr})}{\cos(\theta_i)}} \quad \text{Équation 80}$$

L'ensemble de ces coefficients est illustré dans la Figure 56.

Nous disposons ainsi de tous les coefficients nous permettant de décrire l'évolution de l'amplitude des rayons géométriques depuis l'émission sur la surface du transducteur, la propagation des ondes longitudinales dans l'eau, le passage de ces dernières dans l'acier, leur coexistence avec les ondes transversales et leurs interactions directes ou indirectes en cas de présence d'un défaut plan débouchant sur la surface interne du tube puis leur rétro-propagation vers la surface du transducteur. L'implémentation logicielle des parcours géométriques et le calcul de l'évolution de l'amplitude sera détaillée dans le chapitre suivant.

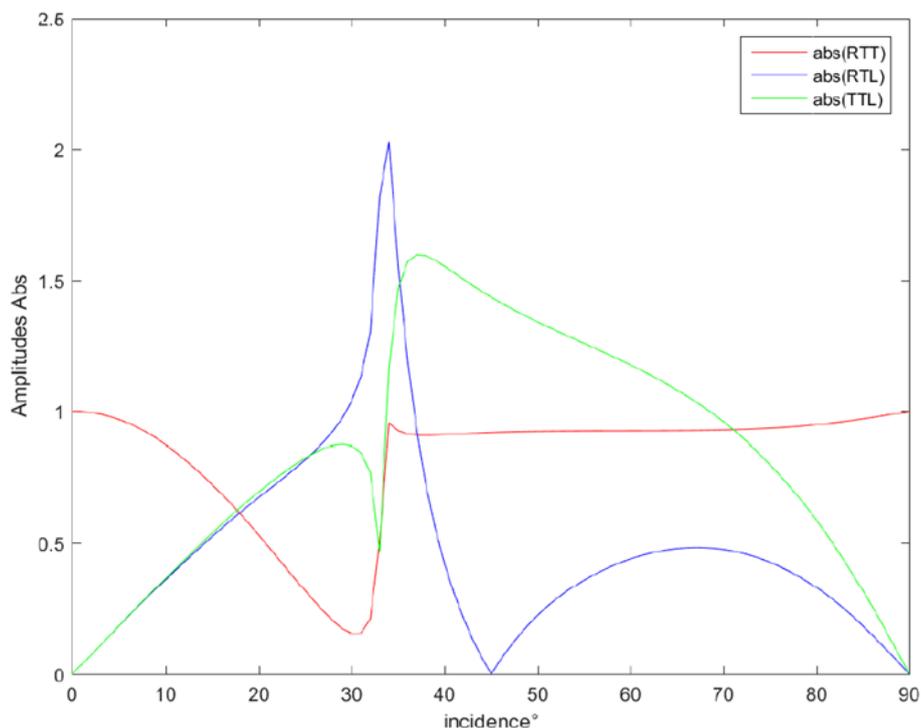


Figure 56 : modules des coefficients en amplitude de déplacement de réflexion et transmission pour une incidence transversale sur une interface plane entre Acier/Eau

V.Conclusion

Parmi les nombreux champs d'application des problèmes inverses, les contrôles non destructifs occupent une part importante. Il s'agit pour notre problématique de viser à préciser les défauts plans non débouchants affectant la pièce métallique inspectée (tube) à l'issue d'un contrôle non destructif ultrasonore, pouvant modifier le comportement nominal ou en affecter l'usage. L'information concernant les caractéristiques recherchées de ces défauts (position, taille, tilt, ...etc.) est contenue dans les signaux acquis par les récepteurs (transducteurs en réception). Par conséquent, la résolution du problème inverse consiste à décoder les informations contenues dans les signaux ultrasonores enregistrés. Ceci permet d'extraire les paramètres visés en produisant des images suffisamment représentatives de celles issues de l'essai non destructif ultrasonore. De ce fait, nous nous sommes focalisés dans ce chapitre sur la première étape primordiale pour l'étude d'un problème inverse, il s'agit de la résolution du problème direct. Cette résolution permet une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu ainsi que la mise en évidence des paramètres clés à identifier. Elle permet aussi la validation des formulations des paramètres acoustiques (données images) choisis pour la comparaison avec des résultats issus du modèle direct développé et ceux issus de l'expérience avec une configuration connue, que celle-ci soit contrôlée (conditions laboratoire) ou réelle (conditions usine avec toutes les contraintes du terrain). En outre, nous avons veillé à ce que la méthode de résolution soit non coûteuse en temps de calcul tout en considérant un mode de construction qui décrit au mieux les

configurations étudiées. En effet, le modèle doit être simple tout en permettant en fine d'obtenir la solution au problème direct de manière embarquée au prototype industriel.

Pour satisfaire ces conditions, la théorie des rayons fournit un outil puissant pour le calcul de l'interaction entre un faisceau ultrasonore et un défaut dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde incidente [46]. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux méthodes permettant de tenir compte des effets de diffraction par un obstacle rigide. Dans un premier temps, nous avons présenté les méthodes asymptotiques dites **HF** qui sont **GTD** et **KA**. Ces approches calculent le champ sur les rayons diffractés en termes de coefficients de diffraction qui découlent du problème canonique d'une incidence plane sur un plan semi-infini avec bord droit (défaut plan). Or, ces approximations ne décrivent pas correctement le champ diffracté pénétrant dans les régions d'ombre. Pour pallier les limitations de ces approximations analytiques, nous avons considéré la **PTD** qui génère des rayons diffractés dans toutes les directions plutôt que dans des directions bien connues sur le cône de diffraction. Nous avons étudié une approximation asymptotique développée par le CEA [57] ainsi que la **Solution Exacte (SE)** et son extension suggérée par Pauli [39], cette dernière consiste en une extension asymptotique de l'intégrale de Sommerfeld qui est valide aux régions d'ombre et la transforme selon l'expression asymptotique de Sommerfeld en dehors de ces frontières. Enfin, la dernière solution proposée est basée sur l'intégrale de l'**OP (Intégrale de Kirchhoff - KI)** qui est valide en tout point de l'espace d'observation. Enfin, nous avons détaillé les différents coefficients de réflexion et de transmission pour les différentes interfaces en jeu pour la modélisation d'un contrôle ultrasonore et prédire les échos ultrasonores générés par l'interaction du faisceau ultrasonore et un défaut de type entaille longitudinale débouchante sur la paroi interne du tube.

La solution proposée pour résoudre le problème direct de la propagation des ondes ultrasonores dans le cadre d'un contrôle ultrasonore sur tube, opte pour découpler la modélisation du faisceau ultrasonore réfracté dans la pièce à inspecter et l'interaction de ce faisceau avec un défaut débouchant sur la paroi interne de cette pièce. Une inspection complète implique deux types de contrôle. Le contrôle longitudinal pour lequel la géométrie du tube est réduite à deux cercles concentriques. Puis, le contrôle transversal pour lequel la géométrie du tube est réduite à une plaque. Dans le prochain chapitre, nous présenterons la modélisation d'une inspection du tube selon la configuration transversale du contrôle ultrasonore en décomposant le problème global en sous-problèmes indépendants [60]. Le modèle direct proposé prendra en compte les séquences suivantes afin de modéliser de manière complète un contrôle ultrasonore :

- Emission
- Propagation dans le milieu couplant
- Transmission à travers une interface plane
- Interaction avec un défaut plan

- Retro-propagation vers le transducteur
- Réception

Enfin, nous prolongerons la solution exposée dans ce chapitre à l'ensemble des fréquences du spectre fréquentiel du transducteur afin d'obtenir des images ultrasonores simulées comparables à celles issues de l'expérience (Bscan, Ascan, courbes Echo-Dynamiques).

Chapitre 3 Implémentation logicielle du simulateur bidimensionnel du contrôle ultrasonore transversal du tube

I.Introduction

Notre problématique est identifiée comme une problématique inverse de l'imagerie à ondes diffractées. Elle consiste en l'illumination de l'objet à inspecter par un faisceau ultrasonore de l'extérieur et à mesurer son interaction avec celui-ci. Plus précisément, il s'agit de l'imagerie par réflexion [31] (le même transducteur est utilisé en émission/réception et recueille le signal réfléchi par l'obstacle détecté, communément appelée pulse-écho). D'ailleurs, les bancs de contrôles en laboratoire et dans les usines *Vallourec* pour les produits Upstream⁴, sont tous dotés de transducteurs réalisant l'émission et la réception.

Dans toute technique d'imagerie, il y a trois problèmes fondamentaux à résoudre [30, 31]:

- **Le problème direct**, qui consiste à établir une ou plusieurs formulations mathématiques suffisamment simples décrivant le mieux possible le lien entre les grandeurs mesurées et les grandeurs recherchées.
- **Le problème d'instrumentation**, qui consiste à construire un système d'imagerie : générer les ondes et mesurer les résultats des interactions de l'onde avec le défaut plan.
- **Le problème inverse**, qui consiste à développer une méthode d'inversion qui, partant des données mesurées, reconstruisent ces images qui caractérisent le défaut détecté. Les précédents travaux réalisés au sein du *VRCF* ont permis d'aboutir à une méthode d'inversion simple [1] . Nous ne nous intéresserons pas à cette méthode d'inversion dans le cadre de ces travaux.

Par ailleurs, la résolution d'un problème direct repose bien souvent sur la mise en œuvre de nombreux problèmes directs. Ce chapitre, décrit la propagation de l'onde ultrasonore et son interaction avec le défaut en décomposant le problème en sous problèmes simples. En effet, nous avons fait le choix de découpler la modélisation du faisceau ultrasonore réfracté dans le tube et l'interaction de ce dernier avec un défaut plan débouchant sur la paroi interne du tube. De ce fait, la résolution du problème direct consiste en la recherche des solutions approchées en régime impulsionnel aux sous problèmes suivants :

- Emission de l'onde par le transducteur
- Propagation dans les milieux (eau et acier)
- Interaction de l'onde avec le défaut

⁴ Tubes pour le secteur du pétrole, les gammes dimensionnelles de ces produits varient entre [39 ; 440] mm pour le diamètre externe et entre [4 ; 30] mm d'épaisseur.

- Retro-propagation des ondes générées après interaction avec le défaut vers le transducteur
- Réception par le transducteur

Nous décrivons la solution proposée pour la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores selon la configuration de contrôle transversale sur tube. La modélisation de la configuration longitudinale du tube sera abordée dans le dernier chapitre. Nous étendrons la solution proposée dans le précédent chapitre autour de la fréquence nominale du transducteur au cas d'un transducteur large bande, afin d'obtenir des résultats directement comparables avec l'expérience, non seulement au niveau des amplitudes maximales des signaux (écho-dynamiques) mais aussi de leur dépendance temporelle qui permet souvent une caractérisation des défauts.

II. Rappel du contrôle ultrasonore du tube pour la détection des défauts débouchants

Le contrôle complet du tube pour la détection des défauts est réalisé sous incidence oblique. L'incidence oblique permet de générer les modes longitudinaux et transversaux dans la pièce à inspecter comme illustré Figure 57.

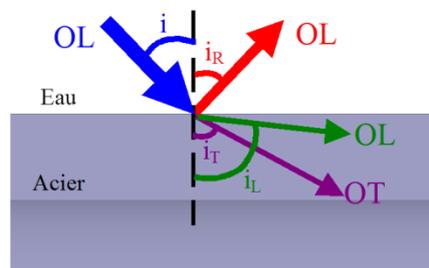


Figure 57 : réflexion et réfraction des ondes ultrasonores OL et OT suite à une incidence oblique [10].

Ces modes en cas d'interaction avec un défaut génèrent de nombreux échos difficiles à interpréter. Pour simplifier l'exploitation de ces échos en s'appuyant sur l'expérience industrielle, une incidence oblique est définie de manière à ne générer que le mode transversale dans la pièce [14]. En effet, l'utilisation des ondes transversales pour l'inspection de plaques présentant une courbure ou des tubes est bien connue et largement utilisée à cause de leur particularité qui est de se propager le long d'un chemin en zigzag et sans conversion de mode comme le montre la Figure 58.

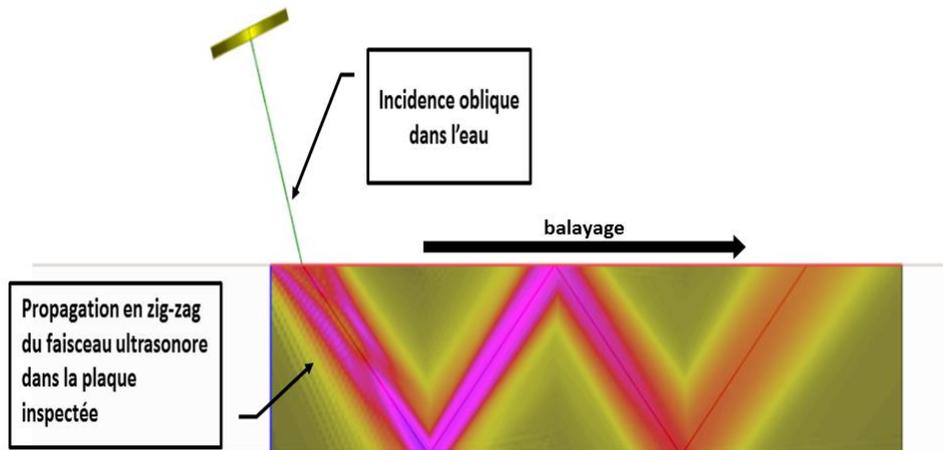


Figure 58 : inspection à l'aide des ondes transversales sous incidence oblique. Propagation des ondes suivant un chemin en zigzag. [15]

D'autre part, Pour une incidence supérieure à l'angle critique pour l'onde transversale dans l'acier (correspondant à 33°), cette dernière possède l'avantage, contrairement à l'onde longitudinale, de se réfléchir totalement sans conversion de mode pour une interface acier/air. Cette particularité est vérifiée tant que la rugosité de la surface de la pièce inspectée est inférieure à la longueur d'onde [14]. Ainsi, l'utilisation du procédé dit de « zigzag » permet l'inspection des deux surfaces de la pièce contrôlée en cas de présence de fissures ainsi que dans l'épaisseur de cette dernière pour les autres défauts comme le montre la Figure 58.

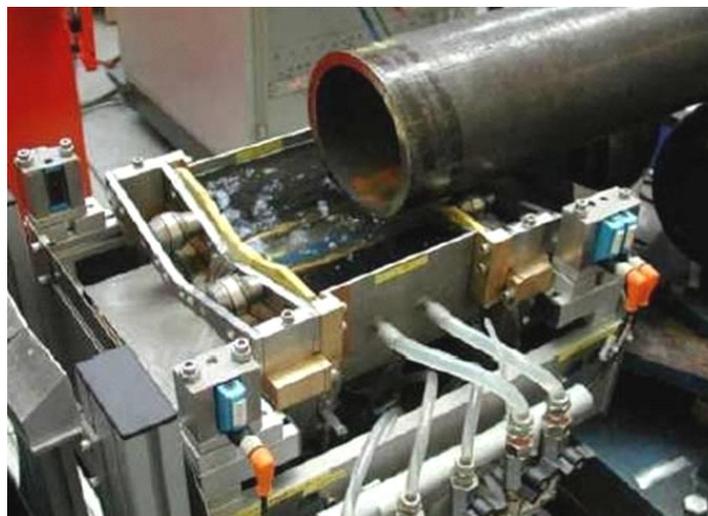


Figure 59 : banc usine Saint-Saulve pour le contrôle ultrasonore des tubes de la division UpStream. Les transducteurs pour le contrôle transversal, longitudinal et le contrôle dimensionnel de l'épaisseur sont immergés dans le tank.

Dans la suite de ce document, nous nous consacrerons uniquement au mode transversal après transmission dans la pièce à inspecter ainsi qu'aux défauts débouchants sur la surface interne du tube dont la profondeur varie entre 0.3 et 1.5mm.

L'inspection complète du tube en usine comme illustré Figure 59, se décline en deux contrôles selon que le défaut ciblé soit de type longitudinal ou transversal.

- **Le contrôle transversal** : effectué pour la détection des défauts transversaux, le contrôle a lieu dans un plan parallèle à la génératrice du tube. La géométrie du tube est ainsi réduite à une plaque (Figure 60).
- **Le contrôle longitudinal** : effectué pour la détection des défauts longitudinaux, le contrôle a lieu dans un plan d'incidence perpendiculaire à la génératrice du tube. La géométrie du tube est ainsi réduite à deux cercles concentriques (Figure 61).

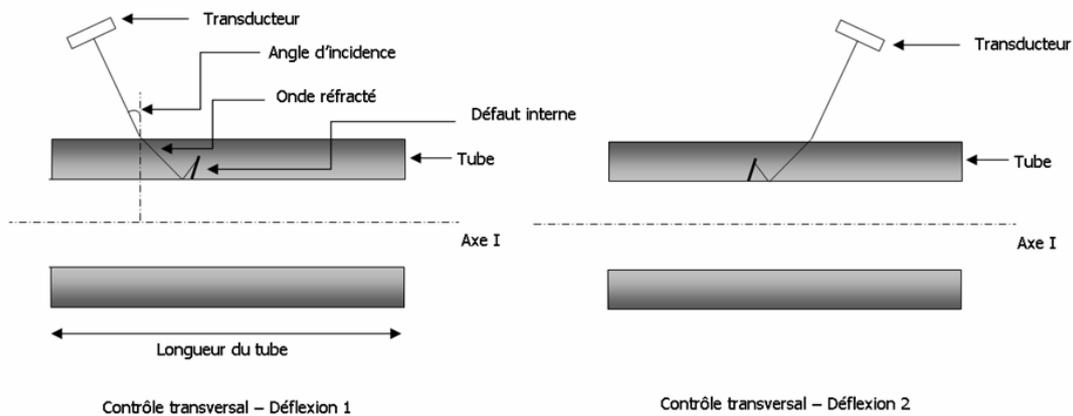


Figure 60 : géométries du contrôle transversal du tube, inspection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif vis-à-vis du faisceau acoustique (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite)

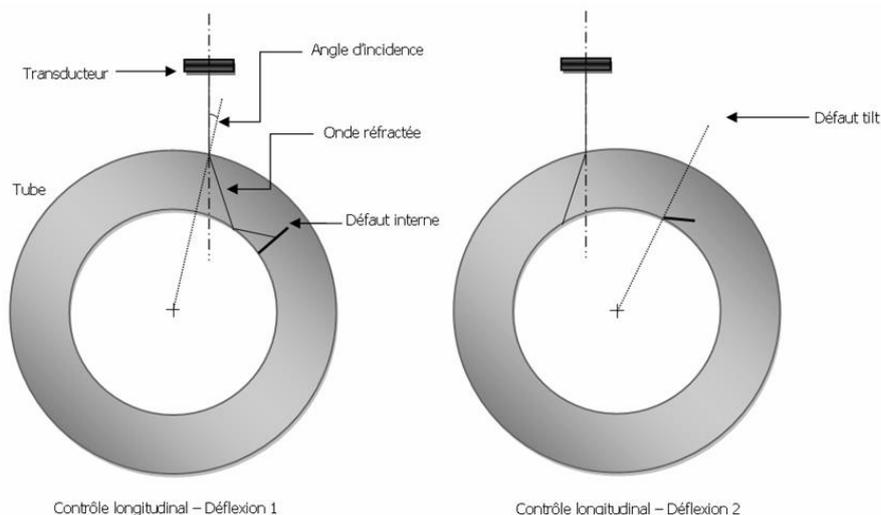


Figure 61 : géométries du contrôle longitudinal du tube, inspection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite)

Dans la suite, nous nous intéresserons particulièrement au contrôle transversal sur tube où la géométrie inspectée selon cette configuration du contrôle est réduite à une plaque. Nous présenterons dans un premier temps les caractéristiques des deux modèles directs utilisés

dans ces travaux pour l'obtention des images ultrasonores simulées du contrôle transversal sur tube. Le premier modèle direct est le simulateur bidimensionnel que nous appellerons dorénavant **Simulateur VRCF**, développé dans le cadre de ces travaux. Le second modèle direct est le logiciel d'expertise **CIVA**. Nous aborderons brièvement le principe utilisé par **CIVA** pour la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores et leur interaction avec un défaut plan débouchant sur la surface interne et le comparerons avec celui du **Simulateur VRCF**. Puis, nous présenterons les différents paramètres définis pour l'analyse des données simulées par rapport aux données expérimentales dans le but de valider les prédictions obtenues par le **Simulateur VRCF**. Enfin, nous décrirons l'implémentation logicielle du **Simulateur VRCF** pour la géométrie de la plaque. Nous décrirons d'abord, le modèle monochromatique (i.e. pour la fréquence nominale du transducteur) puis nous prolongerons le modèle à l'ensemble des fréquences constituant le spectre fréquentiel du transducteur afin d'obtenir des images ultrasonores simulées de type Bscans et Ascans comparables à celles issues de l'expérience.

III. Modèles directs pour la simulation d'une inspection ultrasonore

Le simulateur de propagation ultrasonore **Simulateur VRCF** développé dans le cadre de ces travaux et le logiciel **CIVA** permettent de simuler la génération et la propagation de l'onde ultrasonore dans la pièce à contrôler, son interaction avec le défaut ainsi que la réception au niveau transducteur. Ils permettent d'obtenir des images ultrasonores simulées comparables avec celles obtenues expérimentalement. En revanche, **Simulateur VRCF** et **CIVA** se distinguent par la stratégie considérée pour la modélisation de cette propagation.

1. Le logiciel d'expertise CIVA- le module inspection ultrasonore

La plate-forme **CIVA** est développée par le CEA-LIST et ses partenaires depuis les débuts des années 90, dans le but de simuler une inspection non-destructive [61]. La plupart des modèles développés sont basées sur des méthodes semi-analytiques, mêlant méthodes analytiques et intégration numérique [62] [63] dans un souci de réduction des temps de calcul. Les outils de simulation par ultrasons dans **CIVA**, permettent de simuler un grand nombre de configurations de contrôle ultrasonore nécessitant ainsi le calcul du faisceau propagé et son interaction avec les défauts. La modélisation du faisceau ultrasonore est réalisée à l'aide de la méthode des pinceaux [64]. Un pinceau est un ensemble de rayons formant un cône au point source P comme illustré dans la Figure 62. Le centre du pinceau est appelé rayon axial et forme avec l'enveloppe du pinceau constituée de rayons paraxiaux

un angle correspondant à l'angle d'ouverture du cône. Au cours de sa propagation, le pinceau initialement conique va subir des déformations en fonction des milieux parcourus.

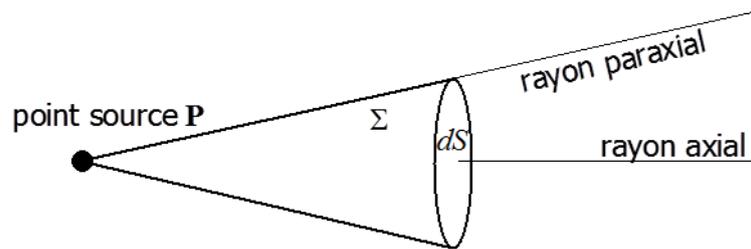


Figure 62: d'un pinceau provenant l'un point source P et de ses rayons : axial et paraxial. [64]

La méthode des pinceaux utilise l'intégrale de Rayleigh pour le calcul du rayonnement acoustique. Selon cette intégrale, la surface émettrice du transducteur est discrétisée en plusieurs sources émettrices infinitésimales. Dans le couplant, le champ est ainsi calculé à partir de la sommation des contributions issues de l'ensemble des sources réparties sur la surface du transducteur. Dans la pièce à inspecter, la méthode des pinceaux est appliquée en propageant les champs élémentaires depuis le couplant jusqu'à la pièce à inspecter à l'aide de la fonction de Green (réponse à une excitation ponctuelle) [64]. L'interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut est traitée en utilisant différentes approches de modélisation. Le choix de ces différentes approches dépend de la nature du défaut ainsi que des caractéristiques du contrôle ultrasonore. Ces approches sont classées en trois grandes catégories : approximations analytiques, solutions analytiques exactes et méthodes numériques. Nous nous intéressons uniquement aux approximations analytiques compatibles avec notre problématique, i.e. les approximations analytiques permettant le calcul de l'interaction entre un faisceau ultrasonore et un défaut plan. Pour répondre à ce besoin, **CIVA** utilise les approximations suivantes [65] [33] [66]:

- **Approximation de Kirchhoff** [33]: permet de modéliser les réflexions spéculaires générées par des défauts volumiques (Trous sphériques ou hémisphériques, trous à fond plat) et des entailles débouchant sur le fond ou la surface de la pièce. La configuration de l'inspection correspond à une inspection en mode « pulse-écho ». Cependant, cette approximation n'est valable que si la direction d'observation est proche de celle de la réflexion spéculaire. La réflexion spéculaire désigne ici une direction de propagation du faisceau ultrasonore perpendiculaire à la surface du défaut [34]. L'approximation de Kirchhoff selon [33] est particulièrement adaptée à la modélisation des phénomènes de la réflexion spéculaire et des effets de coins. Le modèle correspondant à cette approximation nécessite le maillage de la surface du défaut pour le calcul des contributions élémentaires des sources situées sur la surface du défaut illustrées Figure 63. Le calcul peut être bidimensionnel ou tridimensionnel.

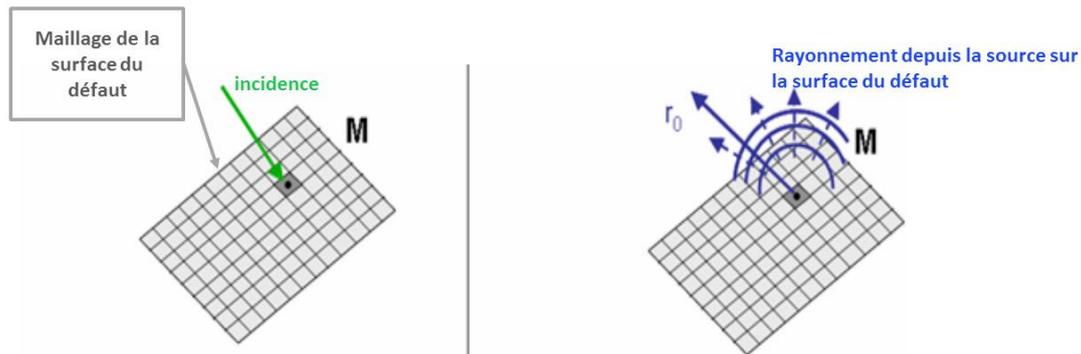


Figure 63 : discrétisation de la surface du défaut en plusieurs sources élémentaires pour le calcul des contributions élémentaires engendrées par l'interaction du faisceau ultrasonore avec un défaut plan selon l'approximation de Kirchhoff dans CIVA

- **Théorie Géométrique de la Diffraction** [33] : permet de modéliser le problème de diffusion des ondes ultrasonores par une arête. La configuration de l'inspection correspond à une inspection en mode **Time Of Flight Diffraction (TOFD)**, illustrée dans la Figure 64. L'approximation n'est valable qu'en dehors des zones d'ombre. Le modèle correspondant à cette approximation nécessite le maillage du contour du défaut. Le calcul peut être bidimensionnel ou tridimensionnel.

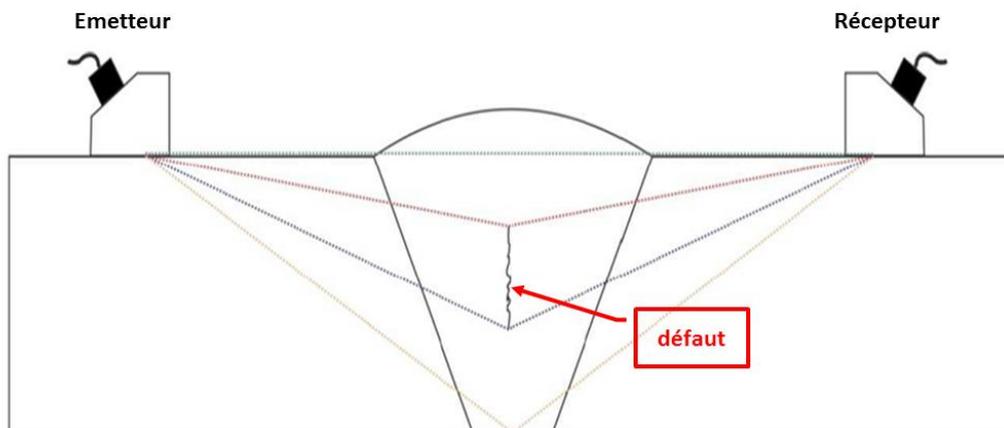


Figure 64 : inspection d'un défaut dans la paroi en TOFD

Enfin, les dernières versions du logiciel **CIVA** sont dotées d'un nouveau modèle de calcul issu d'une collaboration entre le **CEA** et **EDF**. Il s'agit du module **CIVA-Athéna-2D** [66], un module hybride combinant méthodes semi-analytiques et la méthode des Eléments-Finis du code **ATHENA** développé par **EDF**. La zone de calcul considère uniquement le plan d'incidence du capteur, le calcul est donc bidimensionnel. Le **VRCF** ne dispose pas de ce module.

Pour une inspection correspondant à notre problématique : inspection en mode « Pulse-écho » d'une pièce immergée présentant un défaut plan débouchant sur sa surface interne, **CIVA** utilise l'approximation de Kirchhoff en elastodynamique pour le calcul de l'interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut plan. Les résultats des calculs sont affichés suivant

différentes présentations selon le type de balayage effectué : Ascans, Bscans et Cscans..Etc. De plus, le logiciel offre différents outils de post-traitements de ces résultats.

2. Le Simulateur VRCF : simulateur bidimensionnel de propagation ultrasonore

Le simulateur de propagation ultrasonore **Simulateur VRCF** développé dans le cadre de ces travaux est basé sur la théorie des rayons [32]. Le modèle permet la simulation d'un contrôle transversal ultrasonore d'un tube, la géométrie du tube est ainsi réduite à une plaque.

Le faisceau ultrasonore est décrit au moyen de rayons ultrasonores parallèles. Ce choix est justifié par une approximation bien connue qui est : une source ponctuelle P située dans un milieu fluide homogène, isotrope et infini qui émet une onde sphérique divergente vers un point d'observation M. Nous nous plaçons à un point d'observation suffisamment éloigné du point source ce qui nous permet d'approximer l'onde émise par la source au moyen d'une onde plane. Si le point M est suffisamment éloigné de la source P (en pratique, la distance entre ces deux points est supérieure à la longueur d'onde), alors l'onde sphérique peut être considérée comme une onde plane dont le vecteur d'onde est dirigé du point source P vers le point d'observation M comme l'illustre la Figure 65. La divergence du faisceau n'est pas prise en compte contrairement au modèle **CIVA**. Ce choix est justifié par la faible divergence des faisceaux ultrasonores des transducteurs utilisés en bancs automatiques de contrôle.

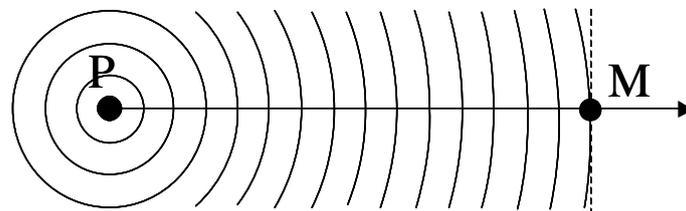


Figure 65 : onde sphérique émise depuis la source P dans un milieu fluide homogène, isotrope et infini vue comme une onde plane au point M et au-delà.

Le **Simulateur VRCF** est basé sur une approche zonale selon laquelle : nous considérons uniquement les rayons ultrasonores ayant eu une interaction directe ou indirecte avec la surface du défaut et susceptible de se retro-propager vers la surface du transducteur. La transmission des rayons ultrasonores dans la pièce à inspecter considère uniquement les ondes transversales. En effet, dans la pratique l'onde transversale est utilisée pour s'affranchir des phénomènes de conversion de mode. Le défaut ciblé est plan, lisse, libre de contrainte, d'extension proche ou supérieure à la longueur de l'onde transversale et débouchant sur la surface interne. La prise en compte de la diffraction suite à une interaction d'un rayon ultrasonore avec le défaut dépend du choix de l'approche définie par l'utilisateur. Le modèle considère la diffraction à l'extrémité non débouchante du défaut. Nous rappelons les différentes approches considérées par le **Simulateur VRCF** pour la prise en compte de l'interaction entre le rayon ultrasonore et le défaut ciblé, qui sont :

- Le modèle **Réflexion & Réfraction (SSD)** : présente l'avantage de la rapidité des calculs. En revanche, il ne prédit pas correctement la réponse des défauts présentant une inclinaison (tilt) défavorable au retour des rayons ultrasonores vers la surface du capteur. Cette approche ne considère pas les rayons diffractés suite à l'interaction de l'onde plane avec la surface du défaut plan débouchant.
- Les modèles basés sur les approximations **HF (GTD & KA)** : délivrent des informations supplémentaires par rapport au modèle **SSD** mais présentent des singularités aux voisinages des zones d'ombre pour le champ diffracté.
- Le modèle **Kirchhoff Approximation Raffiné (KAR)** proposé par [57], issu de la combinaison des approches **(GTD & KA)** pour s'affranchir ainsi de leurs singularités.
- Le modèle **Solution Exacte (SE)** [39] : basée sur une extension asymptotique de Pauli aux frontières d'ombre et une expression asymptotique de Sommerfeld en dehors de ces frontières.
- Le modèle **Kirchhoff Intégral (KI)** [39] [59] : basé sur la résolution numérique de l'intégrale de Kirchhoff.

La surface du transducteur est discrétisée suivant le nombre de rayons en émission. Le transducteur respecte le principe de réciprocité.

Dans un souci de proposer une aide à l'interprétation des données ultrasonores expérimentales et de mieux comprendre les phénomènes complexes opérant lors d'un contrôle ultrasonore, tout en veillant à la contrainte des temps de calcul pour pouvoir simuler un grand nombre de configurations ; les hypothèses simplificatrices considérées permettent d'avoir un modèle de propagation ultrasonore simple pour prédire la réponse d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube lors d'un contrôle non destructif ultrasonore selon la configuration transversale.

D'autre part, ces hypothèses permettent également de dresser la liste des principales différences entre le simulateur de propagation ultrasonore développé dans le cadre de ces travaux et le logiciel d'expertise **CIVA** que nous pouvons résumer principalement dans le Tableau 1.

Comme précisé dans le Tableau 1, les deux simulateurs de propagation (**Simulateur VRCF** et **CIVA**) permettent d'obtenir des images ultrasonores de même nature que celles obtenues expérimentalement. Une des images ultrasonores qui nous intéresse particulièrement est l'image Bscan. En effet, le Bscan représente l'ensemble des Ascans obtenus lors du balayage le long de la pièce à inspecter. Il contient ainsi l'ensemble des informations utiles relatives au temps de propagation des ondes ultrasonores à une position de balayage donnée. De plus, le Bscan permet d'extraire la courbe écho-dynamique qui représente le maximum d'amplitude reçue par le transducteur à chaque position de balayage parcourue. La validation des prédictions obtenues à l'aide des différentes approches du **Simulateur VRCF** est basée sur une étude comparative d'un ensemble de paramètres contenus dans l'image ultrasonore de type Bscan [1]. Nous aborderons ces paramètres par la suite dans ce chapitre.

	Modèle Direct développé Simulateur VRCF	Logiciel d'expertise CIVA
Faisceau ultrasonore	Rayons parallèles	faisceaux divergents
Approche modélisation de la propagation ultrasonore	Approche rayon	Approche champ
Interaction faisceau/défaut plan débouchant sur la surface interne de la pièce à inspecter	SSD : Réflexion Spéculaire	Approximation de Kirchhoff en elastodynamique
	GTD : Théorie Géométrique de Diffraction	
	KA : Approximation de Kirchhoff	
	KAR : Kirchhoff Raffiné	
	SE : Solution Exacte	
KI : Kirchhoff intégral		
Prise en compte de la diffraction	Diffraction à partir de l'extrémité non débouchant du défaut	Maillage de la surface du défaut
Calcul	2D	2D, 3D
Mode du contrôle ultrasonore	Pulse Echo	
Images ultrasonores	Ascan, Bscan	

Tableau 1 : récapitulatif des différentes considérations prise en compte par le simulateur de propagation développé « Simulateur VRCF » et CIVA pour la modélisation de la propagation ultrasonore dans le cadre d'un contrôle non destructif ultrasonore

Dans la section suivante, nous nous intéresserons à la description de l'implémentation logicielle du **Simulateur VRCF** pour la fréquence nominale du transducteur (modèle mono fréquentiel) puis nous étendrons ce dernier au spectre fréquentiel du transducteur pour aboutir aux images ultrasonores souhaitées et qui feront l'objet d'étude comparative avec celles issues de l'expérience dans le prochain chapitre afin d'évaluer la fiabilité des prédictions obtenues l'aide des différentes approches présentées précédemment.

IV. Implémentation logicielle du simulateur de propagation ultrasonore mono fréquentiel

Comme abordé dans le précédent chapitre, la théorie des rayons fournit un outil simple pour déterminer les rayons générés par l'interaction d'une onde ultrasonore et d'un défaut. Les méthodes analytiques basées sur la théorie des rayons, déduite de l'**OG**, permettent de simplifier le problème de la propagation de l'onde ultrasonore et son interaction avec le défaut en décomposant le problème global en sous problèmes simples à traiter. Dans un milieu homogène et isotrope, l'**OG**, considère le faisceau ultrasonore comme un ensemble de rayons ultrasonores où les phénomènes de réflexion et de réfraction sont régis par la Loi de Snell-Descartes. Dans le cadre de notre modélisation, nous nous placerons dans cette hypothèse pour l'ensemble des rayons considérés par le modèle (réfléchis, réfractés et diffractés). Notre problématique consistera donc en [32] :

1. La détermination des rayons définissant la phase indépendamment de son amplitude.

2. La détermination de l'amplitude relative à chaque rayon.

Rappelons que la détermination de l'amplitude peut être réalisée par des considérations physiques, en suivant la variation de l'intensité de l'onde le long du rayon sans tenir compte des rayons voisins. En mode monochromatique où l'onde est plane, nous pouvons écrire le champ sous la forme donnée par l'Équation 81 :

$$\mathbf{u}(x) = \mathbf{u}_0(x)e^{ik\psi(x)}$$

Équation
81

Avec

$\psi(x)$ Terme de la phase
 $\mathbf{u}_0(x)$ Terme d'amplitude

Avant de détailler la démarche considérée pour la détermination des signaux générés suite à l'interaction d'un rayon ultrasonore et d'un défaut plan, nous présentons les différentes hypothèses qui nous ont permis d'appréhender le problème direct global à l'aide de la théorie des rayons, en le décomposant en sous-problèmes et en déterminant des solutions approchées à chacun de ces sous-problèmes :

- Le milieu est homogène et isotrope.
- Le défaut est plan, lisse, libre de contrainte et de profondeur proche ou supérieure à la longueur d'onde de l'onde transversale. Le défaut peut être droit ou incliné.
- Le transducteur respecte le principe de réciprocité⁵.
- Les fronts d'ondes sont supposés plans et parallèles⁶.
- La transmission dans le matériau prend en compte uniquement les ondes transversales.

L'interaction avec le défaut vérifie une approche zonale. Cette approche, nous permet de considérer uniquement les zones où une interaction directe ou indirecte opère entre le faisceau et le défaut. Aussi, nous permet-elle de déterminer les différents trajets géométriques des rayons illustrés dans la Figure 66.

⁵ Le champ du transducteur en émission en un point admet la même dépendance spatiale que le champ émis par une source ponctuelle placée en ce point et vu par le transducteur en réception.

⁶ La transmission des ondes dans la pièce à inspecter se fait dans la zone de Fraunhofer (champ lointain). Par conséquent, on applique l'approximation des ondes planes où les fronts d'ondes sont supposés plans et parallèles.

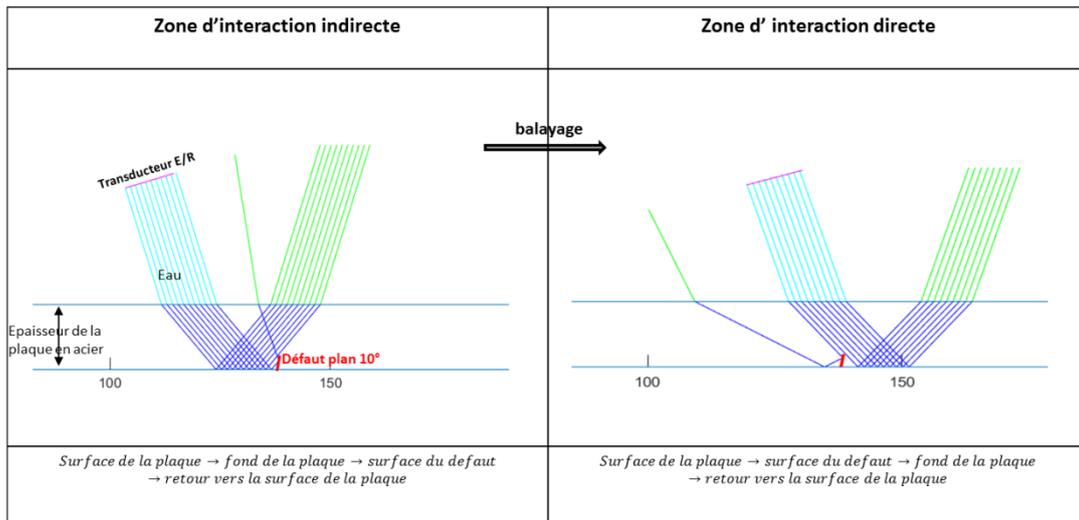


Figure 66 : interactions de l'onde ultrasonore plane avec un défaut plan incliné (10°) débouchant sur la surface interne de la plaque selon une approche zonale

Dans la suite, nous détaillerons l'implémentation logicielle pour le calcul des trajets géométriques définissant les rayons propagés et pour le calcul de l'amplitude le long de chaque rayon pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube correspondant à la géométrie d'une plaque.

1. Synoptique global du modèle bidimensionnel pour la configuration transversal du contrôle ultrasonore sur tube

Le modèle direct *Simulateur VRCF* est développé sous Matlab dans le cadre de ces travaux comporte quatre sections pouvant être résumées comme l'illustre la Figure 67:

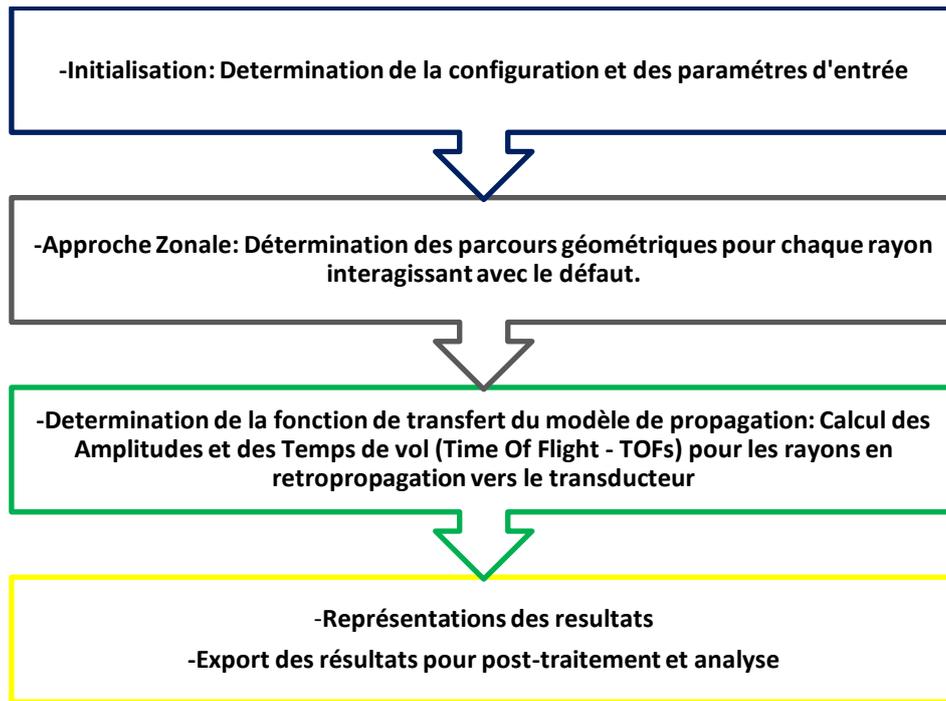


Figure 67 : schéma résumant les quatre sections composant le modèle direct mono-fréquentiel pour la simulation de la propagation d'un faisceau ultrasonore comportant plusieurs rayons ultrasonores pour la géométrie plaque présentant un défaut plan longitudinal droit ou incliné débouchant sur la surface interne

Chaque section peut être résumée sous forme d'un schéma-bloc détaillant les étapes principales constituant le programme. Le synoptique de la Figure 68 illustre les fonctions et les processus itératifs intervenant dans chaque section. Les prochains paragraphes sont dédiés à la description de chacune de ces sections.

2. Initialisation de la configuration du contrôle ultrasonore

i. Définition des paramètres d'entrée pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube

La section initialisation de la configuration du contrôle ultrasonore permet à l'utilisateur via une interface graphique de renseigner les caractéristiques relatives aux milieux de propagation des rayons ultrasonores, à la pièce à inspecter (ici, plaque), au contrôle ultrasonore, au transducteur et à son signal d'émission, au défaut ciblé et enfin à l'approche pour le calcul de la l'interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut comme illustré dans la Figure 69.

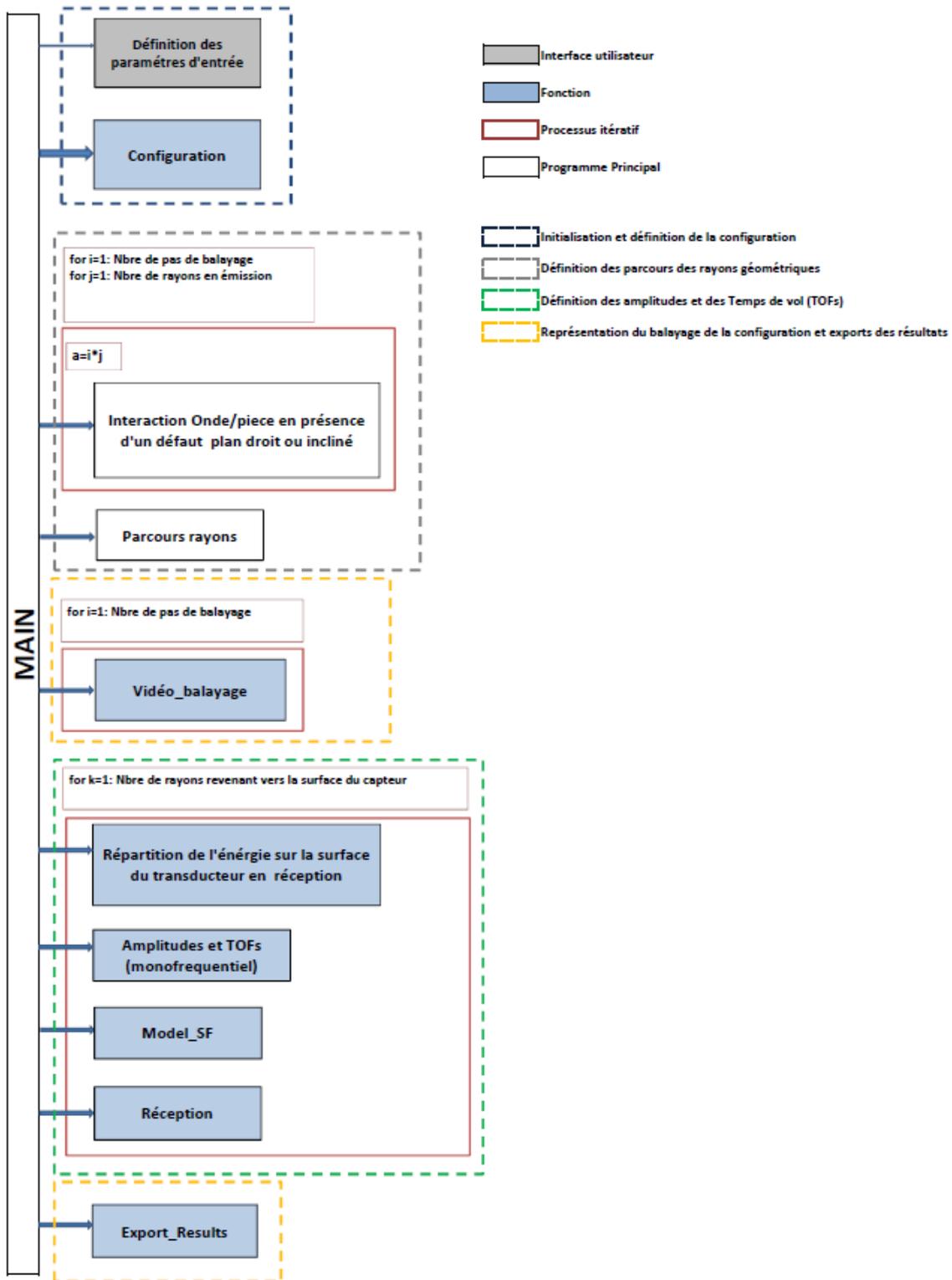


Figure 68 : Synoptique du modèle direct pour la simulation de l'interaction d'un faisceau comportant plusieurs rayons ultrasonores pour la géométrie plaque présentant un défaut plan droit ou incliné débouchant sur la surface interne

Parametres milieux de propagation	Signal d'emission	Defaut cible
Masse volumique Milieu0 (kg/m3): 1000	Nbre d'echantillons : 8192	Tilt (°): 0.001
Masse volumique Milieu1 (kg/m3): 8100	frequence d'echantillonnage : 80	Profondeur (mm): 0.5
Vitesse OndeL milieu0 (m/s): 1483	Largeur de Bande (MHz): 3	Position Extremité1: 138
Vitesse OndeL milieu1 (m/s): 5900	Amplitude (SU): 1	
Vitesse OndeT milieu1 (m/s): 3230		
Parametres transducteur	Definition du controle	Repartition de l'energie sur la surface du transducteur
Inclinaison mecanique (°): 17	Colonne couplant (mm): 30	Piston
Longueur (mm): 12	Pas du balayage (mm): 1	
Frequence nominale (MHz): 5	Debut du balayage (mm): 110	Modele de calcul de la reponse du defaut
Amplitude nominale (SU): 1	Nbre de pas: 40	Reflexion speculaire
	fin du balayage (mm): 150	
Parametres Plaque	Nbre de rayons emis: 75	Start
Longueur (mm): 275		
Hauteur (mm): 15		

Figure 69 : interface graphique permettant à l'utilisateur de définir les paramètres d'entrée pour définir la configuration du contrôle ultrasonore à simuler

Ces caractéristiques résumées sur la Figure 69 sont les suivantes :

- **Milieux de propagation**
- **Transducteur**
- **Signal d'émission du transducteur** : (Cette partie sera détaillée par la suite pour l'extension du modèle mono-fréquentiel au modèle large-bande)
- **Définition du contrôle**
- **Défaut ciblé** : les caractéristiques relatives à la profondeur et tilt (inclinaison) tel que considéré par le **Simulateur VRCF** sont illustrées Figure 70. La largeur du défaut est supposée nulle (les deux facettes du défaut sont confondues).
- **Répartition de l'énergie à la surface du transducteur**
 - Définition du modèle de répartition de l'énergie à la surface du transducteur en émission et en réception comme l'illustre la Figure 71
 - Piston, Hanning ou gaussienne.
- **Modèle de calcul de la réponse ultrasonore du défaut**
 - Définition de l'approche utilisée pour le calcul de l'interaction faisceau ultrasonore/ Défaut
 - Réflexion & Réfraction (**SSD**)
 - Prise en compte de la diffraction
 - ◆ Théorie Géométrique de la Diffraction (**GTD**)
 - ◆ Approximation de Kirchhoff (**KA**)

- ◆ Kirchhoff Raffiné (*KAR*)
- ◆ Solution Exacte (*SE*)
- ◆ Intégrale de Kirchhoff (*KI*)

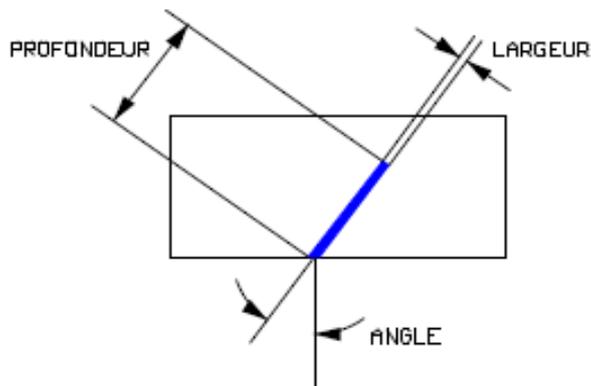


Figure 70 : caractéristiques relatives à la profondeur du défaut et à son tilt (angle, inclinaison) considérées par le *Simulateur VRCF*

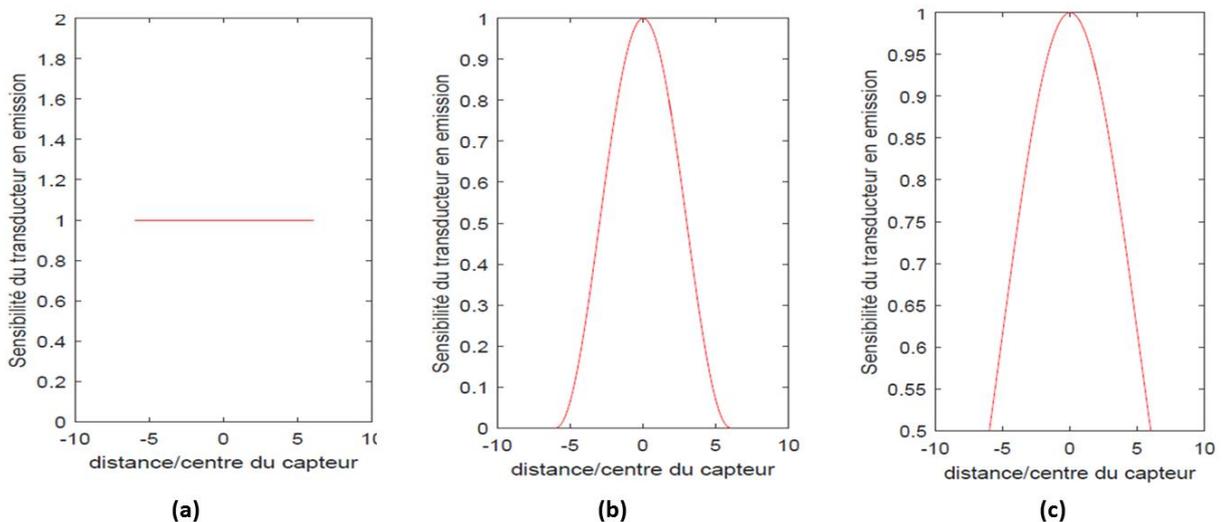


Figure 71: répartition de l'énergie suivant la surface du transducteur en émission/réception selon le modèle : (a) Piston, (b) Hanning, (c) gaussienne.

De plus, l'affichage de cette interface graphique est précédé par le choix du type de simulation à réaliser. En effet, le modèle prend en compte deux types de simulations comme résumé dans la Figure 72 :

- **Simple** : une seule simulation est réalisée avec les paramètres définis par l'utilisateur dans l'interface graphique.
- **Multiples** : une campagne de simulations est réalisée. Chaque itération de cette campagne de simulation correspond à la variation des paramètres suivants : l'inclinaison du défaut, sa profondeur et le pas de balayage. Ces paramètres sont renseignés au préalable par l'utilisateur dans un tableau. L'initialisation du reste des

paramètres du contrôle ne fait pas appel à l'interface graphique. Cependant, l'utilisateur doit les renseigner au préalable à l'aide d'un script dédié.

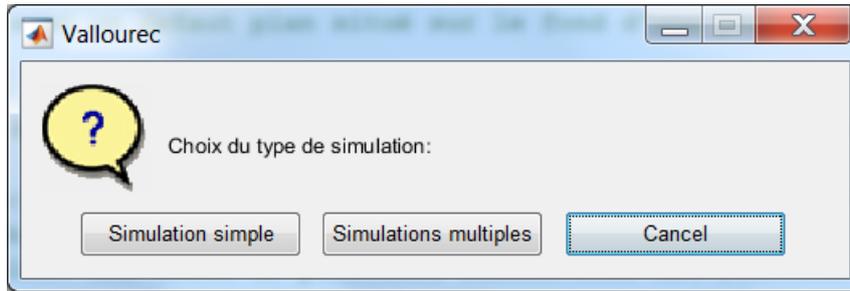


Figure 72: du type de simulation de contrôle ultrasonore à réaliser à l'aide du *Simulateur VRCF*

ii.Approche zonale : détermination des trajets géométriques

Le but étant de simuler l'interaction du rayon ultrasonore avec un défaut plan droit ou incliné débouchant sur la surface interne pour un contrôle transversal. Dans la pratique, le contrôle des défauts débouchants sur la surface interne sont contrôlés en demi-bond illustré dans la Figure 73. Ceci correspond à transmettre le rayon dans la pièce à inspecter sous incidence oblique de manière à ce qu'il se réfléchisse directement sur le défaut après réflexion sur la surface interne de la plaque inspectée. De plus, on applique une incidence oblique suivant deux sens de balayage afin de permettre la détection des défauts inclinés qu'ils soient de tilts positifs (Figure 74, sens1 du balayage) ou négatifs (Figure 74, sens2 du balayage). En effet, la détection des défauts inclinés est souvent plus notable suivant un sens de balayage.

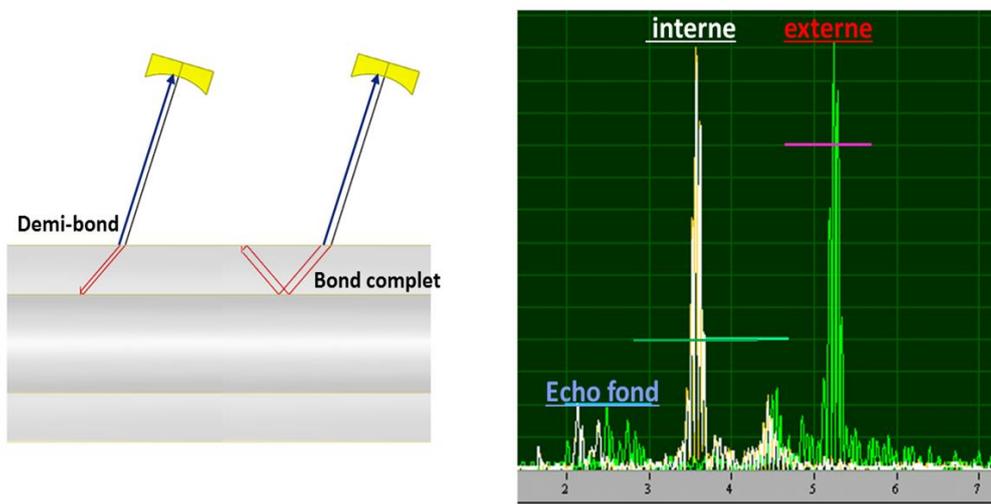


Figure 73 : différents types de bonds des rayons ultrasonores réfractés dans la pièce à inspecter. Le demi-bond permet la détection des défauts internes ou proches de la paroi interne. Le bond complet permet la détection des défauts externes ou proches de la paroi externe.

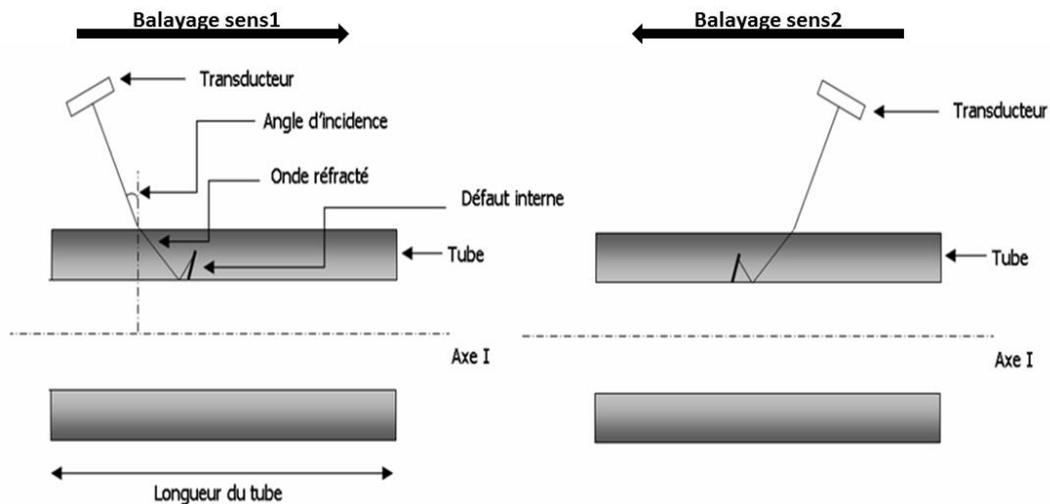


Figure 74 : géométries du contrôle transversal du tube en demi-bond pour la détection d'un défaut débouchant sur la surface interne du tube de tilt positif vis-à-vis du faisceau acoustique (à gauche), inspection d'un défaut de tilt négatif (à droite).

Pour simuler cette interaction entre le rayon ultrasonore et le défaut plan débouchant, nous avons défini les zones sur la surface externe de la plaque à partir desquelles nous observons une interaction directe ou indirecte. Ces zones ont été définies en fonction de l'incidence oblique, de l'inclinaison du défaut plan ciblé ainsi que de la position de son extrémité débouchante sur la surface interne de la plaque. Une interaction directe du rayon ultrasonore et du défaut plan, correspond à une interaction avec le défaut après transmission du rayon ultrasonore depuis l'interface eau/acier. Une interaction indirecte correspond à une réflexion sur le fond après passage de l'interface eau/acier puis interaction avec le défaut (demi-bond). De ce fait, pour la prise en compte de l'interaction du rayon ultrasonore et du défaut plan, nous avons considéré 4 zones différentes illustrées dans la Figure 75 et qui sont définies comme suit :

- Zone d'interaction indirecte : **Zone2**. Pour les défauts de tilt positif tel que $tilt \geq \theta_{refracté}$, aucune interaction indirecte n'opère entre le rayon ultrasonore réfracté en demi-bond et la surface du défaut. Ainsi, la **Zone2** n'est pas observés pour ces tilts positifs comme l'illustre le premier schéma de la Figure 75.
- Zone d'interaction directe : **Zone3**.
- Zones du bond complet, elles correspondent à une réflexion sur le fond puis sur la surface de la plaque sans interagir avec le défaut. Il s'agit des **Zones 1 et 4**.

Suivant l'inclinaison du défaut ciblé et sa profondeur, plusieurs réflexions peuvent apparaître sur la surface du défaut. Nous avons opté pour ne pas considérer au-delà de deux réflexions sur la surface du défaut. La détermination des trajets géométriques est réalisée pour chaque pas du balayage et chaque rayon en émission.

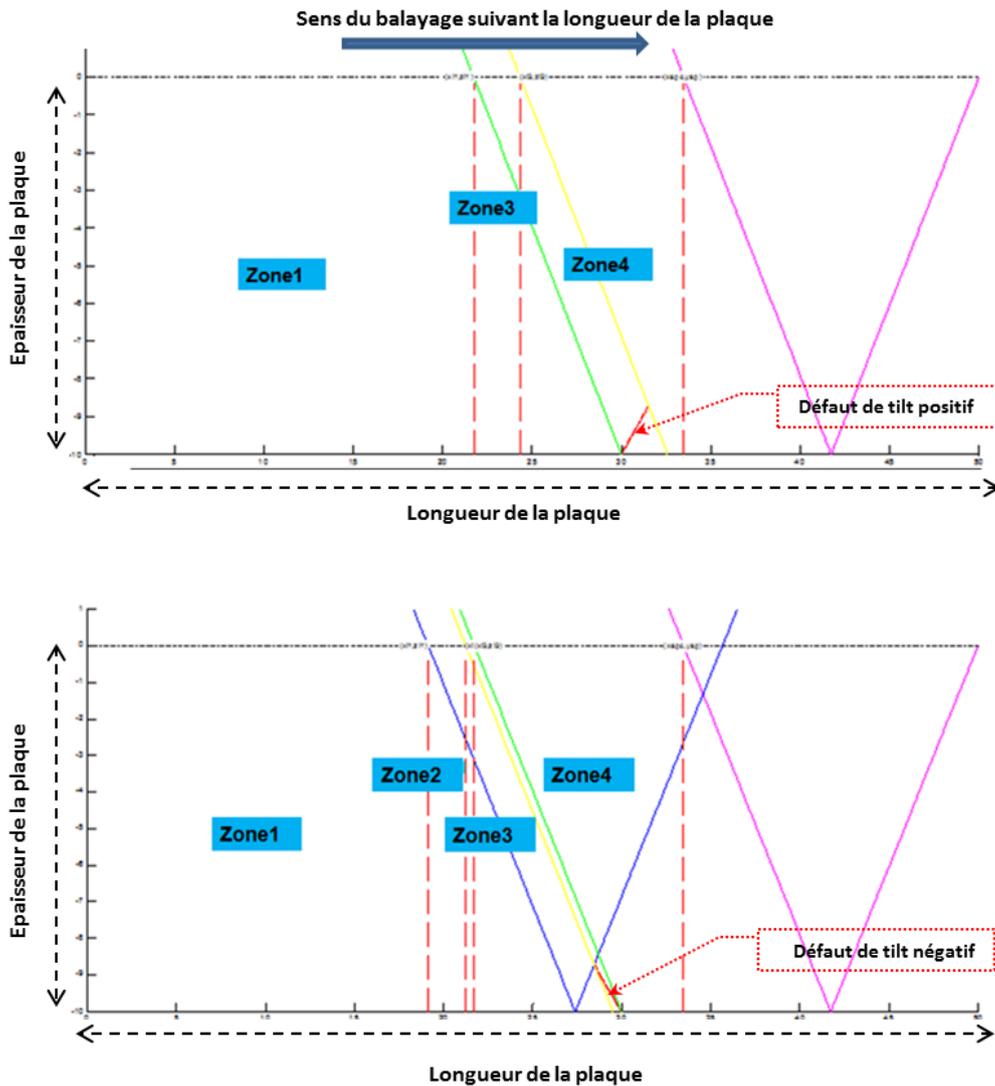


Figure 75 : Approche zonale pour un défaut plan débouchant sur la surface interne de la plaque. La figure du dessus correspond à l'approche zonale pour un défaut de tilt positif (50°). La figure du dessous correspond à l'approche zonale pour un défaut de tilt négatif (-50°). Le balayage du transducteur est défini selon la longueur de la plaque

Pour chaque position du balayage x_i , nous vérifions si le point d'impact x_{ij} sur la surface de la plaque du rayon r_j émis depuis la surface du transducteur appartient à une des zones d'interaction, nous faisons propager le rayon r_j depuis la surface externe de la plaque, jusqu'à son interaction avec le défaut, puis son retour vers la surface externe et sa retro propagation vers le plan du transducteur. Différents trajets sont étudiés et permettent de définir le parcours complet du rayon depuis son émission jusqu'à sa retro propagation vers le plan du transducteur. Le Tableau 2 résume les différents parcours pris en compte par le modèle lors de l'interaction avec le défaut et les différentes réflexions sur les surfaces interne et externe de la plaque. Nous limitons le nombre de réflexions prise en compte sur la surface du défaut à deux.

Zone	parcours	cas étudié
Zone2	2.1	$S_1 F D S_2$
	2.2	$S_1 F_1 D F_2 S_2$
	2.3	$S_1 F_1 D_1 F_2 D_2 F_3 S_2$
	2.4	$S_1 F_1 D_1 F_2 D_2 F_3 \dots$
	2.5	diffraction Z_2 surface
	2.6	diffraction Z_2 fond
Zone3	3.1	$S_1 D S_2$
	3.2	$S_1 D F S_2$
	3.3	$S_1 D_1 F D_2 S_2$
	3.4	$S_1 D_1 F_1 D_2 F_2 S_2$
	3.5	diffraction Z_3 surface
	3.6	diffraction Z_3 fond

Tableau 2 : récapitulatif des différents parcours géométriques du rayon ultrasonore pris en compte par le *Simulateur VRCF*

A chaque impact sur la surface du défaut, le modèle génère des rayons diffractés depuis l'extrémité non débouchante du défaut [46] [57]. Toutefois, nous ne considérons que les rayons diffractés par le défaut susceptibles d'atteindre la surface du transducteur après trajet direct vers la surface externe de la plaque ou après réflexion sur le fond de celle-ci. Ces rayons sont regroupés selon deux cônes illustrés Figure 76. Les rayons composant le cône de diffraction sur la surface externe sont propagés dans l'eau jusqu'à intersection avec le plan du transducteur. Quant aux rayons composant le cône de diffraction vers le fond de la plaque, ils sont réfléchis sur celui-ci, puis propagés dans l'eau jusqu'à intersection avec le plan du transducteur. Si les rayons en retro propagation vers le plan du transducteur appartiennent aux segments définissant la surface du transducteur, ils sont stockés dans une matrice définissant les trajets ultrasonores t_{ij} .

Dans la prochaine section, nous discuterons l'application de cette approche géométrique au calcul des amplitudes ainsi que des temps de vol pour les rayons se retro-propageant vers la surface du transducteur suite à l'interaction avec la surface du défaut plan débouchant.

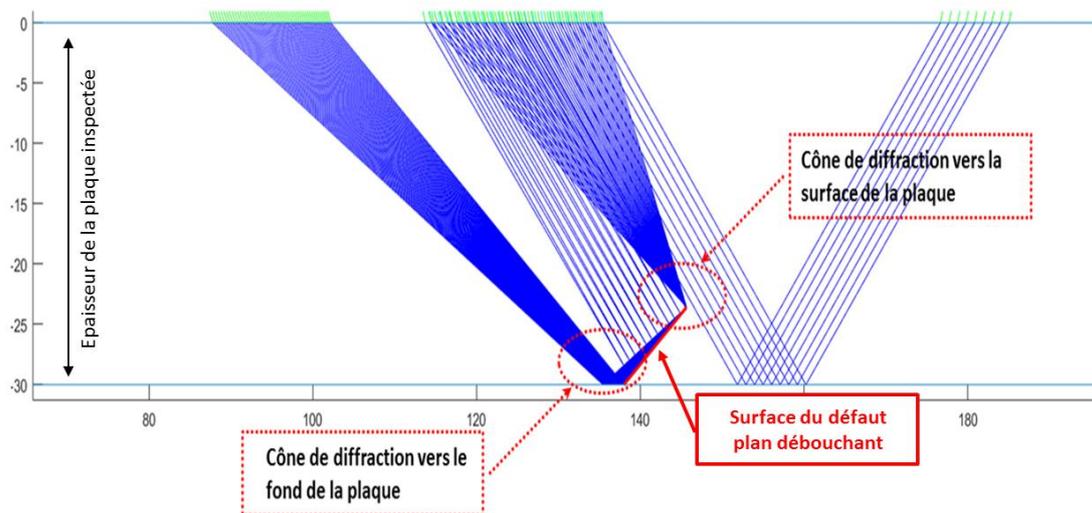


Figure 76 : interaction des rayons ultrasonores avec le défaut interne plan de tilt 50° et de profondeur 10mm débouchant sur la surface interne d'une plaque de dimension 275x175x30xmm. Génération de rayons réfléchis et diffractés au voisinage de l'extrémité non débouchante de ce dernier. Répartition des rayons diffractés en deux cônes de diffraction.

V. Calcul des temps vol et des amplitudes des rayons ultrasonores géométriques

1. Calcul des temps de vol des rayons géométriques (TOF – Time Of Flight)

Pour tous les rayons en rétro-propagation vers la surface du transducteur, les trajets géométriques sont définies et stockés dans une matrice récapitulant tous les points d'impact du rayon ultrasonore depuis son émission jusqu'à sa rétro-propagation vers la surface du transducteur. Cette matrice nous permet ainsi de calculer le temps de vol de chaque rayon en fonction de son parcours. Ce parcours dépend des différents angles (incidence, réflexion, réfraction et observation pour les rayons diffraction) ainsi que des différentes interfaces rencontrées. Le temps de vol d'un trajet est calculé selon l'Équation 82 tel que :

$$TOF_{t_{ij}} = \frac{\text{parcours}_{eau}}{v_{eau}} + \frac{\text{parcours}_{acier}}{v_{acier}} \quad \text{Équation 82}$$

Avec

$TOF_{t_{ij}}$	temps de vol du trajet géométrique.
parcours_{eau}	parcours total du trajet géométrique dans l'eau. Le parcours total comprend l'émission et la retro propagation.
parcours_{acier}	Parcours total du trajet géométrique dans l'acier. Le parcours total comprend les différentes réflexions sur les surfaces interne/externe de la plaque, la diffraction depuis le sommet non débouchant du défaut ainsi que les réflexions sur la surface du défaut
v_{eau}, v_{acier}	Vitesses de propagation. v_{eau} désigne la vitesse de propagation des ondes longitudinales. v_{acier} désigne la vitesse de propagation des ondes

transversales dans l'acier.

Dans la section (Chapitre 3IV.2.i), nous avons présenté la définition des paramètres d'entrée du modèle. Parmi ces paramètres, l'utilisateur peut choisir le modèle de prise en compte de la réponse du défaut suite à son interaction avec le faisceau ultrasonore. Ainsi l'utilisateur peut choisir l'approche **Réflexion&Réfraction (SSD)** ou l'approche **Diffraction**. L'approche **Diffraction** tient compte des phénomènes de réflexion, de réfraction ainsi que de la diffraction. Elle offre à l'utilisateur la possibilité de choisir parmi les 5 modèles de diffraction décrits dans le Chapitre 2, qui sont :

- Théorie Géométrique de la Diffraction (**GTD**).
- Approximation de Kirchhoff (**KA**).
- Kirchhoff Raffiné (**KAR**).
- Solution Exacte (**SE**)
- Intégrale de Kirchhoff (**KI**)

D'autre part, à l'émission chaque rayon sur la surface du transducteur possède une amplitude dépendant de sa position sur la surface du transducteur et du modèle choisi pour la répartition de l'énergie sur la surface du transducteur. Trois modèles de répartition de l'énergie sont proposées à l'utilisateur lors de l'étape de définition des paramètres d'entrée et sont : le modèle Piston, le modèle Hanning **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ou le modèle gaussienne illustrés Figure 71. Le modèle, considère le même transducteur en émission/réception. Par conséquent, la même répartition d'énergie sur la surface du transducteur en émission/réception.

Dans un premier temps, nous détaillerons la démarche considérée pour le calcul des amplitudes pour l'approche **SSD**, puis celles considérées pour la prise en compte de la diffraction.

2. Calcul des amplitudes portées par les rayons géométriques ultrasonores

2.1. Calcul des amplitudes sans prise en compte de la diffraction -Approche SSD

Comme précisé dans la section (Chapitre 3IV), la détermination de l'amplitude peut être réalisée par des considérations physiques, en suivant la variation de l'intensité de l'onde le long du rayon sans tenir compte du champ sur les rayons voisins. L'onde se propageant suivant chaque rayon est prise en compte sous la forme d'une onde plane ayant pour expression

$$\mathbf{A}(x) = \mathbf{A}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

Équation
83

Avec

A_0	Amplitude initiale
\vec{k}	Vecteur d'onde
\vec{r}	Trajet ultrasonore
ω	Vitesse angulaire

Nous précisons, que les réflexions sur les côtés de la plaque ne sont pas prises en compte.

Considérons le trajet géométrique le plus simple suite à une interaction entre un rayon ultrasonore et un défaut plan débouchant sur la surface interne de la plaque. Il s'agit du trajet S_1DS_2 présenté dans le Tableau 2 (p. 116) et plus précisément $C_1S_1DS_2C_2$ tel que C_i désigne les points d'impact sur la surface du transducteur comme le montre la Figure 77. En effet, nous considérons l'évolution de l'amplitude depuis l'émission jusqu'à la réception sur la surface de ce dernier.

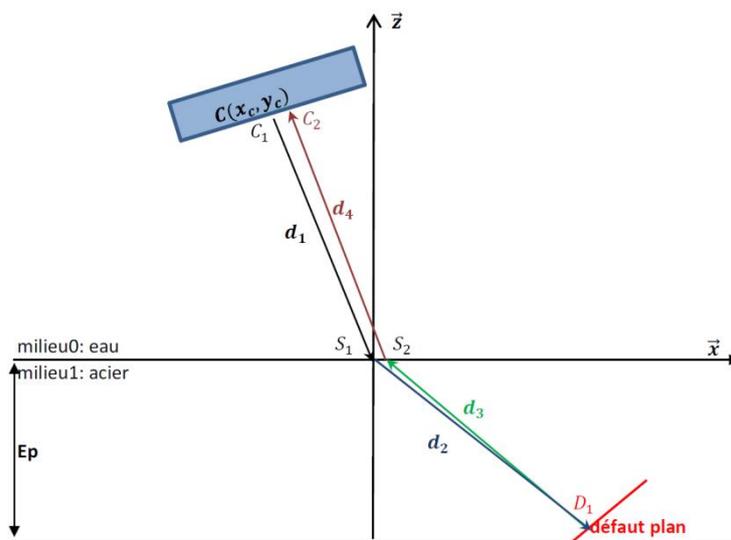


Figure 77 : schéma correspondant au trajet géométrique ultrasonore $C_1S_1DS_2C_2$

La démarche adoptée pour le calcul de l'évolution de l'amplitude reçue par le transducteur $A_{reçue}$ suite à l'interaction entre le rayon ultrasonore et la surface du défaut illustrée Figure 77 pour le trajet ultrasonore le plus simple $C_1S_1DS_2C_2$ selon l'approche **SSD** peut être résumée à l'aide de l'Équation 84

$$A_{reçue} = A_0 * e^{jk_0(d_1+d_4)} * T_{lt} * R_{tt} * T_{tl} * e^{jk_t(d_2+d_3)}$$

Équation
84

Avec

A_0 Amplitude nominale à l'émission

d_1	Distance parcourue par le rayon ultrasonore depuis la surface du transducteur jusqu'à la surface externe de la plaque $[\overrightarrow{C_1S_1}]$
k_0	Nombre d'onde de l'onde longitudinale dans l'eau
k_t	Nombre d'onde de l'onde transversale dans l'acier
T_{lt}	Coefficient de transmission d'une onde longitudinale en onde transversale après passage de l'interface eau/acier
R_{tt}	Coefficient de réflexion d'une onde transversale en onde transversale sur la surface du défaut dans l'acier
T_{tl}	Coefficient de transmission d'une onde transversale en onde longitudinale après passage de l'interface acier/eau
d_2	Distance parcourue par le rayon ultrasonore depuis la surface externe de la plaque jusqu'à la surface du défaut $[\overrightarrow{S_1D_1}]$
d_3	Distance parcourue par le rayon ultrasonore depuis la surface du défaut de retour sur la surface de la plaque $[\overrightarrow{D_1S_2}]$
d_4	Distance parcourue par le rayon ultrasonore depuis la surface externe de la plaque en retro propagation vers le transducteur $[\overrightarrow{S_2C_2}]$

Nous venons de décrire la démarche adoptée pour le calcul de l'évolution de l'amplitude en fonction des trajets ultrasonores pour le trajet ultrasonore le plus simple $C_1S_1DS_2C_2$ selon l'approche **SSD**. Dans la suite, nous adapterons cette démarche à l'approche **Diffraction**.

ii. Calcul des amplitudes avec prise en compte de la diffraction

Nous étudierons la prise en compte de l'évolution de l'amplitude depuis l'émission jusqu'à réception suite à l'interaction du rayon ultrasonore avec le défaut plan débouchant sur la surface interne de la plaque et générant des rayons diffractés depuis le sommet non débouchant du défaut. Nous distinguerons le calcul de l'amplitude selon les approximations dites **HF (GTD, KA, KAR)** basées sur des approximations asymptotiques [55] [57], puis les approches basées sur des considérations intégrales (**SE** et **KI**) [39]. Nous nous focaliserons sur le trajet ultrasonore le plus simple $C_1S_1DS_2C_2$.

a. Approches Hautes Fréquences (GTD, KA, KAR)

La démarche adoptée pour le calcul de l'évolution de l'amplitude reçue par le transducteur $A_{reçue}$ suite à l'interaction entre le rayon ultrasonore et la surface du défaut illustrée Figure 77 pour le trajet ultrasonore le plus simple $C_1S_1DS_2C_2$ selon les approches considérant la diffraction à l'aide d'approximations dites **HF (GTD, KA et KAR)** peut être résumée à l'aide de l'équation suivante :

$$A_{reçue} = A_0 * e^{jk_0(d_1+d'_4)} * T_{lt} * D_{HF} * T_{tld} * e^{jk_t(d_2+d'_3)} \quad \text{Équation 85}$$

Avec

A_0	Amplitude nominale à l'émission
d_1	Distance parcourue par le rayon ultrasonore depuis la surface du transducteur jusqu'à la surface externe de la plaque
T_{lt}	Coefficient de transmission d'une onde longitudinale en onde transversale après passage de l'interface eau/acier
D_{HF}	Coefficient de diffraction selon les approches dites Hautes Fréquences, selon le choix de l'utilisateur quant à l'approche et donc le coefficient de diffraction à utiliser (D_{GTD} , D_{KA} , D_{KAR})
T_{tLD}	Coefficient de transmission d'une onde transversale diffracté depuis le sommet non débouchant du défaut en onde longitudinale après passage de l'interface acier/eau
d_2	Distance parcourue par le rayon ultrasonore incident depuis la surface externe de la plaque jusqu'à la surface du défaut
d'_3	Distance parcourue par le rayon ultrasonore diffracté depuis le sommet non débouchant du défaut de retour sur la surface de la plaque
d'_4	Distance parcourue par le rayon ultrasonore diffracté après transmission dans l'eau depuis la surface externe de la plaque en retro propagation vers le transducteur

Les approches prenant en compte la diffraction à l'aide d'approximation **HF (GTD, KA et KAR)** considèrent la même démarche géométrique pour le calcul de l'évolution de l'amplitude selon le trajet ultrasonore que celle de l'approche **SSD**. Comme le montre l'Équation 85, le coefficient de réflexion R_{tt} sur la surface du défaut est remplacé pour les rayons diffractés depuis l'extrémité non débouchante du défaut par le coefficient de diffraction D_{HF} . Ce coefficient D_{HF} est déterminé par le choix de l'utilisateur de l'approche **HF (GTD, KA et KAR)**. Les expressions des coefficients D_{GTD} , D_{KA} , D_{KAR} ont été détaillées dans le Chapitre 2.

Par ailleurs, l'Équation 85 permet d'obtenir l'amplitude reçue par le transducteur pour le cas où le rayon ultrasonore est diffracté depuis le sommet du défaut et se propage directement vers la surface de la plaque. Pour le cas où le rayon diffracté se propage vers le fond de la plaque avant son éventuelle retro-propagation vers la surface du transducteur, l'Équation 85 devient :

$$A_{reçue} = A_0 * e^{jk_0(d_1+d'_5)} * T_{lt} * D_{HF} * R_{ttD} * T_{tLD} * e^{jk_t(d_2+d'_3+d'_4)} \quad \text{Équation 86}$$

Avec

R_{ttD}	Coefficient de réflexion de l'onde transversale diffractée depuis le sommet non débouchant du défaut sur le fond de la plaque en onde transversale
T_{tLD}	Coefficient de transmission de l'onde transversale diffractée vers l'eau.
d'_3	Distance parcourue par le rayon ultrasonore diffracté depuis le sommet non débouchant du défaut vers le fond de la plaque
d'_4	Distance parcourue par le rayon ultrasonore diffracté sur le fond de la plaque et de retour vers la surface externe de la plaque

d'_5 Distance parcourue par le rayon ultrasonore diffracté depuis la surface externe de la plaque en retro propagation vers le transducteur

Dans les prochaines sections, nous aborderons les équations considérées pour la prise en compte de la diffraction selon les approches basées sur des considérations dites intégrales : la **Solution Exacte (SE)** ainsi que l'**Intégrale de Kirchhoff (KI)**. L'approche géométrique pour le calcul de l'évolution de l'amplitude en fonction du trajet ultrasonore est également adoptée pour ces deux approches. Par conséquent, nous exposerons dans la suite uniquement les équations permettant de prendre en compte l'amplitude du rayon diffracté depuis le sommet non débouchant du défaut.

b. Approche Solution Exacte (SE)

Pour le calcul de l'amplitude selon l'approche **Solution Exacte (SE)**, il est judicieux de rappeler la géométrie du problème illustrée Figure 78 .

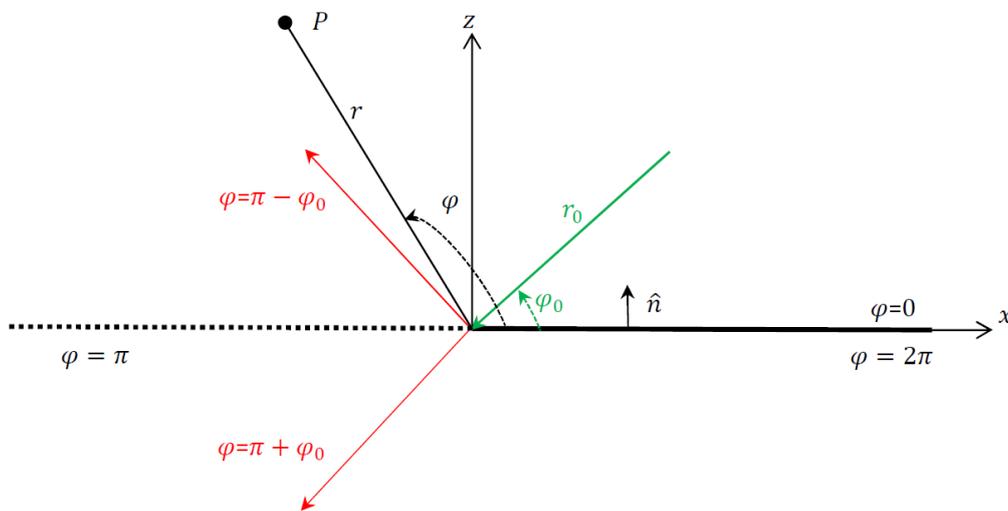


Figure 78 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) sur un demi-plan

Comme précisé dans le Chapitre 2, la **Solution Exacte (SE)** est basée sur l'extension de Pauli valide aux frontières d'ombre $\varphi \approx \pi + \varphi_0$ et $\varphi \approx \pi - \varphi_0$ et la transforme selon l'expression asymptotique de Sommerfeld en dehors de ces frontières [39]. En effet, l'expression asymptotique de Sommerfeld n'est valable que sous condition :

$$\sqrt{k_t r} \left| \cos \frac{(\varphi - \varphi_0)}{2} \right| \gg 1, \sqrt{k_t r} \left| \cos \frac{(\varphi + \varphi_0)}{2} \right| \gg 1 \quad \text{Équation 87}$$

Avec

- k_t Nombre d'onde de l'onde considérée, ici il s'agit de l'onde transversale.
- φ Angle d'observation au point $P(r, \varphi)$.
- φ_0 Angle d'incidence de l'onde incidente sur le demi-plan

Ainsi nous pouvons écrire l'amplitude diffractée au sommet non débouchant du défaut [39] tel que :

$$A_4 = \begin{cases} A_3 * D_{som} \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}}, & \text{si } \left(\sqrt{k_t r} \left| \cos \frac{(\varphi - \varphi_0)}{2} \right| \gg 1, \sqrt{k_t r} \left| \cos \frac{(\varphi + \varphi_0)}{2} \right| \gg 1 \right) \\ & \text{et } \varphi \text{ en dehors des zones d'ombre} \\ A_3 \left[e^{-ik_t r \cos(\varphi - \varphi_0)} * F \left(\sqrt{2 * k_t * r} * \cos \left(\frac{\varphi - \varphi_0}{2} \right) \right) + e^{-ik_t r \cos(\varphi + \varphi_0)} * F \left(\sqrt{2 * k_t * r} * \cos \left(\frac{\varphi + \varphi_0}{2} \right) \right) \right], & \text{sinon} \end{cases}$$

Équation 88

Avec

D_{som} Coefficient de diffraction issu de l'approximation asymptotique de la solution de Sommerfeld. Il correspond au coefficient de la GTD, $D_{som} = D_{GTD}$

A_4 Amplitude du rayon ultrasonore suite à une diffraction sur le sommet non débouchant du défaut vers la surface externe de la plaque

A_3 Amplitude du rayon ultrasonore réfracté depuis la surface externe de la plaque et incident sur la surface du défaut

F Intégrale de Fresnel

c. Approche Kirchhoff Integral (KI)

Pour rappel, la géométrie du problème pour le calcul de l'amplitude selon l'approche Kirchhoff Intégrale (KI) est illustrée ci-dessous :

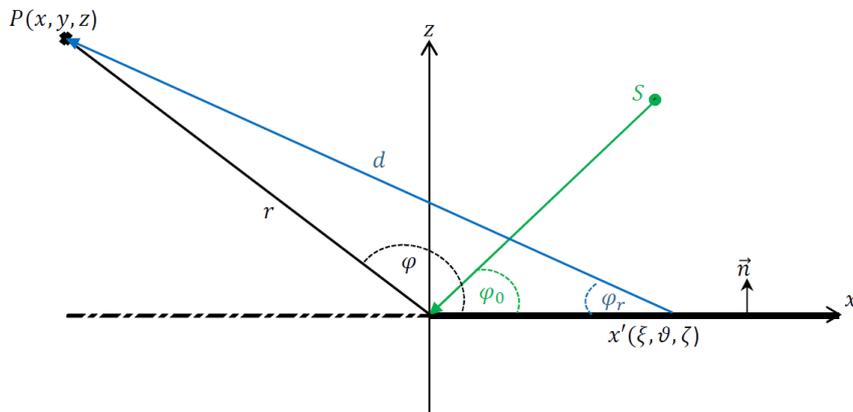


Figure 79: Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) sur un demi-plan

La force de l'Intégrale de Kirchhoff est qu'elle est valable en tout point d'observation $P(x, y = 0, z)$ ou $P(r, \vartheta = 0, \varphi)$ de l'espace.

Ainsi nous pouvons écrire l'amplitude diffractée au sommet non débouchant du défaut selon l'approche présentée dans le document [59] tel que :

$$A_4 = \frac{-i * A_3 * k_t}{2} * \int_0^{+\infty} \sin(\varphi_r) * H_1^1(k_t * d) * e^{-i.k_t.\xi.\cos(\varphi_0)} d\xi, \quad \text{Équation 89}$$

$$\text{et } \sin(\varphi_r) = \frac{r * \sin(\varphi_0)}{d}$$

Avec

H_1^1 Fonction de Hankel

Nous avons décrit dans ce paragraphe la méthode choisie pour la détermination de l'évolution de l'amplitude pour la fréquence centrale du transducteur utilisé pour le contrôle ultrasonore et pour l'ensemble des approches considérées par le **Simulateur VRCF**. Dans le paragraphe suivant, nous étendrons les calculs présentés ci-dessus à toutes les fréquences composant le spectre fréquentiel du transducteur afin d'obtenir des images ultrasonores de type Ascan et Bscan comparables avec l'expérience.

3. Extension du calcul mono-fréquentiel au calcul large-bande

Dans les paragraphes précédents, nous avons présenté la démarche géométrique adoptée pour le calcul de l'évolution de l'amplitude ainsi que des temps de vol en fonction des trajets ultrasonores pour la fréquence nominale (centrale) du transducteur. Pour obtenir des images ultrasonores simulées comparables à celles expérimentales (Bscans, Ascans), il est nécessaire de considérer l'ensemble des fréquences du spectre fréquentiel du transducteur. Pour ce faire, il faut déterminer la fonction de transfert du transducteur [31] [67].

En supposant la linéarité des phénomènes physiques étudiés par rapport à la fréquence, ceci nous permet de considérer ces phénomènes comme des filtres fréquentiels caractérisés par leur fonction de transfert [31]. Cette hypothèse de linéarité, nous permet ainsi d'obtenir le signal reçu par le transducteur comme le produit dans le domaine fréquentiel de son spectre fréquentiel d'émission et la fonction de transfert global de son trajet ultrasonore parcouru. Le signal reçu dans le domaine temporel est obtenu en considérant la transformée de Fourier inverse comme le montre le synoptique de la démarche illustré Figure 80.

L'obtention des signaux Ascans à chaque position du balayage nous permet d'aboutir aux images ultrasonores Bscans et aux courbes écho-dynamiques.

Nous avons présenté la démarche proposée pour résoudre notre problématique consistant à résoudre le problème direct ainsi que le problème d'instrumentation. Le problème direct permet la modélisation de la propagation ultrasonore à l'aide de rayons ultrasonores pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube. Puis le problème d'instrumentation permet d'aboutir aux images ultrasonores générées par l'interaction de ces rayons ultrasonores avec un défaut plan débouchant. La solution proposée consiste en un simulateur de propagation bidimensionnel **Simulateur VRCF**, présentant différentes approches (**SSD**, **GTD**, **KA**, **KAR**, **SE** et **KI**) pour tenir compte de l'interaction d'un rayon

ultrasonore avec un défaut plan débouchant dans le cadre d'une inspection ultrasonore selon la configuration transversale sur tube.

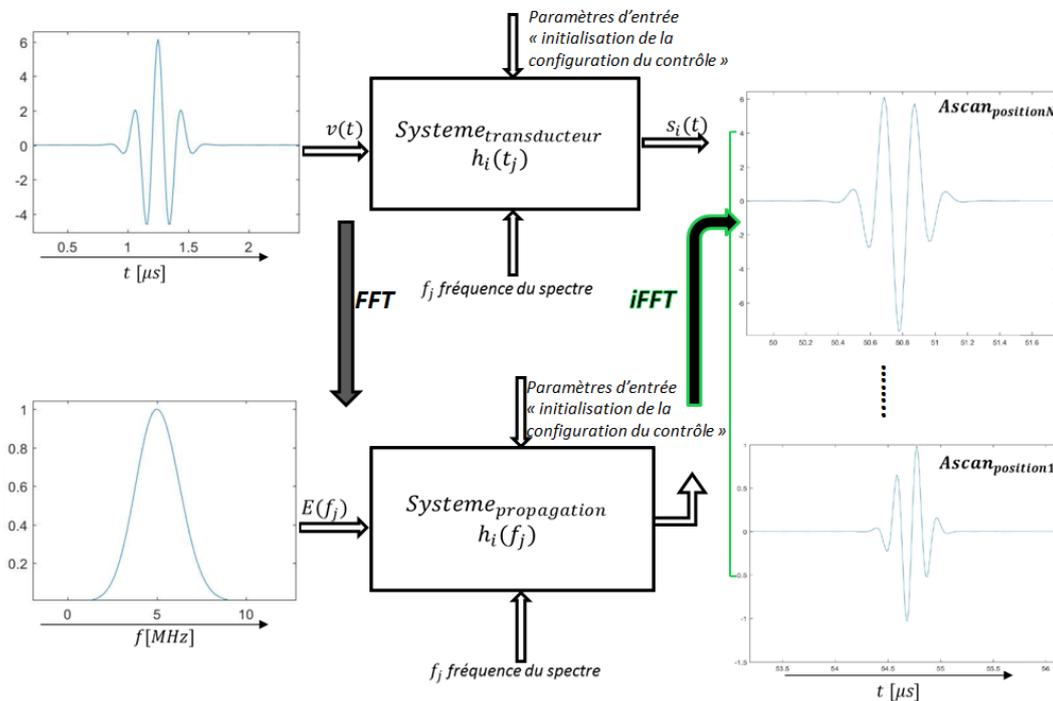


Figure 80 : Synoptique de la démarche d'extension du modèle mono fréquentiel au modèle large bande

Dans un premier temps, nous nous sommes appuyés sur le logiciel **CIVA** comme base de vérification lors du développement de notre simulateur de propagation (**Simulateur VRCF**). En effet, le logiciel **CIVA** (plus largement la plate-forme **CIVA**) développé par le **CEA-LIST** et ses partenaires depuis le début des années 90, est une référence en simulation des inspections non-destructives [61]. La vocation de tout modèle étant de décrire au mieux les différents phénomènes opérant lors d'une inspection ultrasonore expérimentale, la comparaison entre les réponses ultrasonores obtenues à l'aide des deux modèles **CIVA** et **Simulateur VRCF** afin d'évaluer l'approche de modélisation géométrique de notre modèle dans un premier temps. Puis, la comparaison des réponses ultrasonores simulées et expérimentales nous permettra d'évaluer la fiabilité des approches considérées par le **Simulateur VRCF** par rapport aux caractéristiques du défaut étudiées et plus particulièrement pour des défauts dont la caractéristique dimensionnelle relative à la profondeur (de 0.3 à 1.5mm) est proche de la longueur d'onde de l'onde transversale de l'inspection ultrasonore (de 1.3 à 0.65mm pour des fréquences de contrôle variant de 2.5 à 5MHz).

Dans la suite nous présenterons les différents paramètres définis pour l'analyse des données ultrasonores simulées par rapport aux données ultrasonores expérimentales dans le but de valider le **Simulateur VRCF**.

VI. Paramètres des images ultrasonores pour la validation du Simulateur VRCF

1. Choix des données images pour la validation du Simulateur VRCF

Nous appelons données images ultrasonores l'ensemble des données issues des images Bscans qui vont permettre d'évaluer la dissemblance entre les images ultrasonores expérimentales et celles simulées [1]. Les données images choisies pour la validation du simulateur développé sont celles considérées dans les travaux de [1] et sont :

- Valeur maximale de l'amplitude de l'écho du défaut.
- Largeur de la courbe écho-dynamique de l'écho à 50% d'amplitude (-6dB).
- Position en temps de vol de l'amplitude max.
- Pente du segment associé à l'écho du défaut.

Le choix de ces paramètres est justifié par le fait qu'ils constituent des paramètres clés dans le processus itératif d'inversion développé dans le cadre des travaux [1] pour la caractérisation des défauts détectés suite à une inspection ultrasonore sur tube. Nous rappelons brièvement l'intérêt de chacun de ces paramètres pour la détection et l'estimation des caractéristiques du défaut détecté en vue d'une caractérisation.

i. Amplitude maximale du signal ultrasonore reçu

Dans la pratique, l'amplitude est utilisée pour déterminer la criticité d'un défaut détecté. Il s'agit donc d'un paramètre clé pour la caractérisation du défaut. La caractérisation du défaut est ainsi effectuée en comparant l'amplitude du signal du défaut détecté avec celle d'un défaut de référence dit défaut étalon. Toutefois, cette comparaison permet uniquement d'estimer la criticité du défaut et non sa forme [68]. De ce fait, des méthodes de dimensionnement du défaut permettent de mettre en relation l'amplitude du signal ultrasonore et la taille du défaut.

ii. La largeur de la courbe écho-dynamique

La courbe écho-dynamique illustrée Figure 81, représente la valeur maximale de l'amplitude reçue par le transducteur en fonction de la position de balayage de ce dernier. Des méthodes permettent de relier la forme de la distribution des amplitudes sur la courbe écho-dynamique et la forme du défaut détecté [69] ou la nature du défaut [70]) (défaut volumique, plan à surface régulière ou irrégulière ou un défaut constitué d'un ensemble de réflecteurs).

Pour le cas des défauts débouchant sur le fond de la plaque, l'allure de la courbe écho-dynamique provient principalement de l'apport de l'écho de coin (trajet indirect du rayon

ultrasonore) ainsi que des échos de diffraction provenant de l'extrémité non débouchant du défaut. Le maximum d'amplitude provient de la position pour laquelle le rayon central rencontre l'intersection entre le défaut et le fond comme illustré Figure 82.

Il a également été établi que l'allure de la courbe écho-dynamique est sensible au profil du faisceau ultrasonore et par conséquent au transducteur utilisé [69].

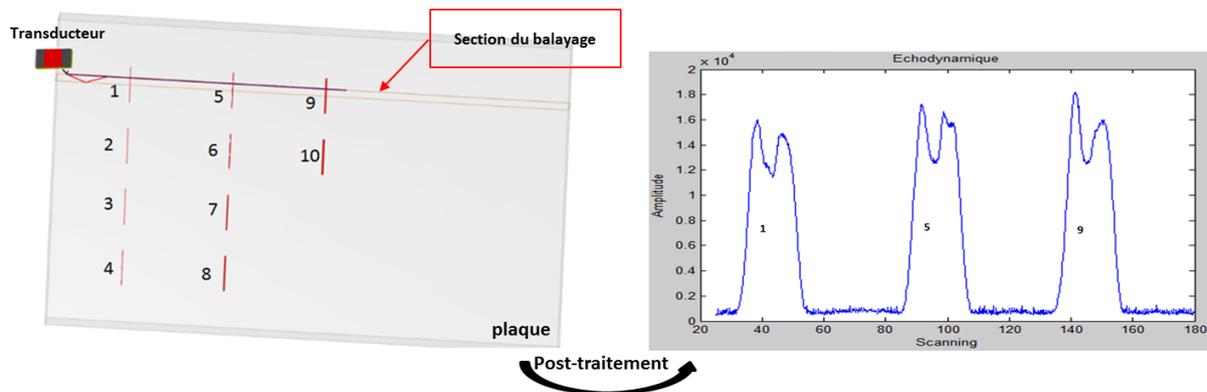


Figure 81 : courbes écho-dynamique expérimentales des réponses acoustiques des entailles artificielles (1), (5) et (9). Extraction des courbes à l'aide de routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux.

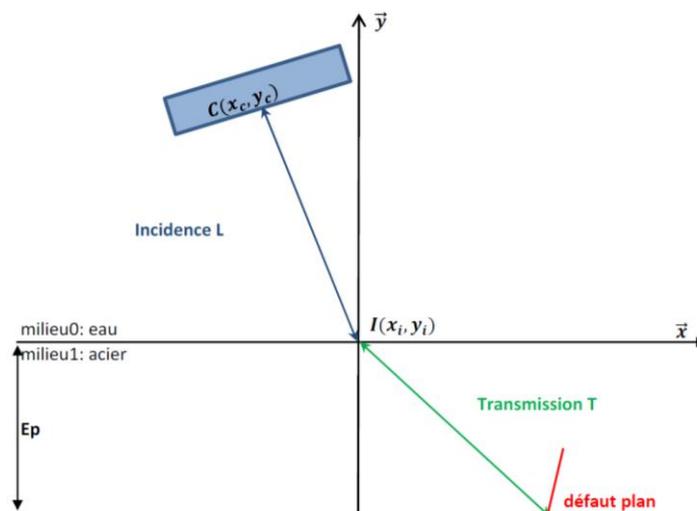


Figure 82 : écho de coin engendrant le maximum d'amplitude suite à l'interaction du rayon ultrasonore central (axe focale) rencontre l'intersection entre le défaut et le fond de la plaque

iii. La position en temps de vol de l'amplitude maximale

L'extrémité non débouchante du défaut peut être localisée par le biais du temps de vol (Figure 83) sous réserve que l'interaction entre le rayon ultrasonore et le défaut comporte un trajet ultrasonore de type réflexion spéculaire [34]. Nous avons étendu le principe de cette méthode aux défauts inclinés. Pour ce faire, nous avons étendu la méthode pour les différents trajets, qu'ils soient de type réfléchis ou diffracté.

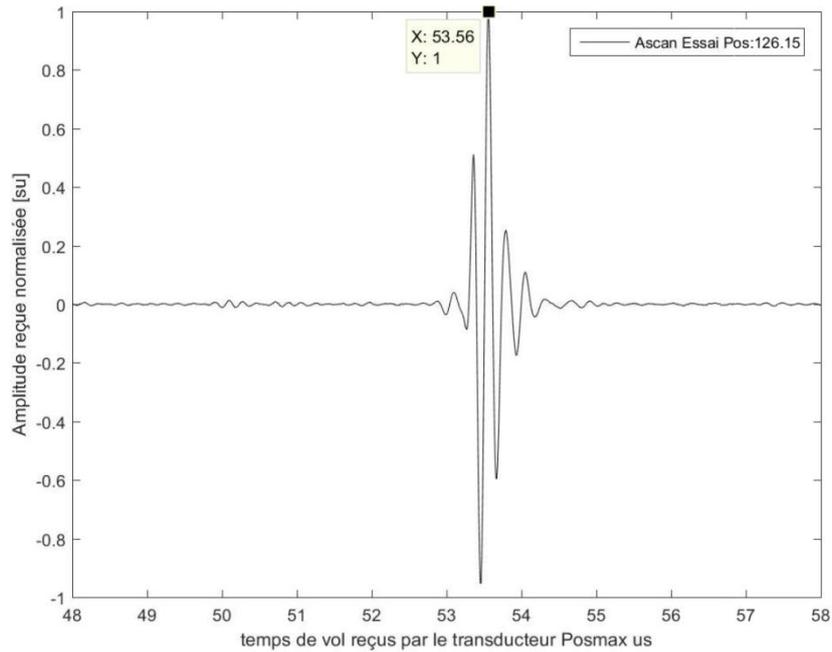


Figure 83: Ascan expérimental correspondant à l'amplitude maximale de la réponse acoustique d'un défaut plan droit d'extension 1mm débouchant sur la surface interne d'une plaque, la position de balayage ainsi que le temps de vol correspondants. Extraction à l'aide de routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux.

iv. La pente du segment associé à la réponse du défaut – pente du Bscan

La pente du segment associé à la réponse du défaut illustrée Figure 84 permet d'évaluer d'un point de vue géométrique, la superposition spatiale des segments associés à la réponse expérimentale du défaut et celle simulée.

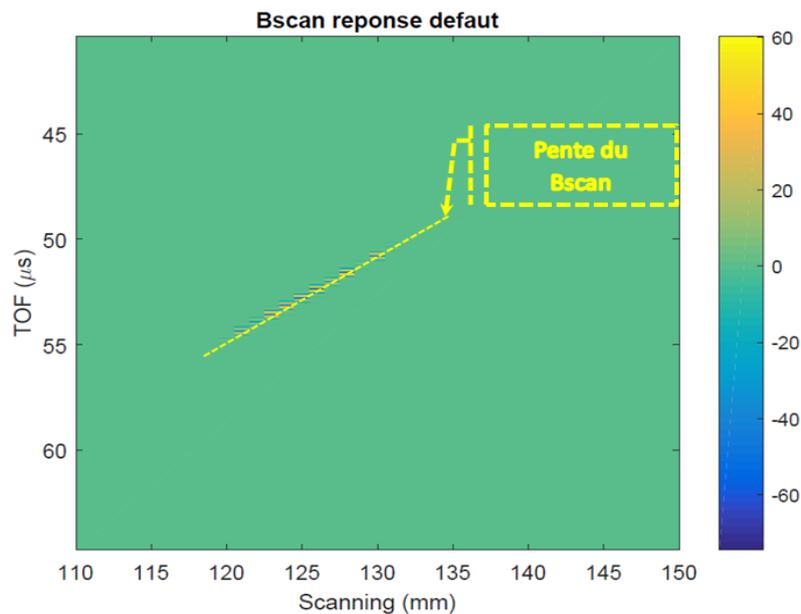


Figure 84: Bscan simulé à l'aide du *Simulateur VRCF* de la réponse ultrasonore d'un défaut plan droit d'extension 1mm débouchant sur la surface interne d'une plaque à l'aide de l'approche *SSD*.

Nous avons présenté les données images qui vont nous permettre dans la suite de ce document, d'étudier les résultats obtenus à l'aide du **Simulateur VRCF** développé dans le cadre de ces travaux (toute approche : **SSD, GTD, KA, KAR, SE** et **KI**) et les évaluer par rapport aux résultats obtenus grâce à la simulation à l'aide du logiciel **CIVA** et ceux obtenus expérimentalement. Pour le besoin de comparaison des résultats obtenus à l'aide de la simulation et ceux à l'aide de l'expérience, des routines ont été développées afin de faciliter le dépouillement des différentes acquisitions et simulations.

2. Routines de dépouillement des résultats expérimentaux et simulés

Le but de ces routines est d'extraire les différentes données images détaillées ci-dessus. Ainsi, une routine de dépouillement a été développée dans le cadre de ces travaux pour les résultats expérimentaux et une routine pour le dépouillement des résultats simulés. La routine de dépouillement des résultats simulés permet de confronter les résultats issus de la simulation **CIVA** (considérée comme une référence en simulation) et les résultats issus du **Simulateur VRCF** (toute approche : **SSD, GTD, KA, KAR, SE** et **KI**).

i. Les résultats simulés

La modélisation bidimensionnelle d'une inspection ultrasonore permet d'aboutir à des images ultrasonores de type Bscans (Figure 84). Le dépouillement et la comparaison des images Bscans simulés à l'aide de **CIVA** et du **Simulateur du VRCF** a donné lieu au développement d'une routine « **CompareCiva_MD** ». Elle permet à l'utilisateur de générer différentes courbes (Figure 85 : 4, 5, 6, 7 et 8), de les analyser puis d'enregistrer les données pertinentes sous un fichier Excel (Figure 85 :11). Les données stockées (Figure 85 : 9 et 10) sont les données relatives à la configuration du contrôle ainsi que les données images ultrasonores relatives au défaut étudié pour chaque modèle **Simulateur VRCF** et **CIVA**.

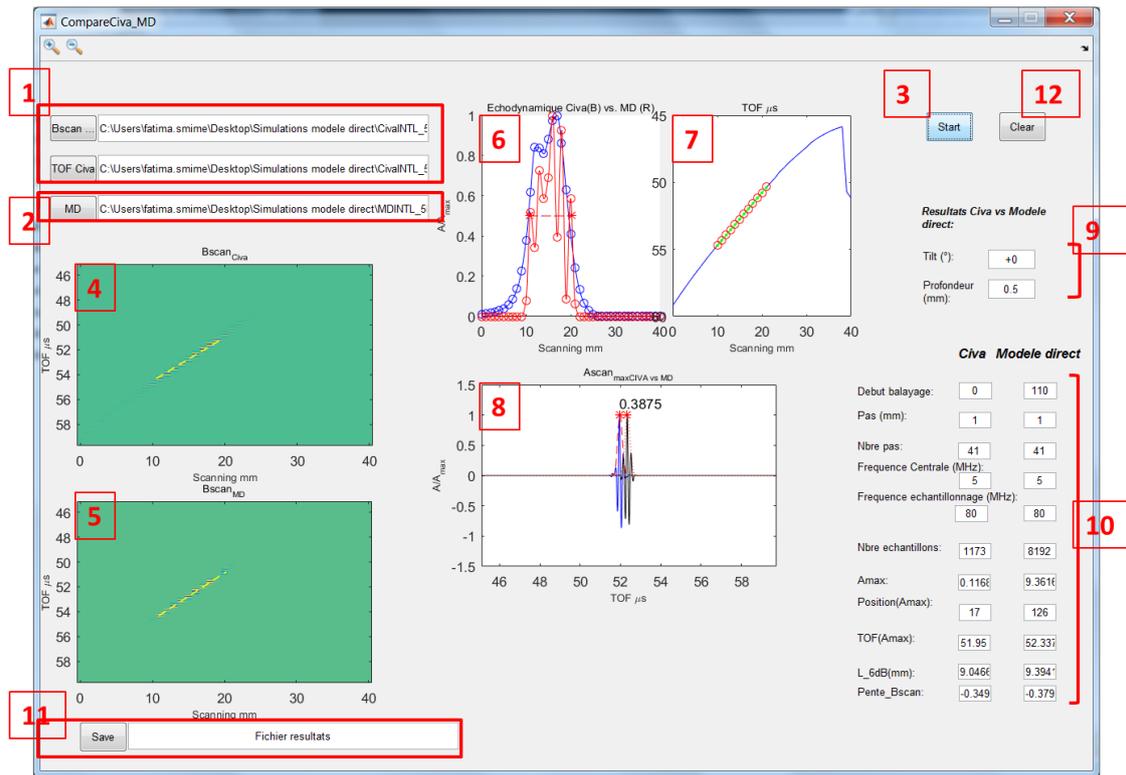


Figure 85 : l'interface utilisateur de la routine développée pour le dépeuillement et comparaison des acquisitions ultrasonores simulées à l'aide de CIVA et Simulateur VRCF toute approche (SSD, GTD, KA, KAR, SE et KI).

ii. Les résultats expérimentaux

Les acquisitions expérimentales génèrent des fichiers Cscans comme celui illustré Figure 86. Ces images Cscans sont découpées en images Bscans correspondant à la réponse ultrasonore de chacune des entailles artificielles. Ces fichiers Bscans expérimentaux sont par la suite relus à l'aide de la routine « **Relecture Essai** » (Figure 87). Elle permet à l'utilisateur de générer différentes courbes (Figure 87: 3, 4, 5, 6), de les analyser puis d'enregistrer les données pertinentes sous un fichier Excel (Figure 87 : 8). Les données stockées (Figure 87: 7) sont les données relatives à la configuration du contrôle ainsi que les données images ultrasonores relatives au défaut détecté.

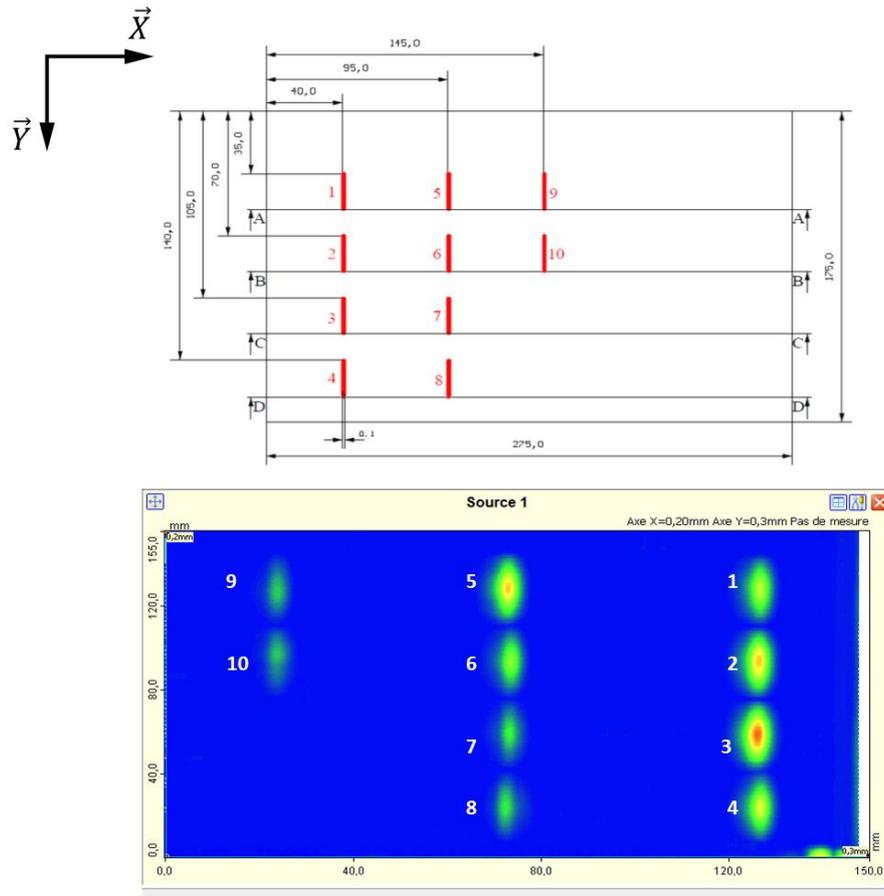


Figure 86 : Cscan expérimental du signal réfléchi par les défauts plans droits ou tiltés usinés sur la surface de plaque [275, 175, 15] mm. Relecture Multi2000 (M2M)

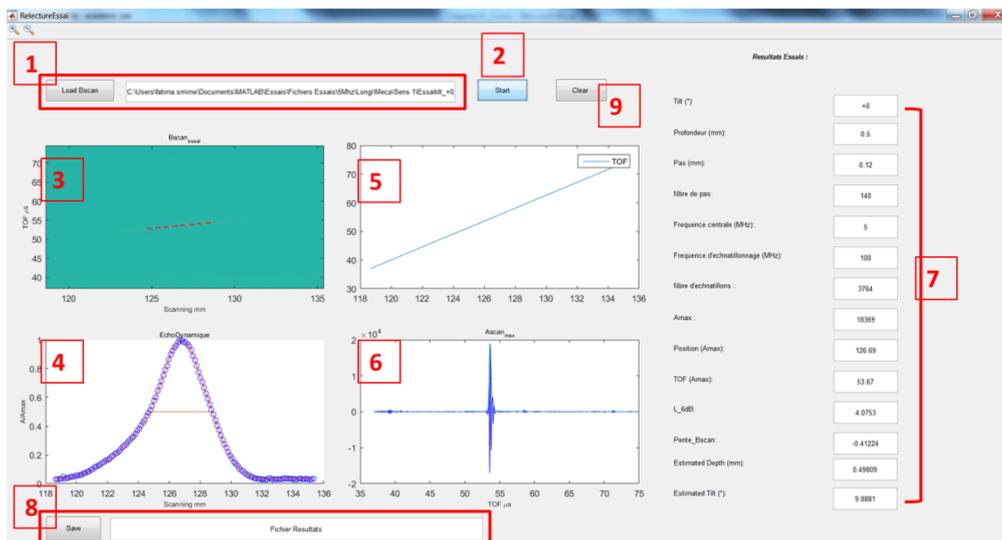


Figure 87 : Interface utilisateur de la routine développée pour le dépouillement des acquisitions ultrasonores

Nous avons déterminé les données images ultrasonores nous permettant d'évaluer les résultats simulés par rapports aux résultats de l'expérience. Pour ce besoin, des routines ont été développées dans le cadre de ces travaux pour faciliter l'extraction de ces nombreux paramètres. Nous pouvons nous consacrer dans le prochain, chapitre à présenter les

résultats de l'étude comparative des différents résultats de l'essai expérimental et des simulations (**Simulateur VRCF** et **CIVA**).

VII. Conclusion

Nous venons de présenter dans ce chapitre un modèle bidimensionnel (**Simulateur VRCF**) simulant la configuration transversale d'une inspection ultrasonore sur tube où la géométrie selon cette configuration est réduite à une plaque. Il s'agit de la solution proposée pour résoudre le problème direct de la propagation ultrasonore dans le cadre d'une inspection non destructive ultrasonore sur tube.

Les séquences prises en compte par le modèle direct développé sont : l'émission, la propagation dans l'eau et dans l'acier, l'interaction du faisceau ultrasonore avec un défaut débouchant sur la surface interne du tube, la retro-propagation du faisceau vers le transducteur et enfin la réception. L'ensemble des séquences de propagation des rayons ultrasonores sont modélisées selon une approche géométrique simple considérant à la fois les phénomènes de réflexion, de réfraction et de diffraction. Par ailleurs, la prise en compte de la diffraction considère différentes approches (**GTD**, **KA**, **KAR**, **SE** et **KI**). Nous avons présenté la démarche géométrique adoptée puis nous avons exposé les principales différences entre la solution de modélisation bidimensionnelle de la propagation ultrasonore dans le cadre d'inspection sur tube proposée (**Simulateur VRCF**) et l'approche du module de simulation ultrasonore de la plate-forme d'expertise **CIVA**.

Puis, nous nous sommes intéressés à l'extension de la solution en régime monochromatique (fréquence nominale du transducteur) à l'ensemble des fréquences du spectre fréquentiel du transducteur. Ce prolongement du modèle est justifié par le besoin d'obtenir des images simulées comparables avec celles issues d'un essai ultrasonore (Ascans, Bscans et courbes écho-dynamiques) contrôlé (configuration laboratoire) ou réel (configuration usine comprenant les contraintes du terrain). Pour ce besoin, des routines de dépouillements ont été développées dans le cadre de ces travaux afin de faciliter l'extraction des différents paramètres définis pour l'étude comparative entre les images simulées et expérimentales. Les différents paramètres définis pour l'analyse comparative sont extraits des réponses acoustiques des défauts étudiés. Nous avons fait le choix de considérer les données images ultrasonores définies par le processus itératifs d'inversion développé dans le cadre des précédents travaux menés [1] au **VRCF** et qui sont : l'amplitude maximale (A_{max}) et sa position en temps ($TOF_{A_{max}}$), la largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB (L_{-6dB}) et la pente du segment de la réponse acoustique sur l'image Bscan (p_{Bscan}).

Le prochain chapitre, s'intéresse à cette étude comparative en vue de valider les résultats simulés à l'aide de la solution proposée « **Simulateur VRCF** ». Elle concernera les différentes approches considérées par le **Simulateur VRCF** en vue de déterminer l'approche appropriée à la configuration de contrôle étudiée, i.e. la configuration transversale où les défauts ciblés sont des défauts plans débouchant sur la surface interne droits ou tiltés et dont la

caractéristique dimensionnelle principale (la profondeur) est proche de la longueur d'onde d'inspection.

Chapitre 4 Etude théorique et expérimentale du simulateur de propagation ultrasonore pour la configuration de contrôle transversale sur un tube

I.Introduction

Au cours des dernières années le contrôle non destructif ultrasonore évolue de plus en plus vers une évaluation quantitative non destructive où il ne s'agit plus seulement de détecter un défaut mais de le caractériser en termes de sa taille, son orientation, sa position, son type et par conséquent sa criticité. Pour répondre à ce besoin accru en résultats quantitatifs, la modélisation s'impose comme une technique efficace et moins onéreuse pour comprendre les phénomènes responsables de la formation des échos observés sur les images ultrasonores expérimentales, pour analyser les données ultrasonores mais également pour améliorer les configurations d'inspection.

L'objectif de ces travaux est de développer une approche simple et pratique en vue d'aboutir à un modèle fiable prenant en compte le processus global d'une inspection ultrasonore sur tube sans être coûteux en temps de calcul. Ainsi, le ***Simulateur VRCF*** développé dans le cadre de ces travaux, permet de mettre en lien les caractéristiques relatives au tube, au transducteur, aux milieux de propagation et à la réponse ultrasonore due à l'interaction entre un faisceau de rayons ultrasonores rigoureusement parallèles et un défaut plan droit/incliné débouchant sur la surface interne du tube.

Ce chapitre s'intéresse à la validation expérimentale des résultats issus du ***Simulateur VRCF*** dans le cadre d'un contrôle non destructif ultrasonore sur tube suivant la configuration transversale. Pour cette configuration, la géométrie du tube est réduite à une plaque. Nous présenterons les différentes étapes du processus de validation qui sont : la définition de l'inspection expérimentale, la description des paramètres correspondants à cette dernière à l'aide du ***Simulateur VRCF*** et ***CIVA*** et enfin l'interprétation des résultats quantitatifs comparant l'expérience et les simulations. Pour ce faire, nous confronterons les différentes données images ultrasonores définies dans le précédent chapitre et qui sont : ***amplitude maximale, temps de vol de l'amplitude maximale, largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB***, ainsi que ***la pente du Bscan de la réponse acoustique du défaut***. Les simulations à l'aide de notre modèle comprendront l'ensemble des approches (***SSD, GTD, KA, KAR, SE*** et ***KI***) décrites dans les deux précédents chapitres.

Dans un premier temps, nous évaluerons les prédictions du modèle par rapport au défaut de référence suivant les normes [19] et [6]. Il s'agit d'un défaut droit dont la profondeur est de 5% de l'épaisseur de la pièce inspectée. Puis nous étudierons, l'influence de la profondeur ainsi que l'inclinaison (tilt) du défaut sur les données images ultrasonores prédites par les différentes approches. Enfin, nous déterminerons parmi les différentes approches dont

dispose le **Simulateur VRCF**, les plus appropriées pour le défaut plan ciblé (droit ou incliné) suivant la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube, ainsi que pour le compromis précision/temps de calcul.

II. Dispositif expérimental de l'inspection ultrasonore suivant la configuration transversale d'une plaque en immersion

La configuration transversale du contrôle ultrasonore sur un tube de grand diamètre peut être approximée par le contrôle sur une plaque comme le montre la Figure 88. Dans un premier temps, nous avons choisi la géométrie de la plaque afin de vérifier la validité des hypothèses considérées et les développements théoriques présentés dans ce document à l'aide d'une géométrie simple.

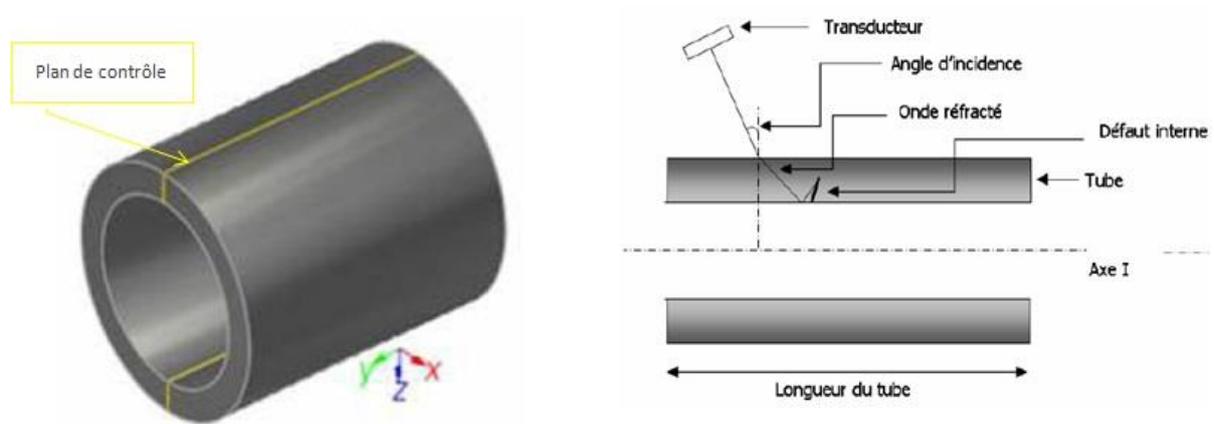


Figure 88 : plan de contrôle transversal du tube

Les inspections ultrasonores menées dans le cadre du processus de validation du **Simulateur VRCF** suivent une procédure mise en vigueur par le **VRCF** et qui respecte les standards imposés par les normes [19] et [6]. Dans la suite, nous présenterons les caractéristiques de la pièce inspectée et du dispositif expérimental de validation

1. Caractéristiques de la pièce test : plaque

La pièce test est une plaque en acier/carbone dont les caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 3. Elle comporte dix entailles artificielles superficielles comme le montre la Figure 89, de différentes profondeurs et inclinaisons comme illustré dans la Figure 90.

Pièce	Plaque usinée
Matériau	acier carbone
Dimensions [mm]	[L=275 ; l=175 ; h=15]
Nombre d'entailles artificielles	10 entailles
Type d'entailles	longitudinales droites et inclinées de longueur 20mm et de largeur 0.1mm

Tableau 3 : caractéristiques de la plaque inspectée

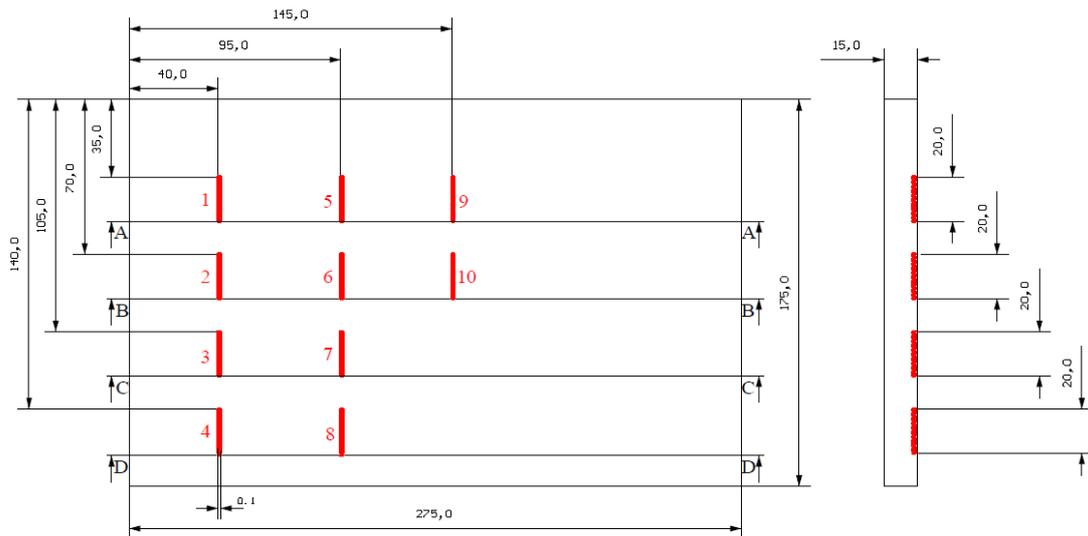


Figure 89 : Vue générale de la plaque

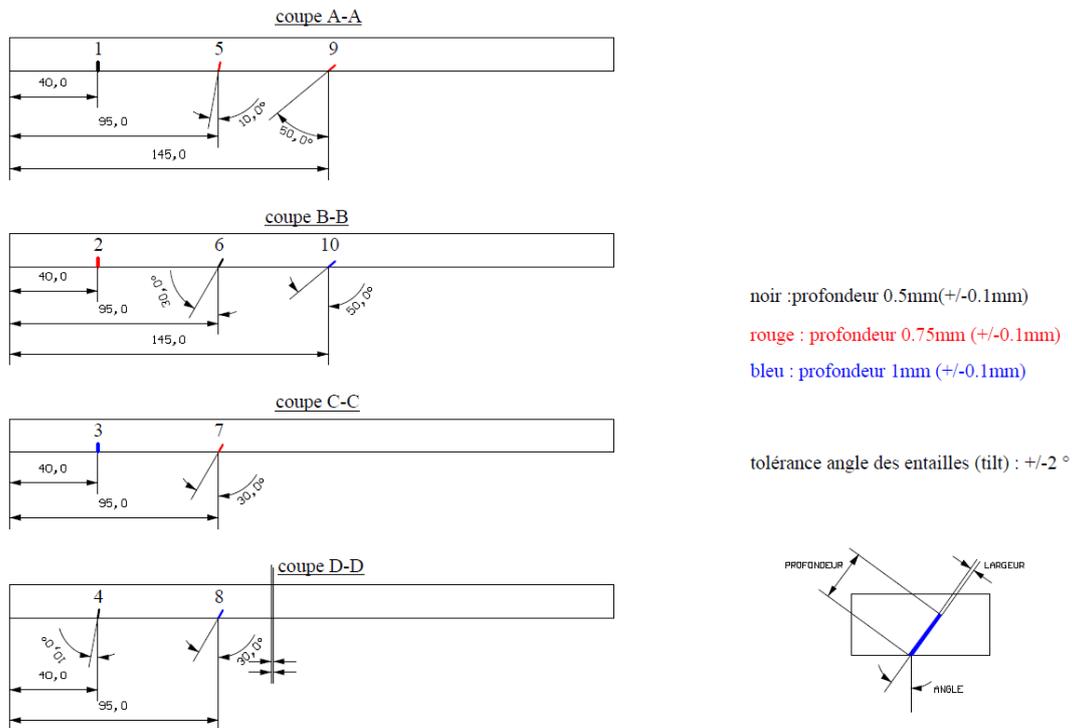


Figure 90 : Vues transversales des entailles artificielles

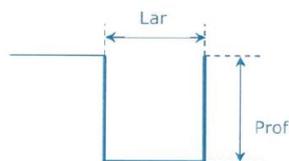
Les caractéristiques dimensionnelles et en tilt (inclinaison) des entailles artificielles usinées sur la plaque selon les spécifications adressées à l'usineur sont détaillées dans le Tableau 4.

N° entaille	tilt ($\pm 2^\circ$)	prof ($\pm 0.02\text{mm}$)	longueur ($\pm 0.5\text{mm}$)	Largeur ($\pm 0.02\text{mm}$)
1	0	0,5	20	0.1
2	0	0,75		
3	0	1		
4	10	0,5		
5	10	0,75		
6	30	0,5		
7	30	0,75		
8	30	1		
9	50	0,75		
10	50	1		

Tableau 4 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque

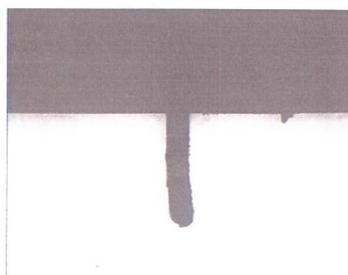
Le rapport de contrôle de ces entailles réalisé par l'usineur [71], indique que l'ouverture requise pour ces entailles rend difficile la réalisation de réplique⁷. Le rapport entre les ouvertures et les profondeurs des entailles artificielles rend défavorable l'obtention de leurs répliques. Or, les répliques permettent de renseigner les caractéristiques réelles des entailles réalisées et donc d'attester de leur conformité.

Relevé des cotes / Measures ()



Profondeur / Depth	Largeur / Width	Longueur / Length
0,49	0,11	20

Photo de la réplique / Resin cross section



Réplique du défaut / Resin shaping

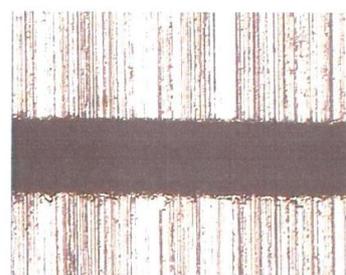


Figure 91 : relevé des côtes de l'entaille n°1 (0°x0.5mm) et photos sa réplique figurant dans le rapport de contrôle des entailles artificielles sur la plaque

A titre d'exemple, la réplique en résine de l'entaille **n°1(0° x0.5 mm)** illustrée dans le Figure 91 présente des déformations qui ne sont pas représentatives de la réalité de l'entaille car

⁷ Empreinte en résine de l'entaille.

elle a été extraite avec difficulté. Sa profondeur est de 0.49 mm et sa largeur est de 0.11 mm respectant ainsi la tolérance imposée qui est de ± 0.02 mm comme précisé dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. L'usineur garantit que l'ensemble des 10 entailles respectent cette tolérance. La largeur peut être considérée constante sur toutes les entailles car elles sont réalisées avec le même feuillard de précision. La longueur des entailles est déterminée par la longueur du feuillard utilisé comme électrode. En revanche, le rapport de contrôle signale deux non conformités locales dues à une déformation non maîtrisée de l'extrémité du feuillard en cours d'usinage. Elles concernent les extrémités des entailles inclinées **n°4 (10°x0.5mm)** et **n°10 (50°x1mm)**. Or, la forme de l'entaille peut affecter la réponse acoustique de cette dernière. Une étude interne au **VRCF** sur la réalisation des entailles de référence [72] montre un écart en amplitude de 1dB pour une entaille carrée dont les coins sont arrondis et de 2.5dB pour une entaille arrondie par rapport à la réponse de l'entaille carrée de référence. Les différentes formes du fond des entailles étudiées dans le cadre de cette étude [72] sont illustrées Figure 92.

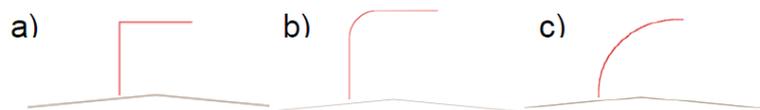


Figure 92 : différentes formes d'entailles considérées pour l'étude de l'influence sur la réponse US : a)entaille carrée b) entaille carrée avec coin arrondi c) entaille arrondie.

2. Caractéristiques du dispositif expérimental

Les inspections ultrasonores ont eu lieu dans la cuve du laboratoire **CND** au **VRCF (Vallourec Research Center France)** (Figure 93). Le transducteur est monté sur un bras se déplaçant suivant trois axes motorisés d'une précision de ± 0.01 mm.

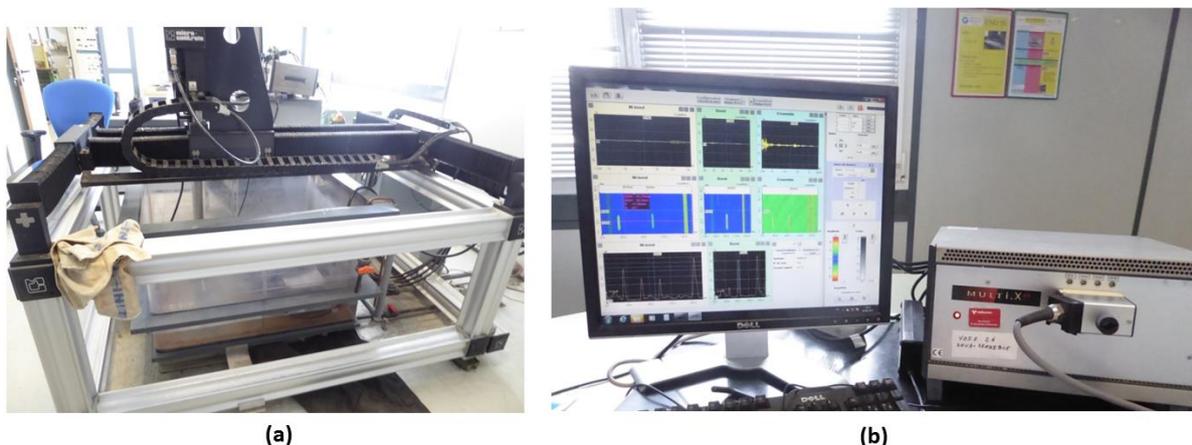


Figure 93 : (a) Cuve d'inspection en immersion avec bras motorisé 3 axes. (b) Electronique M2M Multix 64voies

Les inspections ont été réalisées à l'aide d'un transducteur multiéléments mais nous avons opté pour son utilisation en mode transducteur conventionnel. De ce fait, le transducteur n'utilise ni focalisation, ni déflexion électronique mais présente une inclinaison mécanique. Le réglage de l'appareillage ultrasonore suit un mode opératoire défini par le département **CND** du **VRCF** [73]. Il indique les démarches à suivre pour définir et réaliser l'acquisition ultrasonore, qui sont :

- Réglage de la colonne d'eau suivant le transducteur utilisé.
- Réglage de l'échelle, du gain, filtre... du signal ultrasonore afin d'obtenir des échos les plus nets possibles (diminution du niveau de bruit).
- Détermination des portes pour la détection des défauts internes et externes. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement à la porte pour la détection des défauts internes, car les défauts ciblés sont débouchant sur la surface interne de la plaque. Dans la pratique, la visualisation du 1^{er} écho d'interface, du premier écho de fond et du premier écho de coin du défaut étalon en demi-bond (respectivement en bond complet) est requise pour le réglage de la porte interne (respectivement externe) pour la détection des défauts internes (respectivement externes) comme le montre la Figure 94.

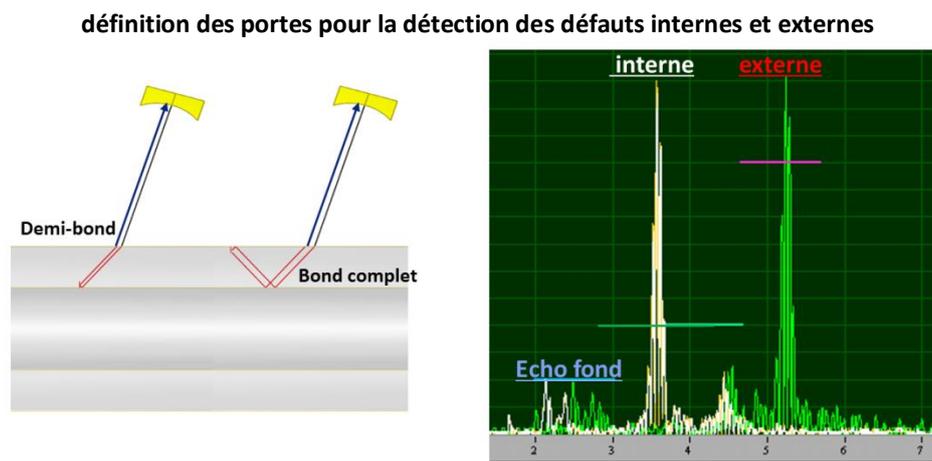


Figure 94 : définition des portes pour la détection des défauts internes et externes

- Définition des caractéristiques du balayage à appliquer pour l'acquisition ultrasonore. La définition de ces caractéristiques permettent notamment la synchronisation entre la commande de la cuve et l'Électronique utilisée pour les acquisitions ultrasonores. Notons que dans le cadre de ces travaux de validation, un balayage est effectué suivant la longueur et la largeur de la plaque (Figure 95).
- Enregistrement et visualisation des acquisitions ultrasonores. Pour ces inspections, les acquisitions ont été réalisées à l'aide d'une Électronique M2M 64 voies (M2M MultiX).

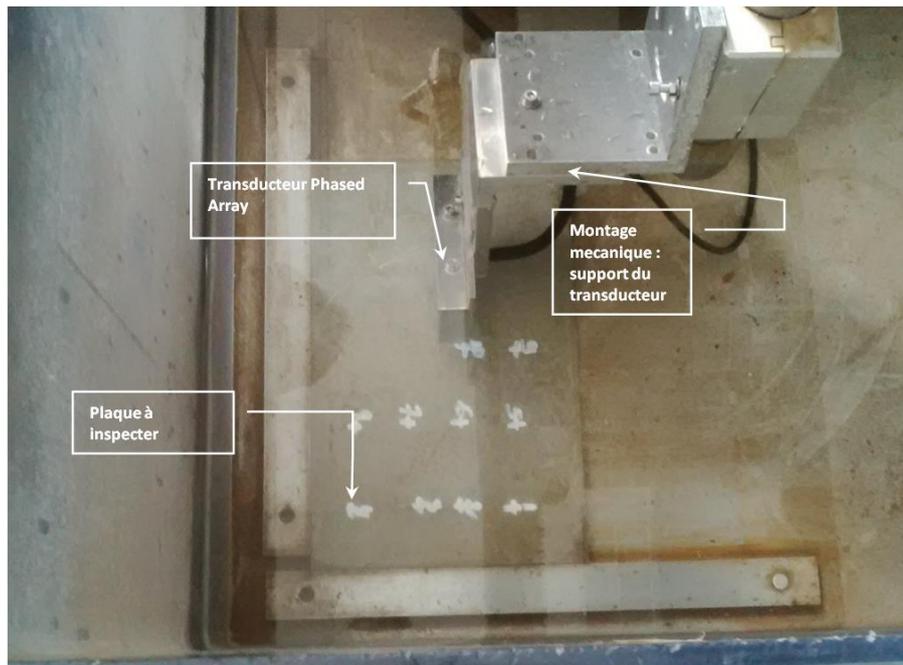


Figure 95 : inspection de la plaque en immersion en cuve au VRCF

Les caractéristiques de l'inspection ultrasonore expérimentale illustrée Figure 95 sont détaillées dans le Tableau 5 ci-dessous :

Transducteur	
Fréquence nominale (MHz)	5
Longueur (mm)	19,2
Largeur (mm)	12
Nombre d'éléments total	32
Nombre d'éléments actifs (Emission= Réception)	32
Pitch (mm)	0,6
Signal	
Fréquence d'échantillonnage (MHz)	100
Nombre d'échantillons	4096
Contrôle	
Angle d'incidence dans l'eau (°)	17
Colonne d'eau (mm)	30
Pas de balayage suivant X (mm)	0,125
Pas de balayage suivant Y (mm)	1

Tableau 5 : Caractéristiques des contrôles ultrasonores à l'aide du transducteur 5MHz pour l'inspection de la plaque

L'incidence dans l'eau est fixée à 17° comme précisé dans le Tableau 5, ceci permet de générer uniquement des ondes transversales dans l'acier et d'inspecter à la fois la surface interne et externe du tube grâce à la trajectoire en « zig-zag » de ces ondes [14]. Cette incidence oblique à 17° est effectuée par le biais de l'inclinaison mécanique du transducteur dans l'eau. Elle est fixée à l'aide d'une cale présentant une pente de 17° comme illustré Figure 96. De ce fait, une incidence du faisceau à 17° ultrasonore sur la surface de cette

dernière correspond à une incidence normale engendrant une séquence d'échos de surface. Le repérage de cette séquence d'échos de surface permet ainsi de fixer l'inclinaison mécanique du transducteur. Toutefois, une incertitude sur l'angle d'inclinaison subsiste lors du serrage du support mécanique illustré Figure 96.

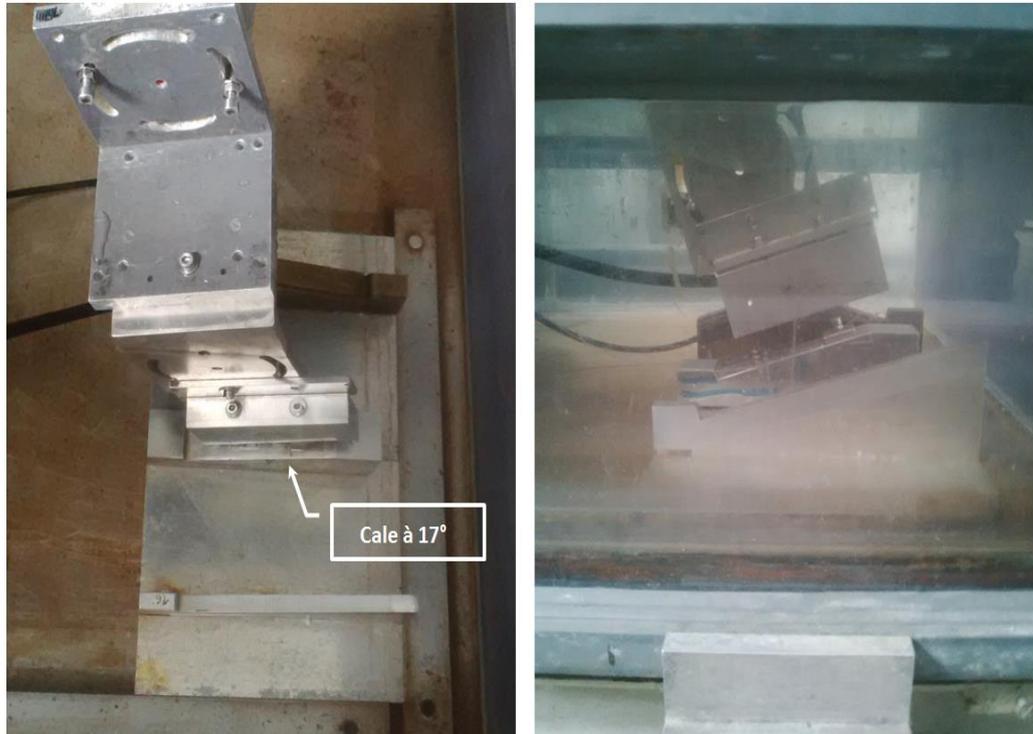


Figure 96 : réglage de l'inclinaison mécanique du transducteur à l'aide d'une cale à 17°. Vue du dessus (à gauche). Vue de côté (à droite)

Le réglage de la colonne d'eau est effectué suivant le Mode Opérateur standard au **VRCF** pour les contrôles en immersion [73]. Il impose la visualisation des différents échos ultrasonores (émission, interne et écho de fond) de manière à positionner la porte de sélection pour les défauts internes.

L'observation de ces échos permet de définir la position, la largeur ainsi que le seuil en amplitude de la porte de détection des défauts internes. Les caractéristiques de cette porte de détection sont définies à l'aide du défaut étalon **$n^2(0^\circ \times 0.75\text{mm})$** (Tableau 4). Le seuil est défini par rapport à la hauteur de l'écran de visualisation suivant la méthode **Full Screen Height (FSH)**, où la sensibilité d'un contrôle ultrasonore est réglée en augmentant l'amplitude de la réponse acoustique du défaut étalon jusqu'à un **%FSH** spécifié. La valeur commune pour voir l'amplitude totale du signal du défaut étalon sans risque de saturation (>100%) en déplaçant le transducteur de part et d'autre, est de 80%FSH. Le seuil usuel pour le déclenchement d'alarme en contrôle industriel est fixé à -6dB de l'amplitude maximale de l'entaille de référence soit 40%FSH. La position et la largeur de la porte de détection sont fixées en déplaçant le transducteur de part et d'autre de l'entaille étalon depuis l'observation du plus petit signal renvoyé par l'entaille jusqu'à sa disparition. Par

conséquent, Toute indication apparaissant dans cette porte et dépassant le seuil fixé peut provenir d'un défaut interne comme illustré dans la Figure 97.

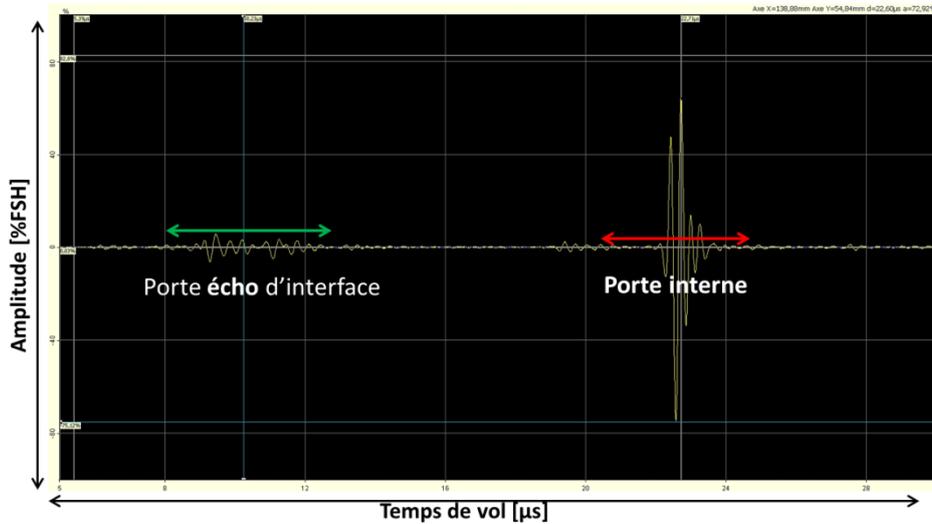


Figure 97 : définition des portes correspondant à l'écho d'interface et à la porte interne permettant la détection des défauts internes

L'inclinaison mécanique du transducteur et la colonne d'eau (θ_i, WP) constituent des paramètres d'entrée déterminants sur les réponses acoustiques expérimentales et simulées. En simulation par exemple, l'erreur induite par les paramètres d'entrée (θ_i, WP) engendrée sur le calcul du temps de vol d'un trajet A/R identique en demi-bond est résumée dans le Tableau 6. En considérant le centre du transducteur comme point d'émergence du rayon ultrasonore central, les durées théoriques des trajets Aller/Retour correspondant à un écho de surface et un écho de coin du mode transversal pour la configuration de contrôle étudiée (Figure 98) sont obtenues à l'aide de l'Équation 90

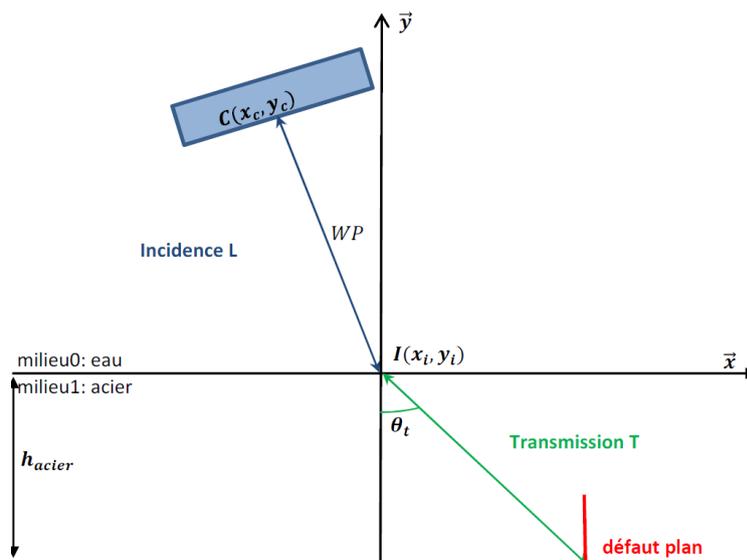


Figure 98 : configuration de contrôle d'une plaque en acier immergée dans l'eau. Le transducteur présente une inclinaison θ_i par rapport à la normale à la surface de la plaque et distant de la surface de la plaque de WP

$$T_{echo_surface} = (2 * WP) / v_{eau} = 40,5\mu s$$

$$T_{echo_coin} = (2 *) WP / v_{eau} + \frac{2 * h_{acier}}{\cos(\theta_t) * v_{t,acier}} = 52,5\mu s$$

Équation 90

	θ_i (°) _{WP=30mm}		WP (mm) _{$\theta_i=17^\circ$}	
	16	18	29	31
$TOF_{\frac{A}{R}(A-C)}$ (μs)	53.42	54.36	51.15	53.85

Tableau 6 : influence des paramètres d'entrée (angle d'incidence- θ_i , hauteur du couplant-WP) sur les temps de vol d'un demi-bond pour des vitesses de propagation : $v_L = 1483m. s^{-1}$ dans l'eau et $v_t = 3230m. s^{-1}$

Nous constatons d'après ce tableau qu'une erreur d'1 mm sur la donnée d'entrée WP selon la configuration illustrée Figure 98, se traduit par un écart sur le temps de vol de 1.35μs pour un trajet correspondant à un Aller/Retour en demi-bond. De même, une erreur d'1° sur la donnée d'entrée θ_i , se traduit par un écart sur le temps de vol de 0.92 à 1.86μs. Une étude menée au **VRCF** pour déterminer l'influence des entailles étalons, du transducteur et du réglage acoustique sur la reproductibilité des résultats ultrasonores sur des entailles étalons [74] indique qu'une différence de 1° sur l'incidence peut engendrer un écart de 4dB sur l'amplitude maximale de la réponse acoustique d'une entaille étalon interne. Cet écart peut être plus considérable pour des entailles inclinées. En effet, l'étude de sensibilité entre les données images ultrasonores et l'angle d'incidence présentée dans [1], montre que la variation de l'angle d'incidence sur les données images ultrasonores n'est pas négligeable. L'écart le plus significatif est observé dans le cadre de ces travaux [1] sur la donnée image relative à l'amplitude maximale d'une entaille inclinée de 10°.

n° passage	Amax	
	entaille2	entaille4
1	72,38	55,86
2	69,96	54,29
3	71,78	55,31
4	71,53	55,55
5	68,68	54,05
6	70,09	54,55
7	72,09	55,78
8	70,05	54,16
9	69,26	54,28
10	70,73	55,33
min (Amax)	68,68	54,05
max (Amax)	72,38	55,86
Etendue [dB]	0,46	0,29

Tableau 7 : amplitudes maximales relevées suite à 10 contrôles successifs des entailles n° 2 et 4 à l'aide du dispositif expérimental de validation suivant un sens du contrôle.

Enfin, le dispositif expérimental présente une répétabilité inférieure au dB comme le montre le Tableau 7. Ceci est valable pour l'ensemble des entailles artificielles résumées dans le Tableau 4 (p. 137). Cette étendue est déterminée à partir du montage expérimental réalisé, en effectuant 10 passages successifs selon la configuration définie dans le **Erreur ! Source du r envoi introuvable.** (p. 140) et en relevant le maximum d'amplitude mesuré à chaque passage. Le Tableau 7 résume par exemple les amplitudes maximales relevées suite à 10 contrôles successifs des entailles n°2 et 4 dont les caractéristiques en tilt et en profondeur sont respectivement $0^\circ \times 0.75\text{mm}$ et $10^\circ \times 0.5\text{mm}$.

3. Caractéristiques du transducteur ultrasonore

Avant toute inspection, il est nécessaire de vérifier et de caractériser l'appareillage ultrasonore utilisé [73]. Une caractérisation du transducteur permet d'accéder, à l'aide de mesures expérimentales, aux paramètres relatifs au signal d'émission (fréquence centrale et bande passante) ainsi qu'au champ ultrasonore dans les milieux de propagation [8]. Ces informations constituent des paramètres d'entrée des modèles de simulation développés dans ce travail. Pour le besoin de détermination des paramètres d'entrées pour la simulation, nous nous sommes intéressés aux grandeurs suivantes :

- Le spectre fréquentiel de la réponse impulsionnelle du transducteur : fréquence centrale et bande passante à -6dB .
- Les caractéristiques du faisceau du transducteur considéré en immersion : divergence du faisceau, distance focale, dimensions de la tache focale.

i. Réponse impulsionnelle et bande passante

Dans le cas d'un transducteur plat en immersion, le relevé de la réponse impulsionnelle et fréquentielle est effectué à l'aide d'un grand réflecteur plat situé à plus d'une longueur du champ proche. La Figure 99 illustre le montage expérimental pour recueillir les caractéristiques du faisceau ultrasonore en immersion à l'aide d'une cible ainsi que les cibles à utiliser selon la configuration de contrôle souhaitée. La détermination de ces caractéristiques obéit aux critères imposés par la norme NF EN [75].

La fréquence centrale du transducteur relevé expérimentalement (Figure 100) est égale à $f_c = 5.08\text{MHz}$ et la largeur de bande à -6dB est de 3.52MHz soit une bande passante relative de 70%. Le signal d'émission présente une impulsion courte fortement amortie comme l'illustre la Figure 100, ceci permet une meilleure séparation des échos dans le domaine temporel (échos provenant de deux indications voisines).

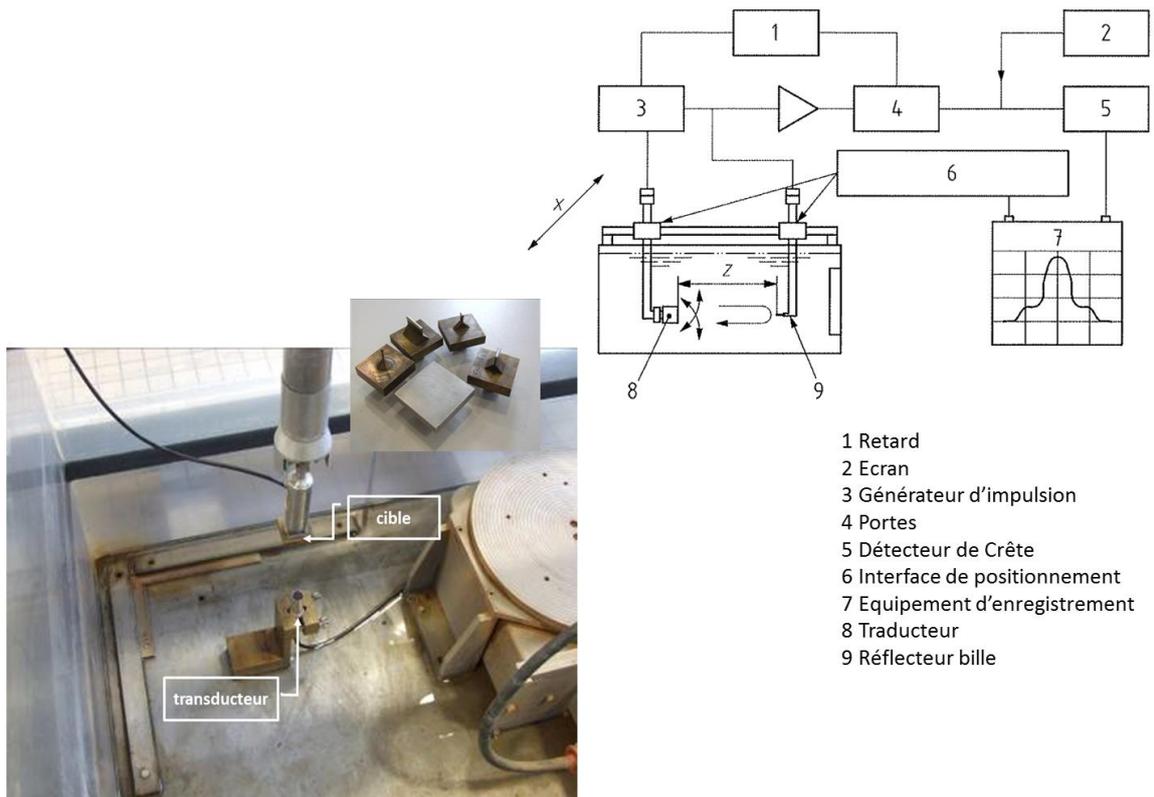


Figure 99 : schéma et exemple d'un montage expérimental pour la détermination des caractéristiques du faisceau ultrasonore d'un transducteur en immersion à l'aide d'une cible et exemples de cibles utilisées. La détermination de la cible à utiliser obéit aux critères imposés par [75]

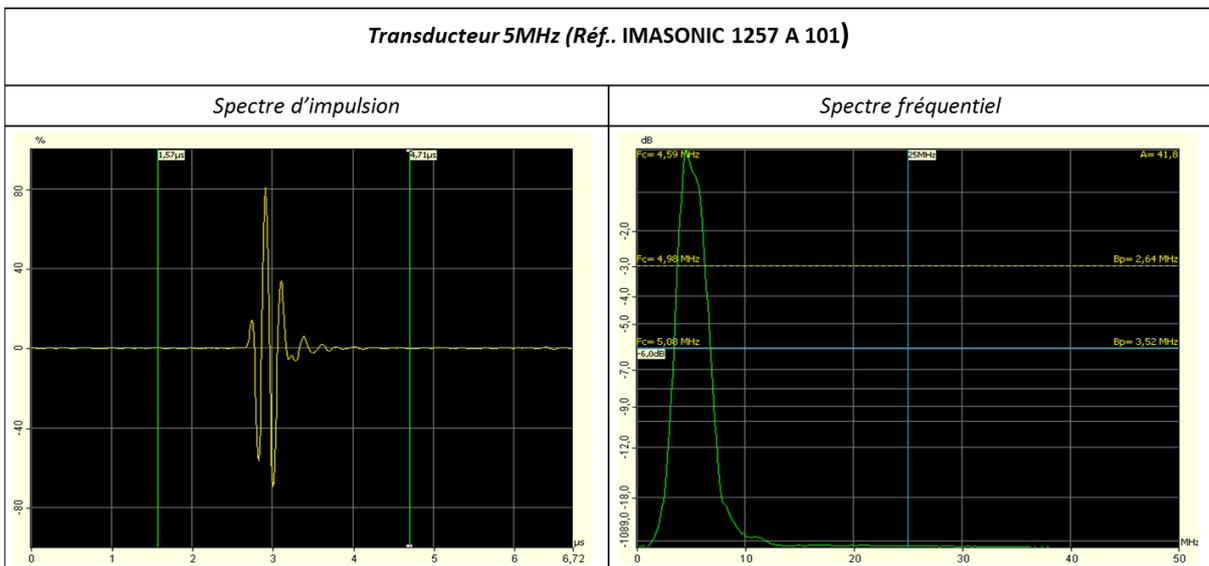


Figure 100 : réponse impulsionnelle et fréquentielle du transducteur multiéléments (32elts) linéaire plan IMASONIC de fréquence nominale 5MHz

ii. Caractéristiques du faisceau ultrasonore

Le profil du faisceau ultrasonore est recueilli à l'aide d'une cible de diamètre $d < 3\text{mm}$ placée à différentes positions dans le plan d'incidence dans l'eau comme le précise la norme [75]. La (Figure 101, a) présente une cartographie du faisceau ultrasonore du transducteur incliné de 17° dans l'eau par rapport à la verticale. Les mesures expérimentales ont montré que la divergence du faisceau est de l'ordre de 0.8° , ce qui est négligeable. Ceci conforte notre choix pour la modélisation du faisceau ultrasonore à l'aide de faisceau rigoureusement parallèle. La (Figure 101, b) présente l'amplitude relative de ce faisceau suivant la distance parcourue dans l'eau. Les caractéristiques relatives à la distance focale ainsi que la longueur de la tache focale obtenues à l'aide des relevés expérimentaux sont respectivement 25mm (Figure 101, b) et 5.36mm (Figure 102). La longueur de la tache focale est déduite de l'étendue spatiale selon laquelle la cible de 3mm est vue par le transducteur. Connaissant la dimension caractéristique de la cible, il est donc possible de déduire la largeur du faisceau ultrasonore à -6dB .

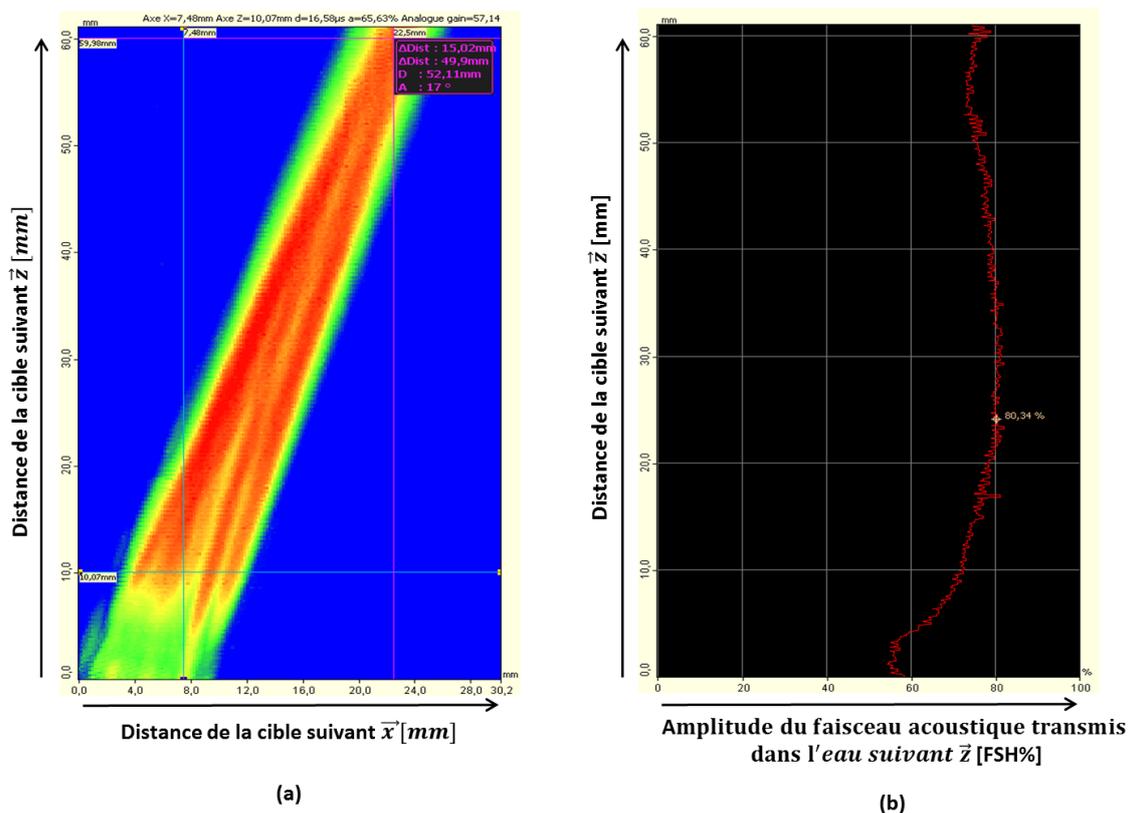


Figure 101 : cartographie du faisceau ultrasonore expérimental dans le plan d'incidence incliné de 17° (Transducteur IMASONIC multielements-32elts - de fréquence nominale 5MHz). (b) Amplitude du champ ultrasonore réfléchi par la cible à différentes positions du plan d'incidence dans l'eau.

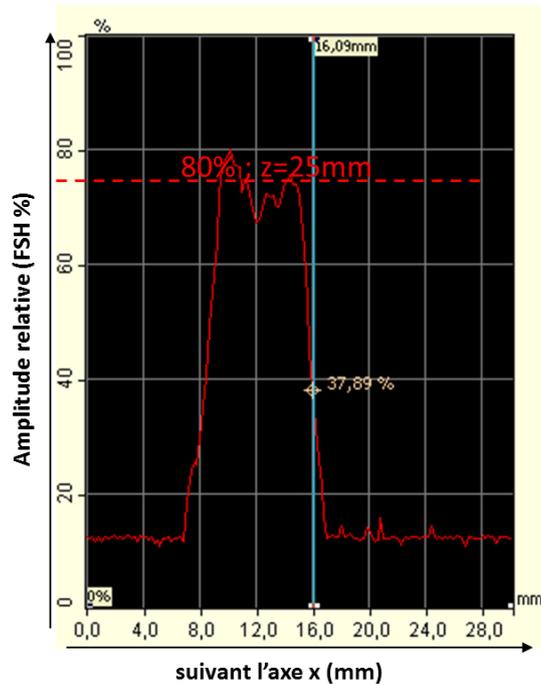


Figure 102 : écho-dynamique horizontale de la largeur de la tache focale du faisceau ultrasonore à la distance focale.

Nous rappelons que le contrôle ultrasonore est réalisé suivant deux sens de balayage afin de favoriser la détection des défauts inclinés. La convention adaptée pour la définition des orientations du tilt (inclinaison) est illustrée dans la Figure 103.

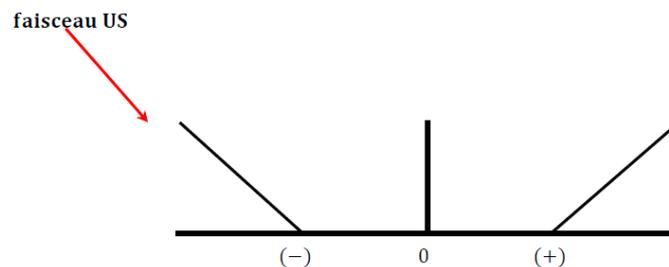


Figure 103 : convention adoptée par le *Simulateur VRCF* pour l'orientation du tilt par rapport à un faisceau ultrasonore d'incidence oblique

Les caractéristiques des entailles artificielles usinées sur la surface de la plaque suivant le sens de balayage sont résumées dans le Tableau 8.

Extension du défaut (mm)	Extension/Épaisseur plaque (%)	sens1 du contrôle			Sens 1&2	sens2 du contrôle		
		-50°	-30°	-10°		10°	30°	50°
0,5	3		X	x	X	x	x	
0,75	5	x	X	x	X	x	x	X
1	7	x	X		X		x	X

Tableau 8 : récapitulatif des entailles artificielles usinées dans la plaque pour le besoin de validation du simulateur de propagation VRCF suivant le sens de balayage pour le contrôle ultrasonore expérimental

Dans la suite, nous présenterons les résultats obtenus à l'aide des simulations et de l'expérience pour la fréquence de contrôle de 5 MHz en distinguant les entailles droites (tilt=0°) des entailles tiltées.

III. Validation expérimentale de la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur défauts artificiels

Les caractéristiques du contrôle expérimental à 5MHz en immersion en cuve ainsi que les paramètres d'entrée des simulations pour cette fréquence sont résumés dans le Tableau 9

		Simulation		Essai
		Simulateur VRCF	CIVA	
Transducteur	Fréquence nominale [MHz]	5		
	Longueur utile du transducteur [mm]	12		
	Faisceau ultrasonore	75 rayons //	faisceau ultrasonore	
Signal Emission	Fréquence d'échantillonnage [MHz]	80		100
	Nombre d'échantillons	8192		4096
	Largeur de bande (BW)	3MHz	60% à -6dB	70% à -6dB
	Répartition de l'énergie sur la surface du transducteur	Gaussienne	Hanning	
Pièce	Géométrie	Plaque		
	Matériau	Acier		
	Longueur (mm)	275		
	Largeur (mm)	175		
	Hauteur (mm)	15		
Ondes considérés selon le milieu de propagation	Couplant	L		
	Pièce	T		
Contrôle	Incidence dans l'eau [°]	17		17
	Colonne d'eau [mm]	30		30
	Position du début du balayage [mm]	110		
	Pas de balayage [mm]	1		X=0,125 ; Y=2
	Nombre de pas	40		
	Position de la fin du balayage [mm]	150		

Tableau 9 : comparatif des paramètres utilisés pour la simulation et pour le contrôle expérimental

La fréquence de contrôle choisie correspond à une longueur d'onde de l'onde transversale $\lambda_t = 0,64mm$. Cette longueur d'onde est très proche voire inférieure aux extensions des entailles artificielles de la plaque test résumées dans le Tableau 10.

N° entaille	tilt ($\pm 2^\circ$)	prof ($\pm 0.02mm$)	longueur ($\pm 0.5mm$)	Largeur ($\pm 0.02mm$)
1	0	0,5	20	0.1
2	0	0,75		
3	0	1		
4	10	0,5		
5	10	0,75		
6	30	0,5		
7	30	0,75		
8	30	1		
9	50	0,75		
10	50	1		

Tableau 10 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque

Or, lorsqu'une onde est incidente sur l'extrémité d'une fissure dont la longueur est proche de la longueur d'onde considérée comme résumé dans le Tableau 11, les approches **HF** présentent leurs limites d'application. Donc, l'enjeu est de déterminer si ces approches **HF** prises en compte par le **Simulateur VRCF** permettent d'obtenir des résultats acceptables pour les extensions ciblées des défauts [32].

Extension du défaut [mm]	Extension/Epaisseur plaque [%]	R(Extension / λ_t) ($\lambda_t = 0,64mm$)
0,5	3	0.8
0,75	5	1.2
1	7	1.6

Tableau 11 : Rapports des extensions des défauts ciblés par rapport à l'épaisseur de la pièce inspectée en % et par rapport à la longueur d'onde transversale à 5MHz.

Les contrôles de validation sont effectués suivant les deux sens de balayage pour une meilleure détection des défauts inclinés (Tableau 10). Dans la suite, nous distinguerons le contrôle suivant le sens1 et le sens2. Chaque contrôle aboutit à une image ultrasonore de type Cscan (Figure 104).

L'image Cscan expérimentale est ensuite décomposée en images Bscans (Figure 105), puis post-traitées à l'aide de routines de dépouillement développées dans le cadre de ces travaux et décrites dans le chapitre précédent.

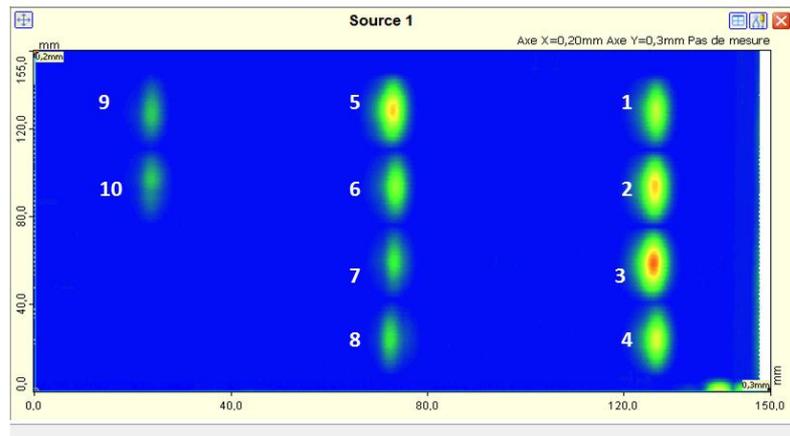
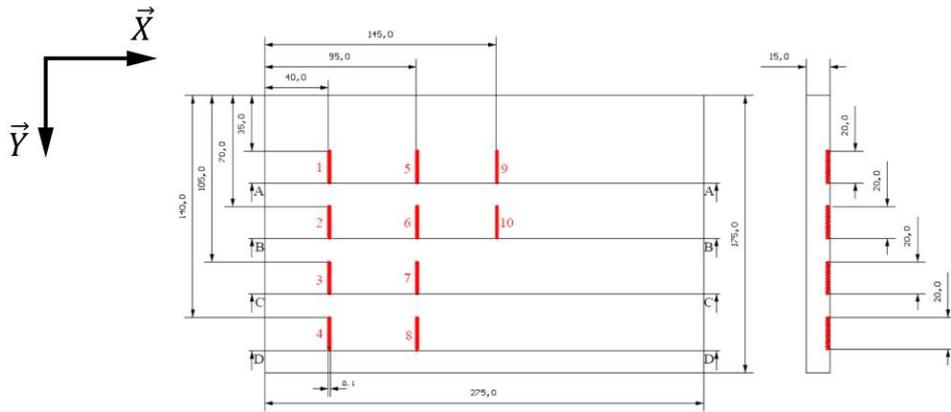


Figure 104 : Vue générale de la plaque et Cscan expérimental du contrôle ultrasonore de la plaque suivant le sens1 du contrôle

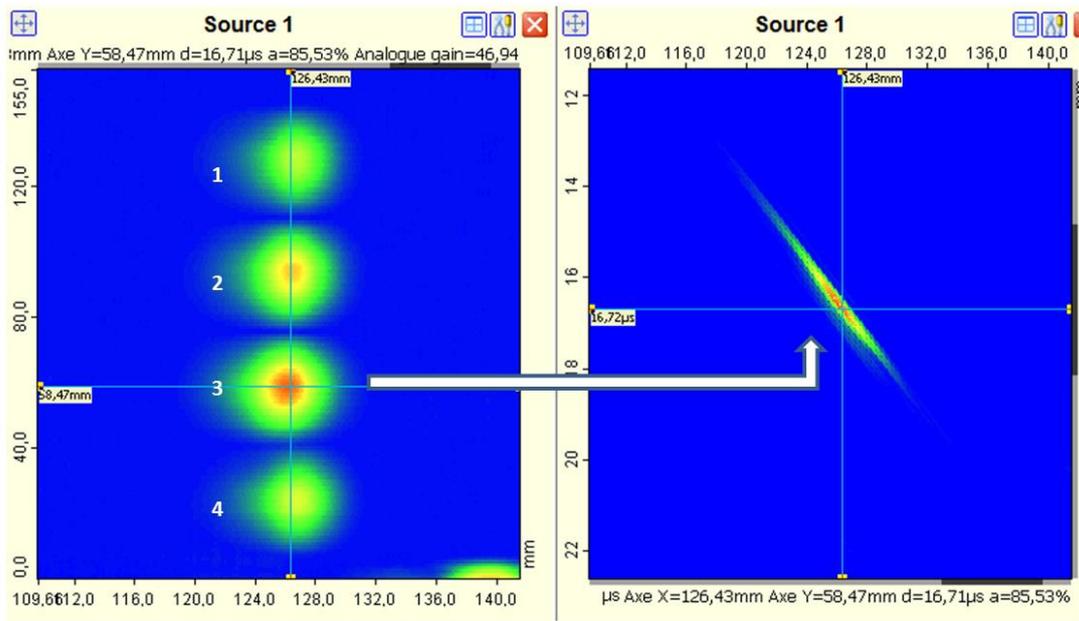


Figure 105 : image Cscan expérimentale des entailles n°1, 2, 3 et 4 (à gauche) (Figure 104). Image Bscan expérimentale de l'entaille n°3 (à droite).

Dans cette partie, nous nous intéresserons à étudier les différentes données images simulées en les confrontant avec celles expérimentales. Ces données images ont été définies dans le chapitre précédent et sont : **amplitude maximale** (Figure 106), **temps de vol de l'amplitude maximale** (Figure 106, c), **largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB** (Figure 106, d) et **pente de la réponse du défaut** sur le Bscan (Figure 106, a).

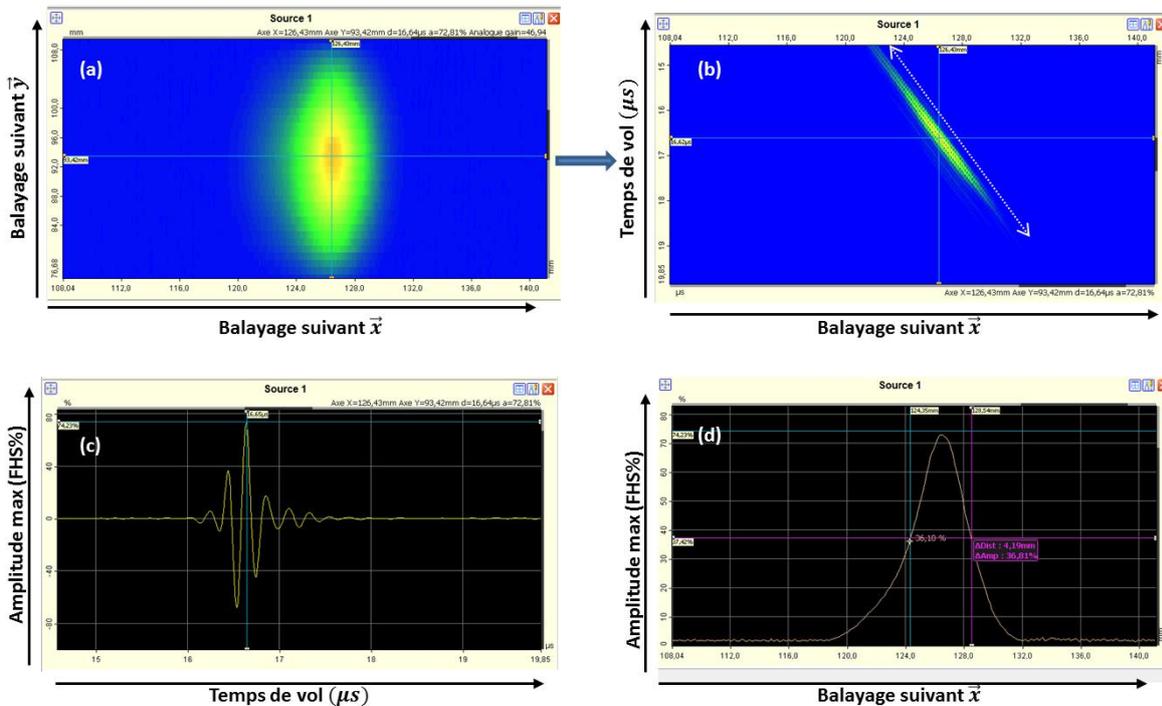


Figure 106 : images ultrasonores expérimentales de l'entaille de référence n°2 suivant le sens1 du balayage. (a) Cscan expérimental. (b) Bscan expérimental et pente de la réponse acoustique de l'entaille. (c) Ascan expérimental (amplitude et temps de vol de l'amplitude maximale). (d) largeur de la courbe écho-dynamique de la réponse acoustique de l'entaille à -6dB.

Le but principal de cette démarche est de quantifier la fiabilité de prédiction des approches implémentées dans le simulateur de propagation développé dans le cadre de ces travaux. Pour ce besoin de validation, une comparaison quantitative entre le **Simulateur VRCF** (toute approche) et **CIVA** est réalisée afin d'analyser les données images obtenues par chacun de ces modèles. Pour cette comparaison, nous avons fait le choix d'étudier les rapports entre la donnée image d'un défaut quelconque et la donnée d'image correspondante de l'entaille de référence. Dans la pratique et selon l'**API 5CT** [19], cette entaille correspond à une entaille droite dont l'extension est égale à 5% de l'épaisseur de la plaque. Dans notre cas, il s'agit de l'**entaille n°2 (0°x0.75mm)** référencée dans le Tableau 10 (p. 149). Par conséquent, nous étudions les rapports suivants :

$$G(Amax_{dB}) = 20 * \log\left(\frac{Amax}{Amax_{entaille2}}\right) \quad \text{Équation 91}$$

$$K(TOF) = \frac{TOF_{A_{max}}}{TOF_{A_{max_{entaille2}}}} \quad \text{Équation 92}$$

$$K(L_{-6dB}) = \frac{L_{-6dB}}{L_{-6dB_{entaille2}}} \quad \text{Équation 93}$$

$$K(Pente) = \frac{Pente}{Pente_{entaille2}} \quad \text{Équation 94}$$

1. Résultats de validation sur défauts artificiels droits

Les défauts artificiels droits ($tilt = 0^\circ$) sont les entailles n° 1,2 et 3 figurant dans le (Tableau 10, p. 149). Elles se distinguent par leurs extensions [0.5 ; 0.75, 1] mm. L'**entaille n°2** dont l'extension est égale à 5% de l'épaisseur de la plaque est l'entaille de référence.

Les résultats expérimentaux sont extraits à l'aide de la routine de relecture développée dans le cadre de ces travaux et décrite dans le précédent chapitre. Les différentes données images issues de l'expérience pour le défaut droit débouchant de trois extensions différentes sont résumées dans le Tableau 12.

	Tilt [0°]				
	Extension [mm]	G (A_{max}) [dB]	TOF (A_{max}) [μ s]	L_{-6dB} [mm]	$Pente_{Bscan}$
Sens1	0,50	0,086	53,67	4,08	0,41
	0,75	0,00	53,74	4,21	0,41
	1,00	-0,036	53,61	4,38	0,41
Sens2	0,50	-0,104	53,99	4,10	0,41
	0,75	0,00	53,91	4,07	0,42
	1,00	-0,082	53,96	4,38	0,41

Tableau 12 : Données images expérimentales de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz selon les deux sens de balayage.

Dans la suite, nous étudierons les résultats obtenus pour chacune des données images ultrasonores séparément.

i. Donnée image ultrasonore relative à l'amplitude maximale

Les résultats expérimentaux relatifs à cette donnée image ultrasonore pour le défaut droit débouchant de trois extensions différentes sont résumés dans la Figure 107.

Le rapport $G(A_{max})$ correspondant à l'amplitude maximale de la réponse du défaut étudié par rapport à celle de l'entaille de référence (**entaille n°2**) montre des écarts négligeables ($< < 1dB$) suivant les deux sens de balayage. **Vallourec** fixe un critère d'acceptation pour les défauts étalons droits suivant les deux sens de balayage. Ce critère limite l'écart des amplitudes suivant les deux sens de balayage à 2dB [72]. Ce critère est donc vérifiée comme le confirme les résultats illustrés dans Figure 107.

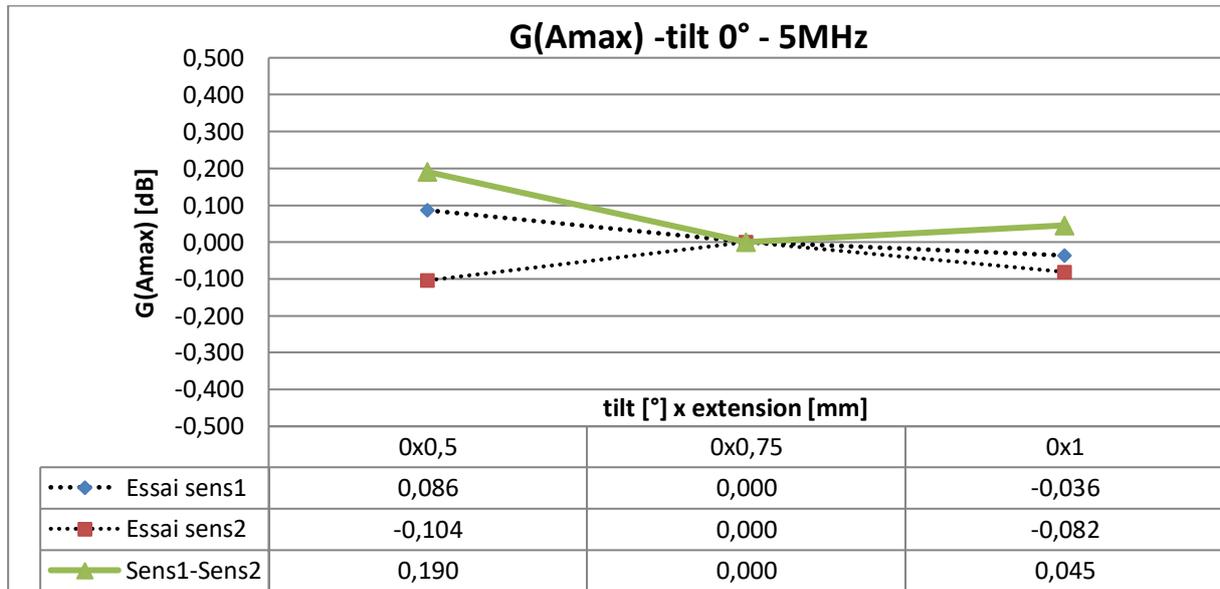


Figure 107 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits (tilt=0°) et de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm ainsi que l'écart observé entre les deux sens de contrôle.

Extension du défaut (mm)	G(Amax) [dB]- tilt 0°							
	Essai (Référence)	CIVA	Simulateur VRCF					
			SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
0,50	-2,35	-3,55	-2,90	-2,86	-2,79	-3,22	-1,31	-2,52
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	1,40	2,35	3,06	3,09	3,14	2,98	2,85	3,33

Tableau 13 : Données images relatives $G(A_{max})$ [dB] Essai et simulations (CIVA et simulateur VRCF) pour les réponses en Amplitude de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz

Les rapports $G(A_{max})$ obtenus en simulations sont résumés dans le Tableau 13. Les écarts en dB entre ces rapports d'amplitudes obtenus à l'aide de l'expérience et ceux obtenus à l'aide de la simulation sont résumés dans le Tableau 14. Nous constatons que les écarts

observés ne dépassent pas les 2dB pour l'ensemble des modèles de simulation. L'ensemble des approches considérées par le **Simulateur VRCF** vérifie ce constat.

Extension du défaut (mm)	E(Amax) [dB]- tilt 0°							
	Essai (Référence)	CIVA	Simulateur VRCF					
			SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
0,50	-0,086	-1,20	-0,56	-0,51	-0,44	-0,87	1,03	-0,17
0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	-0,036	0,96	1,66	1,69	1,74	1,59	1,45	1,93

Tableau 14 : Ecart en [dB] observé entre l'essai expérimental et les simulations (CIVA et simulateur VRCF toute approche) pour les réponses en Amplitude de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm pour une fréquence de contrôle de 5MHz

Par ailleurs, nous constatons que les différentes approches du **Simulateur VRCF** (**GTD**, **KA**, **KAR**, **SE** et **KI**) prenant en compte la diffraction n'apportent pas d'information supplémentaire par rapport à l'approche **SSD** prenant en compte uniquement les phénomènes de réflexion et réfraction dus à l'effet de coin. En effet, les faibles contributions énergétiques dues à la diffraction sont estompées par les fortes contributions énergétiques dues à l'effet de coin [1] [34]. Nous appelons effet de coin, l'interaction directe ou indirecte du rayon ultrasonore et le défaut droit débouchant sur le fond de la plaque au passage de l'interface avec une incidence oblique dans l'eau (dans notre cas, $\theta_i = 17^\circ$ comme l'illustre la Figure 108).

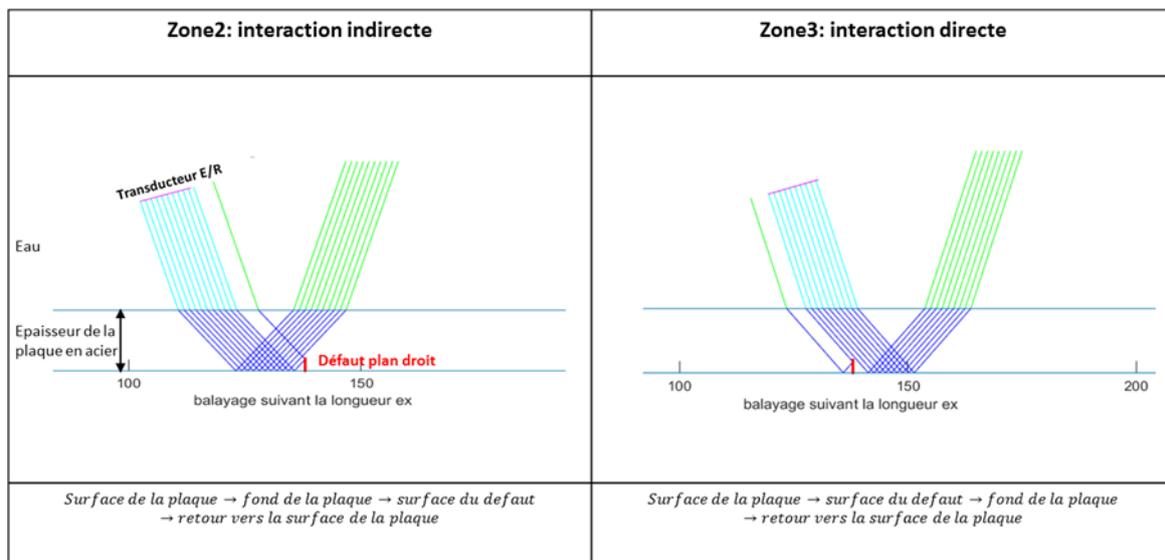


Figure 108 : approche zonale pour le calcul de l'interaction entre un rayon ultrasonore et un défaut plan droit (tilt=0°) débouchant sur la surface interne de la plaque. Zone 2 : effet de coin direct. Zone3 : effet de coin direct

Pour un écho de coin direct ou indirect généré par l'interaction d'un faisceau composé de rayons rigoureusement parallèles avec un défaut droit débouchant, les rayons en retro-propagation vers la surface du transducteur après double réflexion (fond de la plaque +

surface du défaut) sont également parallèles. Les rayons ultrasonores subissent ainsi une double réflexion sur un coin droit (fond de la plaque + défaut débouchant droit), dont le coefficient de réflexion est déterminé comme étant le produit des coefficients de réflexion à chacune des interfaces perpendiculaires [14]. Pour une incidence oblique dans l'eau tel que $\theta_i = 17^\circ$, les ondes transversales réfractées dans la plaque et interagissant en effet de coin avec un défaut débouchant droit, subissent une réflexion totale. Cette réflexion est donc optimale pour des incidences variant entre 34° et 56° comme l'illustre la Figure 109. Or, les angles d'incidence (39.5° et 50.5°) sur chacune des interfaces perpendiculaires constituées par le fond de la plaque ainsi que le défaut droit débouchant sont compris dans cet intervalle.

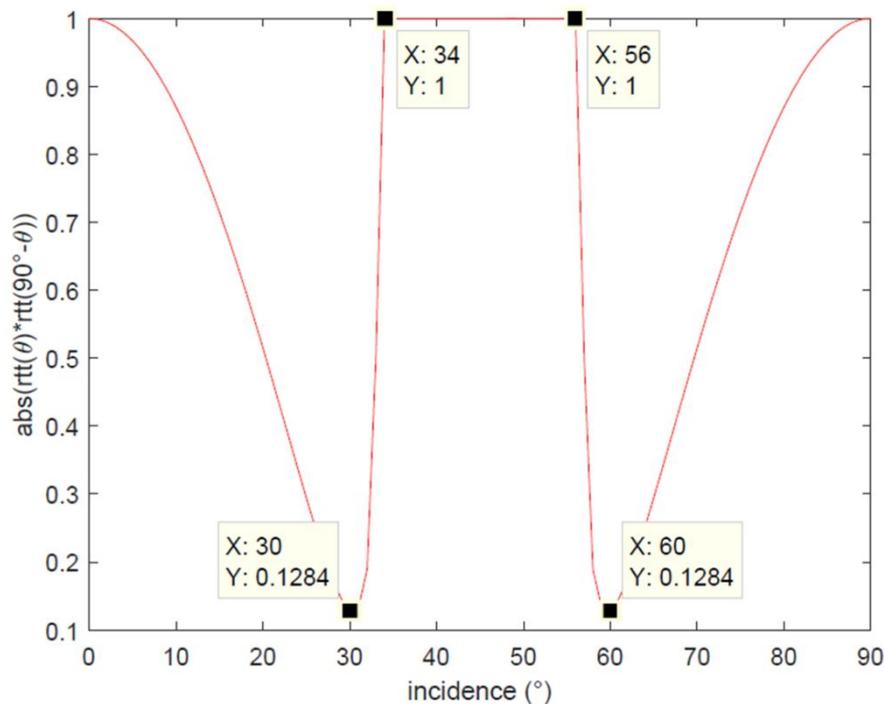


Figure 109 : coefficient de réflexion en écho de coin suite à l'interaction d'une onde transversale et d'un coin droit (fond de la plaque + défaut droit débouchant)

D'autre part, un rayon ultrasonore rencontrant un défaut plan droit dont la dimension est proche de la longueur d'onde considérée, génère des rayons diffractés depuis son extrémité non débouchante dans le voisinage [32]. L'approche zonale du **Simulateur VRCF** considère la diffraction suite à une interaction directe ou indirecte. Nous distinguons ainsi, la diffraction directe opérant lorsque le rayon diffracté se rétro-propage vers la surface de la plaque et la diffraction indirecte opérant lorsque le rayon diffracté se réfléchit sur le fond de la plaque avant de se rétro-propager vers la surface de la plaque. Concernant la diffraction indirecte, les zones d'ombres pour les approximations **HF GTD** et **KA** sont au voisinage de 39.5° et 320.5° (Figure 110, a). Quant à la diffraction directe, les zones d'ombre correspondantes sont au voisinage de 140.5° et 219.5° (Figure 110, b). En dehors de ces voisinages ; l'amplitude des différents coefficients de diffraction est négligeable comme le montre la Figure 110.

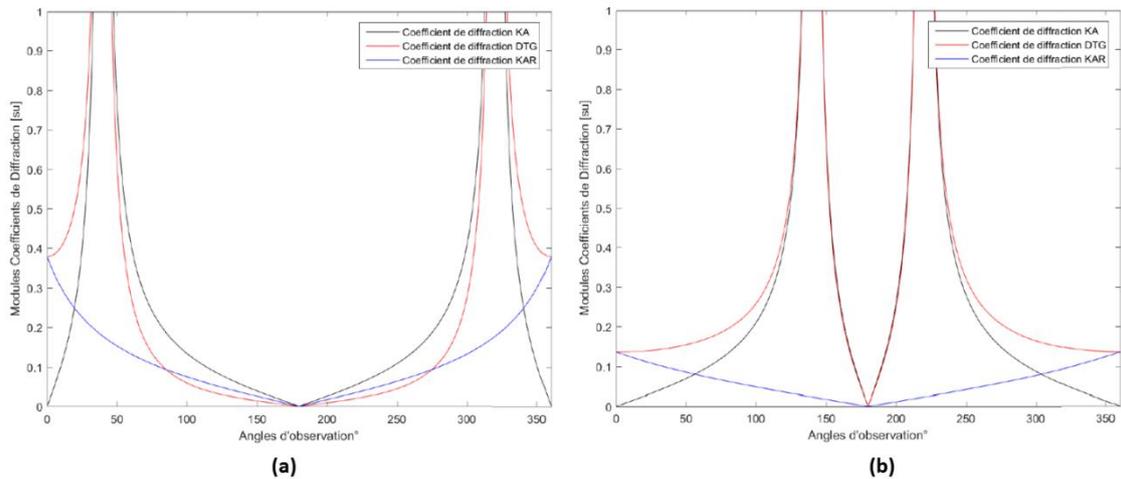


Figure 110 : (a) coefficients de diffraction *HF* (*GTD*, *KA*, *KAR*), diffraction indirecte d’une onde transversale. (b) coefficients de diffraction hautes fréquences (*GTD*, *KA*, *KAR*), diffraction directe d’une onde transversale.

Pour notre configuration de contrôle, seules les zones d’ombres des rayons réfléchis interviennent. Ces zones d’ombres sont ainsi réduites au voisinage de 39.5° pour une diffraction indirecte et au voisinage de 140.5° pour une diffraction directe. Pour ces zones d’ombre réduites, les coefficients de diffraction selon les approximations ***HF GTD*** et ***KA*** deviennent significatifs (>1) pour les rayons de retour vers la surface de la plaque dont les angles varient de [33 ; 47°] après diffraction indirecte. Après une diffraction directe, ces coefficients deviennent significatifs pour les rayons se propageant vers le fond de la plaque avec des angles variant de [133° ; 147°]. Or, ces derniers rayons n’atteignent pas la surface du transducteur dans notre configuration de contrôle. Ainsi, leur apport énergétique n’est pas pris en compte. La contribution énergétique significative (>1) des rayons diffractés se limite à la zone d’ombre des rayons réfléchis après une diffraction indirecte.

L’approche ***KAR*** permet par sa définition d’estomper les singularités dans les zones d’ombre [57] [39]. De ce fait, ses coefficients de diffraction directe et indirecte ne présentent aucune singularité comme l’illustre la Figure 110. Par conséquent, les contributions énergétiques dues aux phénomènes de réflexion de type écho de coin sont plus conséquentes que celles dues à la diffraction.

ii. Donnée image ultrasonore relative au temps de vol

Les rapports $K(TOF_{Amax})$ de l’essai expérimental et ceux issus des différentes simulations (***CIVA*** et ***Simulateur VRFCF***) sont illustrés dans la Figure 111. Nous constatons d’après cette figure que l’ensemble des approches excepté l’approche ***SE*** (***CIVA*** et ***Simulateur VRFCF***) délivrent des rapports quasi-invariants selon l’extension du défaut plan débouchant. Ce résultat découle des temps de vol prédits et qui sont quasi-invariants également selon ses

approches. L'approche **SE** présente une tendance comparable à celle de l'essai expérimental comme illustré Figure 111.

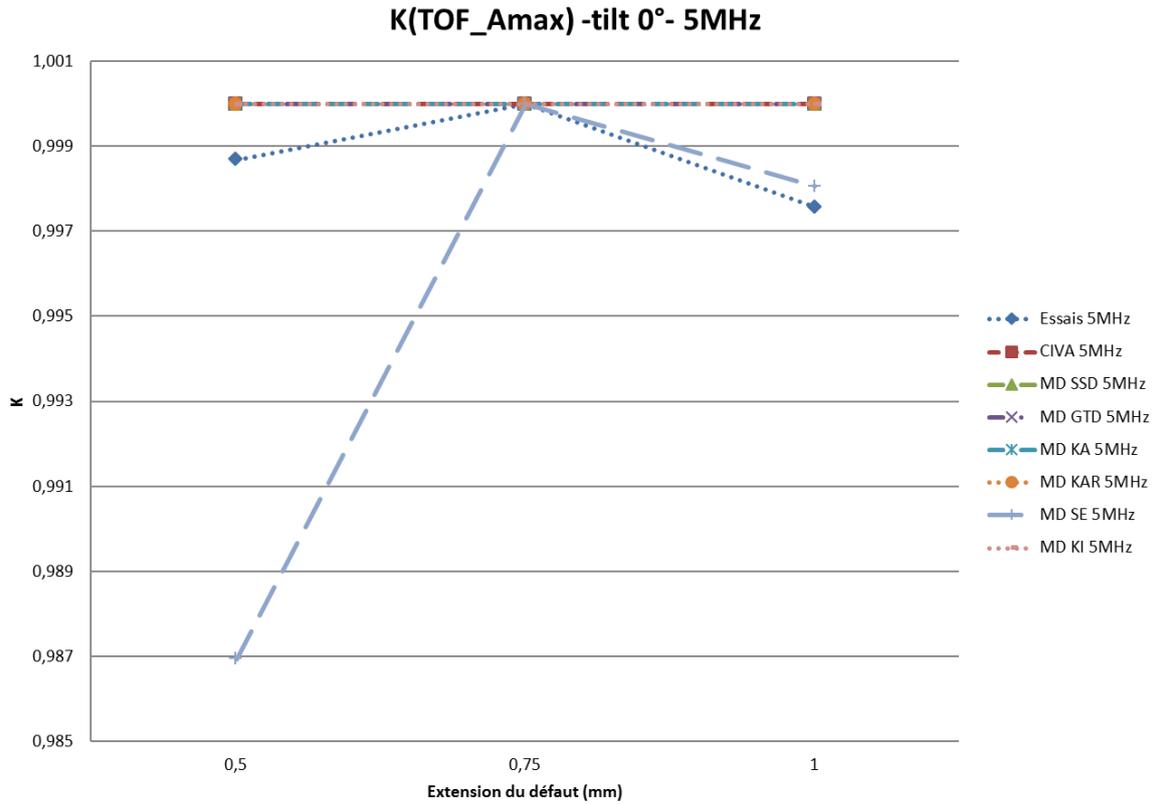


Figure 111 : courbes des rapports $K(TOF_{Amax})$ pour les différentes simulations et pour l'essai expérimental des réponses ultrasonores des défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm

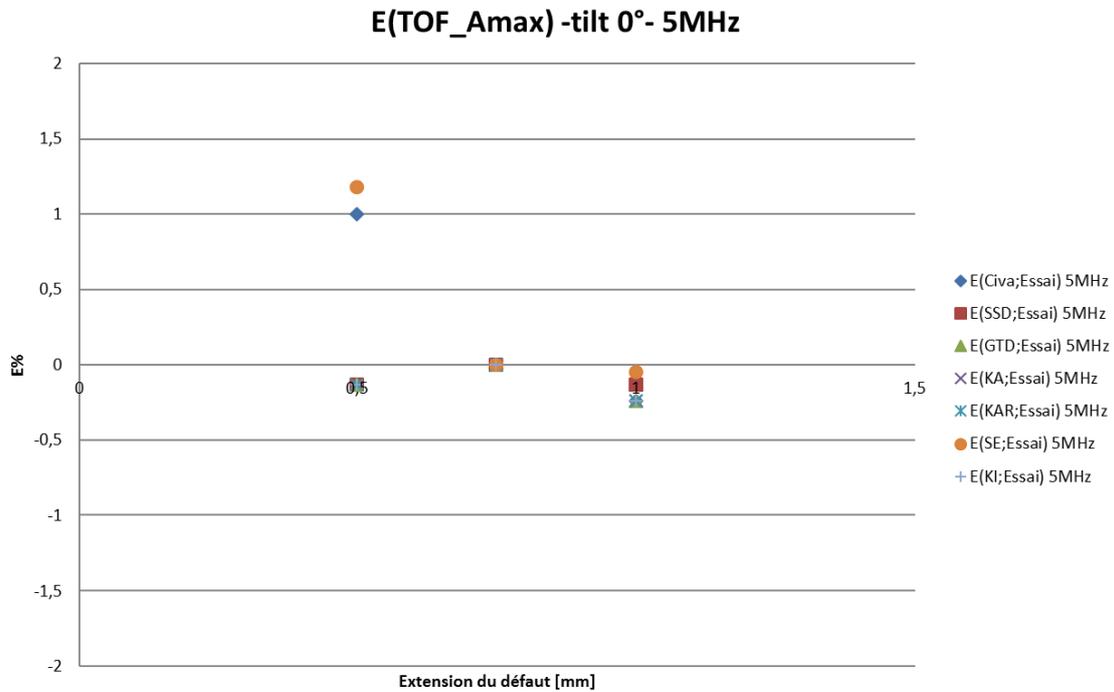


Figure 112 : écarts de prédiction des temps de vol en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm

En revanche, elle présente avec **CIVA** les écarts les plus importants pour le défaut dont l'extension est inférieure à la longueur d'onde considérée (0.64mm). Notons que ces écarts restent négligeables car inférieurs à 1.5% comme observé dans la Figure 112. Par conséquent, nous pouvons considérer que les différentes approches délivrent des prédictions en termes de temps vol comparables avec l'essai expérimental.

iii. Donnée image ultrasonore relative à la largeur à -6dB de la courbe écho-dynamique

Les rapports $K(L_{-6dB})$ sont calculés afin de s'affranchir des différences des largeurs des faisceaux ultrasonores entre l'essai expérimental et les simulations. Ces différences de largeurs se répercutent sur les largeurs des courbes écho-dynamiques. En effet, la largeur de la courbe écho-dynamique est représentative de la dimension du défaut vue en réflexion par le faisceau ultrasonore considéré. La largeur du faisceau ultrasonore expérimental relevée est de 5.36mm (Figure 101). La largeur du faisceau simulé selon **CIVA** est de l'ordre de 9.1mm comme illustré (Figure 113, a). La largeur du faisceau ultrasonore parallèle pris en compte par le **Simulateur VRCF** est approximativement de 11,5mm pour une longueur utile du transducteur de 12mm (Figure 113, b).

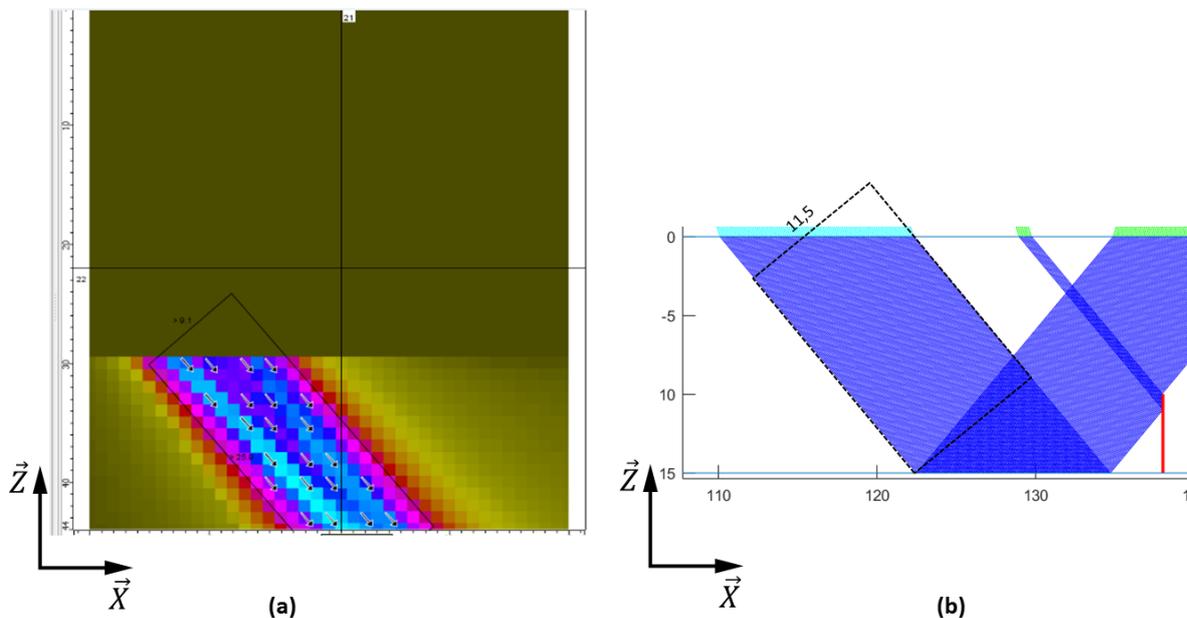


Figure 113 : largeurs des faisceaux ultrasonores transmis dans la plaque à inspecter selon la configuration de contrôle étudiée à l'aide de la simulation. (a) faisceau ultrasonore selon le modèle CIVA. (b) faisceau ultrasonore selon le modèle Simulateur VRCF

Les différents rapports $K(L_{-6dB})$ calculés pour l'essai expérimental et les différents modèles de simulation sont résumés dans le Tableau 15. Au vue des petites extensions des défauts étudiés, les différents modèles affichent des résultats quasi-équivalents.

Extension du défaut (mm)	K (L-6dB) - tilt 0°							
	Essai	CIVA	Simulateur VRCF					
			SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
0,50	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	0,95	0,99
0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,00	1,04	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,92	0,98

Tableau 15 : rapports $K(L_{-6dB})$ pour les différentes simulations et pour l'essai expérimental des réponses ultrasonores des défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm

A l'exception des résultats obtenus selon l'approche **SE**, les écarts entre les différentes approches de simulation (**CIVA** et **Simulateur VRCF**) comparés à l'expérience sont compris entre $\pm 6\%$ comme le montre la Figure 114. Le plus important écart observé pour la donnée image ultrasonore relative à la largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB concerne l'approche **SE** (11%) (Figure 114) car elle délivre des courbes écho-dynamiques différentes de celles obtenues suivant les différentes approches de simulation (**CIVA** et **Simulateur VRCF**) (Figure 115, b).

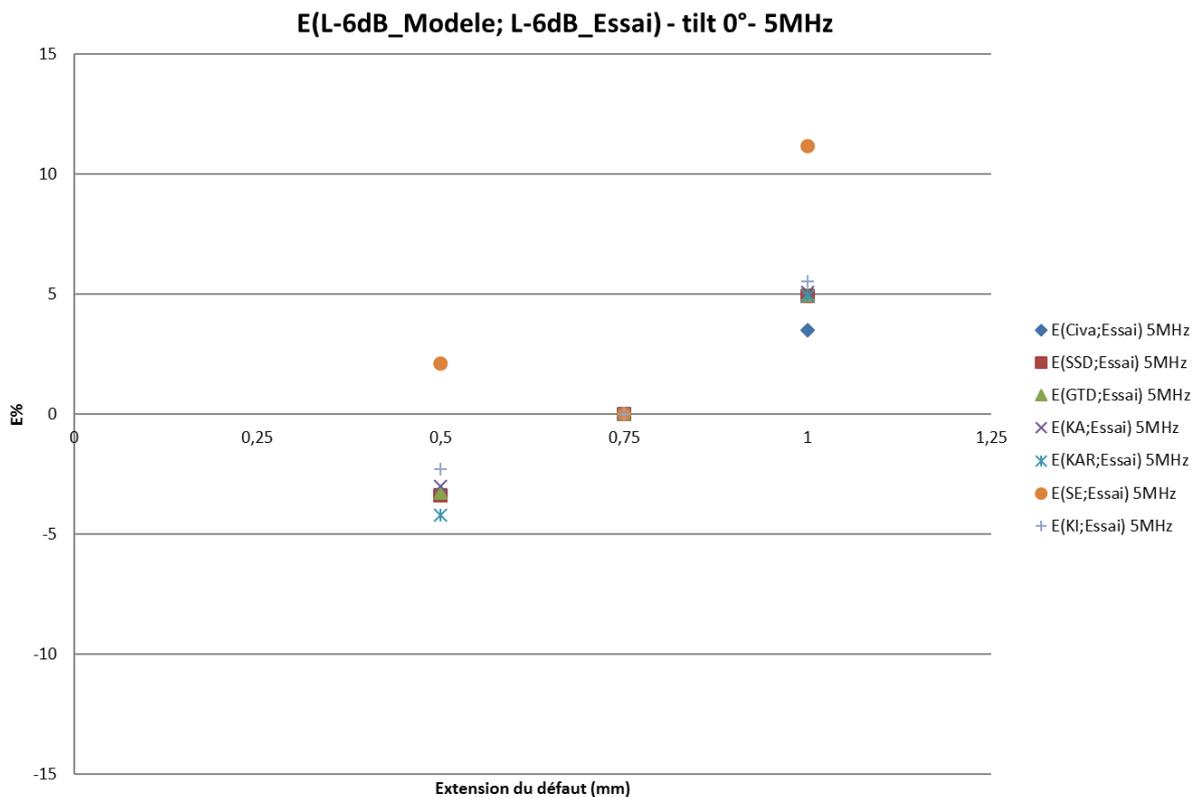


Figure 114 : écarts de prédiction largeurs des courbes écho-dynamiques à -6dB en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm

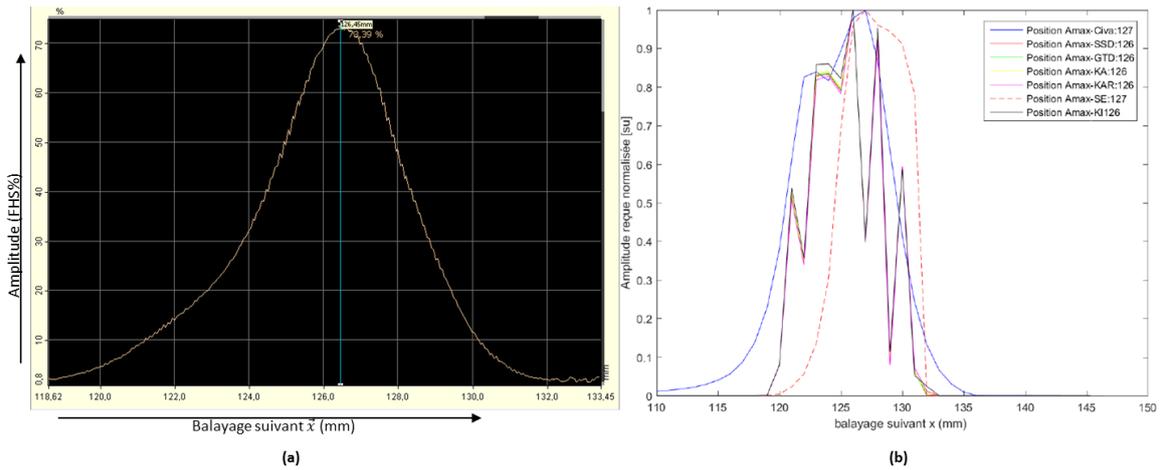


Figure 115 : (a) courbe-écho-dynamique de l'entaille de référence (relecture MultiX M2M). (b) superposition des courbes écho-dynamiques simulées (CIVA, Simulateur VRCF toutes approches) (Relecture, routine de dépouillement développée dans le cadre de ces travaux).

Les allures des courbes écho-dynamiques simulées diffèrent de celle de la courbe écho-dynamique expérimentale comme le montre la Figure 115. Les allures des courbes écho-dynamiques dépendent de la distribution spatiale d'amplitude du faisceau ultrasonore en interaction avec la surface du défaut plan droit [34]. Les distributions spatiales de l'amplitude pour le faisceau ultrasonore expérimental et celui simulé à l'aide de **CIVA** sont disponibles à différentes interfaces. La Figure 116 illustre la distribution spatiale de l'amplitude du faisceau ultrasonore à la surface de la plaque ($z=29\text{mm}$) ainsi que celle du faisceau ultrasonore à la distance focale ($z=25\text{mm}$) pour la configuration de contrôle étudiée. Cette information n'est pas délivrée par le **Simulateur VRCF** qui est un modèle géométrique contrairement à **CIVA** qui est un modèle impulsif.

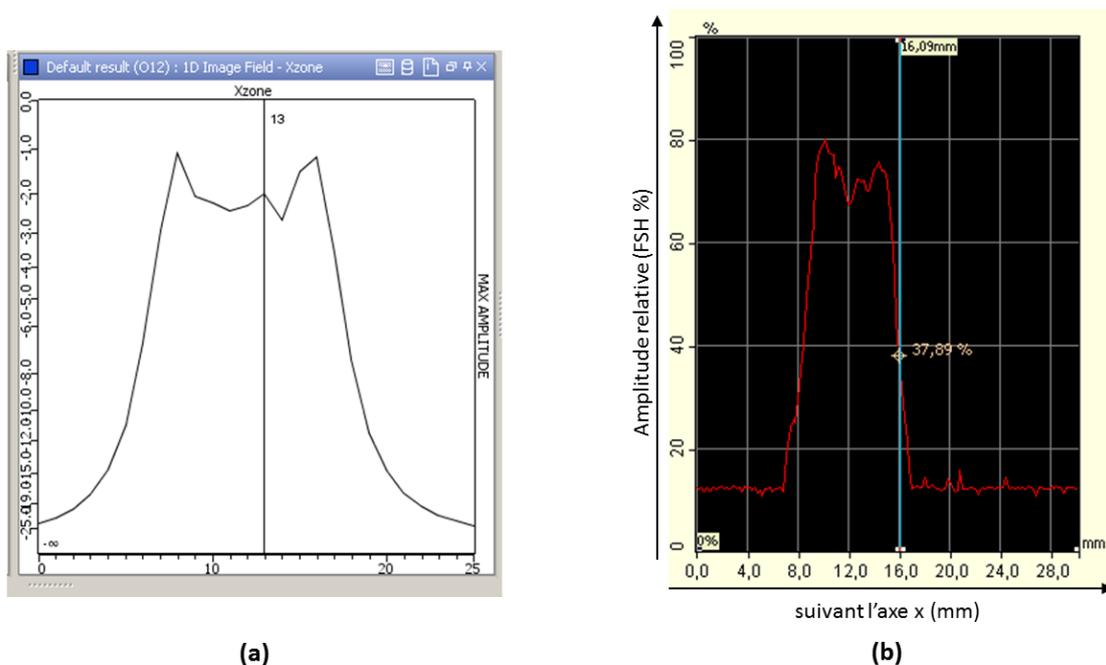


Figure 116 : (a) courbe écho-dynamique du faisceau ultrasonore selon CIVA à la surface de la plaque ($z=29\text{mm}$). (b) courbe écho-dynamique du faisceau ultrasonore expérimental à la distance focale ($z=25\text{mm}$).

Nous pouvons ainsi constaté selon la Figure 116 que l'allure du faisceau expérimental à la surface de la plaque est reproduite par **CIVA**. En revanche, les allures des courbes écho-dynamiques des maxima d'amplitudes des réponses acoustiques des défauts plans droits simulées selon **CIVA** ne correspondent pas à celles expérimentales comme le montre la Figure 115. Le même constat peut être porté sur les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide du **Simulateur VRCF** (Figure 115). Contrairement à l'expérience, les courbes écho-dynamique simulées présentent une double bosse (pour les différentes extensions étudiées du défaut plan droit). La présence de ce phénomène a été identifiée par [69] comme étant la présence d'un ligament entre le fond de la pièce et l'extrémité du défaut plan droit. Or, ce n'est pas notre cas car le défaut droit est débouchant sur le fond de la plaque. Les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide du **Simulateur VRCF** selon les approches (**SSD, GTD, KA, KAR** et **KI**) reproduisent ce phénomène malgré des chutes d'amplitude à certaines positions du balayage (Figure 115). Ces chutes d'amplitudes sont observées pour des positions de balayages pour lesquelles les rayons en retro-propagation atteignent la surface du transducteur loin du centre du capteur. L'approche géométrique du transducteur considère la répartition de l'énergie sur la surface du transducteur suivant une allure gaussienne équivalente en émission et en réception. L'étroitesse du faisceau géométrique du **Simulateur VRCF** réfléchi par la surface du défaut et retro-propagé vers le transducteur expliquerait ces chutes d'amplitudes à ces positions. Une apodisation de ces courbes permettra de s'affranchir de ces chutes d'amplitude sans augmenter le nombre de rayons en interaction avec le défaut et donc sans augmenter les temps de calcul.

L'approche **SE** ne présente pas ces chutes d'amplitudes mais sous-estime les largeurs des courbes écho-dynamiques à -6dB pour les trois extensions des défauts droits comme résumé dans le Tableau 15 (p. 159). L'approche **SE** basée sur la solution exacte selon la **PTD** permet de considérer les régions où le champ diffusé n'a pas de structure de rayons géométriques car elle introduit la notion de composantes non uniformes dues à la radiation dite d'ombre [39]. Elle considère que la contribution due à la radiation d'ombre dépend uniquement de la taille et de la géométrie du contour d'ombre. Pour Achenbach [32], il est considéré que lorsqu'une onde rencontre un défaut plan droit dont la dimension caractéristique (hauteur ou profondeur ou extension selon notre vocabulaire) est proche de la longueur d'onde, elle donne naissance, en plus à des ondes décrites selon les lois de Snell-Descartes, à une onde cylindrique diffractée par cette extrémité ainsi qu'à une onde de surface se propageant le long du défaut et rayonnant à nouveau de l'énergie depuis l'extrémité du défaut. L'approche **SE** considère ces ondes dites de natures non géométriques en considérant la contribution dite non-uniforme du champ diffusé suite à une interaction entre onde plane et un obstacle rigide [39].

iv. Donnée image ultrasonore relative à la pente de l'image Bscan

Enfin la dernière donnée image ultrasonore choisie pour la comparaison des résultats simulés et expérimentaux considère l'orientation de la réponse du défaut sur l'image Bscan, il s'agit de la pente du Bscan ou l'angle préférentiel de l'image Bscan comme illustré dans la Figure 117. Les écarts de prédictions entre les simulations et l'expérience relatifs aux rapports $K(Pente)$ sont illustrés Figure 118. Les écarts max sont observés pour les résultats obtenus à l'aide de l'approche **SE** (9% pour le défaut plan d'extension 1mm). Les écarts observés pour les approches restantes du **Simulateur VRCF** avoisinent au max les 2% quelle que soit l'extension du défaut plan droit étudié.

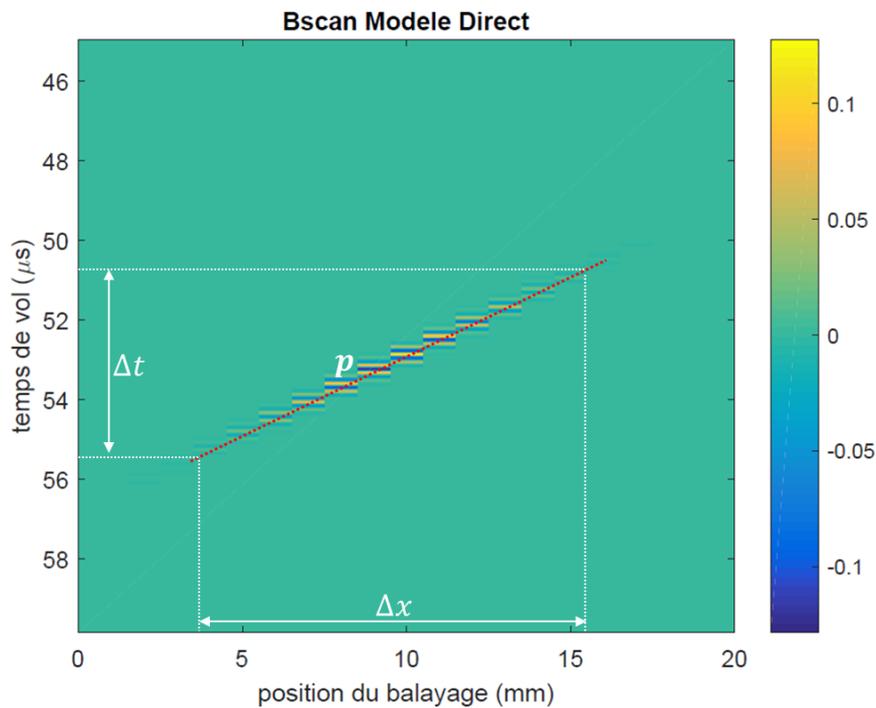


Figure 117 : Bscan simulé de la réponse acoustique de l'entaille de référence [0x0.75]mm à l'aide du Simulateur selon l'approche GTD.

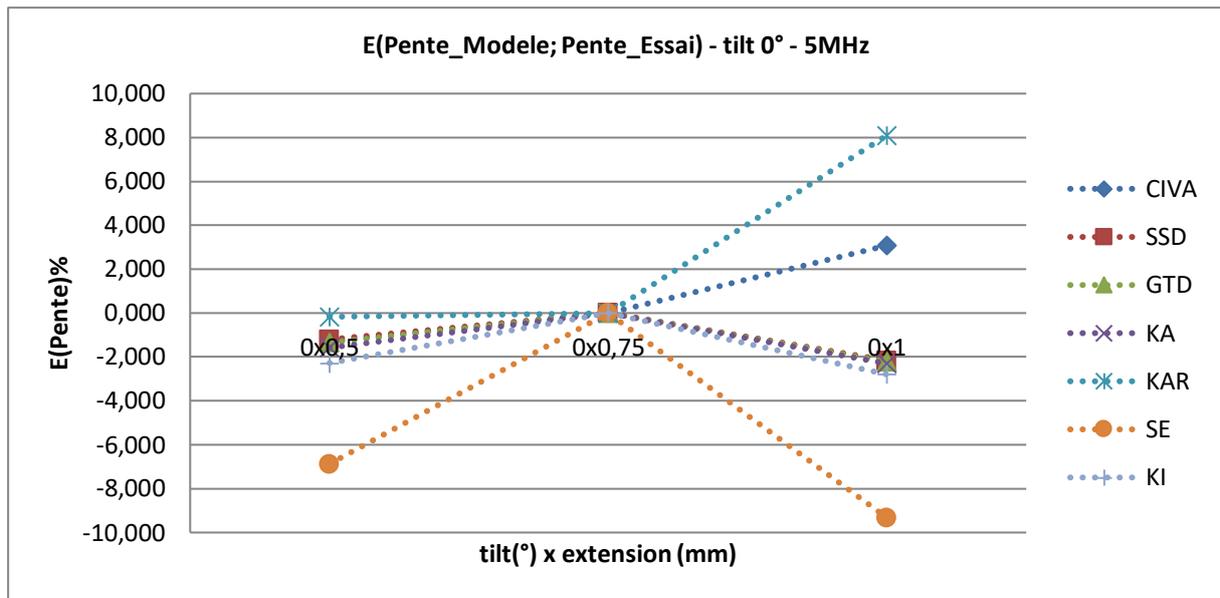


Figure 118 : écarts de prédiction pentes des images Bscan en % entre les différentes simulations et l'essai expérimental pour la réponse de défauts plans droits (tilt=0°) de différentes extensions [0.5, 0.75, 1] mm

v. Discussion

À l'issue de la comparaison des différentes données images ultrasonores, et plus particulièrement les rapports de ces données images par rapport aux données images de l'entaille de référence, nous constatons que le **Simulateur VRFCF** délivre des résultats satisfaisants par rapport à l'expérience pour le cas du défaut droit débouchant. Les résultats simulés selon les approches **HF** à l'aide du **Simulateur VRFCF** et ceux simulés à l'aide de **CIVA** pour les rapports $K(TOF)$, $K(L_{-6dB})$ et $K(Pente)$ sont très proches pour l'extension du défaut droit d'extension 0.5mm. En revanche, les résultats simulés à l'aide de l'approche **KI** sont moins sensibles à cette petite extension. Au vue des faibles écarts observés entre l'expérience et la simulation, nous pouvons constater que l'ensemble des approches délivrent des prédictions proches de l'expérience pour le défaut droit.

Enfin, une dernière donnée importante est le coût de calcul de chacun de ces modèles. Comme le montre le Tableau 16, les deux approches les plus coûteuses en temps de calcul sont les approches basées sur des considérations intégrales. Pour un défaut plan droit et au vue des différents résultats discutés précédemment, l'approche **SSD** délivre des résultats satisfaisants en étant moins coûteuse en temps de calcul. L'approche **KI** délivre des résultats plus précis, notamment pour les signaux Ascans, mais elle est coûteuse en temps de calcul

0°x Extension du défaut (mm)	Temps de calcul selon l'approche (simulateur VRFC) [s]						
	CIVA 2D	SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
0,50	20	7	23	25	24	252	471
0,75		8	32	33	34	375	708
1,00		8	41	44	43	508	975

Tableau 16 : temps de calcul selon l'extension du défaut droit pour les différentes approches considérées par le Simulateur VRFC

2. Résultats de validation sur défauts artificiels tiltés

Les entailles artificielles tiltées sont résumées dans le Tableau 17. Trois tilts différents ont été choisis pour ce besoin de validation. Il s'agit des inclinaisons de défauts les plus observés lors des inspections ultrasonores et qui sont dus généralement au processus de fabrication.

N° entaille	tilt ($\pm 2^\circ$)	prof ($\pm 0.02\text{mm}$)	longueur ($\pm 0.5\text{mm}$)	Largeur ($\pm 0.02\text{mm}$)
1	0	0,5	20	0.1
2	0	0,75		
3	0	1		
4	10	0,5		
5	10	0,75		
6	30	0,5		
7	30	0,75		
8	30	1		
9	50	0,75		
10	50	1		

Tableau 17 : récapitulatif des différentes entailles artificielles internes sur la plaque

Les défauts présentant un tilt sont contrôlés suivant deux sens de balayage. Ceci est indispensable car leurs réponses acoustiques sont souvent plus notables suivant un sens de balayage. Dans la suite nous analyserons chacune des données images ultrasonores définies dans le cadre du processus de validation suivant les deux sens du balayage.

i. Donnée image ultrasonore relative à l'amplitude maximale

La détection des défauts ultrasonores tiltés dans les conditions industrielles exige l'inspection de ces défauts suivant deux sens de balayage de la configuration de contrôle considérée. En effet, comme l'illustre la Figure 119 les réponses acoustiques des défauts sont plus notables selon le sens2 du balayage et plus particulièrement pour les défauts tiltés (7, 8, 9 et 10) résumées dans le Tableau 17.

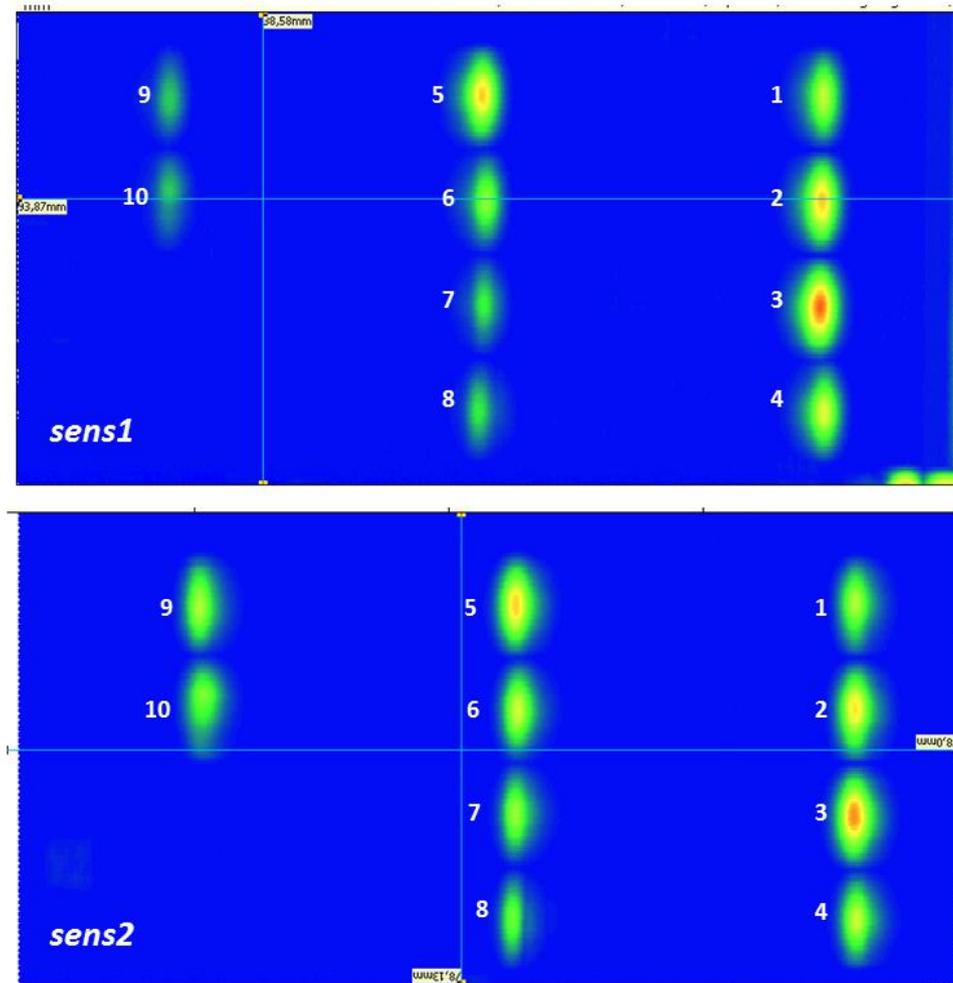


Figure 119 : Cscans expérimentaux du contrôle ultrasonore en immersion de la plaque suivant les deux sens du balayage selon la configuration de contrôle de validation.

Pour la suite de notre analyse, nous rappelons la convention utilisée pour définir le tilt du défaut selon le sens de balayage considéré comme résumé dans le Tableau 18.

Extension défaut (mm)	du	sens1 du contrôle			Sens 1&2	sens2 du contrôle		
		-50°	-30°	-10°		10°	30°	50°
0,5			X	x	X	x	x	
0,75		x	X	x	X	x	x	X
1		x	X		X		x	X

Tableau 18 : tilt de l'entaille selon le sens du balayage considéré

Le rapport $G(A_{max})$ correspondant à l'amplitude maximale de la réponse du défaut étudié par rapport à celle de l'entaille de référence (**entaille n°2**) suivant le sens de balayage est illustré Figure 120. Il corrobore les résultats observés dans cette dernière, les amplitudes maximales des réponses acoustiques des défauts tiltés sont plus notables suivant le sens2 du balayage que le sens1. En contrôle industriel, un seuil défini sur l'amplitude maximale en %FHS (porte interne de détection). Ce seuil est défini par rapport à l'amplitude maximale en

%FHS de l'entaille de référence pendant l'étape de calibration. De ce fait, toute indication ultrasonore dépassant ce seuil peut indiquer la présence d'un défaut. En imposant le seuil de détection de la porte interne à 40% pour une amplitude maximale de l'entaille de référence calibrée à 80%, ceci implique que tout écart supérieur à -6dB engendre une non détection du défaut.

Au vu des extensions des défauts étudiées ([0.5, 0.75 et 1] mm ce qui correspond à [3, 5 et 7]% de l'épaisseur de la plaque) et d'après les résultats illustrés dans la Figure 120, l'ensemble des tilts étudiés sont détectables suivant les deux sens de contrôle (≤ -6 dB). Nous constatons également d'après la Figure 120 que les réponses des défauts tillés étudiés sont quasi-équivalentes (≤ 1 dB) suivant le sens du balayage à l'expression du tilt 30°. L'impact de l'extension du défaut pour un tilt donné est négligeable au vu des faibles extensions étudiées. Les écarts les plus importants sont observés pour le défaut de tilt 30°. Pour les défauts étudiés, la sélectivité entre ces derniers en termes d'extensions et de tilts n'est pas satisfaisante (< 3 dB).

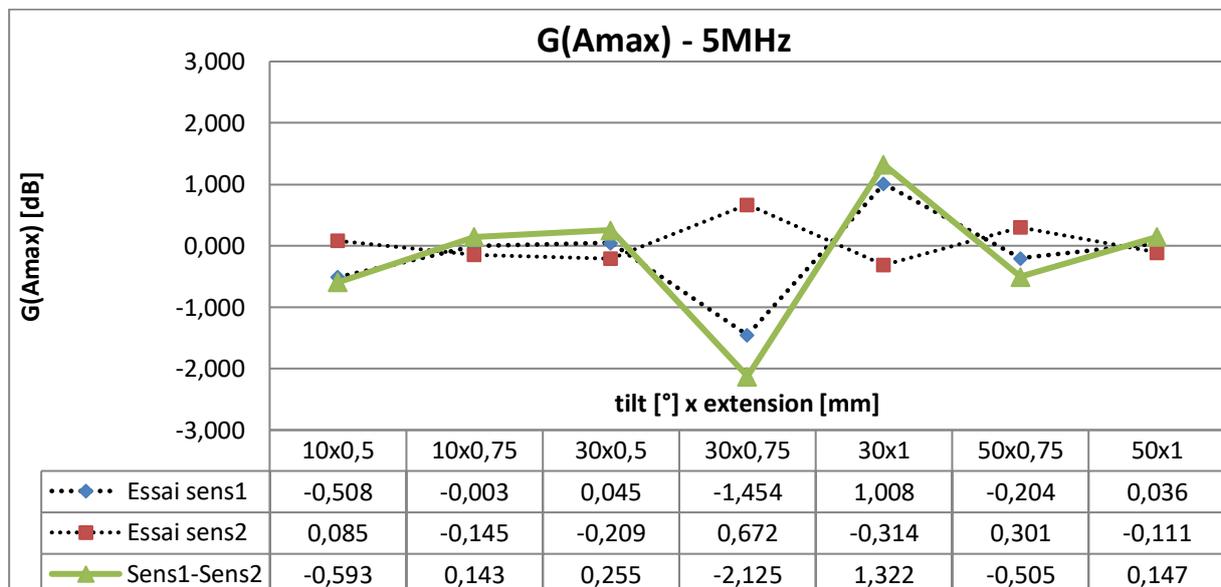


Figure 120 : courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB suivant les deux sens de contrôle ultrasonore 5MHz pour l'inspection des défauts plans tillés de différentes extensions ainsi que l'écart observé entre ces deux sens.

Les rapports $G(A_{max})$ des résultats simulés à l'aide du **Simulateur VRCF** (toute approche), **CIVA** et l'essai expérimental suivant le sens1 (respectivement le sens2) sont illustrés Figure 121 (respectivement Figure 122).

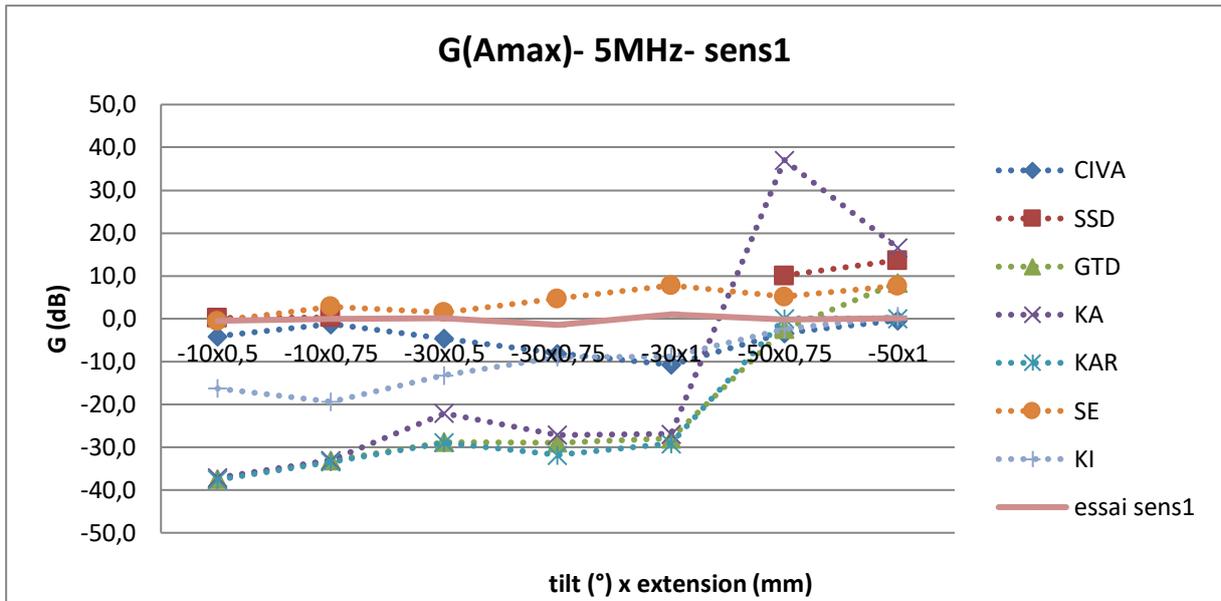


Figure 121 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz

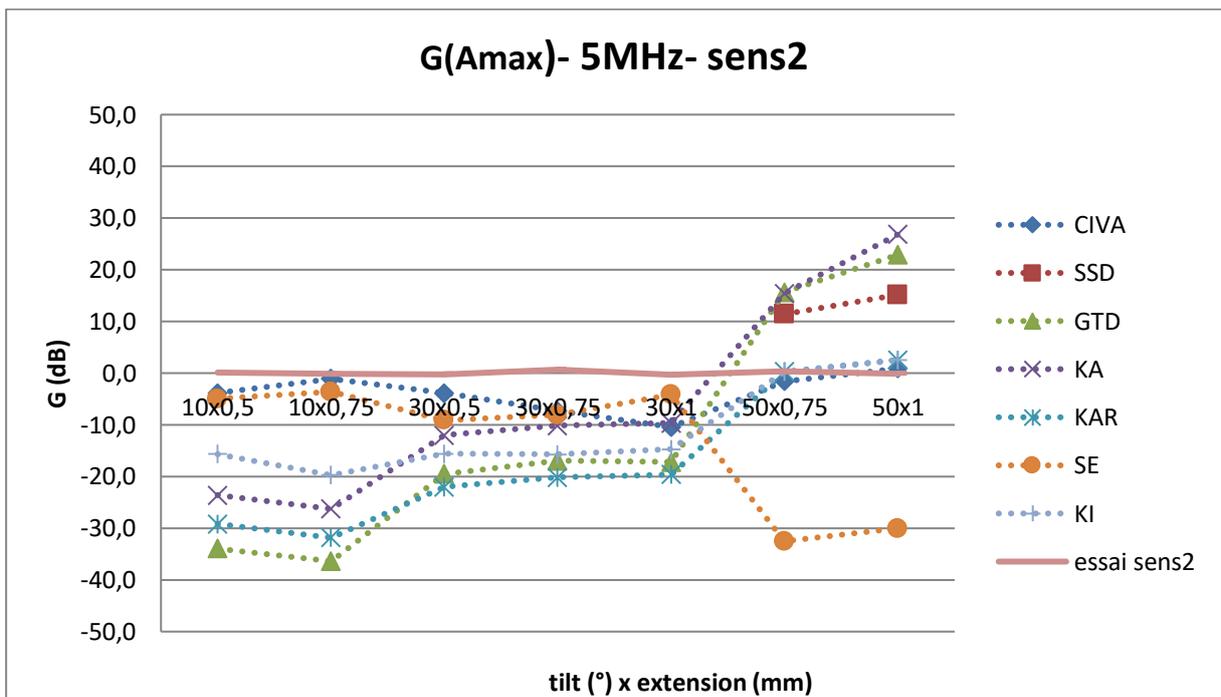


Figure 122 : Courbe du rapport $G(A_{max})$ en dB des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz.

Pour rappel, le **Simulateur VRCF** est basé sur une approche géométrique pour la modélisation de l'interaction entre le rayon ultrasonore et le défaut plan. Il considère ainsi la propagation selon le trajet effectué par le rayon ultrasonore depuis la surface du transducteur en émission jusqu'à son éventuelle retro-propagation vers la surface de ce dernier suite à son interaction avec la surface du défaut plan débouchant sur la surface interne. Les trajets géométriques des rayons ultrasonores selon le sens du balayage pour les tilts étudiés sont résumés dans le Tableau 19.

Approche zonale	Sens1			Sens2		
	-10°	-30°	-50°	10	30	50
Zone2 : Interaction indirecte	$C_1 S_1 F D S_2 C_2$	$C_1 S_1 F_1 D F_2 S_2$	$C_1 S_1 F_1 D_{\perp} F_2 S_2 C_2$	$C_1 S_1 F D S_2$	$C_1 S_1 F D S_2$	\emptyset
Zone3 : Interaction directe	$C_1 S_1 D F S_2 C_2$	$C_1 S_1 D_1 F_1 D_2 F_2 S_2$	$C_1 S_1 D F S_2$	$C_1 S_1 D F S_2$	$C_1 S_1 D S_2$	$C_1 S_1 D_{\perp} S_2 C_2$

Tableau 19 : trajets géométriques suite à l'interaction entre un rayon ultrasonore et un défaut plan tilté selon le sens de balayage considéré

Le Tableau 19 détaille les trajets géométriques dans la plaque inspectée depuis la surface du transducteur en émission C_1 , jusqu'à son éventuelle retro-propagation vers la surface de ce dernier symbolisée par C_2 . Les autres symboles désignent :

- $S_{i=(1,2)}$: point d'impact sur la surface de la plaque. 1 désigne le point d'impact en incidence sur la surface de la plaque, 2 désigne le point d'impact en retour sur la surface de la plaque.
- $F_{i=(1,2)}$: point d'impact sur le fond de la plaque. 1 désigne le point d'impact en demi-bond, 2 point d'impact sur le fond de la plaque suite à une réflexion sur la surface du défaut.
- $D_{i=(1,2)}$: point d'impact sur la surface du défaut. Le **Simulateur VRCF** considère uniquement deux réflexions sur la surface du défaut.

Le Tableau 19 montre qu'aucune retro-propagation des rayons ultrasonores vers la surface du transducteur n'est possible pour le tilt 10° suivant le sens2 du contrôle et pour le tilt 30° suivant les deux sens.

Nous rappelons également que les simulations **Simulateur VRCF** et **CIVA** considèrent uniquement la propagation des ondes transversales. En effet, des conversions de mode opèrent suivant les deux sens de balayage pour les tilts 30° et 50°. Hormis le tilt 50° selon le sens1 du balayage (-50°), les contributions énergétiques dues à la conversion des ondes transversales en ondes longitudinales après interactions indirecte ou directe selon le sens de balayage considéré sont négligeables comme précisé dans le Tableau 20.

	30x0.75		50x0.75	
	sens1	sens2	sens1	sens2
T	106%	84%	17%	103%
T+CM	100%	100%	100%	100%
écart dB	0,5	-1,5	-15,4	0,3

Tableau 20 : Amplitudes maximales en %FSH des réponses acoustiques des défauts tiltés selon le sens de balayage ainsi que l'écart en dB entre les amplitudes en considérant uniquement le mode transversal et en considérant le mode transversale et les conversions de mode. Résultats simulés à l'aide de CIVA.

En effet, pour le tilt -50° selon l'**OG**, deux conversions de modes opèrent suite à une interaction indirecte (Z2, Tableau 19). La première opère après rebond sur le fond où l'onde transversale incidente sur la surface du défaut donne naissance à une onde longitudinale en plus de l'onde transversale réfléchie. Puis, l'onde longitudinale réfléchie depuis la surface du défaut et de retour vers le fond de la plaque, donne naissance à une transversale. Pour le tilt -30° , la conversion de mode des ondes transversales en ondes longitudinales opère suite à une interaction indirecte et directe. Pour le cas de l'interaction indirecte (Z2, Tableau 19), l'onde transversale incidente sur la surface du défaut donne naissance à une onde longitudinale. Pour le cas de l'interaction directe (Z3, Tableau 20), l'onde transversale sur le fond de la plaque après réflexion sur la surface du défaut donne naissance à une onde longitudinale. A l'instar de l'onde transversale, cette onde longitudinale va effectuer un second rebond sur le défaut, puis sur le fond de la plaque puis se retro-propager vers le milieu couplant (dans notre cas l'eau) sans intercepter la surface du transducteur. Selon le sens1 du balayage, Ces ondes générées après conversion de mode ne se retro-propagent pas vers la surface du transducteur pour le tilt 30° contrairement au tilt 50° .

Les différentes approches du **Simulateur VRCF** considérant la diffraction permettent de pallier le non-retour des rayons ultrasonores réfléchis/réfractés à la surface du transducteur en tenant en compte des rayons diffractés. Un rayon incident sur la surface du défaut re-rayonne des rayons diffractés depuis le sommet non débouchant du défaut dans tout l'espace [39]. Les différentes approches du **Simulateur VRCF** considèrent uniquement les rayons géométriques diffractés vers la surface de la plaque ou vers le fond de la plaque. En effet, Certains de ces rayons sont plus susceptibles de se retro-propager vers la surface du transducteur.

Dans la suite, nous analyserons les prédictions obtenues à l'aide des approximations dites **Hautes Fréquences (GTD, KA et KAR)** et celles obtenues à l'aide des approximations basées sur des considérations intégrales (**SE et KI**) disponibles dans le **Simulateur VRCF**.

L'incertitude sur les mesures du dispositif expérimental est de l'ordre de ± 1 dB. L'amplitude des résultats simulés est impactée par la différence des paramètres d'entrée ainsi que la fonction de transfert décrivant la propagation des rayons ultrasonores [30]. Les travaux de validation du logiciel **CIVA** [66] montre des écarts de l'ordre de 8dB pour l'entaille droite d'extension de 0.5mm selon l'inspection considérée ($k_T * a = 1$ et $\theta_T = 45^\circ$; $k_T * a =$

2.4 et $\theta_T = 55^\circ$) où k_T le nombre d'onde de l'onde transversale, a correspond à demi extension du défaut étudié et θ_T l'angle de réfraction des ondes transversales dans la pièce inspectée. Les différents $k_T * a$ pour les extensions des défauts étudiées dans le cadre de ces travaux de validation sont : 2.4, 3 et 5 pour une inspection oblique où $\theta_T = 39.5^\circ$. Ainsi, nous avons fait le choix de définir le critère de +/-6dB afin d'évaluer les prédictions des modèles pour les grandeurs $k_T * a$ et les tilts des défauts étudiés.

a. Résultats obtenus à l'aide des approximations dites Hautes Fréquences (**GTD, KA et KAR**)

Ces approximations permettent de prédire des amplitudes pour le cas des défauts tiltés où le trajet géométrique de retour n'atteint pas la surface du transducteur. Elles permettent de décrire selon des considérations asymptotiques les rayons diffractés comme des rayons ordinaires selon les lois de l'**OG** (Snell-Descartes) [32]. Toutefois, même si la contribution énergétique de la diffraction aux réponses acoustiques de ces défauts est en général faible, elle demeure néanmoins nécessaire pour décrire au mieux la propagation ultrasonore. Quand le faisceau ultrasonore incident est quasi-perpendiculaire à la surface du défaut de tilt 50° comme illustré dans la Figure 123, l'approche sans diffraction **SSD** pourrait suffire.

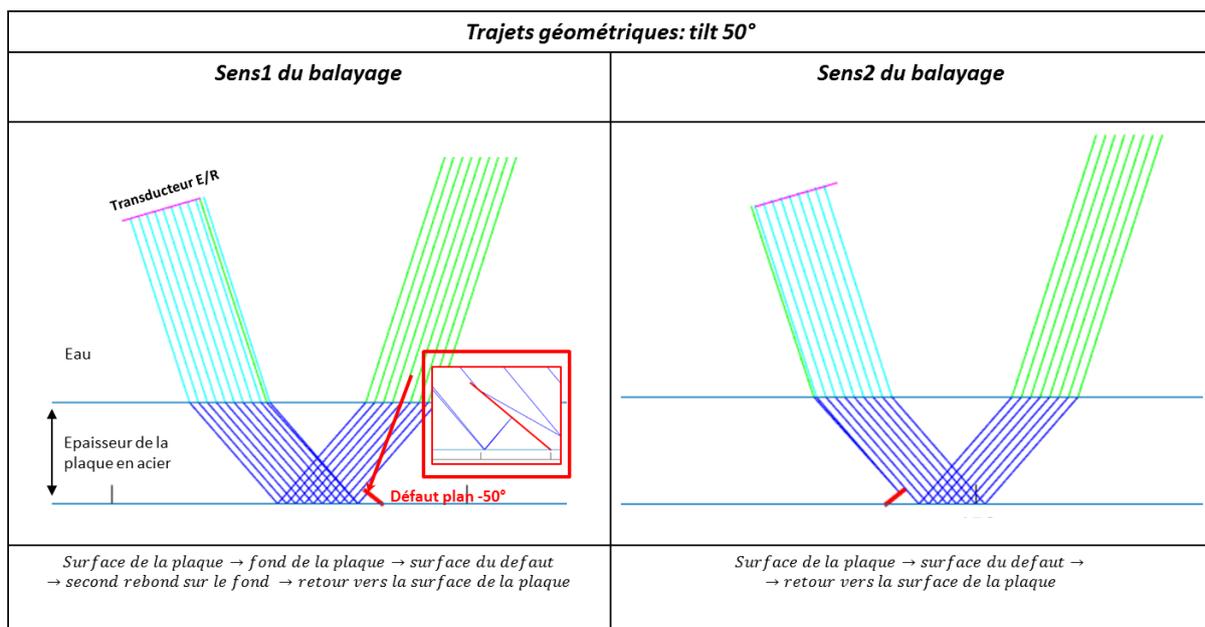


Figure 123 : trajets géométriques en retro-propagation vers la surface du transducteur suite à l'interaction d'un rayon ultrasonore et d'un défaut de tilt 50° selon le sens de balayage.

De ce fait, les trajets géométriques ultrasonores en Aller/Retour sont quasi-identiques pour le sens du balayage considéré comme décrit dans le Tableau 19. Pour cette configuration et selon les deux sens de balayage, le coefficient de réflexion des ondes transversales sur la surface du défaut ainsi que le coefficient de transmission des ondes transversales de retour vers la surface du transducteur en ondes longitudinales (transducteur immergé dans l'eau) sont optimaux.

D'autre part, les rayons incidents sur la surface du défaut se situent au voisinage de la zone d'ombre des rayons réfléchis ($Zone\ d'ombre_1 = \pi - \varphi_0 = \theta_T$) illustrée Figure 124. Ceci donne naissance à des fluctuations importantes d'amplitudes [32] [39].

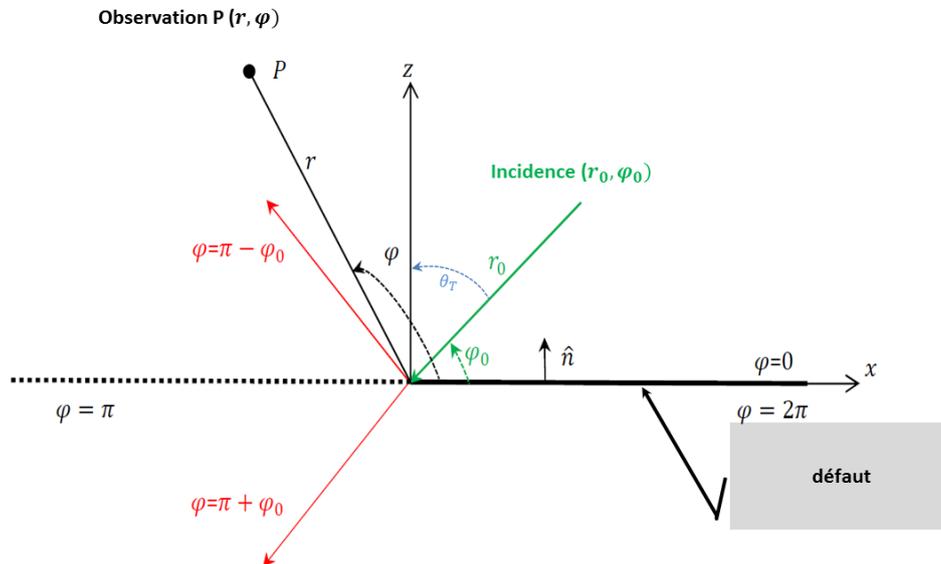


Figure 124 : géométrie du problème canonique de la diffraction d'une onde plane par un demi-plan

L'approximation **KAR** proposée [57] pour pallier les fluctuations d'amplitudes dans la zone d'ombre des rayons réfléchis observées sur les coefficients de diffraction selon **KA** et **GTD** délivrent des résultats quasi-similaires à la **GTD**. En effet, la divergence des coefficients de diffraction selon **KA** dans la zone d'ombre des rayons réfléchis est plus prépondérante que celle des coefficients de diffraction selon la **GTD** [57] [53]. Dans l'ensemble, les écarts restent importants (>6dB) selon les deux sens du balayage pour les grandeurs de $k_T * a$ étudiés.

b. Résultats obtenus à l'aide des approximations basées sur des considérations intégrales (**SE** et **KI**)

En général, elles fournissent de meilleurs résultats que ceux obtenus à l'aide des approximations dites **HF** comme le montre les Figure 121 et Figure 122. L'approche **SE** délivre des résultats proches de ceux de l'expérience et de **CIVA** pour le défaut de tilt 10° quel que soit le sens de balayage considéré. Pour le sens1 du balayage, quel que soit l'interaction indirecte ou directe, l'onde transversale est incidente sur la surface du défaut avec un angle proche de 60° par rapport à la normale. Pour cet angle, la réflexion de l'onde transversale est supposée totale. Cependant, [14] indique que la réflexion totale des ondes transversales implique la présence d'onde de surfaces. Les travaux résumés dans [53] montrent que des ondes rampantes sont générées quand le faisceau ultrasonore impacte le fond de la plaque au voisinage du défaut. Ces ondes se propagent vers la surface du défaut et re-rayonnent des ondes diffractés « head waves » depuis l'extrémité non débouchante du défaut. De plus, quand ces ondes transversales impactent directement la surface du défaut, elles donnent également naissance à des « head waves » mais de nature différentes que

celles discutées précédemment [53]. Ainsi la solution exacte **SE** permet de prendre en compte ses ondes appelées « edge waves » selon [39].

L'approche **KI** permet de pallier la divergence des amplitudes au voisinage de la zone d'ombre des rayons réfléchis, elle permet de considérer uniquement la composante uniforme du champ diffracté [39]. Ceci est notable pour le cas des défauts de tilt 10° selon les deux sens de balayage où les ondes de nature complexe discutées précédemment sont générées. Par ailleurs, Les résultats obtenus selon **KI** convergent vers ceux obtenus à l'aide de **CIVA** à partir du cas $30^\circ \times 0.75\text{m}$ selon le sens1 du balayage et à partir de $50^\circ \times 0.75\text{mm}$ pour le sens2 du balayage.

Nous considérons que le défaut est d'extension infinie alors que les défauts étudiés sont d'extension finie et proche de la longueur d'onde. Nous constatons que les résultats obtenus à l'aide de l'approche **SE** sont plus sensibles au sens de balayage considéré. Ceci est plus notable pour des tilts élevés ($\geq 30^\circ$) suivant les deux sens de balayage. Suivant le sens1 du balayage (tilt négatif) et dans le cas d'un faisceau ultrasonore, les deux surfaces du défaut peuvent être illuminées pour une position donnée du balayage contrairement au sens2 du balayage comme l'illustre la Figure 125. L'illumination des deux faces du défaut est observée lorsque le coin formé par le défaut et le fond de la plaque est dit « fermé » comme le montre la Figure 125.

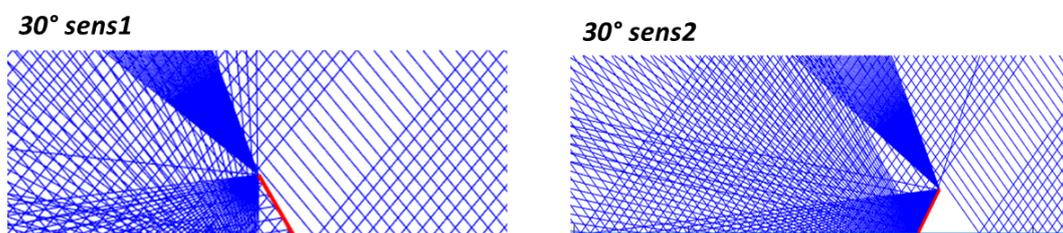


Figure 125 : trajets géométriques des rayons ultrasonores au voisinage d'un défaut plan de tilt 30° d'extension 0.75mm selon le sens du contrôle ultrasonore. A gauche : sens1 correspondant au tilt- 30° . A droite : sens2 correspondant au tilt 30°

c. Discussion

En considérant le critère $\pm 6\text{dB}$ comme critère d'acceptation, nous constatons selon le Tableau 21 que

- **CIVA** vérifie ce critère excepté pour les défauts de tilt 30° et d'extensions 0.75 et 1mm suivant les deux sens de balayage.
- Les approximations dites **HF KA** et **GTD** ne vérifient pas ce critère pour aucun des tilts étudiés quel que soit son extension. L'approximation **KAR** permettant de pallier les limitations des deux précédentes approximations vérifie ce critère uniquement pour le défaut de tilt 50° suivant les deux sens de balayage.
- L'approche **SE** vérifie ce critère pour les tilts 10° suivant les deux sens de contrôle. les résultats pour les tilts 30° dépendent du sens de balayage.

- L'approche **KI** à l'instar de l'approche **KAR** vérifie ce critère pour les tilts 50° suivant les deux sens du balayage.

sens du balayage	défaut étudié	Ecart [dB] - 5MHz						
		Civa	SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
sens1	-10x0.5	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	-10x0.75	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	-30x0.5	1,0		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	-30x0.75	0,0		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	-30x1	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	-50x0.75	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0
	-50x1	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
sens2	10x0.5	1,0		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	10x0.75	1,0		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	30x0.5	1,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30x0.75	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	30x1	0,0		0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
	50x0.75	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0
	50x1	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0

Tableau 21 : validation du critère d'acceptation sur l'écart en dB des amplitudes normalisées obtenus à l'aide des différents modèles de simulation par rapport à l'essai expérimental

De plus, nous pouvons constater d'après le Tableau 21 la complémentarité des approches **SE** et **KI** pour traiter les cas étudiés dans le cadre de ces travaux.

Nous avons discutés dans cette section les prédictions relatives à la donnée image ultrasonore relative à l'amplitude maximale de la réponse acoustique du défaut étudié par rapport à l'amplitude de référence (0°x0.75mm). Nous rappelons que le **Simulateur VRCF** est basé sur une approche géométrique où la propagation des rayons ultrasonores est décrite selon les lois de l'**OG**. De plus, il considère uniquement les ondes transversales, la conversion de modes pour les tilts ($\geq 30^\circ$) n'est pas prise en compte. Enfin, il considère la diffraction par un défaut semi-infini pour des défauts réellement d'extensions finies proches de la longueur d'onde considérée $\lambda_T = 0.65mm$. Selon les résultats discutés dans cette section et au vue des faibles extensions des défauts étudiés ($k_T * a_{max} = 5$), les approches basées sur des considérations intégrales (**SE** et **KI**) délivrent de meilleurs résultats que les approches basées sur des approximations **HF** et peuvent être considérées comme complémentaires selon le tilt étudié. Toutes les approches sont sensibles aux sens de balayage pour les tilts ($\geq 30^\circ$) et particulièrement quand le défaut plan et le fond de la plaque constituent un coin fermé.

ii. Donnée image ultrasonore relative au temps de vol

La donnée image relative au temps de vol consiste en le ratio de la position de l'amplitude maximale en temps de vol du défaut étudié et celle du défaut de référence (entaille n°2 : 0°x0.75mm) tel :

$$K(TOF) = \frac{TOF_{Amax}}{TOF_{Amax_{entaille2}}} \quad \text{Équation 95}$$

Les rapports $K(TOF)$ selon le sens de balayage sont illustrés Figure 126 et Figure 127. Les trajets ultrasonores varient selon le sens de contrôle pour les tilts $\geq 30^\circ$ (Tableau 19, p. 168). Cette variation de trajets géométriques implique des positions en temps de vol différentes pour les amplitudes maximales des réponses acoustiques. D'après les Figure 126 et Figure 127, nous constatons que les résultats selon **CIVA** sont quasi-invariants pour les tilts $\leq 30^\circ$ selon les deux sens du balayage. En effet, les trajets géométriques sont équivalents [34] en considérant l'effet de coin (SFDS ou SDFS). Toutefois, les temps de vol varient car ils leur calcul découlent du trajet Aller/Retour effectué par le rayon ultrasonore.

Les résultats suivant le sens1 du balayage sont illustrés Figure 126. Ceux obtenus selon les approches **SE** et **KI** sont proches des résultats obtenus expérimentalement. En effet, Les écarts suivant le sens1 du balayage entre les prédictions obtenues à l'aide de ces approches et l'expérience sont de l'ordre de 1% comme résumé dans le Tableau 22 donc négligeables. Les prédictions suivant les approximations **GTD**, **KA** et **KAR** présentent des écarts max de 3% avec l'expérience.

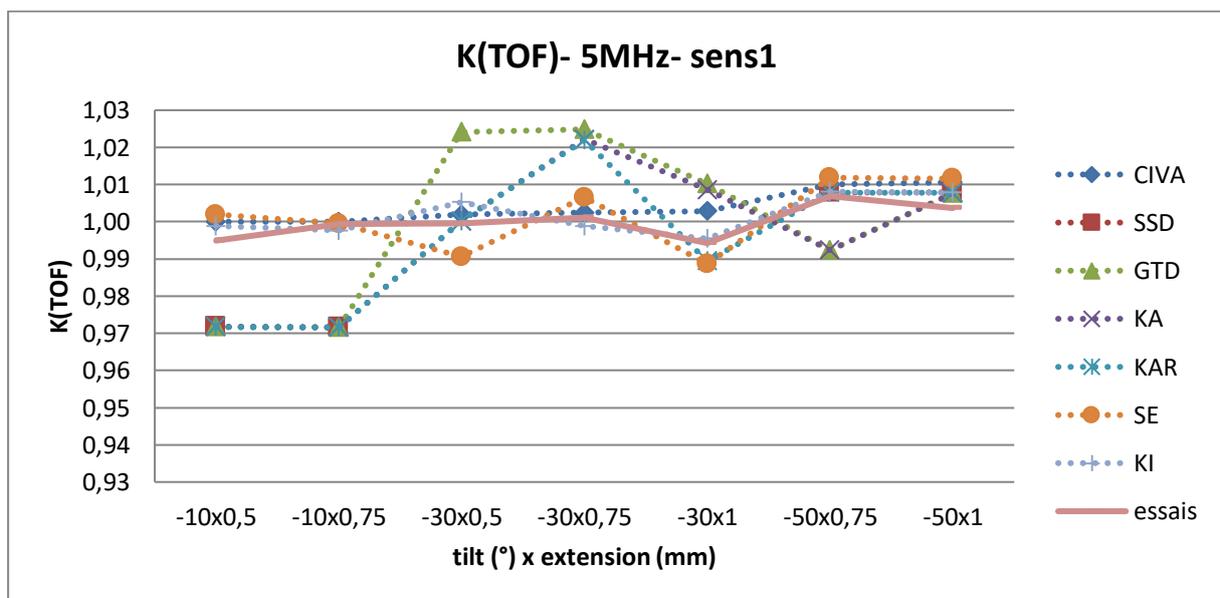


Figure 126 : Courbe du rapport $K(TOF)$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz

En considérant uniquement les phénomènes de réflexion (approche **SSD**), les écarts de prédictions pour la donnée image relative à la position en temps de vol de l'amplitude maximale sont plus notables selon le sens2 du balayage pour le tilt50° comme résumé dans le Tableau 22. Ce constat corrobore celui observé dans le cadre de ces travaux en considérant uniquement la propagation des ondes transversales sans considération de conversion de modes. En considérant les phénomènes de diffraction par un plan semi-infini en plus de la réflexion depuis des obstacles plans rigides, nous constatons d'après le Tableau 22, que les approches **KI** et **SE** vérifient également ce constat. Cependant, en considérant les phénomènes de diffraction par le sommet d'un plan semi-infini, nous constatons que les approches **GTD**, **KA** et **KAR** ne vérifient pas cette tendance.

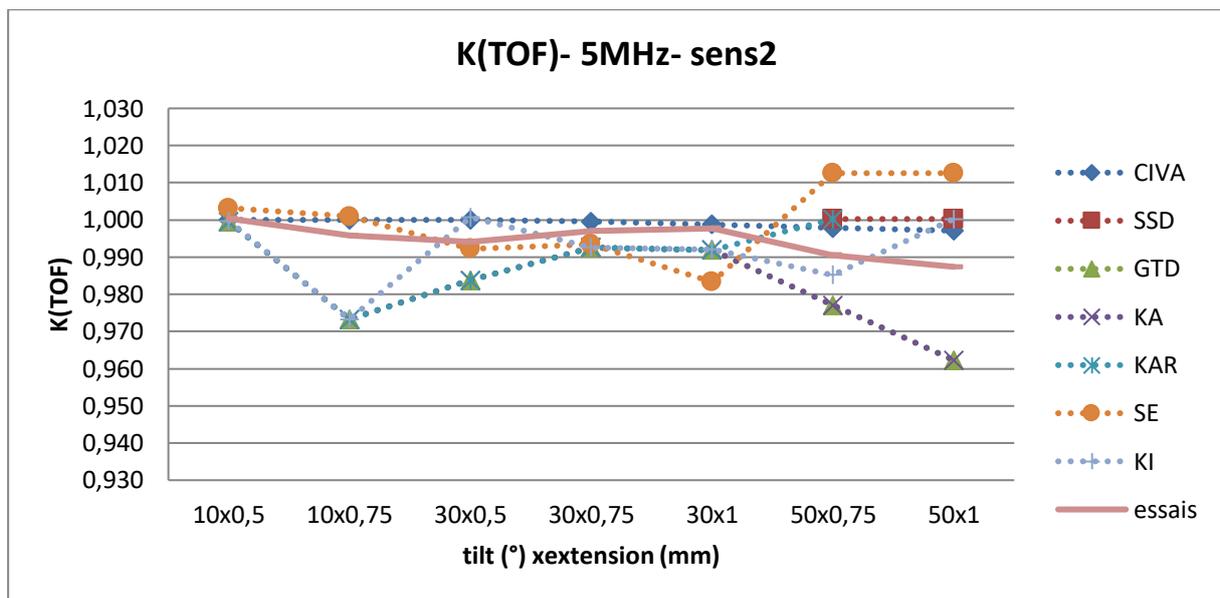


Figure 127 : Courbe du rapport $K(TOF)$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz

Au vu des hypothèses simplificatrices considérées par le **Simulateur VRCF** pour la modélisation de la propagation ultrasonore des ondes transversales (faisceau rigoureusement parallèles, défaut plan semi-infini) nous considérons que les différents écarts restent acceptables car $<3\%$. En effet, Cet écart convertit en pas axial correspond à un écart de prédiction sur la position de l'amplitude maximale en balayage axial de l'ordre de 2mm. Cet écart est acceptable dans la mesure où il est inférieur au pas de balayage axial des bancs de contrôle automatiques en usine qui est de l'ordre de 3mm.

		E(TOF)%						
sens du balayage	défaut étudié	5MHz						
		Civa	SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
Sens1	-10x0.5	-0,5	2,3	2,3	2,3	2,3	-0,7	-0,4
	-10x0.75	-0,1	2,8	2,8	2,8	2,8	0,0	0,2
	-30x0.5	-0,2		-2,5	-0,1	-0,1	0,9	-0,6
	-30x0.75	-0,1		-2,4	-2,1	-2,1	-0,5	0,2
	-30x1	-0,9		-1,6	-1,4	0,5	0,6	-0,1
	-50x0.75	-0,3	-0,1	1,4	1,4	-0,1	-0,5	-0,1
	-50x1	-0,7	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,8	-0,4
Sens2	10x0.5	0,0		0,1	0,1	0,1	-0,3	0,1
	10x0.75	-0,4		2,3	2,3	2,3	-0,5	2,3
	30x0.5	-0,6		1,0	1,0	1,0	0,2	-0,7
	30x0.75	-0,2		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	30x1	-0,1		0,6	0,6	0,6	1,4	0,6
	50x0.75	-0,7	-1,0	1,4	1,4	-1,0	-2,2	0,5
	50x1	-1,0	-1,3	2,5	2,5	-1,3	-2,6	-1,3

Tableau 22 : Ecart en % des TOFs normalisés obtenus à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz

iii. Donnée image ultrasonore relative à la largeur à -6dB de la courbe écho-dynamique

La courbe écho-dynamique représente la variation de l'amplitude maximale des signaux acquis par le transducteur en balayage. Dans le cas d'un défaut plan débouchant sur le fond de la plaque, l'allure de la courbe écho-dynamique traduit l'évolution de la contribution énergétique de l'effet de coin (direct ou indirect). Le maximum de la courbe écho-dynamique correspond à la position pour laquelle l'axe focal impacte l'intersection entre le défaut et le fond [34, 76]. Par ailleurs, l'allure des courbes écho-dynamiques est sensible à l'inclinaison du défaut car l'effet de coin (direct ou indirect) qui constitue la principale contribution énergétique (car plus prépondérante que les contributions dues à la diffraction) est sensible à cette inclinaison. En effet, comme décrit dans le Tableau 19, p. 168) l'effet de coin n'est plus observé pour les tilts ($\geq 30^\circ$) suivant les deux sens de balayage. De plus, pour les extensions des défauts étudiées (très faibles devant la largeur de la tache focale), les échos dus à l'effet de coin et à la diffraction de bord sont confondus [1, 76, 34]. Découpler ces échos, reviendrait à augmenter les fréquences d'inspection ($>15\text{MHz}$) [1]. Or, ces fréquences ne correspondent pas aux fréquences usuelles des bancs automatiques de contrôle déployés dans les usines **Vallourec**. Dans la suite, nous allons étudier l'impact des tilts des défauts sur les allures des courbes dynamiques et plus particulièrement sur la largeur de la courbe dynamique à -6dB. Pour s'affranchir des différences entre les faisceaux ultrasonores expérimental et simulés (**CIVA** et **Simulateur VRCF**), nous avons fait le choix d'étudier cette grandeur calibrée. En effet, la donnée image relative à la largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB consiste en le ratio de la largeur à -6dB de la courbe du défaut étudié et celle du défaut de référence (**entaille n°2** : $0^\circ \times 0.75\text{mm}$) tel que :

$$K(L_{-6dB}) = \frac{L_{-6dB}}{L_{-6dB_{entaille2}}}$$

Équation 96

Les résultats obtenus selon le sens de balayage sont illustrés Figure 128 et Figure 129.

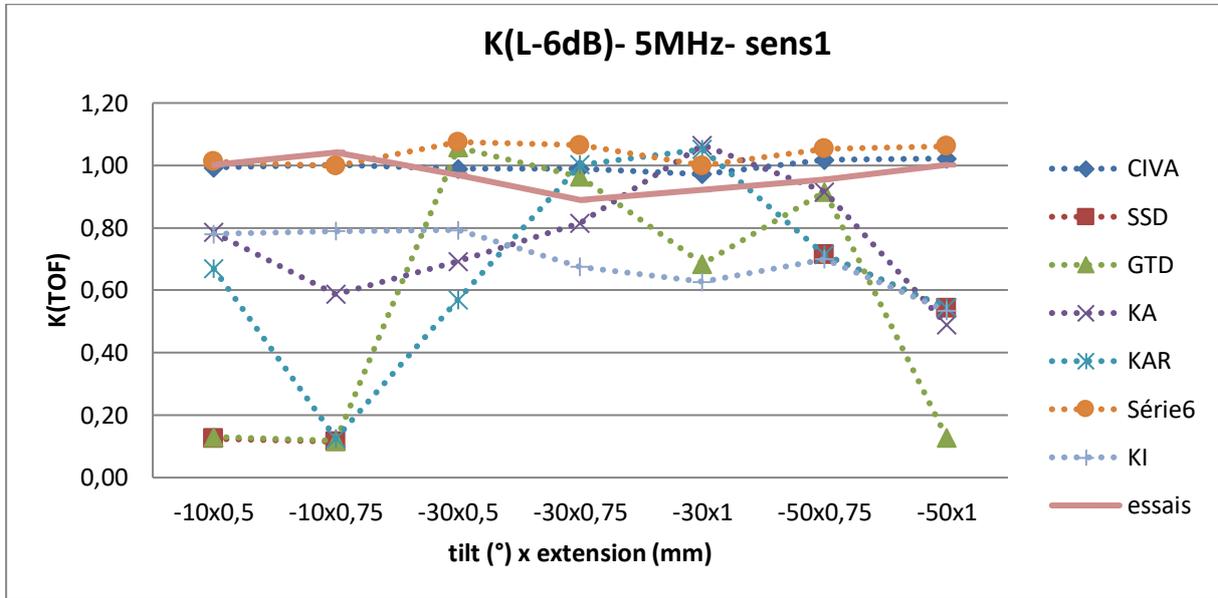


Figure 128 : Courbe du rapport $K(L_{-6dB})$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens1 du contrôle ultrasonore 5MHz

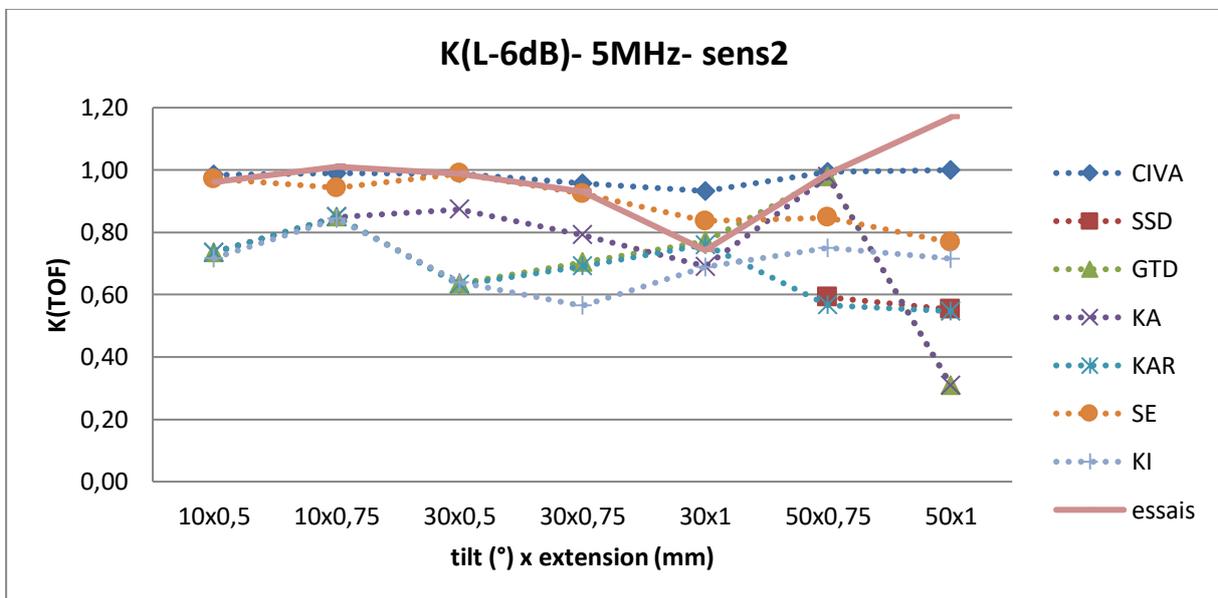


Figure 129 : Courbe du rapport $K(L_{-6dB})$ des résultats simulés selon les différents modèles et l'essai expérimental pour le sens2 du contrôle ultrasonore 5MHz

Dans l'ensemble, les résultats obtenus à l'aide de l'approche **SE** délivrent des résultats proches de ceux obtenus à l'aide de **CIVA** et de l'expérience sauf pour les défauts de tilt 50°.

		E(L-6dB)%						
sens du balayage	défaut étudié	5MHz						
		Civa	SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
Sens1	-10x0.5	0,8	87,6	87,0	21,6	33,2	-1,1	22,1
	-10x0.75	3,9	88,9	88,7	43,6	87,9	4,2	24,2
	-30x0.5	-2,0		-9,0	28,6	41,3	-10,8	18,2
	-30x0.75	-11,2		-8,3	8,3	-12,7	-19,7	24,1
	-30x1	-5,4		25,8	-15,6	-14,1	-8,4	32,0
	-50x0.75	-6,6	25,3	4,1	4,1	25,2	-10,3	26,8
	-50x1	-2,1	45,9	87,4	51,1	45,6	-6,1	46,7
Sens2	10x0.5	-2,4		23,5	23,5	23,5	-1,1	25,4
	10x0.75	2,1		16,0	16,0	16,0	6,8	16,6
	30x0.5	-0,1		35,8	11,5	36,0	0,0	35,3
	30x0.75	-2,7		24,4	15,0	25,8	0,8	39,4
	30x1	-25,6		-3,9	7,0	-2,4	-12,6	7,3
	50x0.75	-0,5	40,2	1,0	1,0	42,7	14,4	24,1
	50x1	14,5	52,7	73,5	73,5	53,2	34,3	38,8

Tableau 23 : Ecart en % des L-6dB normalisées obtenues à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz

Les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide du *Simulateur VRCF* et *CIVA* pour les différents titls étudiés et pour l'extension de référence (0.75mm= 5% de l'épaisseur) sont illustrées dans les Figure 130, Figure 131 et Figure 132. Elles présentent toutes deux maxima. Cependant, ces deux maxima ne désignent pas la présence d'un ligament (défaut plan non débouchant). En effet, les travaux de [69] montrent que la présence d'une double bosse sur des courbes écho-dynamiques issues de l'effet de coin dans le cas d'un défaut plan droit, désigne la présence d'un ligament dont la taille est supérieure à la largeur du faisceau ultrasonore. Ceci ne correspond pas aux configurations étudiées dans le cadre de ces travaux. De plus, l'affaissement d'une bosse principale au profit de deux bosses latérales n'est pas observé sur les courbes écho-dynamiques expérimentales comme l'illustre la Figure 133. Cette dernière montre les allures des courbes écho-dynamiques expérimentales des défauts tiltés ayant une extension de l'ordre de 5% de l'épaisseur de la plaque selon le sens1 du balayage. Les courbes écho-dynamiques expérimentales présentent les mêmes allures suivant les deux sens de balayage.

Par ailleurs, les allures des courbes écho-dynamiques sont sensibles au profil du faisceau ultrasonore [69, 34]. Nous pouvons le constater en comparant les allures des courbes écho-dynamiques simulées à l'aide de *CIVA* (Figure 130, Figure 131 et Figure 132) avec le profil du champ ultrasonore selon *CIVA* pour la configuration de contrôle étudiée (Figure 134). Le profil du champ ultrasonore selon le *Simulateur VRCF* n'est pas disponible car il est basé sur une approche fréquentielle et non impulsionnelle.

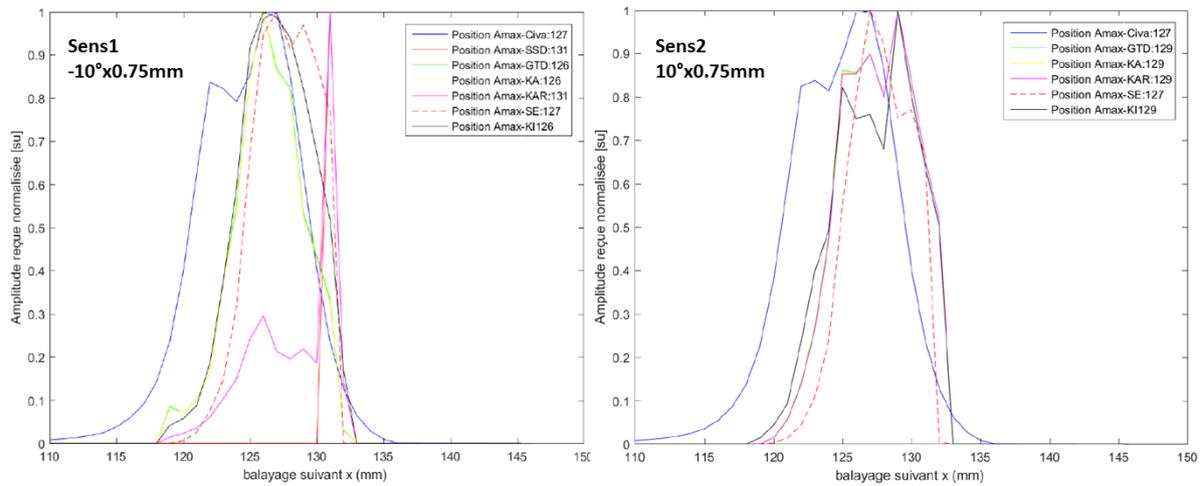


Figure 130 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (50°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.

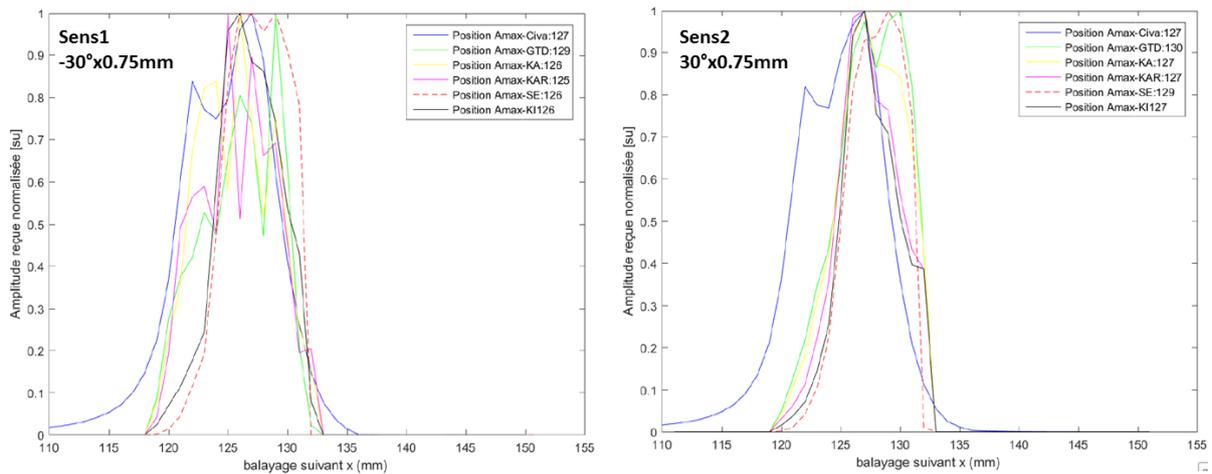


Figure 131 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (30°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.

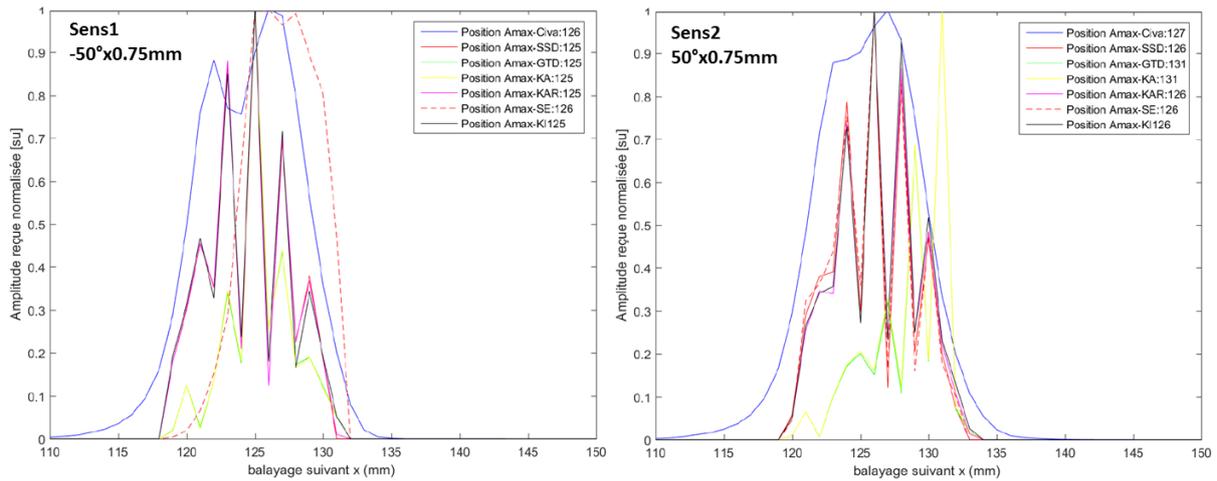


Figure 132 : superposition des courbes écho-dynamiques simulées normalisées des réponses ultrasonores de l'entaille (50°x0.75mm) selon la configuration de contrôle étudiée et suivant le sens de contrôle.

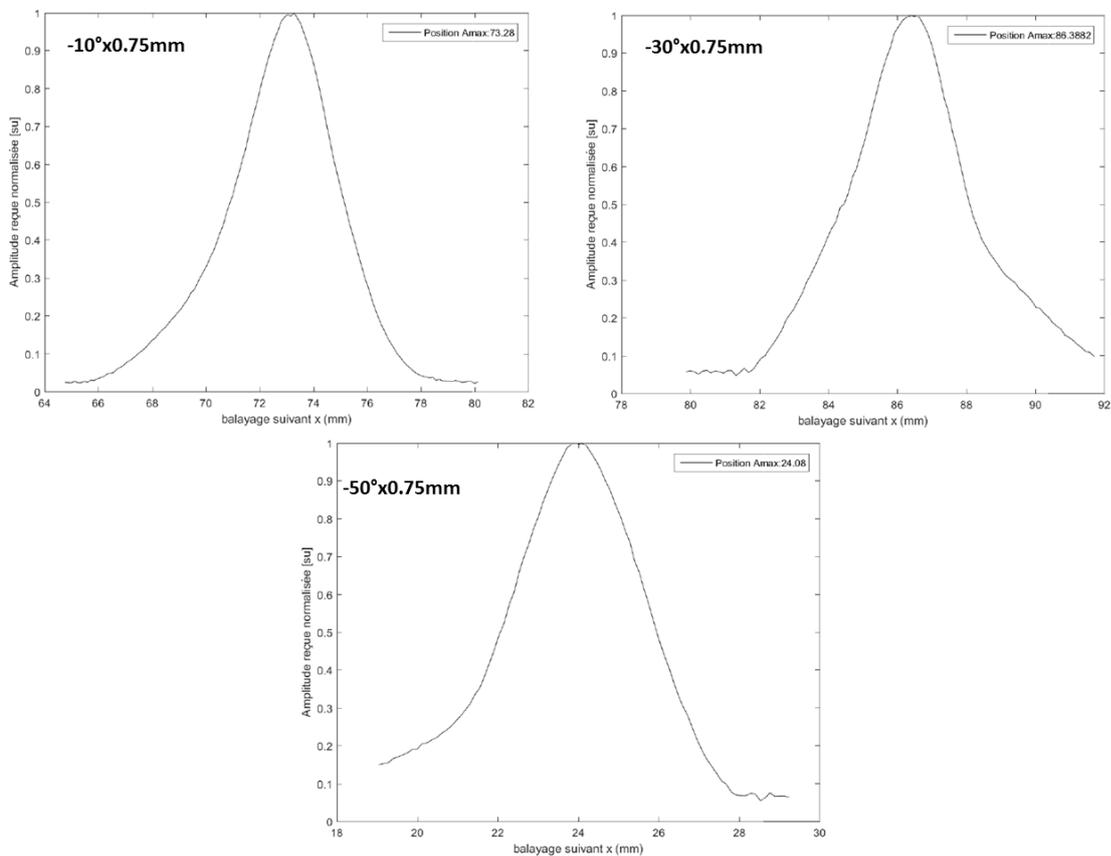


Figure 133 : courbes écho-dynamiques expérimentales des défauts tiltés selon le sens1 du balayage. Extraction à l'aide de la retourne de dépouillement « Relecture-Essai »

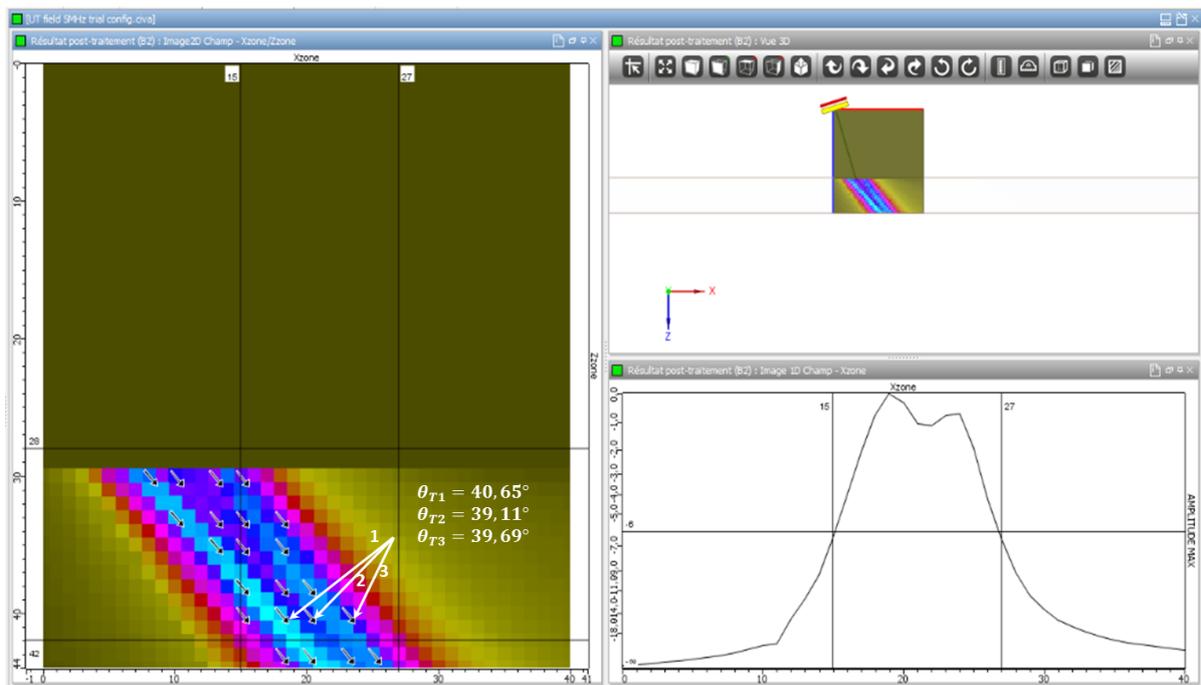


Figure 134 : profil du faisceau ultrasonore réfléchi sur le fond de la plaque selon CIVA, simulation pour une configuration de contrôle en demi-bond et direction des ondes transversales réfractées dans la plaque à inspecter

Dans la suite nous distinguerons les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide du **Simulateur VRCF** obtenues à l'aide d'approches de diffraction par le sommet (**GTD**, **KA** et **KAR**) et celles de diffraction par une arête (**SE** et **KI**) :

a. Résultats obtenus à l'aide des approximations dites Hautes Fréquences (**GTD**, **KA** et **KAR**)

Selon le sens1 du balayage, les courbes écho-dynamiques simulées selon l'approche **GTD** présentent des fluctuations d'amplitudes suite à la déviation de l'effet de coin (-10°) (Figure 135, b) ou aux trajets géométriques différents de l'effet de coin (-30° et -50°) (Tableau 19, p 168). Par déviation de l'effet de coin, nous entendons que les rayons de retour vers la surface du transducteur suite à une interaction indirecte ou indirecte avec la surface du défaut plan, ne sont plus parallèles aux rayons incidents (Figure 135, a). Selon le sens2 du balayage, les courbes simulées selon la **GTD** ne sont pas affectées par la déviation de l'effet de coin (Figure 135, c). Les fluctuations d'amplitudes apparaissent à partir du tilt 50° pour lequel les trajets géométriques correspondent uniquement à une interaction directe (Tableau 19). Les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide de l'approche **KA** présentent des fluctuations d'amplitudes uniquement pour le tilt 50° suivant les deux sens de balayage. Nous en concluons qu'elle est sensible aux trajets géométriques A/R dits équivalents selon [34]. Enfin, les courbes simulées à l'aide de l'approche **KAR** sont par définition la combinaison des courbes écho-dynamiques obtenues à l'aide de la **GTD** et de **KA**.

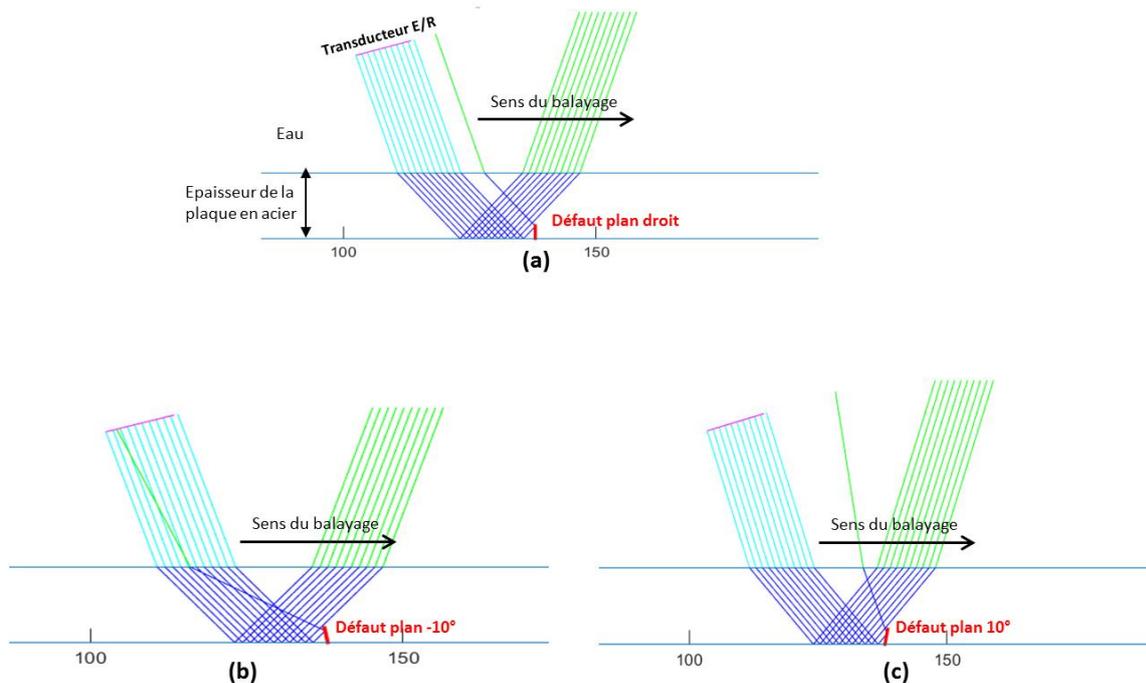


Figure 135 : déviation de l'effet de coin en fonction du tilt du défaut

b. Résultats obtenus à l'aide des approximations basées sur des considérations intégrales (*SE* et *KI*)

Les courbes écho-dynamiques obtenues à l'aide des approches basées sur des considérations intégrales (*SE* et *KI*) ne présentent pas de fluctuations d'amplitudes pour les faibles tilts ($\leq 50^\circ$) suivant les deux sens de balayage comme observé sur les Figure 130 et Figure 131. Pour le défaut de tilt 50° , les courbes simulées à l'aide de l'approche *SE* présentent des fluctuations d'amplitudes selon le sens2 de contrôle (tilt positif). Les courbes écho-dynamiques simulées à l'aide de l'approche *KI* présentent des fluctuations d'amplitudes pour ce tilt quel que soit le sens du balayage considéré.

c. Discussion

Dans l'ensemble, les allures des courbes écho-dynamiques dépendent de plusieurs paramètres : le profil du faisceau ultrasonore en interaction avec le défaut, la position du défaut dans la pièce à inspecter (débouchant ou non débouchant), la taille caractéristique du défaut par rapport à la largeur de la tache focale du faisceau ultrasonore ainsi que de la nature de l'interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut en question (écho de coin, trajets A/R équivalents, réflexions multiples sur la surface du défaut).

Selon [57, 58] la *GTD* délivre des résultats fiables pour le cas de la diffraction par une arête en dehors des zones de réflexions et de la retro-diffraction. Quant à *KA* et *KI*, elles délivrent des résultats plus fiables pour les réflexions depuis la surface du défaut (interaction directe) ainsi que les effets de coin. Nous constatons d'après les résultats abordés dans cette section qu'en effet, *KA* et *KI* permettent de modéliser les effets de coin malgré la déviation de celui-ci à cause du tilt du défaut. Toutefois, elles présentent des fluctuations d'amplitudes pour le

cas de réflexion directe depuis la surface du défaut (50°) et pour le cas de trajets A/R équivalents (-50°). La **GTD** délivrent des résultats différents suivant le sens de balayage et en l'occurrence suivant le tilt du défaut, elle présentent des fluctuations d'amplitudes pour le tilt négatif suite à la déviation de l'effet de coin, à des réflexions multiples depuis la surface du défaut et à des trajets géométriques A/R équivalents. Pour le tilt positif, les fluctuations d'amplitudes selon la **GTD** apparaissent uniquement pour une réflexion directe depuis la surface du défaut (50°).

Pour les extensions des défauts étudiées ($k_T * a_{max} = 5$) en interaction avec des ondes transversales uniquement (la conversion de modes selon le tilt du défaut n'est pas prise en compte), nous constatons que les résultats obtenus selon l'approche **SE** issue de la **PTD** [39] délivrent des résultats meilleurs que l'ensemble des approches considérées par le **Simulateur VRCF** à l'exception de la réflexion directe depuis la surface du défaut (50°). La solution proposée par [57, 58] présente un bon accord avec l'expérience pour $k_T * a \in [5; 10]$. La grandeur $k_T * a$ étudiée dans le cadre de ces travaux est de l'ordre de [2, 5], nous constatons que l'approche **SE** délivre dans l'ensemble les écarts de prédictions les moins importants.

iv. Donnée image ultrasonore relative à la pente de l'image Bscan

La pente du Bscan désigne l'orientation préférentielle de la réponse acoustique du défaut étudié [76], nous avons fait le choix de l'étudier comme donnée image ultrasonore afin de déterminer l'impact du tilt du défaut sur l'orientation de sa réponse acoustique sur l'image Bscan illustrée Figure 136.

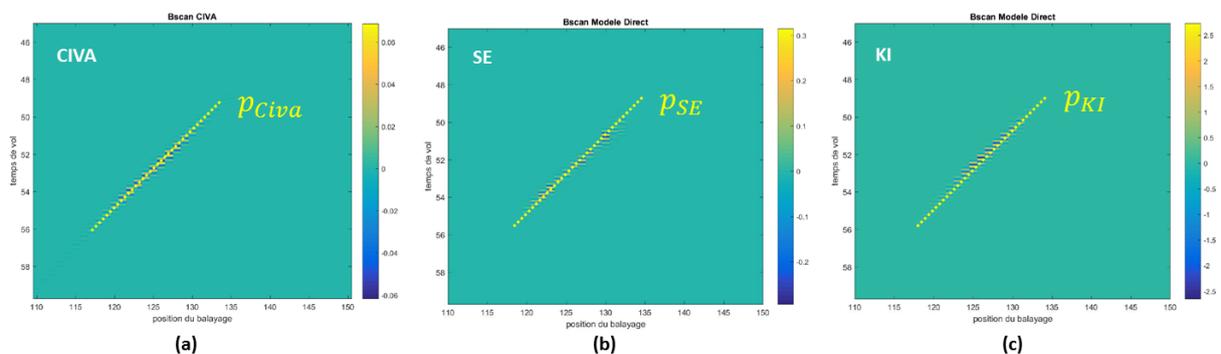


Figure 136 : pentes des images Bscan simulées selon **CIVA** (a) et le **Simulateur VRCF** selon les approches **SE** (b) et **KI** (c) pour le défaut 30°x0.75 suivant le sens1 du contrôle (tilt négatif)

La donnée image relative à la pente de la réponse acoustique sur l'image Bscan consiste en le ratio de la pente de la réponse acoustique du défaut étudié et celle du défaut de référence (entaille n°2 : 0°x0.75mm) tel que :

$$K(Pente) = \frac{Pente}{Pente_{entaille2}} \quad \text{Équation 97}$$

Dans la suite nous avons fait le choix d'illustrer l'évolution de la pente du Bscan suivant le sens du contrôle pour tous les cas étudiés selon les approches basées sur des considérations intégrales (*SE* et *KI*) du *Simulateur VRCF*, *CIVA* et l'essai expérimental comme le montre la Figure 137. Nous avons fait le choix de se focaliser sur les approches *SE* et *KI* car elles fournissent des prédictions meilleures pour les données images ultrasonores analysées précédemment que celles obtenues à l'aide des approches (*GTD*, *KA* et *KAR*).

L'ensemble des modèles (*CIVA*, *SE* et *KI*) présentent des pentes invariantes par rapport au sens de balayage pour les défauts droits. Ceci est également valable pour l'essai expérimental dans la mesure où l'effet de coin est identique pour le défaut droit quel que soit le sens du balayage. Toutefois, nous observons selon la Figure 137 que les pentes sont invariantes pour les défauts 10x0.75, 30x0.5 et 50x1 pour l'essai expérimental. L'approche *KI* présente des pentes invariantes pour les cas 10x0.75, 30x0.5 et 30x1. Selon *CIVA*, les pentes sont invariantes pour le tilt 10° et le cas 30x0.75. Enfin, l'approche *SE* présente des pentes invariantes pour les plus petites extensions 0.5mm et les faibles tilts ($\leq 30^\circ$).

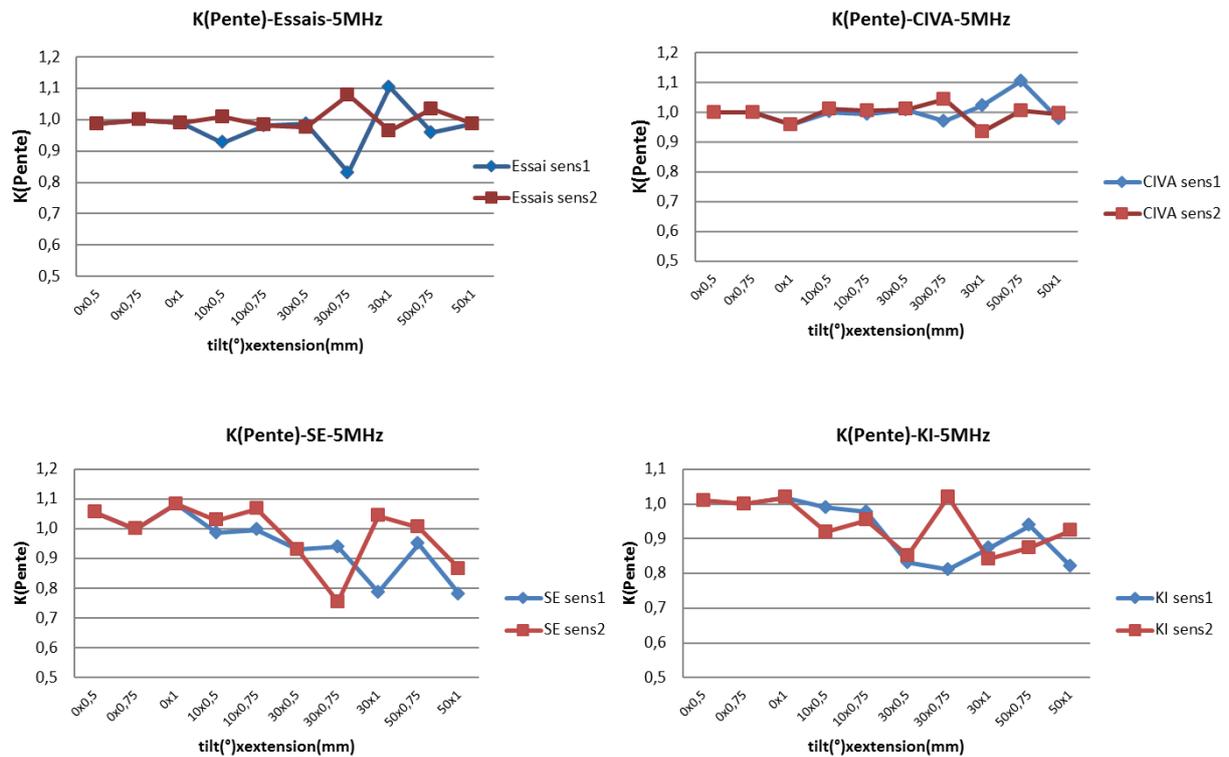


Figure 137 : Courbe du rapport K(Pente) des résultats simulés selon les différents modèles (*CIVA*, *KI* et *SE*) et l'essai expérimental suivant les deux sens du contrôle ultrasonore 5MHz

Dans l'ensemble et au vu des faibles extensions des défauts étudiées et des résultats résumés (Tableau 24, Figure 137), il est difficile d'attester d'une évolution de la pente du Bscan en fonction du tilt et de l'extension du défaut étudié. Une analyse incluant des extensions et des tilts de défauts supplémentaires est nécessaire.

		E(Pente)%						
sens du balayage	défaut étudiée	5MHz						
		Civa	SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI
Sens1	-10x0.5	-8,1	4,0	6,0	31,5	36,1	-6,5	-6,7
	-10x0.75	-1,2	12,8	10,5	10,4	10,7	-1,4	0,5
	-30x0.5	-2,3		5,7	26,2	27,7	5,9	15,9
	-30x0.75	-16,8		-9,5	-9,0	-9,8	-12,9	2,5
	-30x1	7,2		12,2	25,3	12,4	28,7	21,0
	-50x0.75	-15,2	4,2	12,2	12,2	4,3	1,2	2,3
	-50x1	0,9	18,0	-4,1	-4,3	18,4	20,8	16,8
Sens2	10x0.5	-0,2		6,9	6,7	6,9	-2,0	8,9
	10x0.75	-2,3		3,8	3,5	3,7	-8,5	3,1
	30x0.5	-3,6		11,7	11,4	24,4	4,6	12,8
	30x0.75	3,2		13,3	12,6	11,7	30,2	5,6
	30x1	2,9		10,9	10,2	10,0	-8,2	12,8
	50x0.75	2,8	8,4	12,4	12,3	25,2	2,9	15,5
	50x1	-0,9	18,9	27,7	27,8	18,8	12,3	6,5

Tableau 24 : Ecart en % des Pentés normalisées obtenues à l'aide des différents modèles de simulation et l'essai expérimental ultrasonore 5MHz

Enfin, une dernière donnée importante est le coût de calcul de chacun de ces modèles. Il est détaillé dans le Tableau 25 selon le modèle de simulation considéré. Bien sûr, les deux approches les plus coûteuses en temps de calcul sont les approches basées sur des considérations intégrales

		Temps de calcul [s]							
sens du balayage	défaut étudié	CIVA 2D	Simulateur VRCF						
			SSD	GTD	KA	KAR	SE	KI	
Sens1	-10x0.5	20 à 40	8	20	20	21	237	439	
	-10x0.75		7	28	28	29	366	680	
	-30x0.5			16	16	19	198	363	
	-30x0.75			22	23	25	309	574	
	-30x1			26	26	33	393	730	
	-50x0.75		5	22	22	24	287	487	
	-50x1		8	28	28	30	375	652	
Sens2	10x0.5				26	27	26	255	480
	10x0.75				35	36	35	385	735
	30x0.5				28	28	27	226	427
	30x0.75				38	40	40	340	645
	30x1				50	50	52	463	882
	50x0.75		5	39	39	44	350	426	
	50x1		8	51	52	55	504	554	

Tableau 25 : temps de calcul selon l'extension du défaut tilté et suivant le sens de balayage considéré pour les différentes approches considérées par le simulateur VRCF

Pour un défaut plan tilté et au vu des différents résultats discutés précédemment, l'approche **SSD** est insuffisante pour obtenir les réponses acoustiques des défauts tiltés. Les

approches **GTD**, **KA** et **KAR** délivrent des résultats rapidement (temps de calcul inférieur à 30s suivant le sens1 et inférieur à une minute suivant le sens2). Toutefois, les résultats présentent des écarts importants avec l'expérience selon les trajets géométriques ultrasonores impliqués. Enfin, les approches **SE** et **KI** les plus coûteuses (5 à 13 min de calcul) permettent d'obtenir des résultats acceptables et sont complémentaires selon les trajets géométriques ultrasonores impliqués.

IV. Discussion et Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre les résultats de validation des différentes approches du **Simulateur VRCF** développé dans le cadre de ces travaux. Ce simulateur traite de la modélisation de la propagation d'un faisceau ultrasonore composé d'ondes planes transversales sous incidence oblique $\theta_T = 39.5^\circ$ suivant la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube et en interaction avec un défaut plan d'extension finie telle que $k_T * a_{max} \in [2, 5]$ droit ou tilté débouchant sur la surface interne. Les différentes approches disponibles dans le **Simulateur du VRCF** sont basées sur une modélisation de la propagation au moyen de trajets géométriques et se distinguent comme suit :

- **SSD** : considère uniquement la propagation et l'interaction avec la surface du défaut plan au moyen des rayons réfléchis et réfractés sur les différentes interfaces considérées.
- **GTD, KA et KAR** : approches basées également sur la propagation des rayons réfléchis et réfractés mais ajoutent à ces derniers les rayons diffractés générés lors de l'interaction des rayons ultrasonores avec la surface du défaut plan. Ces approximations décrivent la diffraction au moyen de coefficients de diffraction. Toutefois, ces coefficients selon la **GTD** et **KA** présentent des singularités au voisinage des zones dites d'ombres [39]. Une solution **KAR** basée sur la **PTD** [39] est proposée [57] pour pallier aux singularités des coefficients de diffraction selon **GTD** et **KA** en les combinant au voisinage de ces zones d'ombre. L'ensemble de ces approximations sont valables sous la condition $\sqrt{k * r} * |\cos(\frac{\psi}{2})| \gg 1$ avec $\psi = \varphi \pm \varphi_0$ [39].
- **KI** : Approche basée sur la théorie des rayons et considère les rayons diffractés depuis la surface du défaut illuminé suite à l'interaction avec un rayon ultrasonore. Elle considère uniquement la contribution uniforme des rayons diffractés depuis le sommet du défaut. En revanche, elle présente des singularités quand le point d'observation est très proche de la surface du défaut [39].
- **SE** : approche basée sur la **PTD** proposée par [39] décomposant ainsi le champ diffusé en deux composantes, une composante uniforme et une composante non uniforme. Elle permet de décrire correctement les rayons diffractés dans les régions d'ombre. Toutefois, cette solution présente des singularités quand les deux surfaces du défaut sont illuminées [39].

L'ensemble de ces approches sont valables pour des extensions de défauts supérieures aux longueurs d'ondes considérées. En effet, les défauts sont modélisés au moyen de demi-plan. Or, les extensions des défauts étudiées dans le cadre de ces travaux sont d'extensions finies [0.5, 0.75, 1] mm de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde considérée $\lambda_T = 0.6\text{mm}$. Nous avons ainsi analysé les prédictions de ces approches au voisinage de leur domaine de validité.

Le processus de validation des prédictions de ces approches consiste en une comparaison quantitative des données images ultrasonores calibrées par rapport à la donnée image ultrasonore étudiée relative à l'entaille de référence selon les normes [19, 6]. Il s'agit de l'entaille droite dont l'extension est de l'ordre de 5% de l'épaisseur de la plaque inspectée ($0^\circ \times 0.75\text{mm}$). La comparaison quantitative confronte les prédictions obtenues à l'aide des différentes approches du **Simulateur VRCF** aux résultats obtenus à l'aide de l'essai expérimental et ceux obtenus par simulation à l'aide de **CIVA** considérée comme une référence en simulation des configurations de contrôle ultrasonores. De plus, cette comparaison est effectuée en fonction du sens du balayage. Pour cette comparaison nous avons distingué les résultats obtenus pour les défauts droits et les défauts tiltés. Nous dressons ainsi les conclusions suivantes :

- **Pour les défauts droits** : La particularité du défaut droit est que les trajets géométriques des rayons ultrasonores correspondent à un effet de coin et sont invariants selon le sens de balayage considéré. L'ensemble des approches du **Simulateur VRCF** délivrent des prédictions en accord avec l'essai expérimental et **CIVA** pour la donnée image ultrasonore relative à l'amplitude maximale de la réponse acoustique du défaut étudié. L'écart max observé pour cette donnée image est de l'ordre de $\pm 2\text{dB}$ (Tableau 14, p 154). Les prédictions relatives à la position en temps de vol de l'amplitude maximale présentent également un bon accord avec l'expérience, l'écart maximal observé est inférieur à 1.5% et est proche de celui observé pour CIVA 1% pour la plus petite extension du défaut étudié $0.5\text{mm} < (\lambda_T = 0.6\text{mm})$. Les prédictions relatives à la largeur de la courbe écho-dynamique présentent des écarts de l'ordre de $\pm 5\%$, à l'exception de l'approche **SE** pour la plus grande extension des défauts étudiées de 1mm (écart de l'ordre de 11%). Contrairement aux autres approches, l'approche **SE** considère la partie non-uniforme du champ diffracté qui est due à la radiation dite d'ombre [39]. Cette radiation d'ombre dépend de la taille et de la géométrie du contour d'ombre (dans notre cas un défaut plan droit). Concernant la donnée image ultrasonore relative à la pente de la réponse acoustique du défaut sur l'image ultrasonore de type Bscan, l'ensemble des écarts observés selon les différentes approches exceptée l'approche **SE** sont de l'ordre de $\pm 2\%$. L'approche **SE** délivre des écarts de l'ordre de 4 à 8% selon l'extension du défaut étudiée. Pour un défaut plan droit et au vue des différents résultats discutés précédemment et en considérant le coût des calculs, l'approche **SSD** délivre des résultats satisfaisants.

- Pour les défauts tiltés :** les défauts tiltés présentent des trajets géométriques différents selon le sens de balayage considéré (Tableau 19, p. 168). Le **Simulateur VRCF** développé étant basé sur une approche géométrique, nous constatons que les prédictions des différentes approches de ce dernier dépendent des trajets géométriques impliqués. Selon les résultats discutés dans cette section relatifs à l'amplitude maximale de la réponse acoustique du défaut étudié et au vu des faibles extensions des défauts étudiés ($k_T * a_{max} = 5$), les approches basées sur des considérations intégrales (**SE** et **KI**) délivrent de meilleurs résultats pour la donnée image ultrasonore relative à l'amplitude maximale que les approches basées sur des approximations **HF** (**GTD**, **KA** et **KAR**) et peuvent être considérées comme complémentaires selon le tilt étudié. Toutes les approches sont sensibles aux sens de balayage pour les tilts ($\geq 30^\circ$) où les trajets géométriques ne sont plus réduits à un effet de coin. Toutefois, le critère d'acceptation de $\pm 6\text{dB}$ des prédictions relatives à l'amplitude maximale n'est pas toujours vérifié (Tableau 21, p. 173). Concernant les prédictions relatives à la position en temps de vol de l'amplitude maximale de la réponse acoustique du défaut étudié et au vu des hypothèses simplificatrices considérées par le **Simulateur VRCF** pour la modélisation de la propagation ultrasonore des ondes transversales (faisceau rigoureusement parallèles, défaut plan semi-infini), nous considérons que les différents écarts sont acceptables car $< 3\%$. Cet écart est inférieur au pas de balayage déployé dans les bancs de contrôles pour les dimensions de tubes ciblés dans le cadre de ces travaux. Si les prédictions relatives aux temps de vol des amplitudes maximales des réponses acoustiques des défauts étudiés présentent des écarts acceptables avec l'expérience selon les trajets géométriques impliqués, ce n'est pas le cas des allures des courbes écho-dynamiques et par conséquent sur la donnée image relative à la largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB . Selon [57, 58] la **GTD** délivre des résultats fiables pour le cas de la diffraction par une arête en dehors des zones de réflexions et de la retro-diffraction. Quant à **KA** et **KI**, elles délivrent des résultats plus fiables pour les réflexions depuis la surface du défaut (interaction directe) ainsi que les effets de coin. Nous constatons d'après les résultats abordés dans cette section qu'en effet, **KA** et **KI** permettent de modéliser les effets de coin malgré la déviation de celui-ci à cause du tilt du défaut. Toutefois, elles présentent des fluctuations d'amplitudes pour le cas de réflexion directe depuis la surface du défaut (50°) et pour le cas de trajets A/R équivalents (-50°). La **GTD** délivrent des résultats différents suivant le sens de balayage et en l'occurrence suivant le tilt du défaut, elle présentent des fluctuations d'amplitudes pour le tilt négatif suite à la déviation de l'effet de coin, à des réflexions multiples depuis la surface du défaut et à des trajets géométriques A/R équivalents. Pour le tilt positif, les fluctuations d'amplitudes selon la **GTD** apparaissent uniquement pour une réflexion directe depuis la surface du défaut (50°). Pour les extensions des défauts étudiées ($k_T * a_{max} = 5$) en interaction avec des ondes transversales uniquement (la

conversion de modes selon le tilt du défaut n'est pas prise en compte), nous constatons que les résultats obtenus selon l'approche **SE** issue de la **PTD** [39] délivrent des résultats meilleurs que l'ensemble des approches considérées par le **Simulateur VRCF** à l'exception de la réflexion directe depuis la surface du défaut (50°). La solution proposée par [57] présente un bon accord avec l'expérience pour $k_T * a \in [5; 10]$. Les grandeurs de $k_T * a$ étudiées dans le cadre de ces travaux sont de l'ordre de [2 ; 5]. En considérant cette grandeur ainsi que l'approche géométrique prise en compte par le **Simulateur VRCF**, nous constatons que l'approche **SE** délivre dans l'ensemble les écarts de prédictions les moins importants. Comme mentionné dans différentes littératures, le choix entre la **GTD** et **KA** ou **KI** pour la modélisation de la diffraction nécessite de l'expertise. Ceci est observé sur les allures des courbes écho-dynamiques obtenues. En effet, nous constatons que leurs prédictions peuvent être complémentaires selon les trajets géométriques impliqués et par conséquent les tilts étudiés.

Chapitre 5 Perspectives d'amélioration du simulateur bidimensionnel du contrôle ultrasonore transversal du tube et prolongement pour le contrôle ultrasonore longitudinal

I.Introduction

Dans le précédent chapitre, nous avons présenté une étude comparative entre les résultats issus de la simulation et ceux issus de l'expérience. Le but de cette étude étant d'évaluer pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube, la fiabilité des prédictions délivrées par les différentes approches du **Simulateur VRCF**. Ces différentes approches sont toutes basées sur la théorie des rayons et considèrent la même approche zonale bidimensionnelle pour décrire les trajets géométriques ultrasonores. Cependant, elles se distinguent par la description de l'interaction entre le rayon incident et la surface du défaut plan, droit ou tilté, débouchant sur la surface interne du tube. Parmi ces approches, certaines sont basées sur des approximations asymptotiques dites **HF (GTD, KA et KAR)**. Elles présentent certes l'avantage d'être moins onéreuses en temps de calcul ($t_{calcul\ max} = 1min$). Toutefois, elles ne prédisent pas correctement les amplitudes des défauts tiltés. Les approches basées sur des considérations intégrales (**SE et KI**) sont onéreuses en temps de calcul (particulièrement l'approche **KI**, $t_{calcul\ max} = 13min$) mais présentent des écarts moins importants que les approches asymptotiques. Elles sont également complémentaires selon le sens de balayage considéré.

Les différentes extensions des défauts étudiées dans le cadre de l'analyse comparative des différentes approches dans le précédent chapitre sont proches de la longueur d'onde ultrasonore d'inspection $k_T * a \in [2, 5]$. Les trajets géométriques impliqués diffèrent selon le tilt du défaut plan et de ce fait selon le sens de balayage effectué pour sa détection. Les trajets géométriques considérés par l'approche zonale du **Simulateur VRCF** selon le tilt du défaut étudié peuvent être classés comme suit :

- Direct : déviation de l'écho de coin suite au tilt du défaut ($\pm 10^\circ, 30^\circ$)
- Indirects : plusieurs réflexions entre le rayon transversale incident, la surface du défaut et le fond de la plaque avant retro-propagation vers la surface de la plaque (-30°).
- Equivalents : le trajet direct ou indirect emprunté par le rayon ultrasonore en aller est quasi-identique à celui en retour ($\pm 50^\circ$).

Le concept d'un contrôle ultrasonore par réflexion pour lequel l'émetteur et le récepteur sont confondus, implique que l'observateur (le transducteur) est situé dans la région de la réflexion afin d'intercepter les échos re-rayonnés depuis la surface du défaut. Or, dans cette région dite également région d'ombre des rayons réfléchis, la description des rayons

diffractions à l'aide des approximations asymptotiques (**GTD** et **KA**) présente des singularités. Ces singularités impliquent une estimation non correcte de l'amplitude du champ généré suite à cette interaction. Ceci impacte la fiabilité des prédictions relatives à l'amplitude maximale ainsi que l'allure de la courbe écho-dynamique de la réponse acoustique du défaut étudié. Pour pallier ces limitations et permettre de décrire le champ uniformément dans toute les régions d'observation, nous avons fait le choix d'étudier les approches **SE** et **KI** basées sur la **PTD** proposée par [39] ainsi qu'une approximation **KAR** basée également sur la **PTD** proposée par [57]. L'approche **KAR** propose de corriger les singularités à l'aide d'un coefficient de correction issu de la combinaison des coefficients de diffraction selon la **GTD** et **KA**. Nous avons ainsi constaté que les erreurs de prédictions selon **KAR** sont impactées par les singularités des coefficients de la **GTD** et **KA** selon les trajets géométriques impliqués. Quant aux approches basées sur des considérations intégrales **SE** et **KI**, elles présentent des écarts moins significatifs que les approximations asymptotiques car permettent de décrire le champ diffractés dans les régions d'ombre. Cependant, elles sont sensibles aux régions dites de transitions ou les rayons incidents, réfléchis et diffractés interfèrent. De plus, nous avons observés que selon les trajets ultrasonores impliqués, ces deux approches sont aussi complémentaires. L'ensemble des approches étudiées considère l'interaction avec un défaut demi-plan (extension semi-infinie) et non un défaut d'extension finie. Cette considération engendre également des erreurs de prédiction.

L'enjeu principal pour **Vallourec** est d'obtenir un compromis raisonnable entre la rapidité des calculs et la précision des résultats obtenus. Nous avons constaté grâce aux résultats présentés dans le précédent chapitre que les approches dites **HF** présentent l'avantage des rapidités des calculs. Toutefois, elles présentent des écarts importants avec l'expérience pour les petites extensions des défauts étudiées. Les approches basées sur des considérations intégrales permettent d'obtenir des résultats satisfaisants mais sont très coûteuses en temps de calculs.

Dans ce chapitre, nous aborderons les domaines d'application des différentes approches étudiées dans le cadre de ces travaux. Pour $k_T * a$ très grands ($k_T * a \gg 15$) les approches dites **HF** peuvent être privilégiées car leurs performances sont améliorées. Au contraire, pour les petites grandeurs de $k_T * a$ les approches basées sur des considérations intégrales sont à privilégier. L'optimisation des calculs permettra également de réduire les coûts de calcul. Pour ces faibles grandeurs, nous aborderons également différentes perspectives d'amélioration afin de décrire uniformément les champs générés dans toutes les régions en fonction des trajets géométriques impliqués en vue de décrire au mieux les phénomènes complexes de la propagation ultrasonore.

Puis, nous présenterons brièvement les développements effectués dans le cadre de ces travaux en vue d'étendre la configuration transversale du contrôle ultrasonore pour la détection des défauts débouchant sur la paroi externe ainsi que l'extension du **Simulateur**

VRCF à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore afin d'aboutir à un modèle complet de simulation de l'inspection ultrasonore sur tubes sans soudure.

Enfin, nous exposerons une méthode d'estimation simple des extensions et des tilts des défauts détectés basée sur les temps d'arrivée des trajets ultrasonores impliqués. Cette méthode pourrait s'intégrer au processus itératif développé dans le cadre des travaux [1]. Ce processus est basée sur une comparaison entre les données images ultrasonores d'acquisition et celles issues d'une base de données regroupant des images ultrasonores simulées à l'aide d'un simulateur de propagation ultrasonore.

II. Perspective d'amélioration pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube

1. Interaction entre le faisceau ultrasonore et le défaut plan débouchant interne ciblé

Nous avons consacré le précédent chapitre à présenter une étude comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés. Nous distinguons les résultats simulés selon qu'ils soient obtenus à l'aide de **CIVA** ou à l'aide d'une des différentes approches proposées par le **Simulateur VRCF** développé dans le cadre de ces travaux. L'étude comparative considère des paramètres clés définis comme données images ultrasonores pour le besoin de caractérisation des défauts. Les données images étudiées sont normalisées par rapport à celles relatives à une référence comme le précise la norme [19]. La référence considérée est l'entaille droite de profondeur 5% de l'épaisseur de la plaque inspectée (0°x0.75mm). Celles que nous avons jugées pertinentes pour notre besoin d'identification des défauts à l'aide du processus itératif d'inversion développé dans le cadre des travaux [1] sont :

- L'amplitude maximale
- Le temps de vol de l'amplitude maximale
- La largeur de la courbe écho-dynamique à -6dB

L'étude comparative portant sur le temps de vol de l'amplitude maximale a démontré un bon accord entre les différentes approches et l'essai expérimental. En effet, les écarts observés pour les différentes approches n'excèdent pas les 3%. Au vue de l'approche géométrique simple du **Simulateur VRCF**, ces écarts sont acceptables.

Pour les faibles extensions des défauts étudiées, nous avons omis de considérer l'orientation préférentielle de la réponse acoustique sur l'image Bscan (Pente du Bscan) car nous avons observé dans le précédent chapitre qu'il était difficile de statuer de l'évolution de la pente pour les différents tilts et extensions quel que soit le sens de balayage étudié. En effet, l'étude de cas additionnels (extension, tilt, fréquence et angle d'inspection) est requise pour déterminer une tendance.

Il apparait selon cette analyse comparative que les écarts observés entre les résultats expérimentaux et la simulation dépendent essentiellement de :

- Le domaine fréquentiel (extension du défaut par rapport à la longueur d'onde).
- La direction d'observation des ondes diffractées.
- Le tilt du défaut par rapport au sens du balayage (trajets géométriques impliqués).

Nous avons ainsi constaté au vu des faibles grandeurs $k_T * a$ étudiées, que les approximations asymptotiques **HF** présentent des écarts importants avec l'expérience pour les défauts tiltés.

Dans ces travaux [77, 78, 79] Chapman a quantifié la grandeur $k_T * a$ à partir de laquelle les prédictions selon les approches asymptotiques convergent vers celles selon la solution exacte du problème canonique de diffraction par une onde transversale incidente en incidence oblique sur une fissure plane de taille $2a$. Les prédictions selon la théorie de Kirchhoff et la Théorie Géométrique de la Diffraction en elastodynamique s'améliorent à partir de $k_T * a \geq 10$. Partant de ce constant, nous avons étudié des cas supplémentaires en simulation pour lesquels la fréquence d'inspection est de 15MHz. La grandeur $k_T * a$ étudiée est de l'ordre de 15. Nous avons ainsi pu constater l'amélioration des prédictions relatives à la donnée image ultrasonore $G(A_{max})$ obtenues à l'aide des approximations **HF** (**GTD**, **KA** et **KAR**) comme l'illustre les Figure 138 et Figure 139.

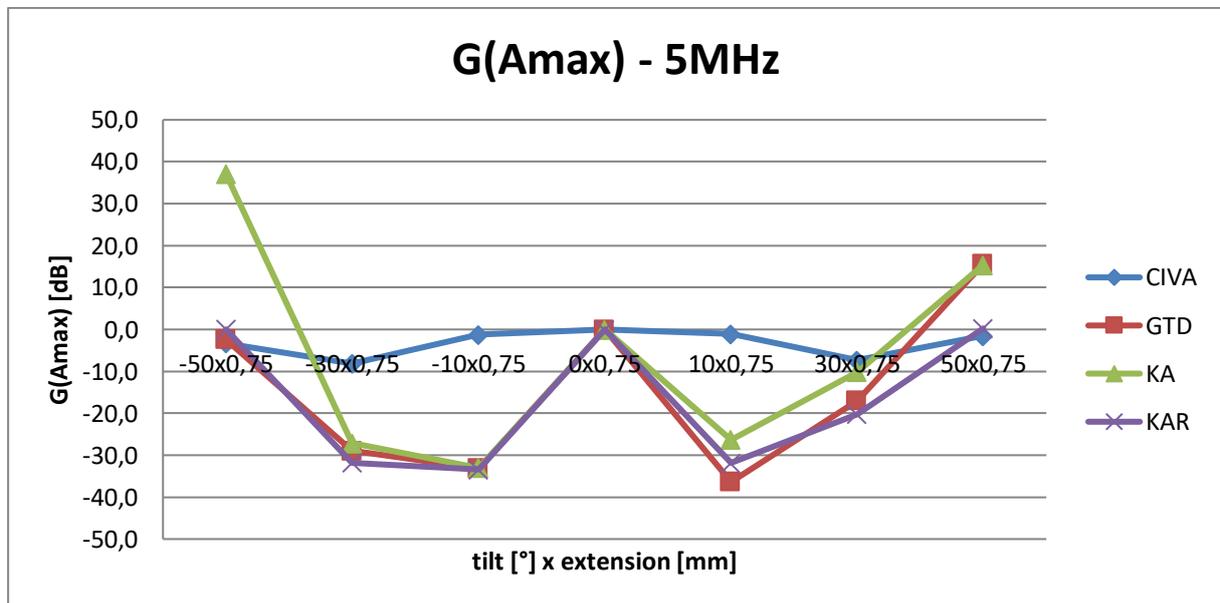


Figure 138 : courbe des rapports $G(A_{max})$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 5MHz.

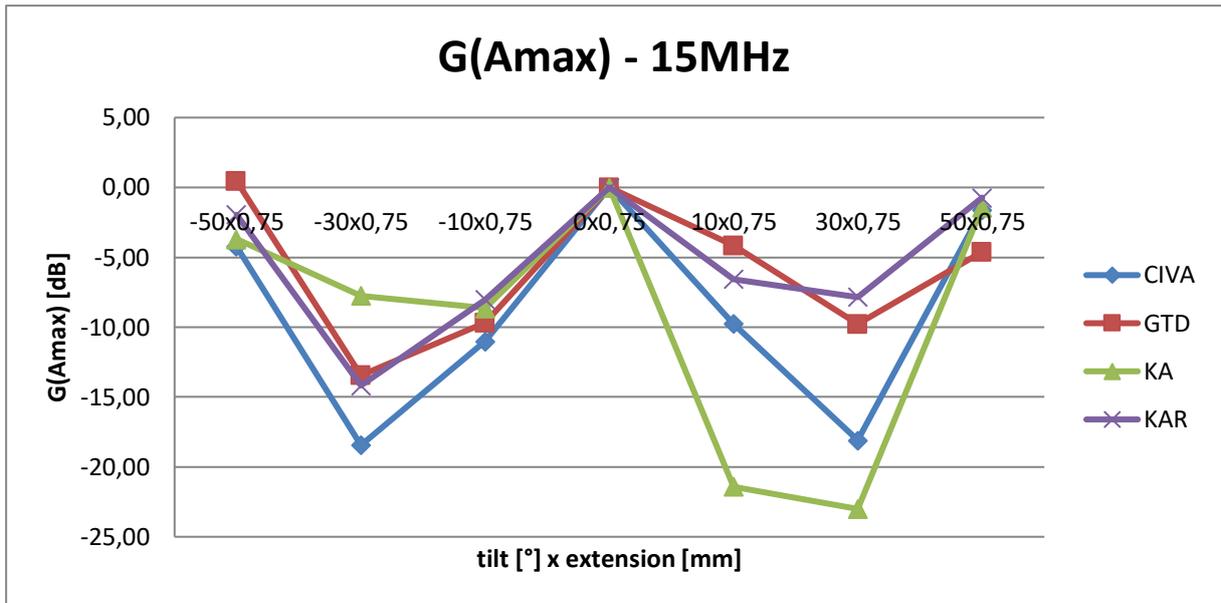


Figure 139 : courbe des rapports $G(A_{max})$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 15MHz.

D'autre part, les approches asymptotiques **GTD** et **KA** ne permettent pas de décrire le champ généré correctement dans toutes les régions d'observation car ne décrivent correctement le champ diffracté que sous la condition $(\sqrt{kr}|\cos(\varphi \pm \varphi_0)| \gg 1)$ [39], i.e. en dehors des zones d'ombres illustrées Figure 140 et ne prennent pas en compte correctement les interférences entre les différents rayons générés [39] ainsi que les champs générés ou observés sous incidence critique pour un faisceau d'ondes transversales [79, 80].

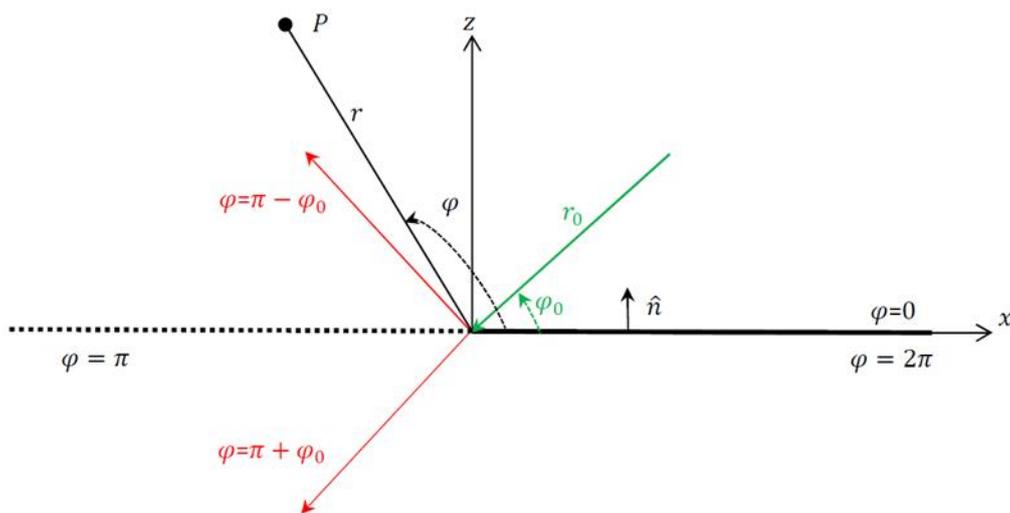


Figure 140 : Géométrie du problème de diffraction d'une onde plane ultrasonore d'incidence (r_0, φ_0) par un demi-plan

Pour les faibles grandeurs de $k_T * a$, ceci affecte la prédiction des largeurs des courbes echo-dynamiques comme abordé dans le précédent chapitre. Pour la grandeur $k_T * a \sim 15$

étudiée en simulation et correspondant à une fréquence d'inspection de 15MHz, nous constatons une amélioration des prédictions relatives à la donnée image ultrasonore $K(L_{-6dB})$ comme observé sur les Figure 141 et Figure 142.

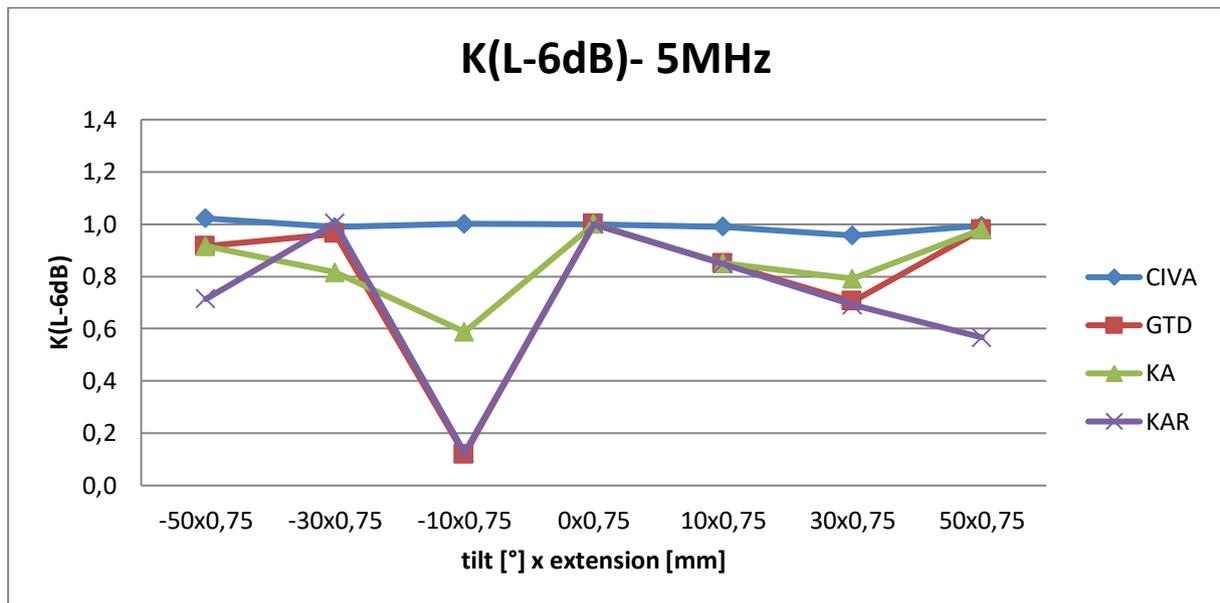


Figure 141 : courbe des rapports $K(L_{-6dB})$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 5MHz.

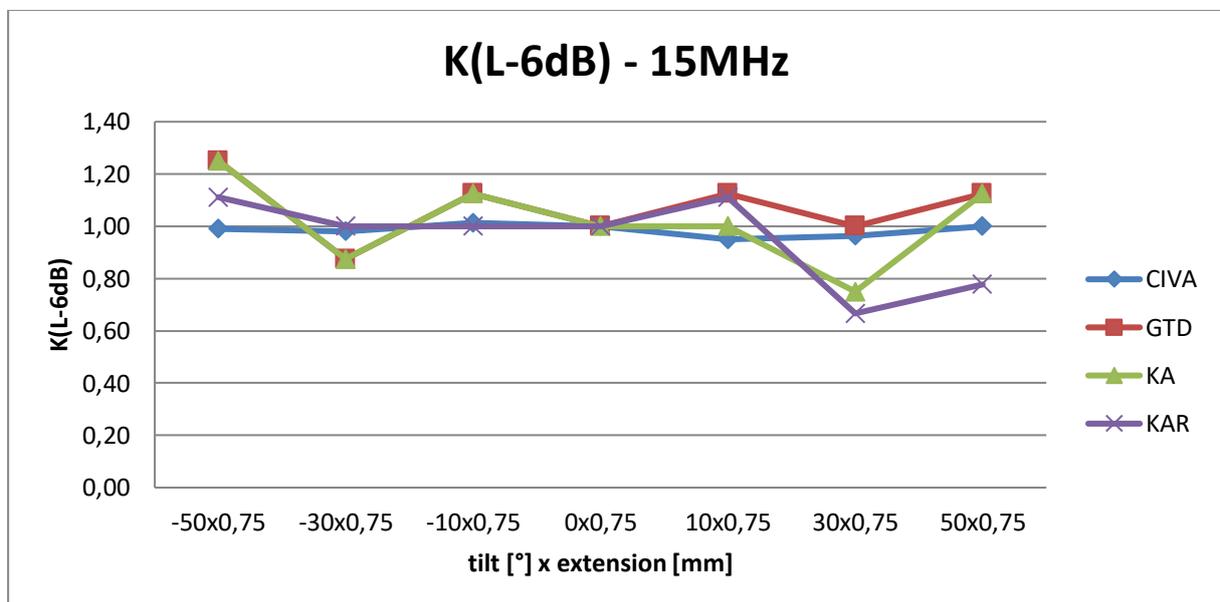


Figure 142 : courbe des rapports $K(L_{-6dB})$ simulés (CIVA et approches HF) suivant les deux sens de contrôle pour l'inspection de défauts plans droits et tiltés et d'extension de référence de 5% de l'épaisseur de la plaque pour une fréquence d'inspection de 15MHz.

Les premiers résultats supplémentaires obtenus en simulation corroborent les conclusions de Chapman [77, 78] quant à l'amélioration des approches HF pour les grandes valeurs de

$k_T * a$. Par conséquent, pour des hautes fréquences d'inspection ou de grandes extensions de défauts telles que $k_T * a \gg 15$, les approches **HF** du **Simulateur VRCF** peuvent être privilégiées pour leur rapidité de calcul. En revanche, pour les petites extensions de défauts tel que $k_T * a \in [2, 5]$, les approches **SE** et **KI** basées sur la **PTD** sont à privilégier car délivrent des prédictions plus satisfaisantes.

Toutefois, des perspectives d'amélioration du **Simulateur VRCF** pour les approches **SE** et **KI** pourront être considérées et porteront sur des propositions extensions de ces approches afin d'améliorer la description des phénomènes de diffraction et d'interférences entre les différents rayons mis en jeu dans les régions d'observation (position du transducteur en balayage par rapport à la position du défaut débouchant sur la surface interne du tube).

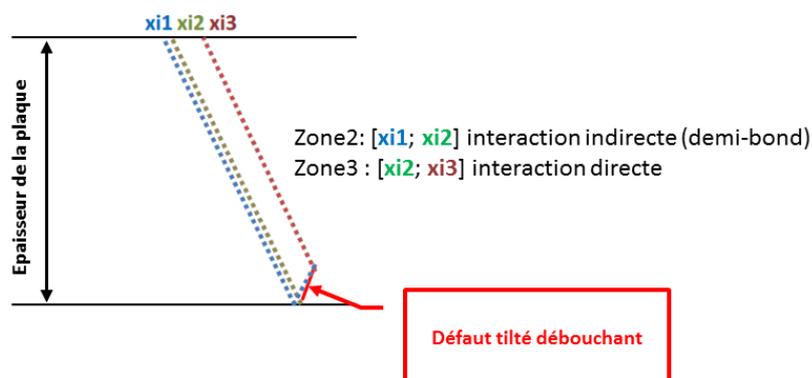


Figure 143 : zones d'interaction considérées par l'approche zonale du Simulateur VRCF entre le rayon transversal sous incidence oblique et le défaut débouchant

L'approche zonale considérée par le **Simulateur VRCF** considère l'interaction entre le rayon ultrasonore d'onde transversale sous incidence oblique et le défaut débouchant suivant les deux zones illustrées Figure 143. Or pour les extensions ainsi que les tilts des défauts étudiés, la largeur de ces zones est de l'ordre voire inférieure à la longueur d'onde considérée. Dans l'ensemble, elles sont toutes de largeur inférieure à celle du faisceau ultrasonore incident. Selon la zone d'interaction et selon le sens de balayage considérés, les différentes zones géométriques peuvent être confondues comme l'illustre la Figure 144. Par conséquent, des interférences entre les rayons incidents, réfléchis et diffractés opèrent. Or, dans ces régions où ces interférences opèrent aussi dites régions de transition les prédictions selon les approximations asymptotiques **GTD** et **KA** présentent des valeurs erronées [39, 81, 58]. Par conséquent, nous avons fait le choix de nous intéresser particulièrement aux solutions selon la **PTD** car cette dernière permet de décrire la diffraction dans les régions de diffraction telles que les frontières de l'optique géométriques, pôles et caustiques, le champ d'onde peut être représenté en termes de rayons élémentaires [39].

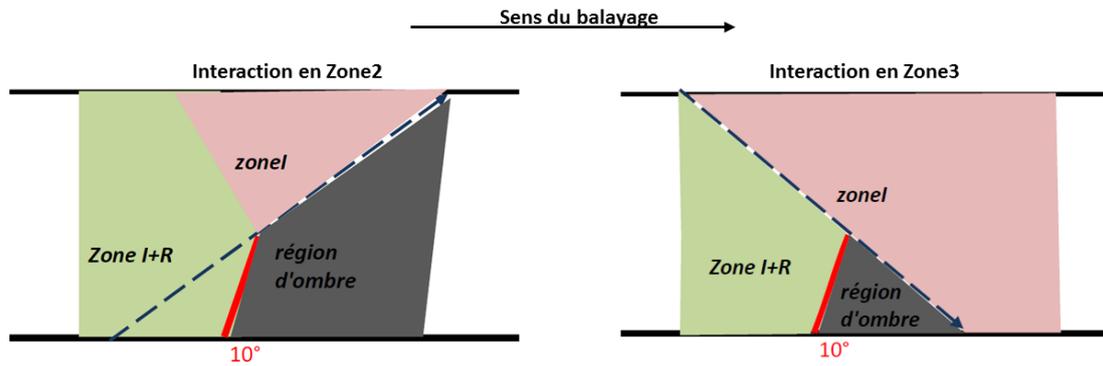


Figure 144 : les différentes zones géométriques pour un rayon d'onde ultrasonore sous incidence oblique en fonction de la zone d'interaction considérée

D'autre part, les travaux [58] (poursuite des travaux [57]) proposant un modèle basé également sur la **PTD** afin d'améliorer la simulation des échos provenant des défauts dont l'intervalle de validité a été estimé pour les ondes transversales à $ka_{max} \in [5,10]$ ont permis de montrer des phénomènes plus complexes de la diffusion des ondes ultrasonores en incidence oblique sur un défaut plan. Dans le but de comprendre la détérioration des prédictions selon le modèle **PTD** développé dans le cadre de ces travaux [58] pour des angles proches des angles critiques des ondes transversales, des captures d'écran du champ ultrasonore simulé en **MEF (Méthode d'Éléments-Finis)** à l'aide du module de simulation **Athena-2D** développé dans le cadre d'un partenariat **CEA/EDF** a permis de mettre en lumière des ondes de nature plus complexe comme illustré Figure 145.

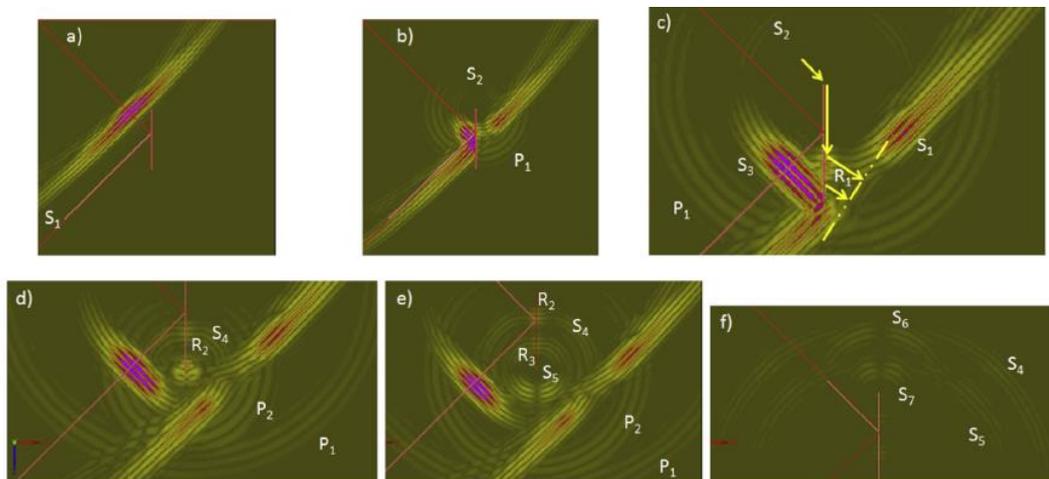


Figure 145 : Captures d'écran d'une simulation MEF (Athena2D) de la configuration suivante : interaction entre un champ ultrasonore sous incidence oblique 45° de fréquence 5MHz avec un défaut plan dont la hauteur est de 5mm ($k_T * a = 25$). Les différentes captures d'écran considèrent différentes échelles [58].

Les axes de propagation des ondes transversales incidentes et réfléchies (S) sont illustrés en rouge sur les captures d'écran de la Figure 145. Les différentes ondes observées sur les différentes captures d'écran de la Figure 145 sont résumés ci-dessous :

- S_3 : est l'onde transversale réfléchiée sur la surface du défaut. Aucune conversion de mode de l'onde transversale en onde longitudinale n'opère car l'incidence oblique étudiée est de 45° .
- P_1 et P_2 (respectivement S_2 et S_4) : sont les fronts d'ondes des ondes diffractées par le sommet et le bas du défaut sans subir des conversions de mode. En effet, toute onde incidente sur un défaut génère un cône de diffraction composé d'ondes longitudinales et transversales [32].
- R_1 et R_2 : onde de Rayleigh générée quand le champ atteint une extrémité du défaut, cette dernière se propage le long du défaut jusqu'à l'extrémité opposée puis re-rayonne une onde réfléchiée R_3 qui se propage selon le front d'onde S_5 ainsi que des ondes diffractées S_6 et S_7 .

Ceci corrobore la considération des ondes de surface par Achenbach [32] le long de la surface d'un défaut semi-infini suite à l'interaction d'une onde plane incidente et la surface de ce dernier. En effet, Achenbach considère en plus des rayons composant le cône de diffraction, deux rayons supplémentaires correspondant à des ondes de surface sur chacune des faces du défaut. Ces derniers génèrent des rayons diffractés supplémentaires en interceptant l'extrémité du défaut. De ce fait, le champ total diffracté \mathbf{u}_d selon la solution proposée par [32] est composé de rayons diffractés primaires \mathbf{u}_β^α et d'un système de rayons de diffraction d'ordre supérieur $\mathbf{u}_{\beta\gamma}^\alpha$ tel que :

$$\mathbf{u}_d = \sum \mathbf{u}_\beta^\alpha + \sum \mathbf{u}_{\beta\gamma}^\alpha \quad \text{Équation 98}$$

Avec

\mathbf{u}_d	Champ total diffracté
\mathbf{u}_β^α	Diffracté primaire : rayon diffracté suite à une interaction du rayon incident avec la surface du défaut
$\mathbf{u}_{\beta\gamma}^\alpha$	Diffracté secondaire : rayon diffracté par le rayon se propageant le long de la surface du défaut
α	Onde incidente : L, TV (transversale de polarisation verticale) ou TH (transversale de polarisation horizontale)
β	Onde se propageant le long de la surface du défaut : RS (Rayleigh symétrique), RA (Rayleigh asymétrique) ou TH
γ	onde de volume générée suite à la diffraction des ondes β : L, TH ou TV

Cette interaction entre les rayons se propageant sur une des faces du défaut et re-rayonnant à nouveau depuis son extrémité permet de générer la diffraction dite secondaire. Par ailleurs, les petites extensions finies des défauts étudiés nous poussent à considérer cette diffraction secondaire ainsi que la contribution des rayons de surface se propageant le long de la surface du défaut. **UFIMTSEV** propose également une méthode pour prendre en compte ces rayons de diffraction secondaire [39] (chapitre5) en considérant les deux faces du défaut. La considération des deux faces du défaut par rapport à la position d'observation

permet de mieux décrire les contributions énergétiques du côté opposé à la face illuminée du défaut. En effet, ces contributions sont supposées nulles car se situent dans la région d'ombre. Or, comme le montre la Figure 145 des ondes de différentes natures existent dans cette région.

D'autre part, l'étude comparative dans le précédent chapitre s'est intéressée au cas d'une incidence oblique dans l'eau de 17° . En fonction des caractéristiques dimensionnelles des tubes à contrôler l'angle d'incidence peut varier. Le **Simulateur VRCF** considère toute incidence dans l'eau. Les travaux [52] ont montré que pour un faisceau ultrasonore sous incidence oblique proche de l'angle critique des ondes transversales dans l'acier (33.2°) impactant le voisinage proche d'un défaut débouchant donne naissance à une onde rampante de forte intensité qui s'atténue rapidement. Cette onde rampante à une composante transversale et deux composantes de type Longitudinal. Le document [53] présente une méthode pour évaluer le champ diffracté quand le coin (défaut, fond) est illuminé par l'onde rampante et calcule les coefficients de diffraction correspondant. Toutefois, la méthode proposée [53] est valable uniquement dans les régions géométriques ainsi que les régions d'ombre et non dans les régions de transition. L'apparition de ces ondes peut être à l'origine de divergences observées entre la simulation et l'expérience puisqu'elles donnent lieu à des contributions complémentaires à l'écho de coin. Ces contributions ont une forte incidence sur l'amplitude des échos de coin des entailles en particulier de petite extension [80, 82].

Enfin, un autre paramètre à l'origine de divergence entre l'expérience et la simulation est la taille du défaut étudié. Enfin, le **Simulateur VRCF** considère les défauts en tant que demi-plan infini. De ce fait, les ondes générées depuis le point source sur la surface du défaut de taille finie sont des ondes sphériques [32, 58].

Nous avons identifié dans ce paragraphe les différents points d'amélioration à considérer afin de diminuer les divergences observées entre les résultats obtenus à l'aide de la simulation et ceux obtenus expérimentalement. Nous pouvons résumer ces derniers comme suit :

- Les régions d'interférence entre les rayons incidents, réfléchis et diffractés
- La contribution de la diffraction secondaire essentiellement pour les défauts de petites tailles.
- La prise en compte des contributions des ondes rampantes en cas d'incidence critique dans l'acier

Nous avons ainsi constaté la complexité des différents phénomènes engendrés par l'interaction entre un rayon ultrasonore transversale et un défaut plan débouchant particulièrement de petite extension. Au vue de cette complexité, nous pouvons exploiter la complémentarité des approches basées sur la **PTD (SE et KI)** en fonction des trajets

géométriques mis en jeu avec les différents points d'amélioration abordés précédemment tel que :

- Pour les trajets géométriques équivalents correspondant à la réflexion spéculaire ($\pm 50^\circ$) : approche *KI*.
- Pour la déviation de l'écho de coin sans réflexion multiple sur la surface du défaut ($+10^\circ$ et $+30^\circ$) : l'approche *SE* pour le cas du demi-plan.
- Pour la déviation de l'écho de coin avec plusieurs interactions entre la surface du défaut et le fond de la plaque : l'approche *SE* pour le cas d'un coin.

2. Prolongement de la configuration transversale au défaut plan débouchant externe

Le contrôle ultrasonore des défauts débouchant sur la paroi externe du tube implique un contrôle en bond-complet [6, 14] comme illustré Figure 146.

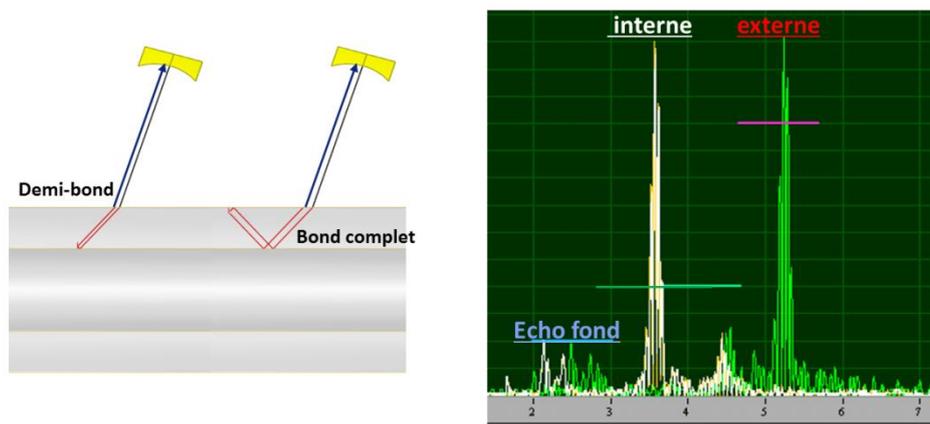


Figure 146 : contrôle des défauts internes et externes et portes de détection relatives à chacun de ces défauts.

Le prolongement aux défauts externes est basé sur le principe simple de l'effet miroir par rapport à l'axe de la plaque comme illustré Figure 147. Pour rappel, la géométrie du tube suivant la configuration transversale du contrôle ultrasonore est réduite à une plaque. L'approche zonale appliquée pour le cas des défauts débouchants sur la paroi interne du tube selon la configuration transversale du contrôle ultrasonore est ainsi étendue au défaut externe tel qu'illustré dans la Figure 148.

La détermination de l'évolution de l'amplitude en fonction du trajet ultrasonore parcouru obéit au schéma de calcul détaillé dans le Chapitre 2. Cependant, les trajets ultrasonores considérés précédemment prennent en compte un trajet ultrasonore additionnel dû au contrôle en bond-complet. Par conséquent, le processus itératif pour le calcul de l'évolution de l'amplitude en fonction du trajet ultrasonore parcouru présenté dans le Chapitre 2 a ainsi été modifié de manière à inclure les défauts externes.

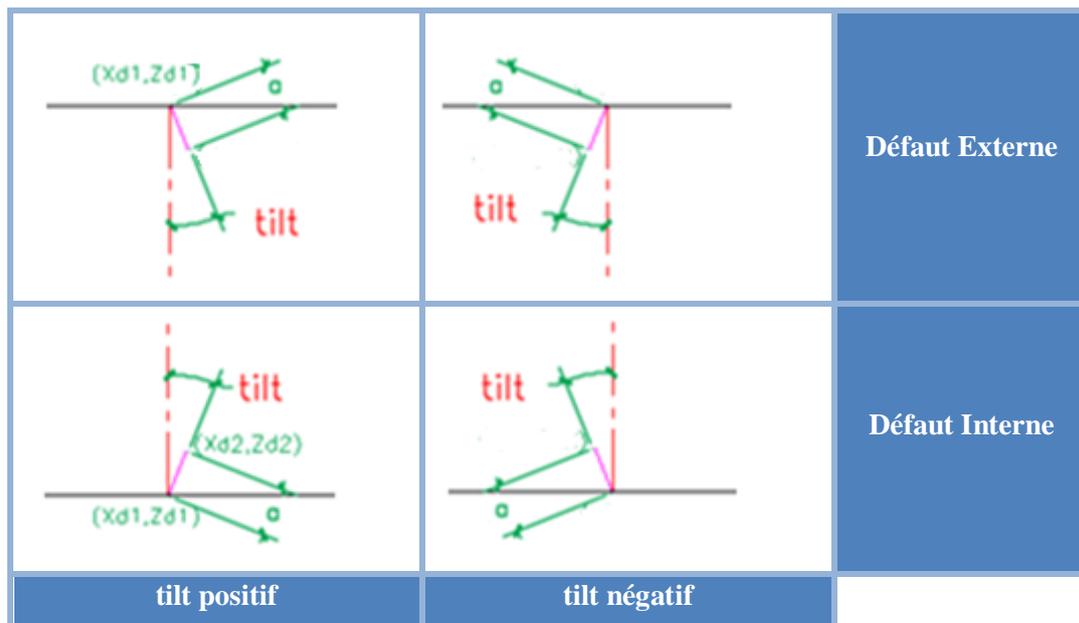


Figure 147 : Antisymétrie entre le défaut interne et externe

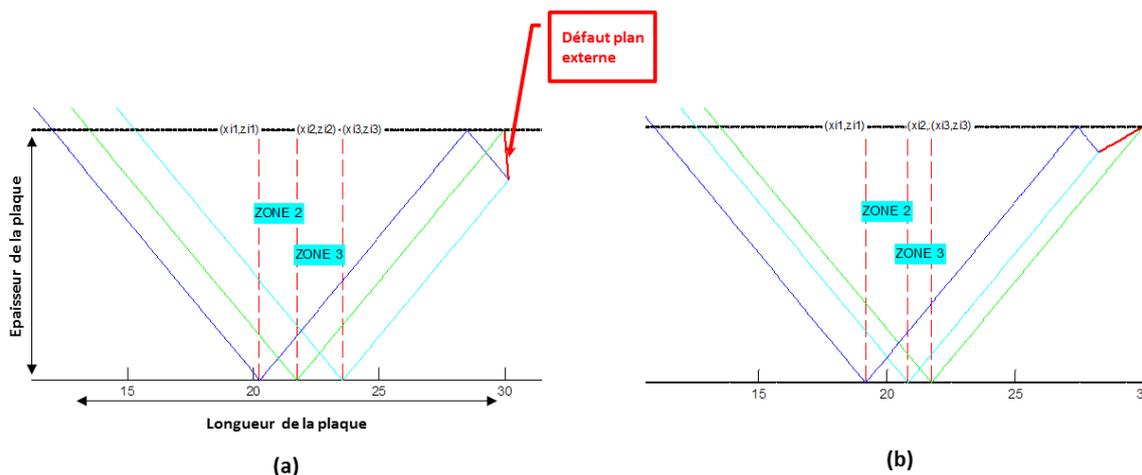


Figure 148 : prolongement de l'approche zonale au cas du défaut plan débouchant sur la surface externe. (a) défaut plan externe de tilt positif. (b) défaut plan externe de tilt négatif

Dans la suite, nous nous intéresserons à l'extension du **Simulateur VRCF** à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube en vue d'obtenir un modèle direct bidimensionnel permettant de modéliser un contrôle ultrasonore complet sur tube sans soudure.

III. Extension du Simulateur VRCF à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube

Comme mentionné précédemment dans le Chapitre 1V.2, le contrôle ultrasonore sur tube sans soudure implique deux configurations de contrôle : la configuration transversale et la configuration longitudinale. Nous avons abordé la configuration transversale dans les précédents chapitres et avons détaillé la démarche géométrique adoptée pour la modélisation d'une inspection ultrasonore suivant cette configuration. Dans ce paragraphe,

nous exposerons le prolongement développé de cette approche géométrique à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore.

Pour rappel, la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube vise à détecter les défauts d'orientation longitudinale (parallèle à la génératrice du tube). Le contrôle a lieu dans le plan transversal du tube suivant une incidence oblique de 17° dans ce plan comme illustré Figure 149. Par ailleurs, le contrôle des défauts longitudinaux implique également les deux sens du balayage afin de s'assurer de la détection des défauts tiltés [6].

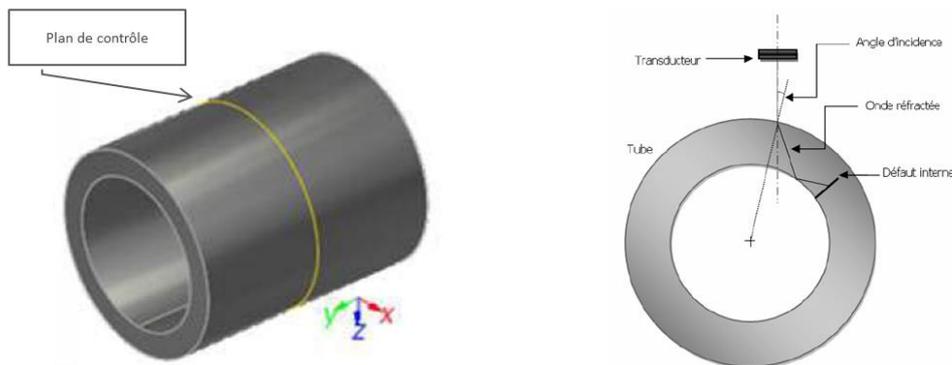


Figure 149 : plan de contrôle longitudinal du tube: coupe transversale. [15]

L'extension du **Simulateur VRCF** à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube obéit à la même approche géométrique adaptée pour la configuration transversale du contrôle et abordée dans Chapitre 3IV. En effet, le processus itératif de la détermination des trajets ultrasonores impliqués obéit à une approche zonale également mais adaptée à la géométrie du tube selon cette configuration du contrôle, i.e. deux cercles concentriques comme illustré Figure 149. Cette approche zonale prend en compte la courbure interne et externe du tube. Cependant, contrairement à la configuration transversale du contrôle ultrasonore du tube qui considèrerait le déplacement du transducteur le long de la longueur du tube, la configuration longitudinale considère le transducteur fixe et le tube en rotation par rapport à ce dernier.

La formulation du problème selon cette configuration du contrôle est subdivisée en 4 parties principales résumées selon le schéma de la Figure 150.

L'interface utilisateur est adaptée également de manière à prendre en compte les caractéristiques dimensionnelles relatives à la pièce inspectée. Cette interface est illustrée Figure 151.

À l'instar du modèle direct pour la configuration de contrôle transversale, le modèle direct pour la configuration longitudinale du contrôle offre à l'utilisateur de choisir d'étudier une simulation simple ou des simulations multiples comme abordé précédemment la section Chapitre 3IV.

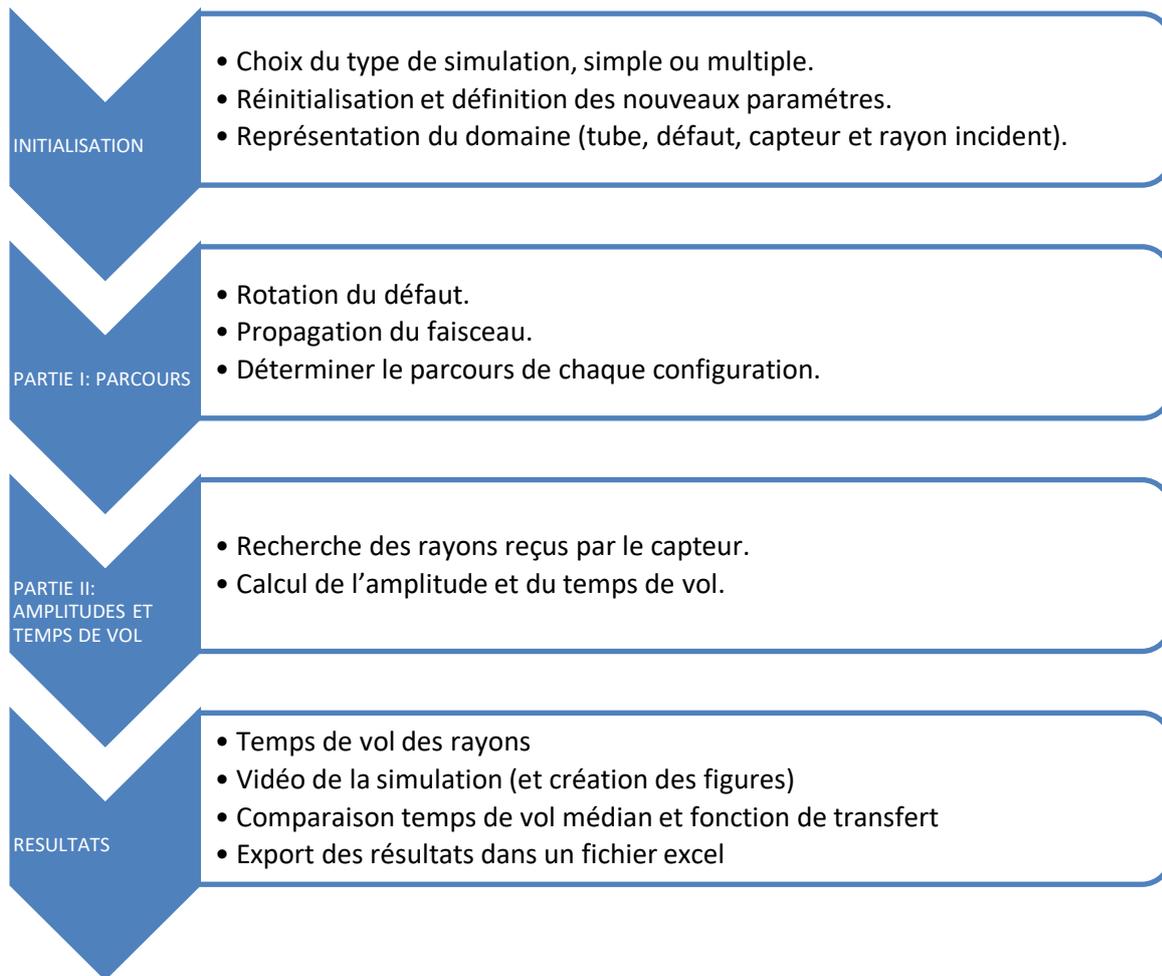


Figure 150 : architecture du simulateur VRCF pour la prise en compte de la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube

Le modèle direct pour la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore permet également d'aboutir à des images ultrasonores compatibles avec l'expérience (Bscans, Ascans et courbes écho-dynamiques). Par conséquent, les routines de dépouillement développées pour la configuration transversale du contrôle ont été adaptées à la configuration longitudinale comme illustré Figure 152.

À ce jour, le modèle direct pour la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore considère uniquement les défauts débouchant sur la paroi interne du tube. Par conséquent, La poursuite des travaux développés dans le cadre de cette thèse concernera la prise en compte des défauts externes ainsi que l'analyse comparative entre les résultats obtenus à l'aide de la simulation (**Simulateur VRCF** et **CIVA**) et ceux obtenus à l'aide de l'expérience. De plus, l'optimisation des étapes de calcul permettra de réduire les couts de calculs particulièrement pour les approches basées sur ces considérations intégrales **SE** et **KI**.

Paramétrage

Modèle Direct Tube

Version du 01/08/2016 (D. LOUBOUTIN)

Tube

Diamètre extérieur du tube (mm):

Épaisseur du tube (mm):

Défaut

Inclinaison du défaut (°):

Profondeur du défaut (mm):

Captteur

Inclinaison mécanique (°):

Longueur du capteur (mm):

Fréquence nominale (MHz):

Nombre de rayons émis:

Propagation

Masse volumique du Milieu0 (kg/m3):

Masse volumique du Milieu1 (kg/m3):

Vitesse ondul. du Milieu0 (m/s):

Vitesse ondul. du Milieu1 (m/s):

Vitesse ondeT du Milieu1 (m/s):

Contrôle

Hauteur de colonne d'eau (mm):

Pas de balayage (°):

Pas calculé en mm:

Nombre de tirs:

Signal d'émission

Type de signal:

Modèle d'émission du signal:

Largeur de bande (MHz):

Nombre d'échantillons:

Fréquence d'échantillonnage (MHz):

Amp.:

Diffraction

Modèle de diffraction:

Nombre de rayons diffractés (fond et surface):

Figure 151 : initialisation des paramètres du contrôle ultrasonore pour la configuration longitudinale

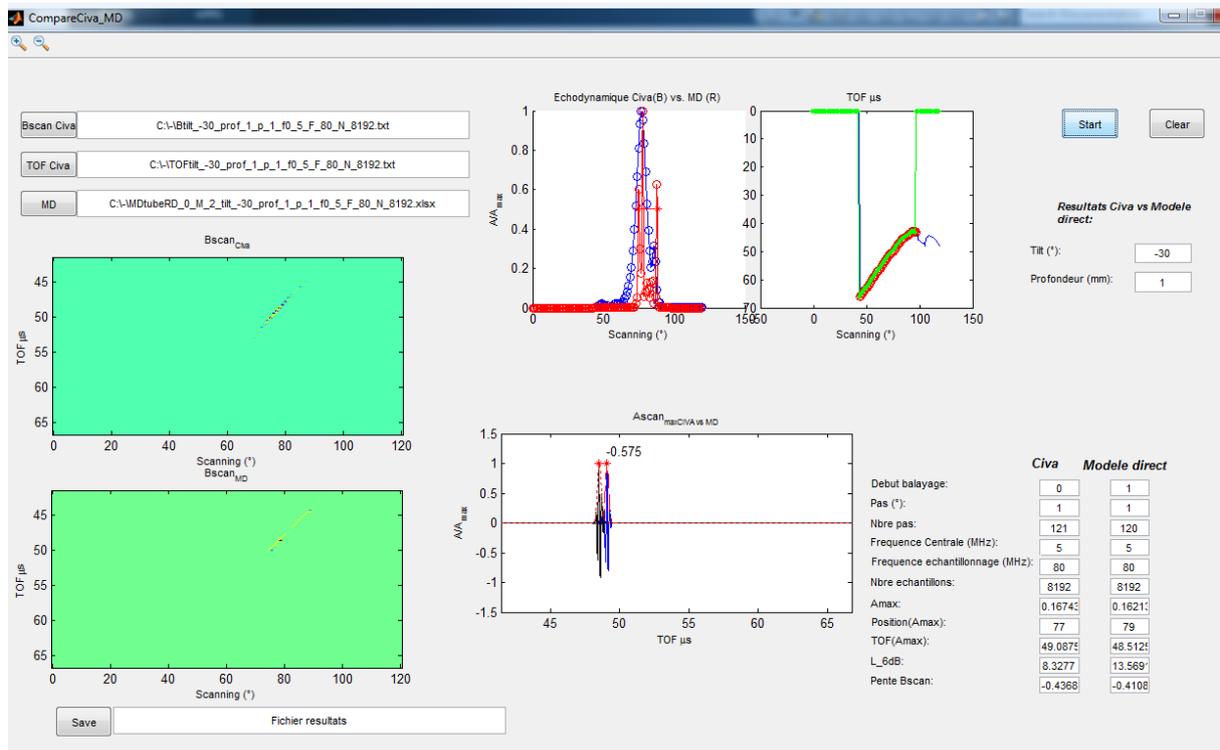


Figure 152 : interface de la routine de dépouillement et comparaison des acquisitions ultrasonores simulées à l'aide de CIVA et Simulateur VRCF toute approche. Exemple étudié : défaut -30°x1mm selon l'approche KA, fréquence d'inspection 5MHz, pas de balayage 1mm

Dans la suite, nous aborderons brièvement une méthode développée dans le cadre de ces travaux afin de déduire les caractéristiques des défauts détectés relatives au tilt et à l'extension de ces derniers. Cette méthode s'appuie sur les trajets géométriques ultrasonores mis en jeu et de retour vers la surface du transducteur après interaction avec le

défaut. Dans un premier temps, cette méthode a été développée pour les défauts débouchant sur la surface interne en configuration transversale du contrôle ultrasonore des tubes sans soudure.

IV. Déduction du tilt et de l'extension du défaut détecté en fonction des temps de vol des trajets ultrasonores

L'approche zonale définie pour la détermination des trajets géométriques des rayons ultrasonores permet de distinguer les temps de vol issus d'une interaction de type réflexion et diffraction directe et indirecte. De ce fait, la connaissance a priori du défaut ciblé permet de connaître les trajets ultrasonores impliqués suite à une interaction avec la surface du défaut ou l'extrémité non débouchant de ce dernier comme illustré Figure 153 et par conséquent les temps d'arrivée relatifs aux rayons ultrasonores se retro-propageant vers la surface du transducteur.

Nous avons étendu le calcul d'estimation de la profondeur du défaut droit présenté dans le document [83] au défaut incliné. Cependant, nous n'avons pas effectué de traitement de signal proposé dans les travaux [28] basé sur la déconvolution des signaux Ascans expérimentaux. Le prolongement de la méthode de calcul au défaut incliné, nous a permis d'aboutir à une première estimation du tilt du défaut ciblé. Les résultats d'estimation de la profondeur et du tilt suivant le sens et la fréquence de contrôle sont présentés Figure 154 et Figure 155 et sont basés sur des résultats expérimentaux. D'après les résultats illustrés Figure 154, l'estimation de l'extension du défaut est meilleure en 5MHz qu'en 3MHz. Ceci corrobore le fait que la sélectivité s'améliore en augmentant la fréquence d'inspection. Nous rappelons qu'en contrôle non destructif, la sélectivité est la capacité de distinguer deux défauts d'extension proches à partir de l'amplitude maximale de leurs réponses acoustiques.

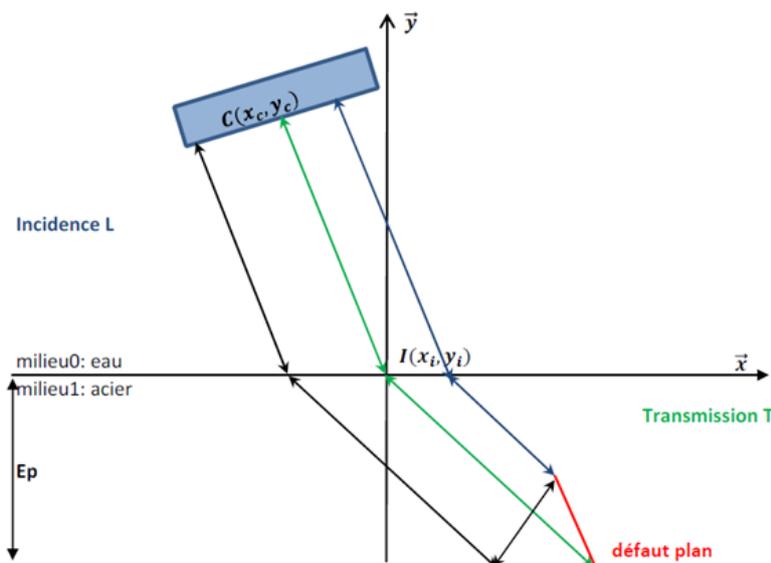


Figure 153 : les différents trajets ultrasonores considérés pour l'estimation du tilt et de l'extension du défaut

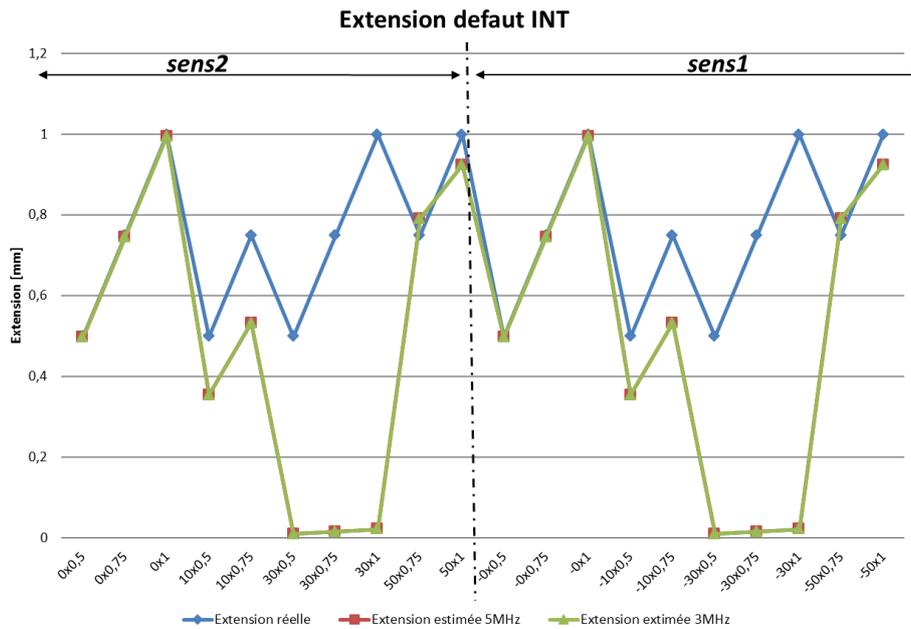


Figure 154 : extensions réelles et estimées depuis les résultats expérimentaux. Estimation basée sur les temps relatifs d'arrivée des rayons ultrasonores

En revanche, les résultats obtenus en se basant uniquement sur les temps de vol des trajets géométriques illustrés Figure 155 pour l'estimation du tilt des défauts détectés sont moins concluants. À la suite de ces résultats, une étude complémentaire à ces travaux a été menée au **VRCF** [29] sur les mêmes défauts en s'inspirant des travaux [36] basés sur une inspection **TFM**. Certes, l'estimation des tilts des défauts est améliorée pour les défauts dont l'extension est supérieure à 0.75mm mais présente des erreurs d'estimation de l'ordre de $\pm 8^\circ$. De plus, cette étude a permis de constater que l'estimation de l'extension du défaut est privilégiée suivant un sens du balayage tandis que l'estimation de l'inclinaison du défaut est privilégiée dans le sens opposé du balayage.

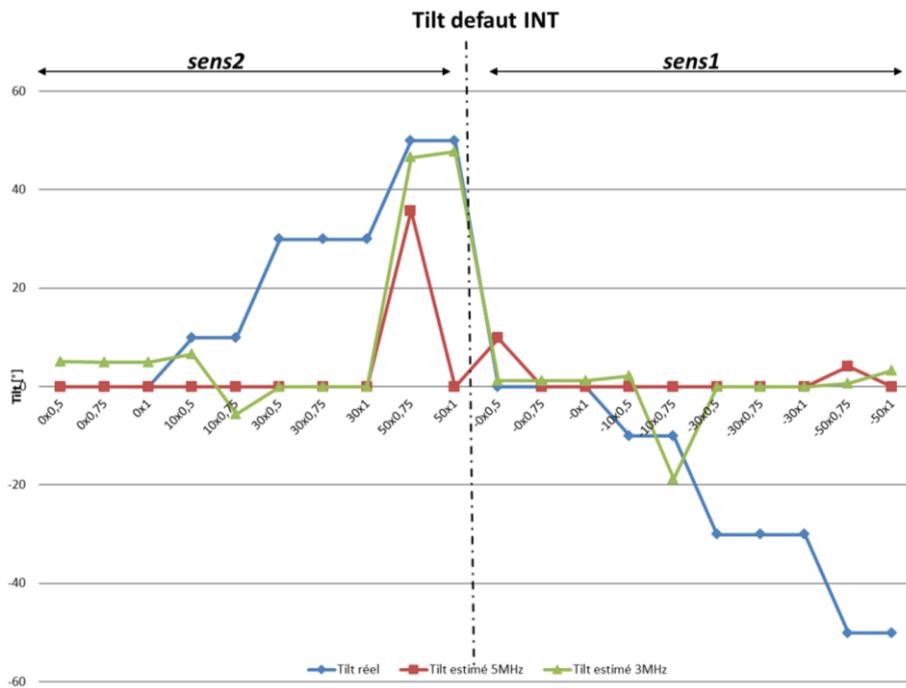


Figure 155 : tilts réels et estimés depuis les résultats expérimentaux. Estimation basée sur les temps relatifs d'arrivée des rayons ultrasonores.

L'ensemble de ces résultats est à considérer afin d'améliorer le processus itératif basé sur la comparaison des images ultrasonores simulées et expérimentales développé dans le cadre des travaux [1] en vue d'identifier et de caractériser les défauts détectés lors d'un contrôle ultrasonore sur banc automatique.

V.Conclusion

L'objectif principal de ces travaux est d'obtenir un modèle direct simple permettant de modéliser une inspection ultrasonore complète sur tube en présence d'un défaut plan (droit ou tilté) débouchant sur la surface interne. Nous avons opté dans un premier temps pour le développement de la configuration transversale car présente une géométrie simple du problème de propagation. Le modèle direct développé « **Simulateur VRCF** » est basé sur une approche géométrique simple permettant de considérer les trajets géométriques ultrasonores impliqués dans l'interaction entre un rayon ultrasonore transversal (uniquement) et le défaut débouchant plan étudié et d'aboutir à des images ultrasonores comparables avec celles expérimentales. Nous avons opté pour les approches **HF** car simples à implémenter ainsi que des considérations intégrales basées sur la **PTD (SE et KI)** et les avons étudié dans la limite de leur validité $k_T * a \in [2, 5]$. Au vu des résultats obtenus dans le précédent chapitre, nous avons constaté que les approches basées sur les considérations intégrales **SE** et **KI** permettent d'obtenir des accords acceptables avec l'expérience en comparaison avec les approximations **HF (GTD et KA)** au vue des faibles extensions des défauts $[0.2; 1.5]mm$ ciblés par notre problématique et au regard des fréquences usuelles

[2.5, 5]MHz déployées sur les bancs de contrôle dans les usines **Vallourec**. Si les accords obtenus à l'aide des considérations intégrales sont meilleures que ceux obtenus à l'aide des approximations **HF**, elles nécessitent toutefois des améliorations afin de décrire au mieux les phénomènes complexes mise en jeu lors de l'interaction entre le rayon ultrasonore et le défaut plan débouchant ainsi que des optimisations pour réduire les coûts de calculs. En effet, ces phénomènes complexes font toujours l'objet d'étude afin de permettre à la modélisation de décrire au mieux la réalité physique de la propagation ultrasonore. Nous avons ainsi abordé dans ce chapitre les différentes pistes d'amélioration pour décrire correctement les champs générés dans les zones de transition (interférences entre rayons incidents, réfléchis et diffractés) ainsi que la diffraction dite secondaire [39, 32] due aux ondes de surface se propageant le long de la surface du défaut plan puis qui génèrent des rayons diffractés depuis l'extrémité non-débouchante du défaut plan de petite extension. La contribution de ces ondes est non négligeable pour des défauts de petites tailles [32]. D'autre part, nous avons abordé la contribution des ondes rampantes au voisinage des incidences critiques d'un faisceau ultrasonore composé d'ondes transversales dans l'acier [52, 53]. Par ailleurs, nous avons constaté que les approches **HF (GTD et KA)** sont d'intérêt quand la grandeur $k_T * a$ est proche voire supérieure à 15. En effet, les prédictions de ces dernières s'améliorent

Nous avons présenté le prolongement du modèle direct selon la configuration transversale aux défauts plans débouchant sur la surface externe. Puis, nous avons exposé la démarche géométrique considérée afin d'étendre le **Simulateur VRCF** à la configuration longitudinale des défauts débouchants sur la surface interne du tube.

Enfin, nous avons présenté une estimation du tilt et de l'extension du défaut détecté expérimentalement basée sur les trajets géométriques d'intérêt. Une étude menée à la suite de ces résultats et basée sur la **TFM** nous a permis de constater la difficulté d'aboutir avec précision au tilt du défaut pour les faibles extensions ciblées par notre problématique. Néanmoins, elle nous a permis de constater que l'estimation de l'extension du défaut détecté est privilégiée selon un sens du balayage tandis que l'estimation du tilt est privilégiée selon le second sens du contrôle [29].

La suite de ces travaux concernera :

- L'intégration des points d'amélioration abordés dans ce chapitre à la configuration transversale du contrôle ultrasonore pour les défauts internes et externes ainsi que la validation expérimentale.
- Le prolongement de la configuration longitudinale aux défauts externes ainsi que la validation expérimentale.
- L'étude de cas supplémentaires (extensions, tilts, fréquences, pas de balayage...etc.) en vue d'alimenter une base de données d'images ultrasonores simulées pour le processus d'inversion développé dans le cadre des travaux [1].

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce document porte sur un modèle bidimensionnel permettant de décrire une inspection ultrasonore immergée sous incidence oblique en présence d'un défaut plan débouchant sur la surface interne du tube sans soudure et de générer des images ultrasonores comparables à celles issues d'une acquisition ultrasonore (Bscans, Ascans, écho-dynamiques). Une des méthodes de contrôle ultrasonore régie par la norme [19] et déployée sur les bancs des usines **Vallourec** consiste à comparer l'amplitude des indications ultrasonores en acquisition par rapport à un seuil déterminé à l'aide d'un défaut de référence. En pratique, il est admis que l'amplitude des défauts est proportionnelle à leurs profondeurs. Or, cette hypothèse n'est pas toujours valable particulièrement pour les défauts tiltés. De ce fait, une étude plus approfondie conduisant à définir d'autres critères plus significatifs en vue d'une évaluation quantitative des défauts détectés permettra de mieux attester de la criticité de ces derniers ainsi que de la faisabilité d'une réparation dans le but d'atteindre un point d'équilibre entre la qualité (risque client) et la productivité (risque fournisseur).

L'information concernant les caractéristiques recherchées (position, taille, inclinaison, ...etc.) est contenue dans les signaux acquis par les transducteurs en réception. Ces échos acquis proviennent des différentes interactions avec le défaut ainsi que la géométrie de la pièce inspectée (réflexion, diffraction, conversion de mode...etc.). Leur interprétation nécessite une certaine expertise et peut parfois s'avérer complexe. Par conséquent, la localisation et la caractérisation du défaut nécessitent le traitement des données ultrasonores d'acquisition et une bonne connaissance des phénomènes de propagation. Cette problématique de détermination des caractéristiques ciblées des défauts en décodant les signaux ultrasonores relève de la résolution du problème inverse de la propagation ultrasonore. Les projets précédemment menés au **VRCF** [2] [1] ont montré l'intérêt d'un processus d'inversion basé sur un modèle direct pour l'estimation des caractéristiques ciblées. Les travaux présentés dans ce document s'intéresse à l'étape primordiale de cette approche de résolution des problèmes inverses, il s'agit de la résolution du problème direct. L'approche de résolution doit être non couteuse en temps tout en décrivant au mieux les configurations de contrôle étudiées. En effet, le modèle bidimensionnel développé dans cette thèse et intitulé « **Simulateur VRCF** » doit être simple tout en permettant in fine d'obtenir la solution du problème de détermination des caractéristiques ciblées des défauts détectés de manière embarquée au prototype industriel.

Les développements effectués dans le cadre de ce travail pour la résolution du problème direct afin de répondre aux spécifications relatives à cette étude sont basés sur la théorie des rayons avec une modélisation géométrique simple. Cette modélisation tient compte des deux aspects de la propagation : propagation spéculaire (réflexion et réfraction) et la diffraction du faisceau sur un défaut plan débouchant sur la surface interne du tube droit ou tilté. Cette solution est prolongée à l'ensemble des fréquences du spectre fréquentiel du

transducteur afin d'aboutir aux images ultrasonores simulées de type Bscans, Ascans et écho-dynamiques. L'interaction entre le défaut plan et le faisceau ultrasonore considère différentes approches pour tenir compte des aspects de la propagation ultrasonore étudiés dans le cadre de ces travaux afin de déterminer les approches appropriées aux configurations de contrôle souhaitées et aux extensions ciblées des défauts à détecter. En effet, les approches permettant de décrire la diffraction selon la théorie des rayons sont déterminées selon le critère $k * a$ où k est le nombre d'onde et a est la caractéristique dimensionnelle principale du défaut plan ciblé. Les grandeurs $k * a$ étudiées dans le cadre de ces travaux varient entre 2 et 5. L'enjeu est donc de déterminer les performances des approches **HF (GTD et KA)** dans la limite de leur domaine de validité ainsi que les performances des approches basées sur la **PTD (SE et KI)** pour pallier aux limitations des approches **HF**. L'étude comparative présentée dans ce document pour la configuration transversale du contrôle ultrasonore sur tube en vue de la validation du **Simulateur VRCE**, nous permet de dresser les conclusions suivantes par rapport aux différentes approches dont dispose ce dernier:

- L'approche **SSD** tenant compte uniquement des phénomènes de réflexion et de réfraction a pour principal avantage sa rapidité des calculs. Elle permet de rendre compte de l'importance de la diffraction quand la majorité des rayons émis ne se rétro-propagent pas favorablement vers la surface du transducteur après interaction avec la surface du défaut plan tilté.
- Les approches permettant de tenir compte en plus de la diffraction, peuvent être classées comme suit :
 - Les approches dites **HF - Hautes Fréquences GTD et KA** : elles affichent une rapidité des calculs (inférieur à 1min) car elles décrivent la diffraction au moyen de coefficients de diffraction mais présentent des écarts importants avec l'expérience dues à leurs singularités au voisinage des zones géométriques d'ombre ainsi qu'à leur domaine de validité par rapport à la grandeur $k * a$. Les performances s'améliorent quand $k * a \gg 15$ (pour les cas étudiés dans ces travaux).
 - Les approches **SE et KI** basées sur la **PTD** : elles sont plus coûteuse en temps de calcul car elles sont basées sur des considérations intégrales pour décrire la diffraction. Elles délivrent de meilleurs accords avec l'expérience et sont plus appropriées pour les grandeurs $k * a$ étudiées ($k * a \in [2, 5]$). Elles affichent des résultats complémentaires par rapport aux différents trajets ultrasonores étudiés (différents tilts des défauts plans). L'optimisation des étapes de calculs des considérations intégrales de ces approches permettront de diminuer les coûts de calculs.
 - L'approche asymptotique **KAR** basée sur la **PTD** proposée par [57]: elle affiche une rapidité des calculs car elle décrit la diffraction au moyen de coefficients de diffraction. Elle permet de réduire les singularités du champ diffracté au voisinage des zones géométriques d'ombre à l'aide d'un

coefficient correcteur obtenu en combinant les coefficients de la **GTD** et **KA** comme coefficient correcteur. Les performances s'améliorent quand $k * a > 14.6$

Cette étude comparative nous a permis d'identifier les pistes d'amélioration à envisager pour décrire au mieux la réalité physique de la propagation ultrasonore pour les grandeurs $k * a$ ciblées. L'interaction entre le faisceau ultrasonore en incidence oblique et le défaut plan débouchant de petite extension peuvent donner naissance en fonction des trajets ultrasonores impliqués à des phénomènes de propagation ultrasonore plus complexes. L'enjeu de la poursuite de ces travaux est de déterminer le compromis à atteindre entre la précision souhaitée et les coûts des calculs.

Les développements réalisés pour le prolongement de la configuration transversale du contrôle ultrasonore aux défauts externes ainsi que l'extension du **Simulateur VRCF** à la configuration longitudinale du contrôle ultrasonore sur tube ont également été abordés. L'ensemble de ces prolongements doit faire l'objet de validations expérimentales afin d'aboutir à un modèle bidimensionnel complet du contrôle ultrasonore sur tube. L'étude de configurations supplémentaires constitue également une étape indispensable afin de déterminer les performances du **Simulateur VRCF** par rapport aux différentes configurations de contrôle déployées dans les usines **Vallourec** et de déterminer l'approche appropriée à la configuration de contrôle ciblée.

Enfin, nous avons présenté une méthode d'estimation du tilt ainsi que de la profondeur des défauts à partir des trajets ultrasonores directs, indirects et diffractés. Cette méthode affiche des erreurs d'estimation pour les défauts tiltés. Toutefois, le raffinement de cette méthode, en tenant compte de certaines données images ultrasonores ainsi que de l'évolution des méthodes d'acquisition vers la **TFM**, permettra d'affiner les prédictions du processus d'inversion développé dans le cadre des travaux [1] en vue d'aboutir aux caractéristiques ciblées des défauts.

Bibliographie

- [1] A. SEGURA, «traitement et interprétation de l'imagerie tridimensionnelle de systèmes automatiques de contrôles non destructif de tube,» PhD Dissertation, Vallourec Research Aulnoye & Université de Technologies de Compiègne, 2009.
- [2] B. BISIAUX, «BKF Concept, BKF UT: Oblique and Longitudinal Flaw Detection WTM,» NDT Department, Rapport Interne VRCF, 2008.
- [3] VALLOUREC, «Vallourec Info,» *Vallourec info*, n° 190, p. 12, Communication interne Vallourec juillet 2014.
- [4] M. LEMAIRE et M. DEDIEU, «Technologie du tube d'acier: Technique des tubes sans soudures,» Paris, 1973 - Document de Formation Professionnelle Continue Vallourec.
- [5] BENOIT et JOUR, «Technologie du tube d'acier: Formage de L'acier,» Paris, 1973 - Document de Formation Professionnelle Continue VALLOUREC.
- [6] Comité Européen de Normalisation (CEN), *EN ISO 10893-10:2011: Essais non destructifs des tubes en acier. Partie 10: Contrôle automatisé par ultrasons sur toute la circonférence des tubes en acier sans soudure et soudés (sauf arc immergé sous flux en poudre) pour la détection des imperfections*, Bruxelles: Norme, 2011.
- [7] BOUCHON et VYERS, «Technologie du tube d'acier: Le Contrôle,» VALLOUREC, 1973 - Document de Formation Professionnelle Continue VALLOUREC.
- [8] J. PERDIJON, *Le contrôle non destructif par ultrasons*, Hermès éd., Hermès, Paris, 1993.
- [9] J. DUMONT-FILLON, «Contrôle Non Destructif (CND),» 1996 - Technique de l'ingénieur (r1400).
- [10] F. DENEUVILLE, *Initiation aux Contrôles Non Destructifs chez VALLOUREC*, Document de Formation Interne VRCF: VALLOUREC RESEARCH AULNOYE, 2010.
- [11] COFREND, «Confederation Française pour les Essais Non Destructifs,» [En ligne]. Available: https://www.cofrend.com/jcms/uat_128230/ultrasons-ut.
- [12] W. COMMONS, «WIKIPEDIA,» 2007. [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:SchmePiezo.gif>. [Accès le 2014].
- [13] OLYMPUS, «olympus-ims,» [En ligne]. Available: <https://www.olympus-ims.com/products/ndt-others/aqualene/>.

- [14] H. KRAUTKRAMER J., *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer, 1969, p. 521.
- [15] EXTENDE, «Manuel d'utilisation CIVA2015,» EXTENDE, 2015.
- [16] S. FOUREZ, «Contrôles Non Destructifs - Ultrasons Niveau3,» Documents de Formation Generale et Tronc Commun, POLE INDUSTRIEL CEM- Groupe Formation CCI Grand Hainaut, 2013.
- [17] A. FIDHAOUSSEN, P. CALMON et M. LAMBERT, «Developpement de techniques de reconstruction ultrasonore multi-elements pour la localisation et la caracterisation de defauts dans des pieces de geometrie complexe,» 2012.
- [18] A. NOEL, B. BISIAUX et F. LESAGE, «Application des Phased Array Matriciels pour le Contrôle ultrasonore sur tube,» Rapport interne Vallourec Research Center France 2006.
- [19] American Petroleum Institute, *Specification for Casing and Tubing*, N. Edition, Éd., Norme API Specification 5CT, January 1 st 2012, p. 284.
- [20] VALLOUREC UNIVERSITY, «Seminaire Metallurgie,» chez *Seminaire Metallurgie*, 2013.
- [21] A. SEGURA et F. LESAGE, «Evaluation of API 5UE Recommendation: defect's depth estimation using ACT and ADDT method,» Rapport interne VRCF, 2005.
- [22] P. DOYLE et C. SCALA, «Crack depth measurement by ultrasonics: a review,» *Ultrasonics*, pp. 164-170, 1978.
- [23] Olympus, «Appareil de recherche de défauts: Diagrammes AVG,» [En ligne]. Available: <http://www.olympus-ims.com/fr/atlas/dgs/>.
- [24] N. CHEBBO et N. MERCIER, «Predictions des echos de diffraction provenant de l'interaction d'un faisceau ultrasonore avec un defaut plan,» *International Journal on Acoustics*, vol. 87, pp. 461-469, 2001.
- [25] B. SHAKIBI, F. HONARVAR, M. D. C. MOLES, J. CALDWELL et A. N. SINCLAIR, «Resolution enhancement of Ultrasonic defect signals for crack sizing,» *NDT&E International*, vol. 52, pp. 37-50, 2012.
- [26] L. W. SCHMERR, B. J. ENGLE, A. SEDOV et X. LI, «AIP Conference Proceedings,» 2013. [En ligne]. Available: <http://proceedings.aip.org/>.
- [27] M. MOLES, L. WESLEY et T. SINCLAIR, «Accurate Defect sizing using phased arrays and signal processing,» chez *JRC-NDE*, 2009.

- [28] R. H. HERRERA, L. ZHAORUI, N. RAFFA, P. CHRISTENSEN et A. ELVERS, «Improving Time estimation by Blind Deconvolution: with Applications to TOFD and Backscatter Sizing,» chez *Canada's NDT Conference*, Edmonton, 2015.
- [29] D. LOUBOUTIN, «Ultrasonic Imaging of tilted notches,» Rapport Interne VRCF , p15, 2016.
- [30] M. LAMBERT, M. BONNET et D. LESSELIER, «Introduction à la diffraction inverse en acoustique et élasticité,» chez *Matériaux et acoustique*, Hermes, 2006.
- [31] L. W. SCHMERR et S.-J. SONG, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems - Models and Measurements*, Springer, 2007.
- [32] ACHENBACH, GAUTESSEN et McMAKEN, *Ray Methods for Wave in Elastic Solids, With applications to scattering by cracks*, London: PITMAN, 1982, p. 251.
- [33] M. DARMON, N. LEYMARIE, S. CHATILLON et S. MAHAUT, «Modelling of scattering of ultrasounds by flaws for NDT,» chez *Ultrasonic Wave Propagation in Non Homogenous Media*, 2009, pp. 61-71.
- [34] N. EL YADARI, «Identification des défauts vus lors d'un contrôle non destructif ultrasonore par méthode d'inversion basée sur des résultats de modèles directs,» PhD dissertation- Université Paris Diderot - Paris 7- 2006.
- [35] M. V. FELICE, A. VELICHKO et P. D. WILCOX, «Accurate Depth Measurement of Surface-Breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique,» *NDT&E*, n° %168, pp. 105-112, 2014.
- [36] A. FIDHAOUSSEN, «Developpement de methode de reconstruction ultrasonore pour la localisation et la caracterisation de defauts,» PhD Dissertation Université Paris-Sud 11 2012.
- [37] C. PRADA et M. FINK, «Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media,» *Wave Motion*, n° %120, pp. 151-163, 1994.
- [38] S. BANNOUF, «Developpement et optimisation de methodes d'imagerie synthetique pour le controle non-destructif par ultrasons de composants industriels complexes,» PhD dissertation UNIVERSITE PARIS DIDEROT (Paris 7) & CEA List & INSTITUT LANGEVIN 2014.
- [39] P. Y. UFIMTSEV, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, John Wiley & Sons, Inc., 2007, p. 329.

- [40] J. B. KELLER, «A Geometrical Theory of Diffraction, Calculus of Variations and its applications,» chez *Symposium Appl Math Mc Graw-Hill*, New York, 1958.
- [41] J. E. GUBERNATIS, E. DOMANY et A. KRUMHANSL, «Elastic wave scattering theory with application to nondestructive evaluation,» New Mexico, 1979.
- [42] J. J. BOWMAN, T. B. A. SENIOR et P. L. E. USLENGHI, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, Amsterdam: North-Holland, 1969.
- [43] L. ZHILIN, «AN OVERVIEW OF THE IMMERSSED INTERFACE METHOD,» *TAIWANESE JOURNAL OF MATHEMATICS*, vol. 7, n° 11, pp. 1-49, 2003.
- [44] C. ZHANG, J. RANDALL et B. LEVEQUE, «The immersed interface method for acoustic wave equations with discontinuous coefficients,» *Wave Motion*, n° 125, pp. 237-263, 1997.
- [45] N. SAAD, «Caractérisation par ondes acoustiques des surfaces fonctionnalisées,» 135, PhD Dissertation, 2012.
- [46] J. ACHENBACH, *Wave propagation in elastic solids*, ELSEVIER Science Publishers B.V., 2005, p. 425.
- [47] P. BOLLAND, «Traitement d'images ultrasonores: étude et application de la transformation de Hough aux échos de diffraction,» 1999.
- [48] M. BRUNEAU, *Manuel d'acoustique fondamentale*, Hermes.
- [49] A. H. NAYFEH, *Perturbation Methods*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [50] P. C. BRUNEAU Michel, *Acoustique Générale: Equations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluide et solide, applications*, Collection Technosup éd., Ellipse, 2006.
- [51] KELLER et KARAL, «Elastic wave propagation in homogenous and inhomogenous media,» *Acoustical Society of America*, n° 131, 1959.
- [52] V. ZERNOV, L. FRADKLIN, A. GAUTESSEN, M. DARMON et P. CALMON, «Wedge diffraction of a critically incident Gaussian beam,» *Wave Motion*, vol. 50, pp. 708-722, 2013.
- [53] V. ZERNOV, L. FRADKLIN, A. GAUTESSEN et M. DARMON, «Aspects of diffraction of a creeping waves by back-wall crack,» chez *10th Anglo-French Physical Acoustics Conference*, 2010.

- [54] B. BAKER et E. T. COPSEN, *The Mathematical Theory of Huygens' Principle*, American Mathematical Society, 2003.
- [55] A. SOMMERFELD, *Mathematical Theory of Diffraction*, vol. 35, Springer Science+Business Media, LLC, 2004, p. 162.
- [56] H. M. MACDONALD, «The effect produced by an obstacle on a train of electric waves,» n° 1212, pp. 299-387, 1912.
- [57] L. BO, «Modélisation de la propagation et de l'interaction d'une onde acoustique pour la télémétrie de structures complexes,» PhD Dissertation-Université du Maine, Le Mans, France-2011.
- [58] M. DARMON, V. DORVAL, A. KAMTA DJAKOU, L. FRADKIN et S. CHATILLON, «A system model for ultrasonic NDT based on the Physical Theory of Diffraction (PTD),» *Ultrasonics*, vol. 64, p. 115–127, January 2016.
- [59] Y. ZIYAUMUL, «A new representation of the Kirchhoff's diffraction integral,» *Optics Communications*, pp. 48-51, 2013.
- [60] M. MEPHANE, «Modélisation d'un contrôle ultrasonore de tubes d'acier présentant des défauts type "entaille longitudinale",» PhD Dissertation -CEA/Vallourec- 1998.
- [61] CEA_List, «<http://www-list.cea.fr>,» [En ligne].
- [62] M. DARMON et S. CHATILLON, «Main Features of a Complete Ultrasonic Measurement Model: Formal Aspects of Modeling of Both Transducers Radiation and Ultrasonic Flaws Responses,» *Open Journal of Acoustics*, vol. 3, pp. 43-53, 2013.
- [63] S. MAHAUT, S. CHATILLON, N. LEYMARIE, R. RAILLON, P. CALMON et M. DARMON, «AN OVERVIEW OF ULTRASONIC BEAM PROPAGATION AND FLAW SCATTERING MODELS IN THE CIVA SOFTWARE,» chez *Review of Progress in Quantitative NDE*, San Diego, California, 2010.
- [64] N. GENGEMBRE et A. LHEMERY, «Pencil method in elastodynamics: application to application to ultrasonic field computation,» *Ultrasonics*, vol. 38, pp. 495-499, 2000.
- [65] R. RAILLON et I. LECOEUR-TAIBI, «Transient elastodynamic model for beam defect interaction: application to non-destructive testing,» *Ultrasonics*, vol. 38, n° 1527-530, 2000.
- [66] R. R. F. J. S. C. S. L. Gwénaél TOULLELAN, «UNE REVUE DES TRAVAUX DE VALIDATION DU LOGICIEL CIVA UT,» chez *Cofrend2014*, 2014.

- [67] M. LAVAL, «étude de la diffraction subie par le champ US d'un traducteur focalisé en présence d'un défaut –prédiction de la réponse échographique d'un défaut donné,» 292, Manuscrit de these- Université de Paris 06, 1992.
- [68] C. S. P.A. DOYLE, «Crack depth measurement by ultrasonics: a review,» *Ultrasonics*, pp. 164-170, 1978.
- [69] R. Olivier, «Etude des méthodes ultrasonores adaptées au dimensionnement et à la caractérisation des défauts dans des structures de faibles épaisseurs: analyse de l'effet coin,» PhD dissertation - Université Paris 7 - 1994.
- [70] «Contrôle Non Destructif par ultrasons niveau3,» Institut National des Sciences Appliquées - Lyon, 2003.
- [71] V. STENGER et A. BARBAZZA, «Entailles tiltées sur plaque en acier,» Rapport de Controle d'entailles usinées MEIRS, 2014.
- [72] C. CROUZAT, «Conclusions of Notch Quality and Reference Pipe choice effect on UT response,» Rapport interne Vallourec- Vallourec Research Center France (VRCF), 2013.
- [73] F. PETIT, «Utilisation de la cuve US et du logiciel UTWIN2,» Mode Operatoire CND VRCF, 2015.
- [74] P. W. H. W. B. TOULMONDE, «Reproductibilité des resultats US sur defauts longitudinaux: influence des entailles etalons, du transducteur et du réglage acoustique,» 1991.
- [75] N. E. 12668-2, «Essais Non Destructifs: Caracterisation et verification de l'appareillage de controle par ultrasons. Partie2: Transducteurs,» Norme Europeenne- Norme Française, 0335 3931, 2010.
- [76] J. MOYSAN, «Imagerie numerique ultrasonore pour la detection automatique des defauts en controle non destructif,» PhD Dissertation - Institut Nationale des Sciences Appliquées de LYON - 1992.
- [77] R. K. CHAPMAN, «Ultrasonic reflection from smooth flat crack: exact solution for the semi-infinite crack,» 1981.
- [78] R. K. CHAPMAN, «Ultrasonic scattering from smooth Flat Cracks: an elastodynamic Kirchhoff Diffraction Theory,» 1984.
- [79] R. K. CHAPMAN et J. M. COFFEY, «Ultrasonic Scattering from Smooth Flat Crack: Edge Wave Signals from finite Cracks with Curved Edges,» 1982.

- [80] V. ZERNOV, L. FRADKIN, A. GAUTESEN et M. DARMON, «Aspects of diffraction of a creeping waves by back-wall crack,» 2010.
- [81] A. KAMTA DJAKOU, M. DARMON, L. FRADKLIN et C. POTEL, «The Uniform Theory of Diffraction for elastodynamics: Plane wave scattering from a half plane,» *Acoust. Soc. Am.*, vol. 5, n° 1138, pp. 3272-3281, 2015.
- [82] EXTENDE, «Echos de coin en ondes T,» [En ligne]. Available: <http://www.extende.com/fr/>.
- [83] B. SHAKIBI, F. HONARVAR, M. MOLES, J. CALDWELL et A. N. SINCLAIR, «Resolution enhancement of Ultrasonic defect signals for crack sizing,» *NDT&E International*, vol. 52, pp. 37-50, 2012.