

Une approche POD par simulation d'un contrôle ultrasonore industriel

Romain Hodé¹, Benoît Dupont¹, Jérôme Dudous²,
Laura Clément², Sébastien Lonné², Fabrice Foucher²

¹ CETIM, France

² Extende, France.

*corresponding authors, E-mail: romain.hode@cetim.fr, fabrice.foucher@extende.com

Résumé

Pour répondre au besoin de fiabilisation des contrôles non destructifs (CND), l'utilisation d'indicateurs statistiques tels que la probabilité de détection (POD) présente un fort intérêt. Cela permet notamment de définir les performances en détection d'une technique de contrôle CND en considérant la variabilité de paramètres influents. La réalisation expérimentale d'une étude POD nécessite l'approvisionnement d'un grand nombre de maquettes avec des défauts calibrés et de différentes dimensions ; ce qui pose des difficultés de mise en œuvre et représente un coût élevé. Une approche basée sur l'utilisation de simulations numériques est par conséquent intéressante.

Pour évaluer l'intérêt d'une telle approche dans un cadre industriel, deux études POD ont été réalisées à l'aide du logiciel de simulation numérique CIVA. La première pour un contrôle CND par ultrasons (UT) à l'aide d'une sonde monoélément et la seconde avec une sonde multiélément. La structure étudiée est un assemblage de deux plaques en acier soudées bout-à-bout avec un défaut de type « manque de fusion » orienté parfaitement le long du chanfrein en « V ». La démarche complète permettant d'obtenir les courbes POD simulées a été mise en place. Les différentes étapes pour aboutir aux tracés des courbes POD sont introduites dans cet article, en particulier pour le cas UT multiélément. Les paramètres les plus influents sur le résultat du contrôle CND par ultrasons (monoélément et multiélément) sont déterminés à l'aide des indices de Sobol. Une comparaison entre les résultats obtenus pour le cas UT monoélément et UT multiélément est présentée pour différents scénarios de contrôle.

1. Introduction

La probabilité de détection (POD) et en particulier les courbes POD constituent un indicateur statistique permettant d'estimer la plus grande taille d'un défaut pouvant ne pas être détecté par un procédé END donné en considérant la variabilité des paramètres influents inhérente à une inspection (incertitudes sur les caractéristiques du défaut, de la pièce, du capteur et de sa mise en œuvre, facteurs

environnementaux voire facteurs humains). [1-3] En particulier, on recherche généralement la taille de défaut pour laquelle on atteint une probabilité de détection de 90% avec 95% de confiance. Cet indicateur participe à la qualification d'une procédure de contrôle pour une structure (géométrie, matériau) et donc à sa fiabilité.

Les indicateurs statistiques doivent s'appuyer sur un volume de données suffisant pour constituer une information fiable, c'est la notion de « confiance » statistique. Or, il est complexe et coûteux de générer un volume de données suffisant via une approche purement expérimentale. C'est particulièrement le cas pour les paramètres influents liés à la pièce et au défaut car cela induit la construction de nombreuses maquettes et il est délicat de maîtriser sur ces maquettes l'évolution de certains paramètres (par exemple les propriétés matériaux) ou de fabriquer certains défauts (défauts internes notamment) afin de disposer d'un nombre suffisant d'échantillons représentatifs. C'est pourquoi une approche par modélisation et simulation s'avère particulièrement intéressante. C'est l'approche appelée « MAPOD » pour Model Assisted POD.

Le logiciel de simulation CIVA propose un environnement « métier » dédié au CND et permet d'évaluer l'impact de nombreux paramètres influents sur un contrôle, et ce, pour différentes méthodes END. Il est alors possible de piloter précisément la variation de ces paramètres influents au sein d'études paramétriques et ainsi de générer rapidement et à moindre coût le volume de données requis pour ce type d'étude. De plus, CIVA permet d'exploiter des métamodèles. Construits à partir d'un premier jeu de simulations, les métamodèles permettent de rééchantillonner le jeu de données à volonté et ainsi explorer de multiples scénarii d'inspection en temps réel, sans avoir à relancer de calculs. Le logiciel CIVA permet de simuler les méthodes UT, ET, RT-CT, TT, GWT (ondes guidées) ainsi que le monitoring santé des structures « SHM » (Structural Health Monitoring).

Cette article illustre l'utilisation de cet outil dans le cadre d'une étude de POD d'un contrôle de soudures par ultrasons. Il présente dans un premier temps le cas industriel puis expose la méthodologie globale d'une approche MAPOD. La



simulation d'un contrôle par sonde multiélément est décrite. Une analyse en sensibilité des paramètres influents puis une étude POD est ensuite menée. Un contrôle conventionnel de cette même soudure est également considéré.

2. Présentation du cas industriel traité

Le cas industriel traité est une soudure bout-à-bout de deux plaques en acier. La géométrie, le matériau, le défaut et les deux techniques de contrôle par ultrasons sont présentés dans cette partie. Les paramètres donnés ci-dessous correspondent à la configuration nominale définie dans le logiciel CIVA.

2.1. Géométrie

La soudure bout-à-bout étudiée est composée de deux plaques d'épaisseur nominale 15 mm. Cette structure soudée possède un chanfrein en « V » représenté sur la Figure 1, avec un angle nominal du chanfrein égal à 60°.

2.2. Matériau

Les deux plaques soudées sont en acier. La masse volumique est égale à 7,8 g.cm⁻³. La célérité nominale des ondes de volume longitudinales est 5 920 m.s⁻¹ et celle des ondes transversales est 3 255 m.s⁻¹. L'atténuation des ondes ultrasonores dans la matière ainsi que le bruit de structure ne sont pas considérés dans cette étude.

2.3. Défaut

Le défaut considéré est de type « manque de fusion » parfaitement orienté le long du chanfrein (voir Figure 1). Les valeurs nominales des trois paramètres définissant la position et la dimension de ce manque de fusion sont sa profondeur « p » (valeur nominale 7 mm), sa hauteur « h_d » (valeur nominale 2 mm) et sa longueur « l_d » (valeur nominale 5 mm).



Figure 1 - Positionnement du manque de fusion. A gauche : vue en coupe du défaut dans le plan (Oxz). A droite : vue 3D de la soudure bout-à-bout (chanfrein en « V ») et du défaut.

2.4. Techniques de contrôle et modes opératoires

Deux techniques de contrôle ultrasonores sont étudiées : par sonde monoélément et par sonde multiélément. Ces deux techniques sont présentées dans les parties 2.4.1 et 2.4.2.

2.4.1. Sonde monoélément

La sonde monoélément est du type MWB60-4 (GE). La pastille est de forme rectangulaire, de longueur 9 mm et de

largeur 8 mm. La fréquence centrale nominale est égale à 4 MHz. Les ondes transversales sont générées avec un angle de 60° par rapport à la normale à la surface de la pièce inspectée à l'aide d'un sabot.

2.4.2. Sonde multiélément

La sonde multiélément est du type 5L64-A2 (Olympus) avec un sabot du type SA2-N55S. Ce transducteur possède 64 éléments de forme rectangulaire disposés linéairement (pitch 0,6 mm). La fréquence centrale nominale est égale à 5 MHz. Un balayage électronique linéaire est simulé en ondes transversales avec un angle de 60° par rapport à la normale à la surface de la pièce inspectée (voir Figure 2). L'ouverture active est égale à 9,5x10 mm² (16 éléments).

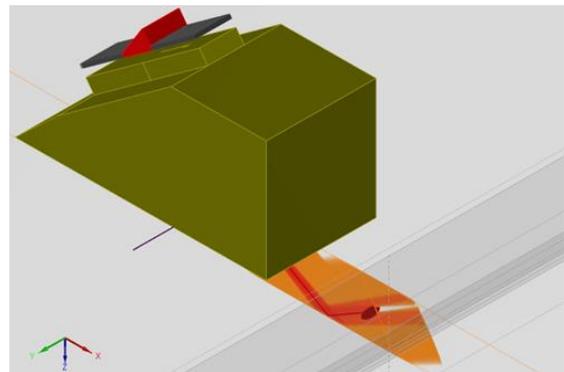


Figure 2 - Vue 3D du transducteur multiélément, du sabot et de la soudure avec le défaut de type « manque de fusion ».

3. Méthodologie générale – application au cas ultrasons multiéléments

3.1. Démarche utilisée

La méthodologie globale d'une étude MAPOD peut se résumer par les phases suivantes :

- Définition et vérification de la configuration nominale ;
- Choix des paramètres influents et études préliminaires permettant de préparer les plans d'expériences ;
- Etudes paramétriques (réalisation des plans d'expériences) ;
- Analyses de sensibilité : analyse de l'impact des paramètres influents, réduction du nombre de paramètres influents aux paramètres essentiels ;
- Calculs POD.

La définition de la configuration nominale doit s'appuyer sur une bonne connaissance du cas réel. Elle implique donc une documentation suffisante, potentiellement des mesures (dimensionnelles, propriétés matière) et des échanges techniques entre les différents acteurs. Une fois les paramètres renseignés, il faut s'assurer que les paramètres de réglage (par exemple pour CIVA, le facteur de maillage, les modes pris en compte) sont pertinents en termes de précision et de temps de calcul, avant de lancer l'ensemble des études

paramétriques. On doit également s’assurer que les modélisations sont compatibles avec le domaine de validité des modèles. On peut également se référer à des études de validation (voir par exemple la section « validation » de <https://www.extende.com/fr>) et réaliser quelques comparaisons expérimentales.

Deux études MAPOD ont été menées, la première appliquée au cas UT monoélément et la seconde au cas UT multiélément. Seuls les résultats des études paramétriques, des analyses de sensibilité et des calculs POD pour le cas UT multiélément sont présentés dans cette article, respectivement dans les parties 3.2, 3.3 et 3.4.

3.2. Etudes paramétriques

Pour l’étude MAPOD considérée en UT multiélément, une première liste de paramètres influents a été établie. Cette liste est présentée dans le Tableau 1. Pour chaque paramètre, une valeur nominale est fixée, ainsi qu’une plage de variation. Cette étape a été réalisée à partir des retours d’expérience acquis concernant ces pratiques CND, des normes en vigueur et des échanges techniques entre les partenaires.

Tableau 1 - Liste des paramètres influents considérés.

Paramètres influents considérés	Valeur nominale	Plages de variation [min ; max]
Epaisseur des plaques	15 mm	[13,5 mm ; 16,5 mm]
Angle du chanfrein	60°	[57° ; 63°]
Célérité des ondes transversales (T)	3255 m/s	[3155 m/s ; 3355 m/s]
Hauteur du défaut	2 mm	[0,6 mm ; 4 mm]
Longueur du défaut	5 mm	[0,8 mm ; 30,8 mm]
Profondeur	7 mm	[4,5 mm ; 9,5 mm]
Fréquence centrale de la sonde multiélément	5 MHz	[4,5 MHz ; 5,5 MHz] ¹
Hauteur du sabot	27,4 mm	[25,8 mm ; 27,4 mm]
Angle d’incidence du sabot	36°	[35° ; 37°]
Célérité des ondes longitudinales dans le sabot	2330 m/s	[2280 m/s ; 2380 m/s]
Rotation de la sonde autour de l’axe z	0°	[-10° ; 10°]
Position initiale de la sonde selon l’axe y	174,5 mm	[173,5 mm ; 175,5 mm]
Pas d’incrément de la sonde selon l’axe y	2 mm	[0,5 mm ; 4 mm]

¹ Plage de variation inspirée de la norme NF EN ISO 18563-1 (Chapitre 9, Section 9.4.2.2) indiquant que la fréquence centrale doit se situer dans des limites de ±10%.

L’intérêt de cette étape est d’exclure de cette liste certains paramètres qui ont un impact négligeable sur la sortie, en l’occurrence l’amplitude du signal réfléchi par le défaut cible. Pour cela, et uniquement dans cette première étape, chaque paramètre est étudié indépendamment des autres. Le principe consiste à simuler l’amplitude du signal réfléchi par le défaut en faisant varier la valeur du paramètre étudié dans sa plage de variation. Les autres paramètres sont quant à eux fixés à leur valeur nominale.

Plusieurs études paramétriques ont été réalisées avec les paramètres considérés dans le Tableau 1 (soit treize études paramétriques au total). Les paramètres qui n’ont pas été retenus par la suite sont ceux répertoriés ci-dessous :

- l’épaisseur des plaques ;
- l’angle du chanfrein ;
- la profondeur du défaut ;
- la hauteur du sabot ;
- l’angle d’incidence du sabot ;
- la célérité des ondes longitudinales dans le sabot.

Suite à ces études paramétriques, des analyses de sensibilité ont été réalisées. Cela fait l’objet de la partie suivante.

3.3. Analyses de sensibilité

L’objectif de cette étape est d’étudier l’impact des paramètres sur le signal de sortie et de classer les paramètres du plus influent au moins influent pour un scénario de contrôle défini. Ce travail peut être divisé en trois parties. La première partie consiste à générer des métamodèles avec les paramètres influents retenus suite aux études paramétriques. La deuxième partie a pour but de vérifier les résultats obtenus avec ces métamodèles, notamment en les comparant aux résultats des simulations paramétriques. La troisième partie vise à obtenir les résultats des analyses de sensibilité pour un scénario de contrôle défini. Le nombre de paramètres qu’il est possible d’intégrer dans un même métamodèle étant limité, deux premiers métamodèles ont été réalisés pour effectuer un premier tri des paramètres. Un métamodèle final a ensuite été obtenu en conservant les paramètres les plus influents, voir Tableau 2.

La génération de ce métamodèle final a été réalisée en effectuant 3510 simulations numériques (correspondant à 3510 tirages aléatoires) avec le logiciel CIVA. Ces calculs ont été réalisés sur deux machines différentes. Sur la première machine (processeur Intel® Xeon® CPU E5-2650 v3 @ 2.30 GHz, RAM : 32 Go), le temps de calcul était de 1965 heures, soit environ 82 jours. Sur la seconde machine (processeur AMD RYZEN 9 3900X 12-Cœurs @ 3,80 GHz, RAM : 128 Go), le temps de calcul était

de 836 heures, soit environ 35 jours. Un interpolateur de type « Radial Basis Function » (RBF) a été utilisé pour minimiser l'erreur entre la prédiction du métamodèle et les résultats calculés. Une illustration est présentée sur la Figure 3.

Tableau 2 – Définition du métamodèle final.

Paramètres influents considérés	Valeur nominale	Plages de variation [min ; max]
Célérité des ondes T	3255 m/s	[3155 m/s ; 3355 m/s]
Hauteur du défaut	2 mm	[0,6 mm ; 4 mm]
Longueur du défaut	5 mm	[0,8 mm ; 30,8 mm]
Rotation de la sonde autour de l'axe z	0°	[-10° ; 10°]
Position initiale de la sonde selon l'axe y	174,5 mm	[173,5 mm ; 175,5 mm]
Pas d'incrément de la sonde selon l'axe y	2 mm	[0,5 mm ; 4 mm]

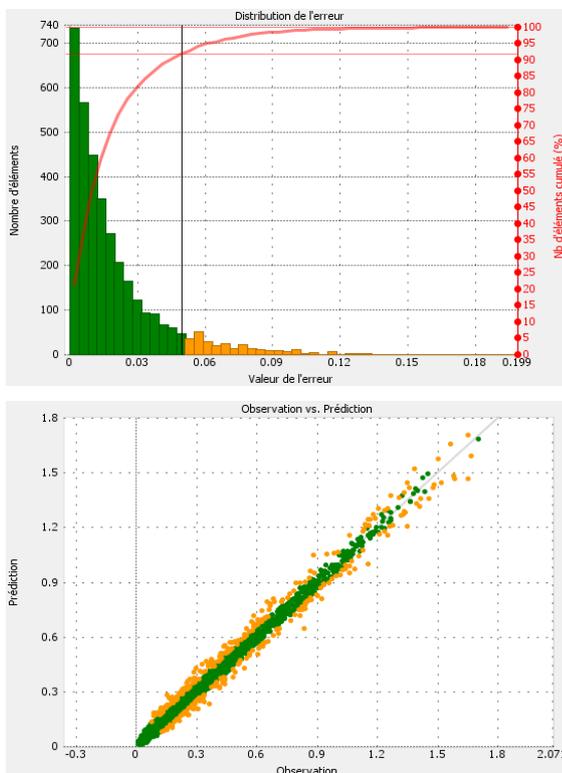


Figure 3 – Captures d'écran issues du logiciel CIVA pour le métamodèle final. En haut : tracé de la distribution de l'erreur (en vert : erreurs inférieures à 5%, en orange : erreurs comprises entre 5% et 20%). En bas : tracé des prédictions du métamodèle vis-à-vis des résultats calculés. Interpolateur utilisé : « Radial Basis Function » (RBF).

Trois scénarios de contrôle ont été définis :

- Scénario 1 : distributions uniformes (voir Tableau 3). Dans ce scénario, toutes les distributions (à part celle de

la hauteur du défaut) sont considérées comme uniformes sur l'ensemble de la plage de variation ;

- Scénario 2 : inspections « optimales » (voir Tableau 4). Ce scénario modélise une inspection « optimale » car des distributions normales sont définies pour les paramètres : « célérité des ondes transversales », « rotation de la sonde autour de l'axe z » et « pas d'incrément de la sonde selon l'axe y ». La variabilité des paramètres est donc restreinte autour de leur valeur nominale (en fonction de l'écart-type défini) ;
- Scénario 3 : inspections « dégradées » (voir Tableau 5). Les distributions proposées dans ce scénario sont similaires à celle du scénario 2 mais les valeurs moyennes et écart-types sont différentes, notamment pour les paramètres « rotation de la sonde autour de l'axe z » et « pas d'incrément de la sonde selon l'axe y ».

Des analyses de sensibilité ont été réalisées avec le métamodèle défini au Tableau 2. Ces études de sensibilité ont été obtenues avec le logiciel CIVA en traçant la valeur des indices de Sobol pour chaque paramètre influent. Cela a permis de classer les paramètres du plus influent au moins influent pour un certain scénario de contrôle. Le tracé de ces indices de Sobol est présenté sur la Figure 5 pour le scénario 2 (inspections « optimales », voir Tableau 4) dans le cas UT multiélément. Le métamodèle permet de naviguer d'un scénario à l'autre en temps réel, sans avoir à relancer de simulations. Pour ce scénario, les trois paramètres les plus influents sont : la rotation de la sonde autour de l'axe z, la hauteur du défaut et la longueur du défaut (voir Figure 1 et Figure 2 pour la visualisation de ces paramètres et du repère cartésien utilisé).

Tableau 3 – Scénario 1 : distributions uniformes.

Paramètres influents considérés	Plages de variation [min ; max]	Distribution	Moyenne, écart-type
Célérité des ondes T	[3155 m/s ; 3355 m/s]	Uniforme	-
Hauteur du défaut	[0,6 mm ; 4 mm]	Liste arithmétique	-
Longueur du défaut	[0,8 mm ; 30,8 mm]	Uniforme	-
Rotation de la sonde autour de l'axe z	[-10° ; 10°]	Uniforme	-
Position initiale de la sonde selon l'axe y	[173,5 mm ; 175,5 mm]	Uniforme	-
Pas d'incrément de la sonde selon l'axe y	[0,5 mm ; 4 mm]	Uniforme	-

Tableau 4 – Scénario 2 : inspections « optimales ».

Paramètres influents considérés	Plages de variation [min ; max]	Distribution	Moyenne, écart-type
Célérité des ondes T	[3155 m/s ; 3355 m/s]	Normale	3255 ± 30 m/s
Hauteur du défaut	[0,6 mm ; 4 mm]	Liste arithmétique	-
Longueur du défaut	[0,8 mm ; 30,8 mm]	Uniforme	-
Rotation de la sonde autour de l'axe z	[-10° ; 10°]	Normale	0° ± 3°
Position initiale de la sonde selon l'axe y	[173,5 mm ; 175,5 mm]	Uniforme	-
Pas d'incrément de la sonde selon l'axe y	[0,5 mm ; 4 mm]	Normale	0,5 ± 1 mm

Tableau 5 – Scénario 3 : inspections « dégradées ».

Paramètres influents considérés	Plages de variation [min ; max]	Distribution	Moyenne, écart-type
Célérité des ondes T	[3155 m/s ; 3355 m/s]	Normale	3255 ± 30 m/s
Hauteur du défaut	[0,6 mm ; 4 mm]	Liste arithmétique	-
Longueur du défaut	[0,8 mm ; 30,8 mm]	Uniforme	-
Rotation de la sonde autour de l'axe z	[-10° ; 10°]	Normale	0° ± 7,5°
Position initiale de la sonde selon l'axe y	[173,5 mm ; 175,5 mm]	Uniforme	-
Pas d'incrément de la sonde selon l'axe y	[0,5 mm ; 4 mm]	Normale	4 ± 2,5 mm

3.4. Calculs POD

Suite à ces études de sensibilité, des calculs POD ont été menés pour les différents scénarios de contrôle : scénario 1 (distributions uniformes, voir Tableau 3), scénario 2 (inspections « optimales », voir Tableau 4) et scénario 3 (inspections « dégradées », Tableau 5). Les résultats des études POD en utilisant le métamodèle final sont présentés sur le Tableau 6. Ceux-ci sont discutés dans la partie suivante où les résultats des études POD en UT monoélément et UT multiélément sont comparés.

4. Comparaison UT monoélément/ UT multiélément

La méthodologie appliquée à l'étude MAPOD pour le cas UT multiélément, présentée à la partie 3.1, a aussi été mise en œuvre pour le cas UT monoélément. La sonde monoélément simulée est décrite à la partie 2.4.1. Les résultats des analyses de sensibilité et des études POD pour les cas UT multiélément et UT monoélément sont comparés ci-dessous.

4.1. Analyses de sensibilité

Les résultats des analyses de sensibilité pour le scénario 2 (inspections « optimales », voir Tableau 4) sont présentés pour le cas UT monoélément sur la Figure 4 et sur la Figure 5 pour le cas UT multiélément.

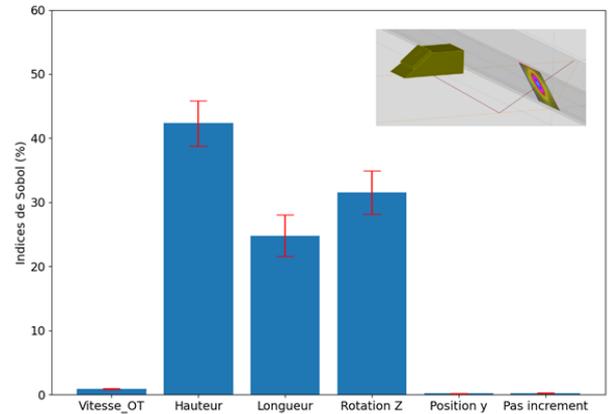


Figure 4 – Analyses de sensibilité pour le scénario 2 (inspections « optimales »). Représentation des indices de Sobol (en %) pour le cas UT monoélément. Les valeurs des indices de Sobol pour chaque paramètre influent sont données en pourcentage (avec les barres d'erreur associées représentées en rouge).

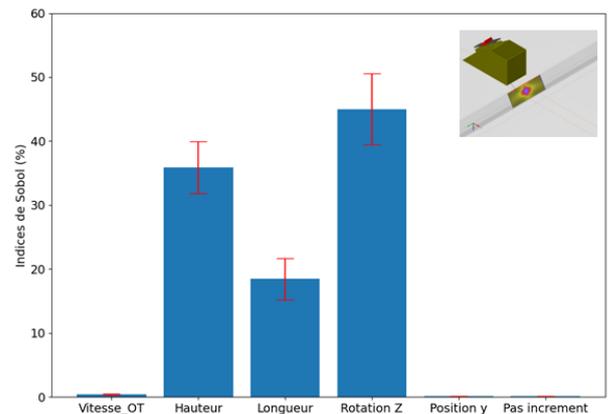


Figure 5 – Analyses de sensibilité pour le scénario 2 (inspections « optimales »). Représentation des indices de Sobol pour le cas UT multiélément. Les valeurs des indices de Sobol pour chaque paramètre influent sont données en pourcentage (avec les barres d'erreur associées représentées en rouge).

Dans les deux cas, les six paramètres influents retenus sont : la célérité des ondes transversales dans la pièce, la hauteur du défaut, la longueur du défaut, la rotation de la sonde autour de l'axe z, la position initiale de la sonde selon l'axe y et le pas d'incrément de la sonde selon l'axe y. Pour chaque paramètre influent, les indices de Sobol sont tracés en pourcentage.

Les trois paramètres les plus influents, pour le cas UT monoélément et pour le cas UT multiélément, sont : la hauteur du défaut, la longueur du défaut et la rotation de la sonde autour de l'axe z. De plus, d'après les indices de Sobol tracés sur la Figure 4 et la Figure 5, le paramètre « hauteur du défaut » est plus influent que le paramètre « longueur du défaut ». En revanche, le paramètre « rotation de la sonde autour de l'axe z » est le paramètre le plus influent pour le cas UT multiélément, alors que dans le cas UT monoélément, le paramètre le plus influent est la hauteur du défaut. Ce point est discuté dans la partie 4.3.

4.2. Etudes POD

Les résultats des études POD obtenus avec le métamodèle final dans les cas UT monoélément et UT multiélément, pour les trois scénarios de contrôle, sont présentés dans le Tableau 6. Le paramètre caractéristique de ces études POD est la hauteur du défaut. Le paramètre noté $A_{90/95}$ est la dimension de ce paramètre caractéristique pour obtenir une probabilité de détection égale à 90%, avec un niveau de confiance de 95%. Cette valeur $A_{90/95}$ est donnée pour un seuil de détection fixé à -6 dB et -12 dB par rapport à un étalonnage en sensibilité, réalisé par « Time Corrected Gain » (TCG), sur des trous de génératrice de diamètre 3 mm et à trois profondeurs différentes : 15 mm, 20 mm et 30 mm.

Tableau 6 - Valeurs du paramètre $A_{90/95}$ pour les études POD (données de type « Hit/Miss ») en UT monoélément et UT multiélément, pour deux seuils différents (-6 dB et -12 dB).

		Scénario 1 <i>Distributions uniformes</i>	Scénario 2 <i>Inspections « optimales »</i>	Scénario 3 <i>Inspections « dégradées »</i>
UT monoélément	$A_{90/95}$ -6 dB	3,77 mm	1,40 mm	3,92 mm
	$A_{90/95}$ -12 dB	1,65 mm	0,69 mm	1,79 mm
UT multiélément	$A_{90/95}$ -6 dB	-	1,72 mm	-
	$A_{90/95}$ -12 dB	3,36 mm	0,87 mm	2,54 mm

La plus faible valeur de $A_{90/95}$ est obtenue, dans les deux cas (UT monoélément et UT multiélément), pour le scénario 2 (inspections « optimales »). Pour un seuil fixé à -6 dB, la valeur de $A_{90/95}$ est égale à 1,40 mm pour le cas UT monoélément et 1,72 mm pour le cas UT multiélément. Cette différence sur la valeur de $A_{90/95}$ est principalement due à l'influence du paramètre « rotation de la sonde autour de l'axe z » qui est plus importante pour le cas UT multiélément que pour le cas UT monoélément (voir Figure 4 et Figure 5). Ce point est abordé dans la partie suivante.

4.3. Discussion sur la rotation de la sonde autour de l'axe z

La différence observée sur la valeur du paramètre $A_{90/95}$ pour les cas UT monoélément et UT multiélément [scénario 2 (inspections « optimales »), voir Tableau 4] est discutée dans cette partie. En effet, comme observé à la partie 4.2, la valeur $A_{90/95}$ concernant le paramètre caractéristique « hauteur du défaut » est plus faible pour le cas UT monoélément que pour le cas UT multiélément (voir Tableau 6). Cette différence est due à l'influence plus importante de la rotation de la sonde autour de l'axe z pour le cas UT multiélément que pour le cas UT monoélément (voir les tracés des indices de Sobol à la Figure 4 et à la Figure 5). Cette influence sur la rotation de la sonde est notamment liée aux propriétés acoustiques du faisceau ultrasonore qui sont différentes dans les deux cas. En effet, les traducteurs utilisés dans ces simulations numériques sont inspirés de modèles commerciaux couramment utilisés et ont des caractéristiques différentes.

Tableau 7 - Valeurs du paramètre $A_{90/95}$ pour le scénario 2 et le scénario 2*.

		Scénario 2 <i>Inspections « optimales »</i> (écart-type sur l'angle de rotation : $\pm 3^\circ$)	Scénario 2* <i>Inspections « optimales »</i> (écart-type sur l'angle de rotation : $\pm 1^\circ$)
UT monoélément	$A_{90/95}$ -6 dB	1,40 mm	1,02 mm
	$A_{90/95}$ -12 dB	0,69 mm	0,61 mm
UT multiélément	$A_{90/95}$ -6 dB	1,72 mm	0,96 mm
	$A_{90/95}$ -12 dB	0,87 mm	0,66 mm

Par exemple, l'ouverture et la fréquence centrale des traducteurs monoélément et multiélément sont différentes : fréquence centrale 4 MHz et ouverture 8x9 mm² pour la sonde monoélément, fréquence centrale 5 MHz et

ouverture 9,5x10 mm² (16 éléments actifs) pour la sonde multiélément. Cela engendre une influence plus grande de la rotation de la sonde autour de l'axe z dans le cas UT multiélément que dans le cas UT monoélément sur l'amplitude du signal réfléchi par le défaut. Pour illustrer ce point, un nouveau scénario (nommé scénario 2*) a été défini. Celui-ci est similaire au scénario 2 présenté au Tableau 4 mais avec une valeur d'écart-type sur la rotation de la sonde autour de l'axe z égale à $\pm 1^\circ$ au lieu de $\pm 3^\circ$.

Les résultats des études POD avec les scénarios 2 et 2* sont présentés dans le Tableau 7. Dans ce nouveau scénario 2*, les valeurs de $A_{90/95}$ sont très proches dans les cas UT monoélément et UT multiélément. Le scénario 2* semble bien plus probable pour le cas UT multiélément que pour le cas UT monoélément pour les raisons suivantes. Premièrement, la mise en œuvre d'un contrôle avec un transducteur multiélément s'accompagne plus généralement d'un système de guidage pour réaliser un balayage mécanique de la soudure ; ce qui réduit potentiellement l'occurrence de variations d'angle. Deuxièmement, l'utilisation d'un système de codage de la position lors du balayage mécanique (exemple : encodeur à fil) peut permettre de réduire la variabilité associée au pas d'incrément de la sonde. Troisièmement, l'imagerie obtenue par UT multiélément a pour avantage de conserver une traçabilité du contrôle réalisé et peut éventuellement réduire la probabilité de manquer un maximum d'amplitude. Pour ces différentes raisons, il semble plus probable d'être dans le scénario 2* pour le cas UT multiélément que pour le cas UT monoélément.

5. Conclusion et perspectives

Deux études MAPOD ont été menées avec le logiciel de simulation numérique CIVA pour le contrôle d'un assemblage soudé par ultrasons (UT) utilisant soit un transducteur monoélément, soit un transducteur multiélément. La démarche complète permettant d'aboutir au tracé de courbes POD simulées pour différents scénarios de contrôle a été mise en place. Cinq étapes ont été successivement réalisées : définition et vérification de la configuration nominale, choix des paramètres influents et études préliminaires, études paramétriques, analyses de sensibilité et calculs POD. La démarche et les résultats de l'étude MAPOD pour le cas UT multiélément a été présentée dans cet article. Une comparaison de ces résultats avec l'étude

MAPOD réalisée pour le cas UT monoélément a ensuite été effectuée.

Les trois paramètres jugés les plus influents sur l'amplitude du signal réfléchi par le défaut de type « manque de fusion » sont dans les deux cas (UT monoélément et UT multiélément) : la hauteur du défaut, la longueur du défaut et la rotation de la sonde autour de l'axe z. Grâce à cette approche basée sur l'utilisation de métamodèles, différents scénarios de contrôle ont pu être testés et les courbes POD ont pu être tracés sans nécessité de réaliser des simulations supplémentaires. Il est intéressant de noter qu'un contrôle réalisé en UT monoélément n'est pas moins performant, d'après la simulation, qu'un contrôle réalisé en UT multiélément. A paramètres identiques, l'acoustique générée dans la structure en UT multiélément ou en UT monoélément est très proche. La mise en œuvre du contrôle en UT multiélément, plutôt qu'en UT monoélément, permet probablement de privilégier un scénario de contrôle avec des variabilités plus réduites sur certains paramètres (angle de rotation de la sonde autour de l'axe z, pas d'incrément de la sonde, etc.).

Concernant les perspectives, une meilleure prise en compte des facteurs humains serait à intégrer dans la réalisation de ces études MAPOD. L'objectif est de développer une méthode qui ne nécessite pas la fabrication d'un grand nombre de maquettes, avec des défauts calibrés et de différentes dimensions (ce qui est difficile à mettre en œuvre et onéreux), mais qui permet d'enrichir cette approche actuellement entièrement numérique par des données expérimentales issues de contrôles CND.

Références

- [1] A. Berens, NDE reliability data analysis, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 17, 689-701, 1989.
- [2] MIL-HDBK-1823A – Nondestructive evaluation system reliability assessment, US Dept. of Defense, 2009.
- [3] B. Chapuis, P. Calmon and F. Jenson, Best Practices for the Use of Simulation in POD Curves Estimation, IIW Collection, 2018.