

Une approche POD par simulation d'un contrôle ultrasonore industriel

Romain HODÉ¹, Benoît DUPONT¹, Jérôme DUDOUS², Laura CLÉMENT²,
Sébastien LONNÉ², Fabrice FOUCHER²

¹ CETIM

² Extende

Journées COFREND 2023, Marseille



Introduction

Contexte

- ▶ Besoin de fiabilisation des contrôles non destructifs (CND)
- ▶ Incertitudes lors du contrôle sur :
 - ▶ les caractéristiques de la structure inspectée (géométrie, paramètres mécaniques, etc.)
 - ▶ le défaut
 - ▶ le(s) traducteur(s)
 - ▶ la mise en œuvre du contrôle, les facteurs humains, etc.
- ▶ Nécessité d'utiliser des indicateurs statistiques tels que la probabilité de détection (POD) [1-3]

[1] A. Berens, NDE reliability data analysis, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 17, 689-701, 1989.

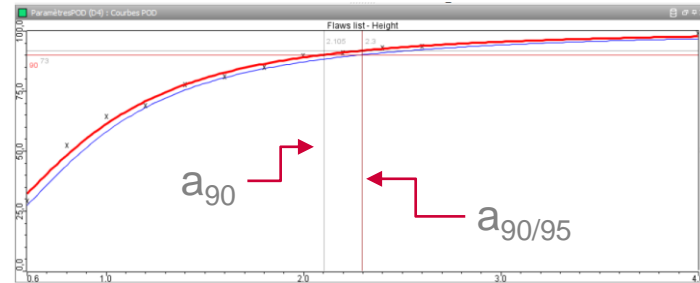
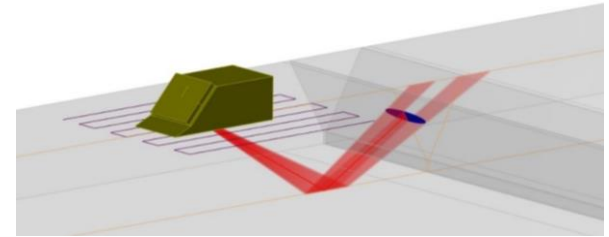
[2] MIL-HDBK-1823A – Nondestructive evaluation system reliability assessment, US Dept. of Defense, 2009.

[3] B. Chapuis, P. Calmon and F. Jenson, Best Practices for the Use of Simulation in POD Curves Estimation, IIW Collection, 2018.

Introduction

Probabilité de détection (POD)

- ▶ 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
- ▶ Le **périmètre de l'étude** doit être considéré
 - ▶ Une technique END
 - ▶ Un matériel (composant)
 - ▶ Un type de défaut
 - ▶ Une procédure de contrôle mise en œuvre
- ▶ Le résultat est une **courbe POD** en fonction de la taille du défaut (plus généralement la variable caractéristique) livrant deux indicateurs :
 - ▶ POD est supérieure à 90% (a_{90})
 - ▶ POD avec un intervalle de confiance ($a_{90/95}$)



Introduction

Réalisation d'une étude POD

- ▶ Plusieurs approches possibles



Expérimentale

- ▶ Avantage(s)
 - ▶ Prise en compte des facteurs humains
- ▶ Inconvénient(s)
 - ▶ Difficultés de mise en œuvre
 - ▶ Coût

Par simulation numérique

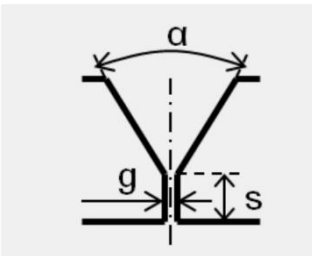
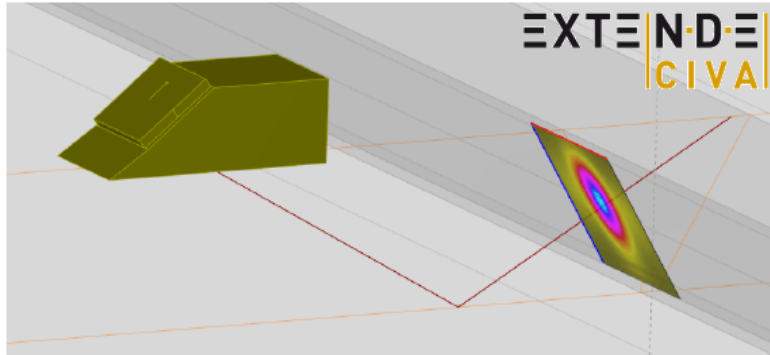
- ▶ Avantage(s)
 - ▶ Génération d'un volume important de données
 - ▶ Réalisation d'analyses de sensibilité
- ▶ Inconvénient(s)
 - ▶ Moindre prise en compte des facteurs humains

Combinaison des deux approches

Présentation du cas traité

Soudure bout-à-bout avec chanfrein en « V »

UT monoélément

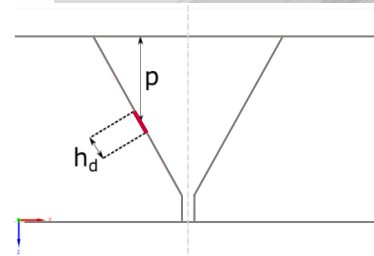
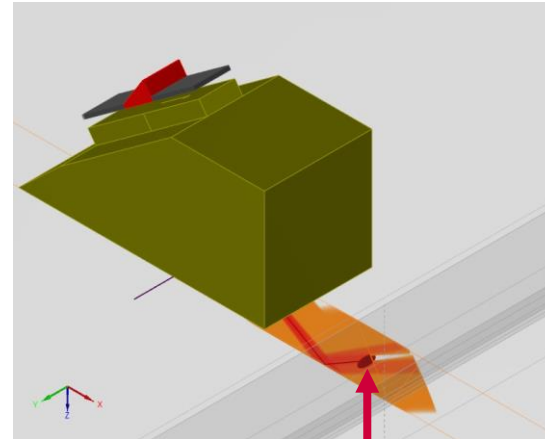


Angle : $\alpha = 60^\circ$

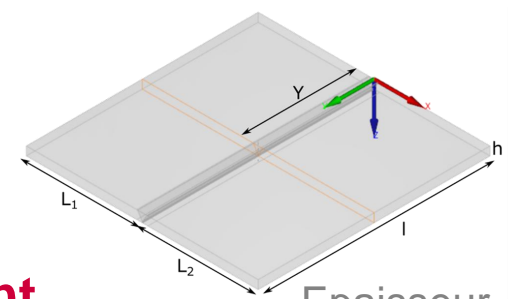
Ecartement : $g = 1 \text{ mm}$

Talon : $s = 2 \text{ mm}$

UT multiélément



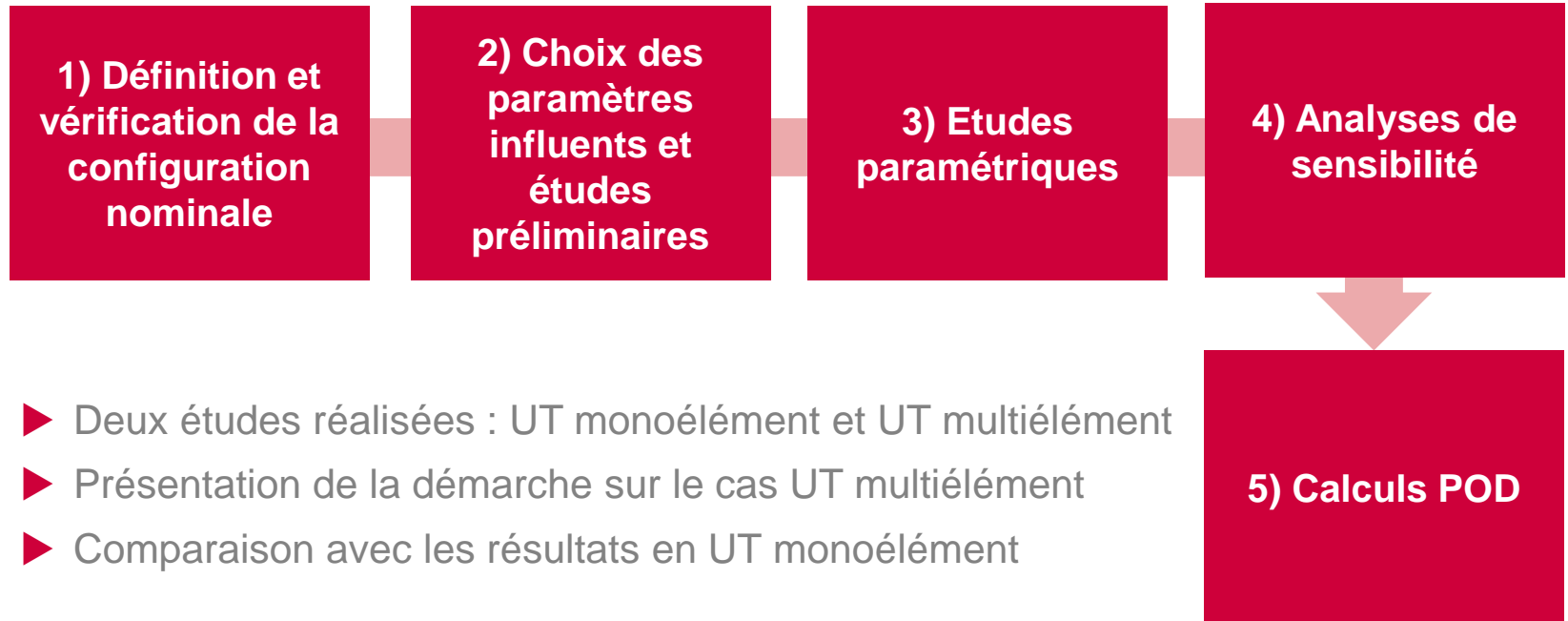
Manque
de fusion



Epaisseur
 $h = 15 \text{ mm}$

Présentation de la démarche suivie

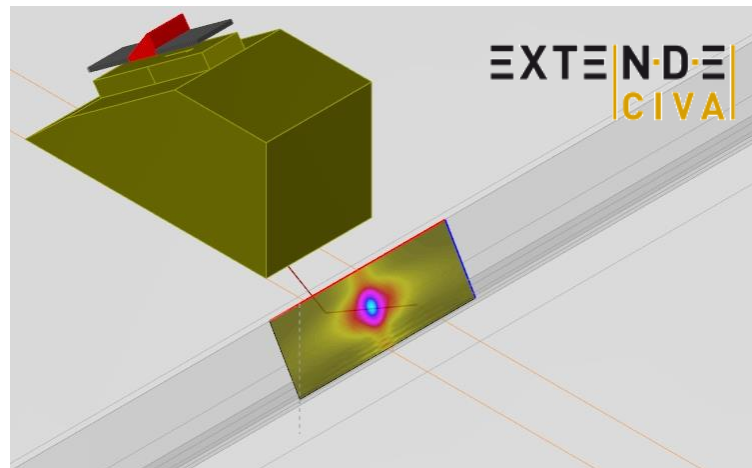
Etudes « Model Assisted POD » (MAPOD) - 5 étapes



Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

1) Définition et vérification de la configuration nominale

- ▶ Technique de contrôle et mode opératoire
 - ▶ Transducteur : 5L64-A2, 64 éléments
 - ▶ Sabot SA2-N55S
 - ▶ Fréquence : 5 MHz
 - ▶ Balayage électronique linéaire (non focalisé)
 - ▶ Etalonnage : « Time Corrected Gain » (TCG), génératrice $\Phi = 3$ mm
 - ▶ 15 mm, 20 mm et 30 mm de profondeur

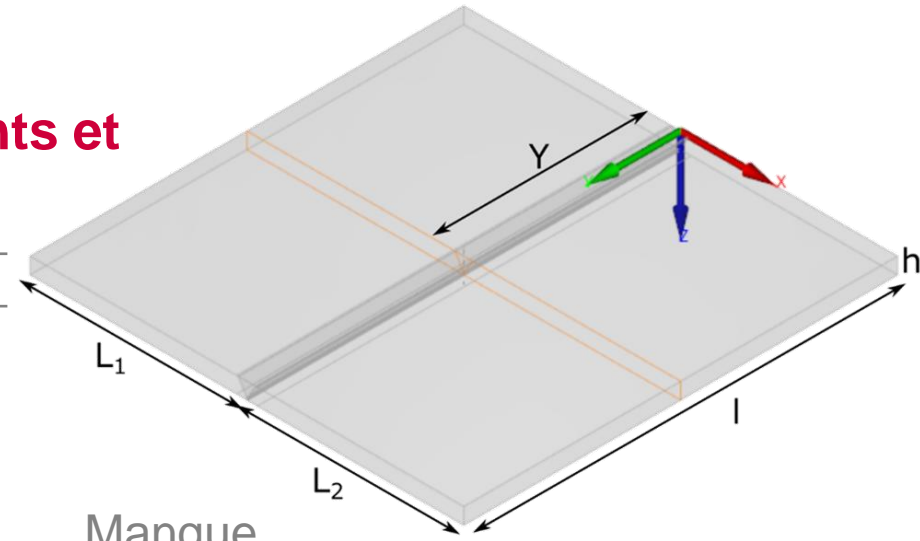


Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

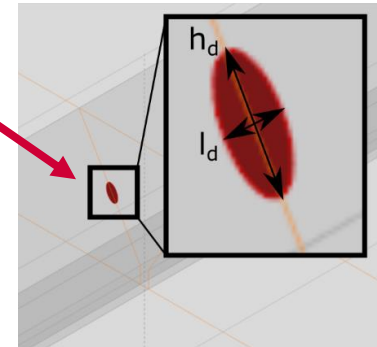
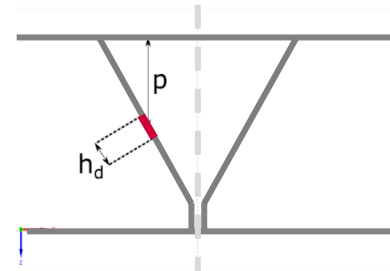
2) Choix des paramètres influents et études préliminaires

Paramètres influents considérés

Géométrie	Epaisseur des plaques Angle du chanfrein Célérité des ondes transversales (T)
Défaut	Hauteur du défaut Longueur du défaut Profondeur du défaut
Traducteur	Fréquence centrale de la sonde multiélément Hauteur du sabot Angle d'incidence du sabot Célérité des ondes longitudinales dans le sabot
Contrôle	Rotation de la sonde autour de l'axe z Position initiale de la sonde selon l'axe y Pas d'incrément de la sonde selon l'axe y



Manque de fusion



Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

3) Etudes paramétriques

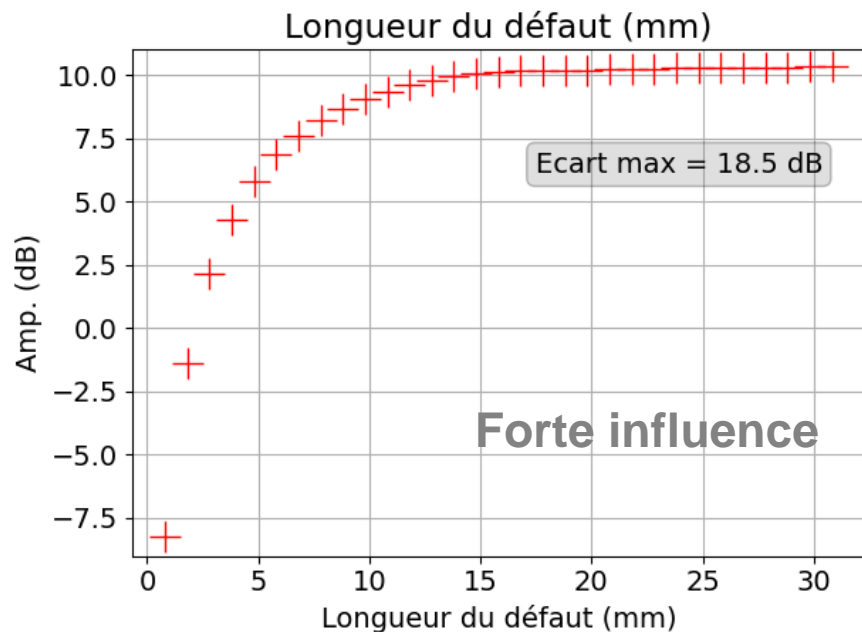
► Objectif : premier tri des paramètres

Paramètres influents considérés		Valeur nominale	Plages de variation [min ; max]
Géométrie	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]
Défaut	Hauteur du défaut	2 mm	[0,6 mm ; 4 mm]
	Longueur du défaut	5 mm	[0,8 mm ; 30,8 mm]
	Profondeur du défaut	7 mm	[4,5 mm ; 9,5 mm]
Traducteur	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]
Contrôle	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]

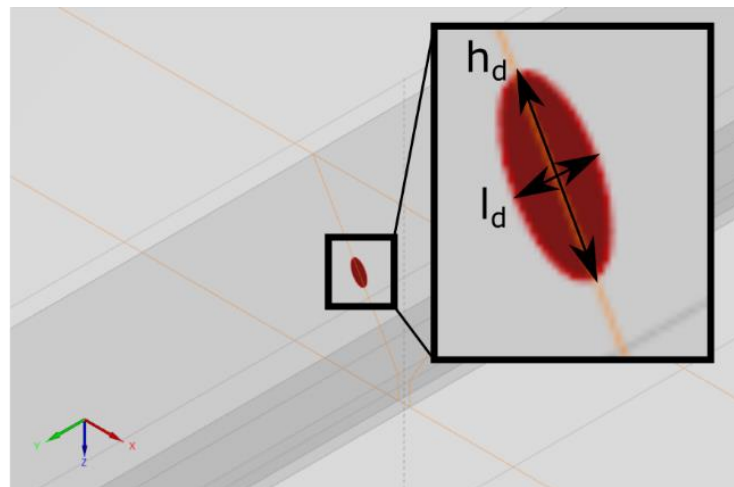
¹ Plage de variation inspirée de la norme NF EN ISO 18563-1 (Chapitre 9, Section 9.4.2.2) indiquant que la fréquence centrale doit se situer dans des limites de $\pm 10\%$.

Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

3) Etudes paramétriques - exemples

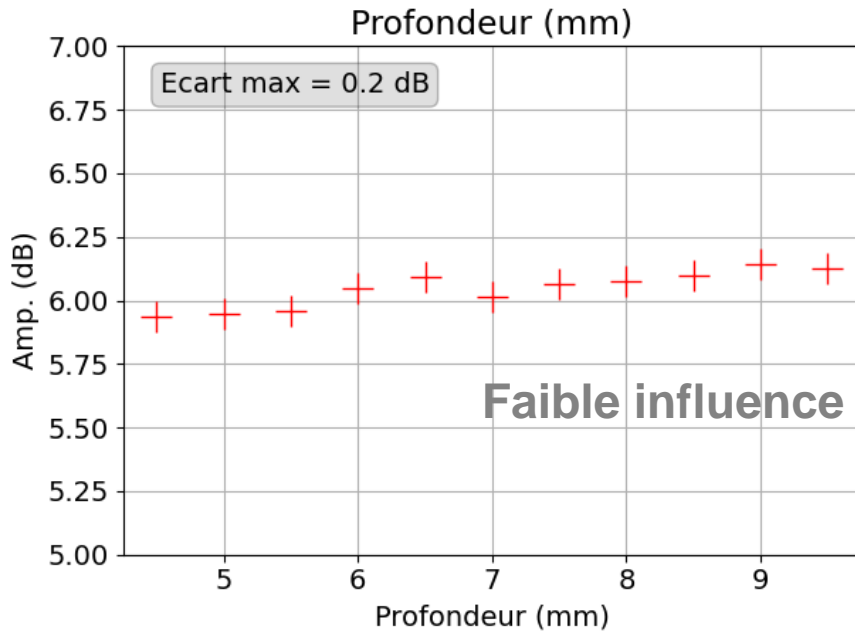


Longueur du défaut (mm)

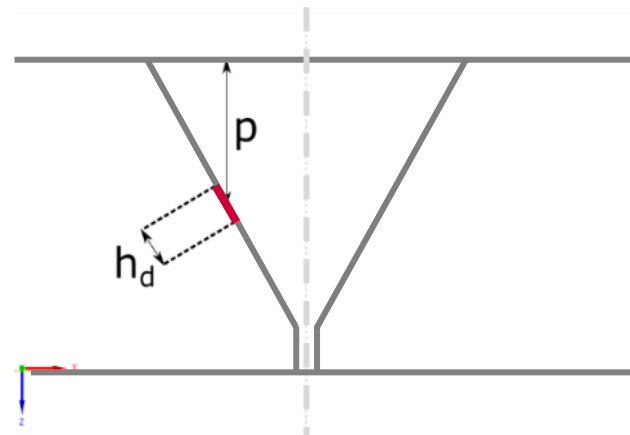
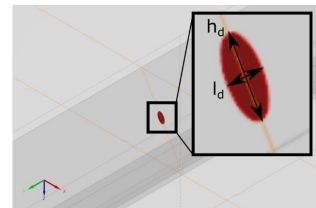


Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

3) Etudes paramétriques - exemples



Profondeur du défaut (mm)



Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

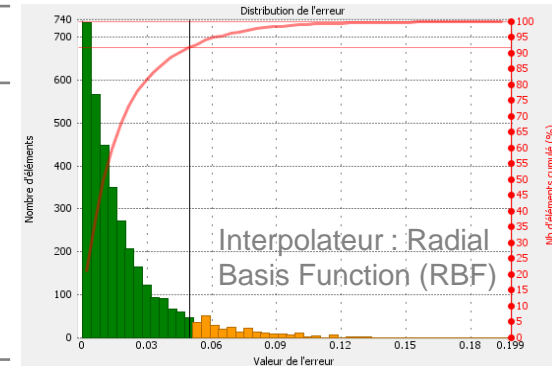
4) Analyses de sensibilité

► Objectifs :

- étudier l'impact des paramètres sur l'amplitude du signal de sortie
- classer les paramètres du plus influent au moins influent pour un scénario de contrôle défini

► Paramètres retenus pour le métamodèle final – 3510 tirages aléatoires

Paramètres influents considérés	Valeur nominale	Plages de variation [min ; max]
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]
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 Processeur Intel® Xeon® CPU E5-2650 v3 @ 2.30 GHz, RAM : 32 Go

² Processeur AMD RYZEN 9 3900X 12-Cœurs @ 3,80 GHz, RAM : 128 Go

Temps de calcul : 82 jours¹, 35 jours²

Résultats de l'étude MAPOD en UT multiélément

4) Analyses de sensibilité – 3 scénarios de contrôle

Scénario 1 : distributions uniformes

Paramètres influents considérés	Plages de variation	Distribution	Moyenne, écart-type
Célérité des ondes transversales (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	-

Scénario 2 : inspections « optimales »

Paramètres influents	Distribution	Moy., écart-type
Célérité des ondes T	Normale	3255 ± 30 m/s
Hauteur du défaut	Liste arithmétique	-
Longueur du défaut	Uniforme	-
Rotation de la sonde	Normale	0° ± 3°
Position initiale	Uniforme	-
Pas d'incrément	Normale	0,5 ± 1 mm

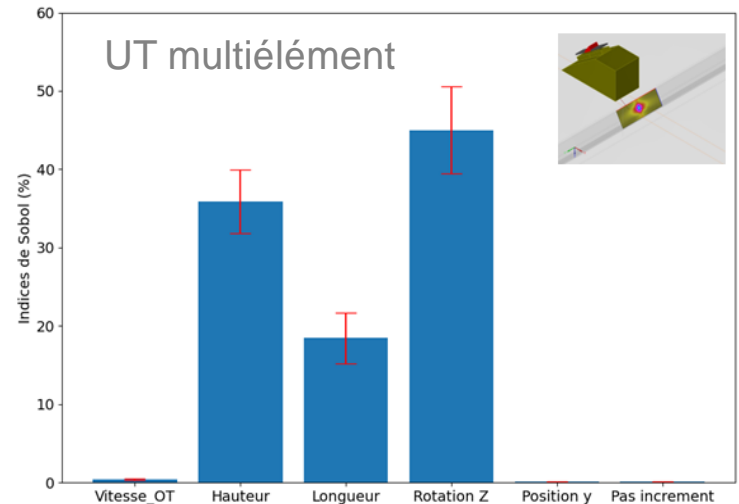
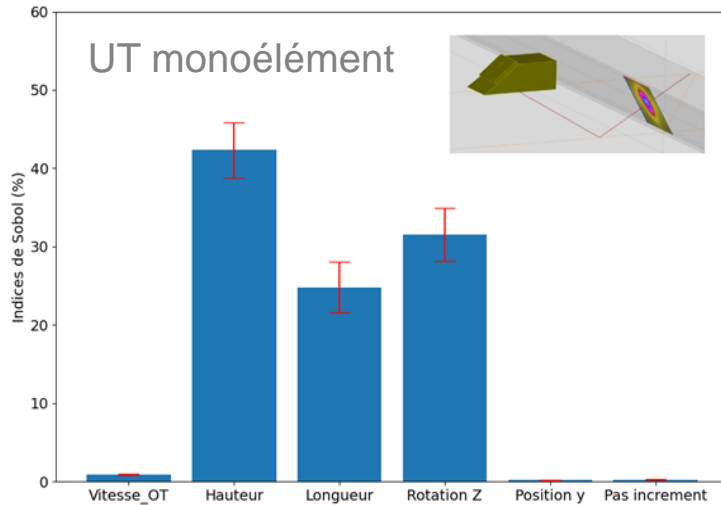
Scénario 3 : insp. « dégradées »

Distribution	Moy., écart-type
Normale	3255 ± 30 m/s
Liste arithmétique	-
Uniforme	-
Normale	0° ± 7,5°
Uniforme	-
Normale	4 ± 2,5 mm

Comparaison UT monoélément/UT multiélément

Analyses de sensibilité – Scénario 2 (inspections « optimales »)

- ▶ Tracés des indices de Sobol
- ▶ 3 paramètres les plus influents :
 - ▶ Hauteur du défaut, longueur du défaut et rotation de la sonde autour de l'axe z



Comparaison UT monoélément/UT multiélément

Courbes POD

► Résultats UT monoélément et UT multiélément

- Paramètre $A_{90/95}$ – Hauteur du défaut
- Données de type « Hit/Miss »

		Scénario 1 Distributions uniformes	Scénario 2 Inspections « optimales »	Scénario 3 Inspections « dégradées »
UT mono.	$A_{90/95}$ -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 multi.	$A_{90/95}$ -6 dB	-	1,72 mm	-
	$A_{90/95}$ -12 dB	3,36 mm	0,87 mm	2,54 mm

Scénario 2 : inspections « optimales »

Paramètres influents	Distribution	Moy., écart-type
Célérité des ondes T	Normale	3255 ± 30 m/s
Hauteur du défaut	Liste arithmétique	-
Longueur du défaut	Uniforme	-
Rotation de la sonde	Normale	0° ± 3°
Position initiale	Uniforme	-
Pas d'incrément	Normale	0,5 ± 1 mm

Scénario 3 : insp. « dégradées »

Distribution	Moy., écart-type
Normale	3255 ± 30 m/s
Liste arithmétique	-
Uniforme	-
Normale	0° ± 7,5°
Uniforme	-
Normale	4 ± 2,5 mm

Comparaison UT monoélément/UT multiélément

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

- ▶ 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
- ▶ Nouveau scénario 2* : écart-type $\pm 1^\circ$
- ▶ Transducteurs aux caractéristiques différentes

	Monoélément [MWB60-4 (GE)]	Multiélément [5L64-A2 (Olympus)]
Fréquence centrale	4 MHz	5 MHz
Ouverture	8x9 mm ²	9,5x10 mm ² (16 éléments actifs)

		Scénario 2 Inspections « optimales » Ecart-type $\pm 3^\circ$	Scénario 2* Inspections « optimales » Ecart-type $\pm 1^\circ$
UT mono.	$A_{90/95}$ -6 dB	1,40 mm	1,02 mm
	$A_{90/95}$ -12 dB	0,69 mm	0,61 mm
UT multi.	$A_{90/95}$ -6 dB	1,72 mm	0,96 mm
	$A_{90/95}$ -12 dB	0,87 mm	0,66 mm

- ▶ Scénario 2* semble bien plus probable en UT multiélément
 - ▶ Système de guidage
 - ▶ Possibilité d'imagerie

Conclusion et perspectives

Conclusion

- ▶ Deux études MAPOD réalisées (5 étapes)
- ▶ Dans les deux cas, les 3 paramètres les plus influents sont :
 - ▶ la hauteur du défaut
 - ▶ la longueur du défaut
 - ▶ la rotation de la sonde autour de l'axe z
- ▶ Différents scénarios de contrôle testés
- ▶ Discussion sur les résultats obtenus

Perspectives

- ▶ Meilleure prise en compte des facteurs humains
- ▶ Enrichir cette approche numérique par des données expérimentales issues de contrôles CND

