

Apports d'une cosimulation "END – Tolérance aux dommages" dans la réduction des risques de rupture

**Fabrice Foucher¹, Sébastien Lonné¹, Philippe Dubois¹,
Stéphane Leberre², Pierre Calmon², Michael Enright³, Yasin Zaman³**

¹ Extende, Massy, France,

² CEA DISC, Gif Sur Yvette, France, France

³ SwRI, Southwest Research Institute, San Antonio, TX, Etats-Unis.

*corresponding author, E-mail: fabrice.foucher@extende.com

Résumé

Dans l'approche par tolérance aux dommages utilisée notamment en aéronautique, il est essentiel de démontrer la fiabilité des inspections END pour la détection de potentiels défauts structurels, particulièrement dans le cas de pièces obtenues par fabrication additive car ce procédé introduit d'avantages d'anomalies. Les courbes de Probabilité de Détection (POD), qui relient la probabilité de détecter un défaut à sa taille, constituent un indicateur clé en évaluant une taille maximale de défaut que le procédé END peut manquer à un certain niveau de probabilité et avec un certain taux de confiance. Cette information est utilisée, conjointement à d'autres données telles que la géométrie de la pièce, les propriétés mécaniques, les contraintes ou encore les cinétiques d'évolution des défauts, pour adapter la stratégie de maintenance et de contrôle de la pièce afin d'optimiser la sûreté et sa durée de vie en service.

La fiabilité d'un END et l'évaluation du risque sont basées sur des indicateurs statistiques qui nécessitent un volume de données important si l'on veut que ces indicateurs soient fiables. Ainsi, il est difficile d'obtenir un bon niveau de confiance sur la base d'une approche purement basée sur des essais expérimentaux compte-tenu du volume de maquettes et des coûts engendrés. Les outils de simulation peuvent atteindre cet objectif s'ils ont la capacité de prendre en compte et piloter précisément les paramètres pertinents et grâce aux capacités de calcul intensif maintenant disponibles.

Le travail présenté dans cet article met en œuvre des cosimulations réalisées entre les logiciels DARWIN®, en modélisation probabiliste de la tolérance au dommage, et CIVA, en modélisation END. DARWIN calcule des niveaux de risque de rupture par zone dans une pièce donnée, quand CIVA permet d'obtenir des courbes de probabilité de détection pour différentes méthodes END. L'application présentée illustre le cas d'une pièce de rotor en titane impliquant un contrôle par ultrasons.

Il apparaît très pertinent de relier la simulation des END et celle de la mécanique de la rupture, deux disciplines assez compartimentées par ailleurs. En effet, DARWIN permet de connaître les défauts et les tailles critiques associées qui sont les données d'entrées essentielles pour développer une méthode d'inspection pertinente. CIVA permet d'obtenir des courbes POD permettant ensuite à DARWIN de quantifier le niveau de réduction de risque apporté par cet END. Cela souligne l'importance des END pour la sûreté de fonctionnement et permet d'adapter la sensibilité du procédé d'inspection afin de trouver le meilleur compromis entre la performance nécessaire et les coûts

1. Introduction

Les END sont mis en œuvre pour détecter les défauts qui vont affecter l'intégrité structurelle d'une pièce. Pour être efficace, les END ne peuvent opérer "seul". En effet, la taille et les propriétés (localisation, type) des défauts recherchés doivent s'appuyer sur des bases solides : retours d'expériences et inspections précédentes sur ce type de pièce mais aussi et surtout des connaissances métallurgiques, des facteurs mécaniques et des considérations liées à la mécanique de la rupture. La taille des défauts critiques aura un impact direct sur le choix de la méthode END à mettre en œuvre. Par ailleurs, les END pourront apporter des indicateurs permettant d'établir une stratégie de maintenance efficace. L'approche par tolérance aux dommages utilisée pour développer les opérations de maintenance en aéronautique est un exemple de ce type de stratégie où la performance en détection du procédé END est utilisée, avec d'autres informations, pour définir des cycles d'inspection et de maintenance appropriés et peut également aider à améliorer la conception mécanique des pièces afin d'intégrer des « marges de sécurité » suffisantes pour l'intégrité structurelle. Dans ce contexte, les disciplines des END et de la mécanique de la rupture doivent travailler ensemble. La performance d'un END est souvent estimée à partir d'un indicateur appelée Probabilité de Détection ou POD ("Probability of Detection") établissant un lien entre la probabilité de détecter un défaut nocif et sa taille. Pour être



utile, cet indicateur doit se baser sur des données pertinentes et en nombre suffisant pour associer aux résultats un niveau de confiance élevé et être représentatif de la variabilité des conditions d'inspection et des situations rencontrées sur le terrain. Comme une pièce est généralement composée de différentes parties en termes de propriétés mécaniques du fait de variations géométriques, d'épaisseur, de contraintes ou d'autres aspects, et encore plus dans le cas d'une pièce conçue par de nouvelles techniques comme la fabrication additive, une évaluation efficace des risques pourra nécessiter plus qu'une courbe POD unique pour quantifier les risques sur les différentes zones d'une pièce. Cela implique qu'encore plus de données sont nécessaires pour construire ces multiples courbes POD.

Il est souvent très difficile et coûteux d'obtenir suffisamment de données pertinentes en s'appuyant simplement sur des données expérimentales. Les outils de simulation numériques en END peuvent s'avérer très utiles à cette étape par leur capacité de produire un très grand volume de données à moindre coût. Par ailleurs, la modélisation probabiliste de tolérance aux dommages (PDT) permet de prédire les risques de rupture en différentes zones d'une pièce selon différentes hypothèses en termes de prévalence et types de défauts et de performance des inspections END.

Cet article illustre l'utilisation conjointe de la simulation numérique END et PDT pour l'évaluation des risques de rupture sur l'exemple d'une pièce de turbine en titane.

2. Modélisation pour les calculs de probabilité de détection et de tolérance au dommage

2.1. Plate-forme CIVA pour la modélisation END et le calcul de courbes POD

La simulation de l'inspection END a été réalisée à l'aide du logiciel « métier » CIVA, développé par le CEA et distribué par EXTENDE. Les modules de CIVA permettent de modéliser différentes méthodes et techniques END : Contrôle par ultrasons (UT), ondes guidées (GWT), courants de Foucault (ET), thermographie (TT), radiographie (RT) et tomographie X numérique (CT). Les modèles mathématiques de CIVA s'appuient prioritairement sur une approche semi-analytique qui permet de résoudre une large gamme de situations avec des performances de calcul très compétitives. Pour élargir encore le champ d'application, la tendance est désormais de s'appuyer sur des modèles plus numériques (Eléments Finis, Différences finies, etc.) ou hybrides (couplant éléments finis et semi-analytiques) en recherchant le meilleur compromis entre versatilité, précision et performance (pour plus d'informations sur les modèles mis en œuvre dans CIVA en modélisation ultrasonore, se référer à [1], [2] et [3]). CIVA inclut également des métamodèles, ce qui est particulièrement utiles pour les études de fiabilité. Un métamodèle est un modèle de substitution qui s'appuie sur des interpolateurs avancés permettant de remplacer un modèle directement

basé sur les équations physiques. La première étape consiste à réaliser une base de données de simulations physiques pour une plage de variation donnée des paramètres de ce modèle. Le métamodèle se construit sur ces résultats de simulation et, après évaluation de la précision des interpolations produites par celui-ci, permet d'explorer en temps réel la gamme complète des scénarios d'inspection constitués par l'ensemble de ces variations paramétriques. Il apporte également la possibilité de réaliser une étude statistique des données simulées, requis pour les études de sensibilité et POD.

2.2. Introduction sur DARWIN et l'approche probabiliste de tolérance au dommage (PDT)

DARWIN® (“Design Assessment of Reliability With Inspection”) est un logiciel développé par le Southwest Research Institute (SwRI), basé à San Antonio, Texas, USA. DARWIN permet le calcul du risque de rupture prenant en compte la réalisation ou l'absence d'inspections END ainsi que différents paramètres mécaniques. Plus précisément (voir Fig. 1), les données d'entrées de DARWIN incluent les contraintes mécaniques sur la pièce issues de calculs Eléments Finis (les résultats de modèles FEM classiques tels que ANSYS et ABAQUS sont supportés), les relations contraintes/efforts du matériau, les propriétés cinétiques d'évolution des fissures de fatigue (ou FCG pour « Fatigue Crack Growth »), les probabilités de distribution de défauts dans la pièce, le programme d'inspection END et les courbes de POD spécifiques par zone. Pour calculer le risque, DARWIN discrétise la pièce en un certain nombre de zones qui peuvent avoir différentes propriétés physiques, contraintes résiduelles ou externes, type d'anomalies, etc. DARWIN inclut également la capacité de calculer les tailles critiques initiales des défauts (ou CICS pour « Critical Initial Crack Sizes ») aux endroits sélectionnés au sein d'un modèle Élément Fini de la pièce. Le CICS est la taille initiale d'un défaut pouvant évoluer jusqu'à la rupture pendant la vie de la pièce en un endroit donné. Le CICS représente ainsi la plus petite taille de défaut qui doit être détectée par les END (des défauts plus petits n'évolueraient pas jusqu'à la rupture et n'ont donc pas besoin d'être détectés). L'approche CICS apporte des données d'entrées “clés” nécessaires à la conception de la méthode d'inspection (i.e., la taille de défaut cible devant être détecté selon la zone de la pièce). Sur cette base, la simulation END peut être utilisée pour mettre au point la technique de contrôle puis calculer les courbes POD par zone et alimenter DARWIN qui pourra alors estimer le risque de rupture en fonction des cycles d'utilisation. Grâce à cette information, le CND peut ensuite ajuster le niveau de performance requis et le rythme des inspections pour trouver la solution la plus efficace et diminuer le risque de rupture, ce qui illustre le cercle vertueux de cette méthodologie PDT. Plus d'informations sur DARWIN sont fournies dans les Références [4-8].

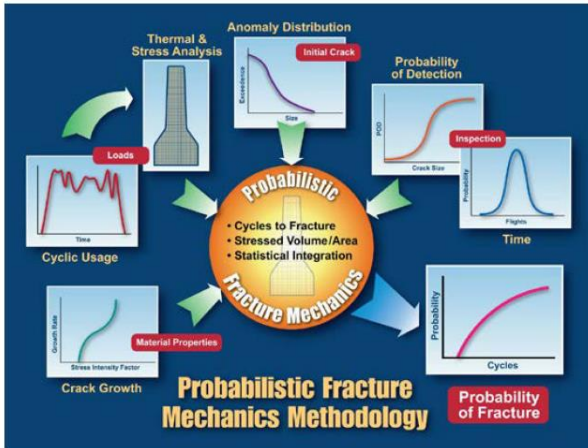
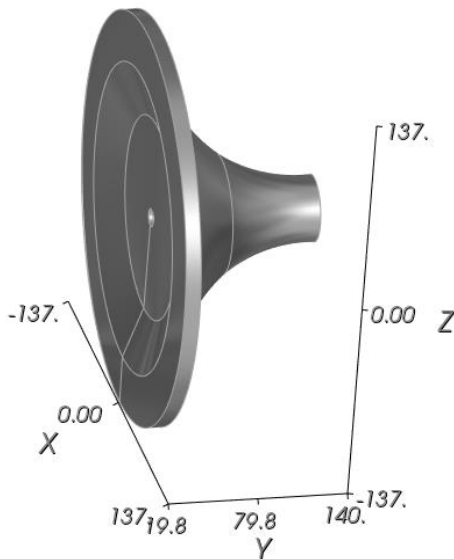


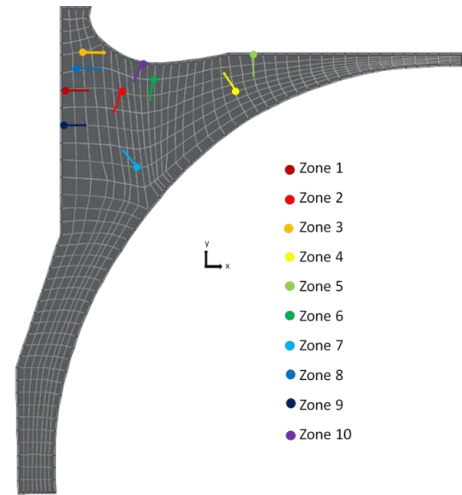
Figure 1 – Vue globale de l’approche probabiliste de tolérance au dommage avec DARWIN

3. Cas d’application

Comparés aux procédés traditionnels, les techniques de fabrication additive peuvent amener à une réduction significative des coûts de production. Cependant, dans le même temps, cela engendre de nouveaux types de défauts, potentiellement en grand nombre, tels que des porosités ou manques de fusion entre particules de poudres métalliques. Certains de ces défauts, présents au stade de la fabrication, peuvent amener à des défauts plus grands et critiques s’ils sont situés dans des régions subissant des contraintes mécaniques cycliques importantes. Le travail présenté s’appuie sur une pièce de rotor de moteur en titane issue de l’industrie aéronautique. La géométrie de la pièce est visible sur la figure 2a, elle mesure environ 275 mm de diamètre et 120 mm de hauteur.



a)



b)

Figure 2 – a) Géométrie et dimensions de la pièce en titane
b) Discrétisation de la section de la pièce par DARWIN et sélection de 10 zones avec défauts

Ayant exploité un premier ensemble de données mécaniques, DARWIN discrétise la section de la pièce en différentes zones pouvant présenter des probabilités de risque de rupture différentes, comme montré en figure 2b. Le nombre de zones distinctes à considérer pour le CND n’est pas forcément très important. En effet, après qu’un nombre suffisant de zones aient été considérées, ajouter de nouvelles régions n’améliorera pas substantiellement la précision du calcul du risque global sur la pièce. Dans cette étude visant à illustrer ce concept de cosimulations END-PDT, seulement 10 zones ont été retenues, correspondant aux 10 flèches illustrées en figure 2b.

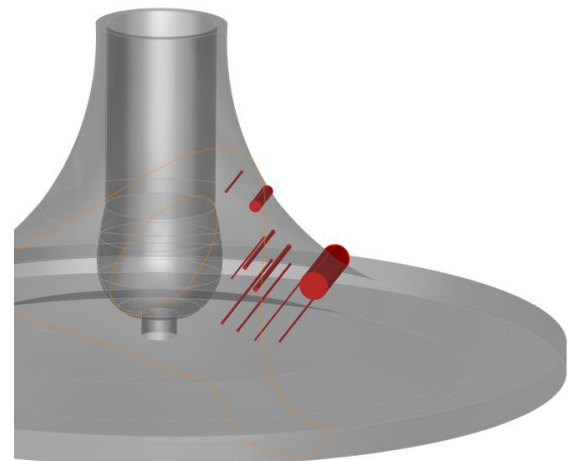


Figure 3 – Illustration des 10 défauts dans le modèle 3D de CIVA

Deux types de défauts ont été considérés dans ces zones :

- Des défauts plans circulaires orientés selon la section radiale du rotor, représentatifs de défauts évolutifs avec la vie de la pièce,

- Des anomalies sphériques, déjà présentes au stade de la fabrication.

Tous les défauts évoluent dans la section radiale de la pièce et les flèches de la figure 2b indiquent la direction principale d'évolution des défauts.

Les valeurs des CICS sont affichés dans le tableau 1. Les 10 défauts (plans) positionnés dans la pièce pour le modèle CIVA sont montrés en Figure 3. Des Trous à Fond Plat ont été définis à cette fin. Cette image illustre bien la variété des tailles de défaut critiques en fonction de la zone considérée.

Tableau 1 – Valeurs des CICS calculées par DARWIN

Zone ID	CICS radius	
	(in)	(mm)
1	0.0118	0.2984
2	0.0315	0.7998
3	0.0183	0.4650
4	0.0754	1.9153
5	0.0156	0.3961
6	0.0254	0.6440
7	0.1859	4.7219
8	0.0161	0.4079
9	0.0141	0.3573
10	0.0121	0.3063

4. Modélisation END et étude POD

4.1. Description de la technique UT

Avant de pouvoir calculer des courbes POD, il a été nécessaire de définir la ou les techniques d'inspection. La méthode des ultrasons a été ciblée. Dans un premier temps, le cas des défauts plans a été investigué. Compte-tenu de la localisation et l'orientation des défauts selon la section radiale de la pièce, une inspection depuis la partie plane de la pièce apparaissait peu prometteuse et une technique par immersion appliquée depuis la partie torique du rotor a alors été considérée. Elle suppose l'utilisation d'un porteur mécanique réglé pour positionner et orienter la sonde de façon pertinente pour les zones à inspecter. Ensuite, un bras tournant permettrait de couvrir la circonférence complète du composant.

La sonde définie est constituée de 64 éléments, elle présente un pitch de 0.3mm et possède une fréquence centrale de 10MHz. Des groupes de 32 éléments actifs simultanément sont constitués afin d'offrir une ouverture appropriée. Des balayages électroniques et angulaires sont employés pour couvrir une région assez large de la section de la pièce avec des ondes transversales. Les auteurs tiennent à mentionner ici que cette technique de contrôle a été conçue à des fins illustratives et ne représentent pas une solution finalisée. Un

travail d'optimisation, des essais d'implémentations matériels et robotiques seraient nécessaire pour valider son aptitude pour cette inspection. En Figure 4, le concept de cette inspection et le faisceau d'ondes ultrasonores transmises est illustrée par simulation CIVA et pour une région couvrant les zones #6 et #10 définies par DARWIN. La tâche focale du faisceau ultrasonore apparaît bien orientée et localisée dans la pièce. La zone couverte dans la section de la pièce, cumulant l'ensemble des angles et groupes d'éléments activés et considérant la sensibilité à l'orientation du défaut cible pour cette zone est représenté en Figure 5 grâce à une simulation de couverture en sensibilité.

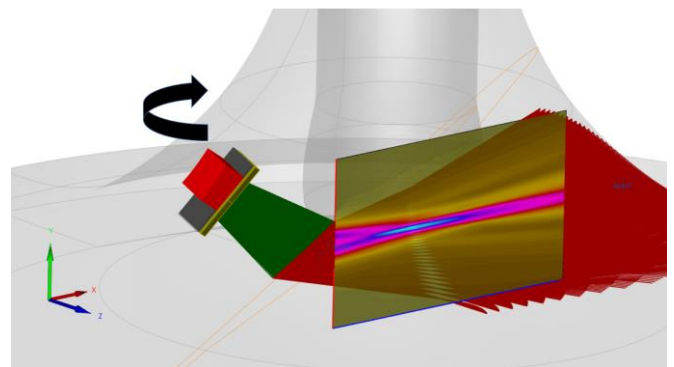


Figure 4 – Simulation du faisceau d'ondes transverses en zones #6 et #10.

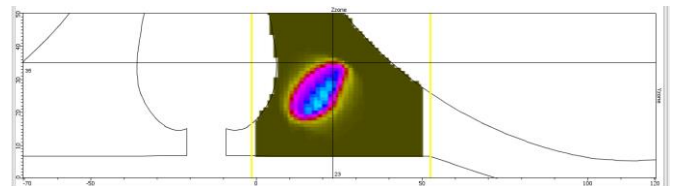


Figure 5 – Simulation de couverture en sensibilité en zones #6 et #10

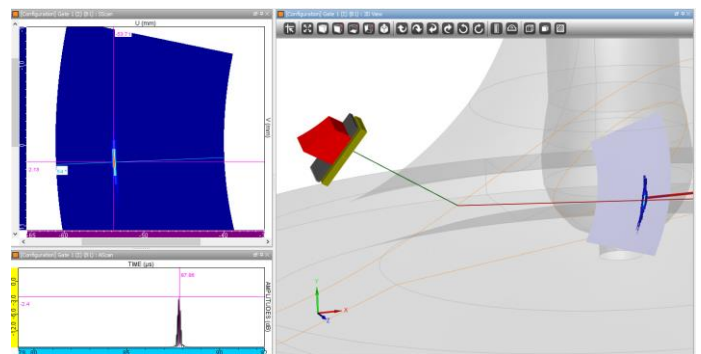


Figure 6 – Simulation d'inspection du défaut #10

En Figure 6, la simulation de l'interaction de cette sonde avec un défaut en zone #10 est illustrée. Le Trou à Fond Plat correspondant est modélisé ici pour sa taille CICS, à savoir 0.6mm de diamètre. L'amplitude maximale obtenue a

été calculée à -2.4dB, calibrée sur la réponse d’un Trou à Fond Plat de 0.5mm de diamètre situé dans une cale plane constituée du même matériau et considérant une réflexion spéculaire du faisceau de cette sonde, ce qui apparait en première approche comme un assez bon niveau de sensibilité

4.2. Analyse en sensibilité

Calculer les courbes POD signifie estimer la fiabilité d’une méthode d’inspection en termes de détection en considérant la variabilité des paramètres influents et incertains du contrôle pour différentes tailles de défaut. Ces paramètres variables peuvent comprendre les paramètres du défaut (taille, orientation, localisation, etc.), les incertitudes sur la pièce (géométrie, propriétés physiques), les paramètres d’inspection (paramètres de sonde, variabilité sur son positionnement et le balayage), ou encore les paramètres environnementaux et facteurs humains. D’un point de vue “MAPOD” (pour “Model Assisted POD”), cela suppose d’introduire des paramètres variables pertinents dans le modèle et de propager les incertitudes en échantillonnant les données et en simulant les différentes situations. Le choix des paramètres incertains n’est pas évident et requiert des discussions avec des experts et/ou des investigations préliminaires sur les paramètres influents du modèle. Les lecteurs intéressés se référeront aux références suivantes pour plus d’informations sur la méthodologie pour des études MAPOD ([9], [10], [11]). Dans ce projet, les variables suivantes ont été sélectionnées :

- Taille du défaut (diamètre),
- Vitesse des ondes ultrasonores dans la pièce (+/- 300 m/s autour de la valeur nominale)
- Orientation du défaut (+/-10° autour de l’orientation nominale),
- Position de la sonde sur la pièce (+/-2mm autour de la position nominale),
- Angle de déflexion de la sonde (+/-1.5° autour de l’angle nominal).

Une plage de variation adaptée a été définie pour chaque paramètre constituant un plan d’expérience multiparamétrique via un échantillonnage basé sur une technique LHS (Latin Hypercube Sampling). Afin d’explorer de multiples scénarios d’inspection en post-traitement sans avoir à lancer de nouvelles simulations, la stratégie a été de construire un métamodèle à partir de cette base de simulations, plutôt que de s’appuyer uniquement sur un jeu de données fixe. Un métamodèle est automatiquement généré dans CIVA pour chaque étude paramétrique. Les Figures 7 à 10 illustrent le métamodèle réalisé à partir de la simulation de l’inspection du défaut #10. On visualise en Figure 7, le diagramme parallèle représentant la base des 1500 simulations réalisées (la plage des valeurs de chaque paramètre est affiché sur chaque colonne et les résultats obtenus apparaissent en vis à vis sur la colonne de droite, le résultat étant ici le maximum d’amplitude du signal UT

obtenu dans la simulation de l’inspection). En Figure 8, l’évaluation de la précision du métamodèle en fonction des simulations de référence est affiché (graphiques de type “True vs Predicted”), puis l’utilisation du métamodèle pour évaluer l’impact de paramètres influents selon un scénario choisi par l’utilisateur en sélectionnant une combinaison quelconque des paramètres d’entrée dans la plage considérée est affichée en Figure 9 (ici sous forme de graphiques 2D) et enfin, en Figure 10, la hiérarchisation de l’impact des paramètres influents via les indices de Sobol est affichée (la taille et l’orientation du défaut sont les paramètres prédominants dans ce cas). La force des métamodèles est que n’importe quelle combinaison de paramètres (c’est à dire de scénarios d’inspection) ou n’importe quelle fonction de densité décrivant la fréquence d’occurrence de ceux-ci peut être interrogée et fournir de nouveaux résultats en temps réel.

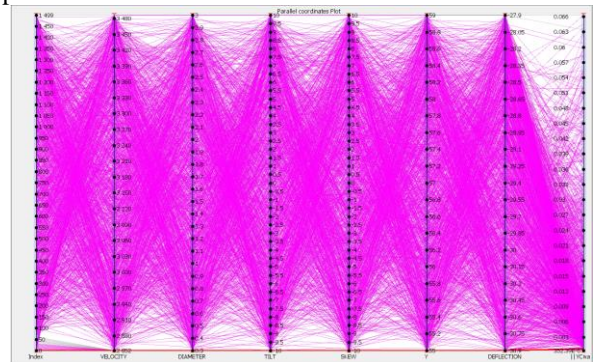


Figure 7 – Diagramme parallèle représentant les simulations réalisées (cas du défaut #10)

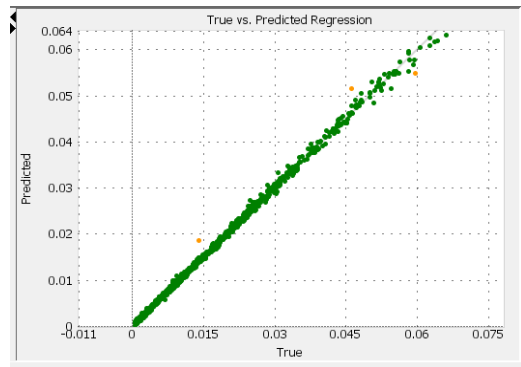


Figure 8 – Graphique « True vs Predicted » permettant d’évaluer la précision du métamodèle par rapport aux simulations de référence

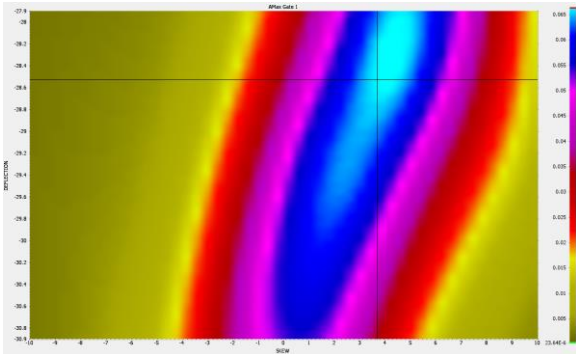


Figure 9 – Impact des paramètres « Déflexion de sonde » et « Orientation du défaut » sur l’amplitude du signal ultrasonore.

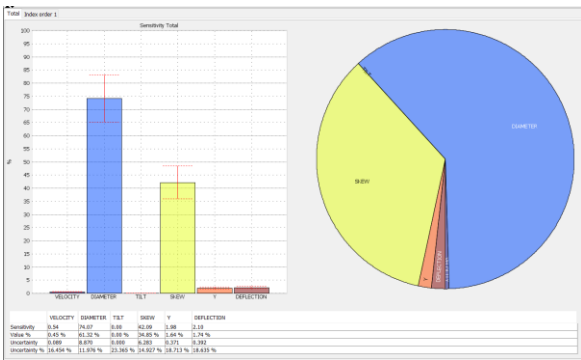


Figure 10 – Diagramme des indices de Sobolj des paramètres variables du modèle.

4.3. Courbes POD

La génération des courbes POD consiste ensuite à extraire des jeux de données du métamodèle pour des fonctions de densité choisies pour les paramètres incertains et pour une gamme de taille de défauts. Les résultats (ici, l’amplitude des signaux) sont placés sur l’axe Y et la taille du défaut est placée sur l’axe X (graphique « \hat{a} vs a »). A partir de ces données, différentes techniques d’analyse POD peuvent être appliquées, incluant les approches standard dites “paramétriques”, généralement adoptées dans l’industrie aéronautique, à savoir “Signal Response” ou “Hit-Miss” [12]. Ici encore, plusieurs scénarios d’inspection peuvent être analysés en temps réel grâce au métamodèle, sans avoir à lancer de nouvelles simulations.

Par exemple, la courbe POD obtenue sur le défaut #10 est affichée en Figure 11, pour 17 tailles de défaut allant de 0.3 à 0.7mm de diamètre et considérant les résultats de 50 inspections par taille de défaut prenant en compte différentes fonctions de densité traduisant la variabilité des paramètres incertains (lois normales autour de leur valeur nominale avec un écart type de 10% de la plage de variation mentionnée dans la partie précédente). Les seuils de décision ont été placés à -6dB par rapport à la réponse d’un Trou à Fond Plat situé dans un bloc de référence (pièce plane de

même matériau). Le diamètre du TFP de référence est adapté à la zone considérée, il est de 0.5mm de diamètre pour la zone #10. Ces seuils supposent que le rapport Signal sur Bruit est suffisamment bon pour détecter les signaux du bruit de fond, ce qui paraît une hypothèse raisonnable mais devrait être confirmé expérimentalement. Finalement, ces courbes POD sont extraites dans des fichiers de type ASCII lus ensuite par DARWIN. La probabilité de détection à 90% pour 95% confiance, le célèbre $a_{90/95}$, est atteint ici pour un diamètre de défaut de 0.5mm, c’est-à-dire un rayon de 0.25mm, soit moins que le CICS indiqué par DARWIN pour la zone #10.

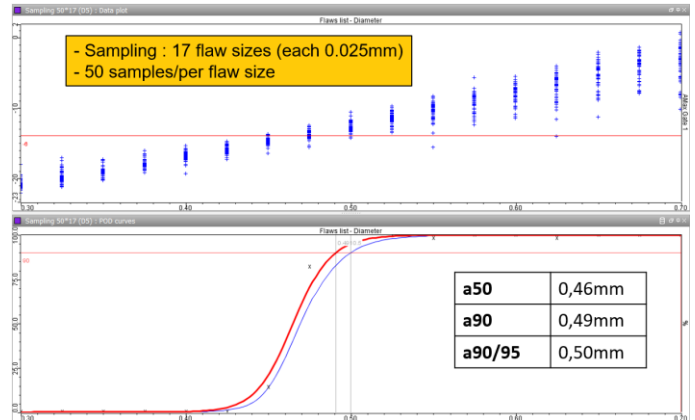


Figure 11 - Courbes POD simulées par CIVA pour le défaut #10

5. Evaluation du risque de rupture

La Figure 12 montre l’ensemble des courbes POD importées depuis CIVA vers DARWIN pour les 10 zones définies ainsi qu’une autre courbe POD appelée “FAA AC 33.14-1” utilisée comme référence (issue du document « US Federal Aviation Administration Advisory Circular 33.14-1 [13] » qui inclut un ensemble de courbes POD de référence pour l’industrie aéronautique). La courbe “FAA AC 33.14-1” de la figure 12 correspond à une courbe POD d’inspection UT basé sur un seuil de réjection équivalent à un Trou à Fond Plat de diamètre 1/64 de pouces (environ 0.4mm).

Une fois l’ensemble des courbes transférées dans DARWIN, l’outil va les intégrer ainsi que d’autres informations comme la prévalence de défauts par zone et d’autres informations liées à la cinétique d’évolution des fissures de fatigue, afin de calculer des courbes de probabilité de risque de rupture selon les cycles d’utilisation (dans notre cas, cycles de vol) de la pièce. Le risque de rupture évalué ici correspond au risque inconditionnel, ce qui veut dire le niveau de risque sans connaissance préalable de la présence ou l’absence de défaut. Les courbes de risque sont calculées pour chacun des cas suivants :

- Pas d’inspection du tout,
- Inspection au stade de la fabrication, avec un END caractérisé par deux courbes POD :
 - o La courbe POD FAA de référence,

- La courbe POD spécifique à la zone établie à partir de la méthode END simulée dans CIVA
- Inspection en service après 10 000 cycles d'utilisation (avec de la même manière une performance END caractérisée par les deux courbes POD mentionnées précédemment),
- Inspection réalisée à la fois en service et en fabrication.

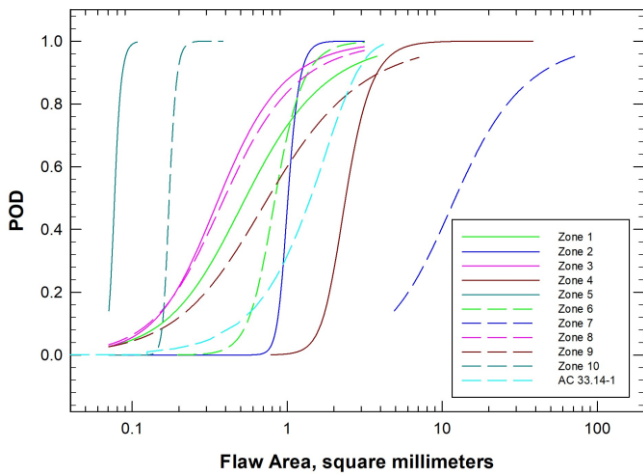


Figure 12 – Les onze courbes POD intégrées dans DARWIN pour les défauts plans

5.1. Défauts plans – Zone 8

Sur la figure 13, un premier exemple de courbe d'évaluation de risque est montré, correspondant à la zone 8. La courbe la plus haute (vert clair) montre l'évolution de la probabilité de rupture avec les cycles de vol sans aucune inspection. Si après 10 000 cycles, une inspection END est réalisée, la réduction de risque est caractérisée par la courbe rose si l'inspection est elle-même caractérisée par la courbe POD FAA. Il peut être observé qu'après 13 000 cycles, le risque augmente à nouveau signifiant que certains des petits défauts qui n'avaient pas été rejetés lors de l'inspection (sur la base de la courbe POD FAA) ont ensuite évolué vers une taille plus critique. Maintenant, si l'inspection en service est réalisée par l'END établi par la modélisation CIVA et caractérisé par la courbe POD de la zone correspondante, cela induit une meilleure performance et le niveau de risque reste constant jusqu'à presque 20 000 cycles (voir courbe en vert foncé).

Considérons maintenant que l'inspection est réalisée au stade de la fabrication. Les niveaux de risque sont caractérisés par la courbe bleu clair pour les courbes POD FAA et par la courbe bleu foncé pour le modèle CIVA. Le niveau de risque est bien plus réduit dans ce cas, notamment dans le cas de l'inspection définie par CIVA. Finalement, en associant des inspections à la fois en fabrication et en service (correspondant aux courbes pourpres et bleu foncé),

on peut observer que lorsque l'inspection est réalisée avec le niveau de performance correspondant à la POD du modèle CIVA, l'inspection en service n'induit pas de réduction supplémentaire du risque, alors que ce n'est pas le cas si on se base sur la courbe FAA. En d'autres termes, l'inspection en fabrication est si efficace (avec un END dédié à la zone considérée) qu'il rejette tous les défauts nocifs qui auraient été détectés lors d'une inspection en service après 10 000 cycles. Si une inspection en service est toujours souhaitée, elle peut potentiellement être décalée ultérieurement dans le temps lorsque d'autres défauts auront évolué. Ces outils de simulation peuvent ainsi être utilisés pour identifier la périodicité optimale d'une inspection en service.

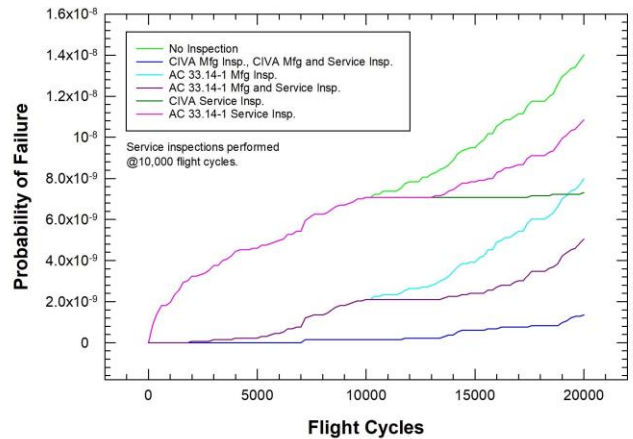


Figure 13 – Courbes d'évaluation de risques obtenues par DARWIN pour la zone #8

5.2. Défauts sphériques – Zone 6

Un autre type de défaut considéré dans cette étude a été des anomalies volumiques. On modélisera typiquement ce type de défaut par des sphères dans des pièces en titane forgées [13]. Des porosités qui sont souvent présentes en fabrication dans des pièces obtenues par fabrication additive sont également couramment modélisées par des sphères. Dans un premier temps, la même méthode d'inspection (basée sur des ondes transverses) a été simulée dans CIVA conduisant à un END assez peu performant. En effet, la méthode par ondes T était vraiment pensée pour rechercher un écho spéculaire sur un défaut plan orienté selon la section radiale de la pièce. Mais pour une porosité sphérique, il paraît bien plus simple et efficace de mettre au point une inspection ultrasonore par faisceau droit généré depuis la surface plane de la pièce (comme illustré en Fig. 14). Cette seconde technique d'inspection a été simulée dans CIVA à partir de laquelle une nouvelle courbe POD a été calculée, attestant une bien meilleure performance. Les courbes POD pour les défauts sphériques dans la zone 6 sont affichées en figure 15. Il est intéressant de relever que la courbe POD de la technique par ondes T apparaît bien moins efficace que la courbe FAA pour les petites tailles de défauts mais commence à atteindre une meilleure POD pour des défauts plus grands (environ 3

millimètres carrés de surface apparente soit environ un diamètre de 1.9mm).

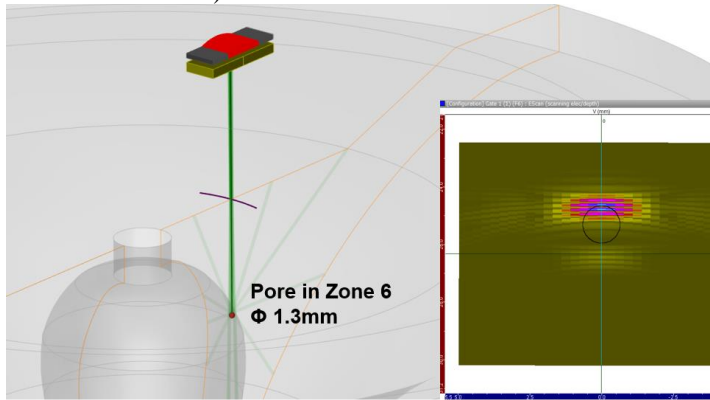


Figure 14 - Technique L0° plus adaptée pour la détection des porosités sphériques

unique basée sur les ondes T ne peut suffire pour détecter tous les types d’anomalies de façon efficace sur cet exemple de pièce.

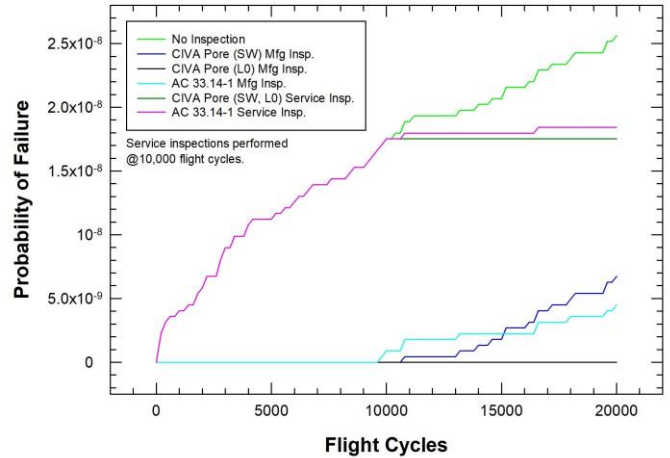


Figure 16 – Courbes d’évaluation des risques obtenues par DARWIN pour les porosités en zone #6

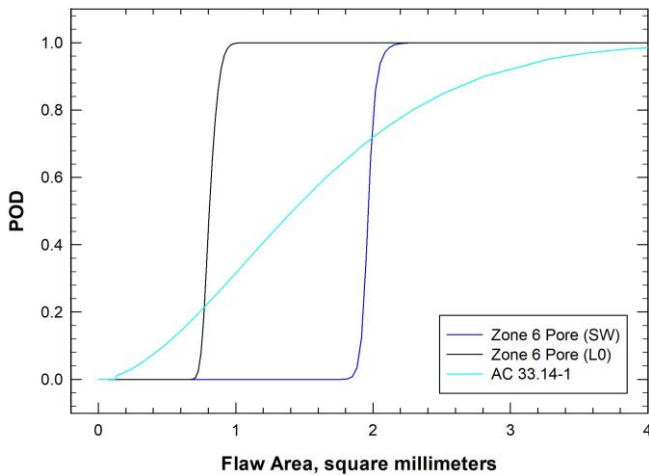


Figure 15 – Courbes POD pour les défauts sphériques de la zone #6

Concernant les courbes de risque de rupture pour cette zone (voir Fig.16), il est intéressant de comparer les deux techniques simulées dans CIVA. Vis à vis de la courbe FAA, la réduction de risque est moindre avec la technique d’inspection par ondes T au stade de la fabrication. En effet, comme observé sur les courbes POD, la technique par ondes T n’est pas suffisamment efficace pour les petits défauts. Par contre, pour une inspection en service où l’on s’attend à ce que la population d’anomalies inclut des défauts plus grands, la technique simulée conduit à une réduction de risque plus forte que si on se base sur la POD FAA. Maintenant si l’on considère la méthode L0° pour laquelle la performance semble meilleure pour les petits défauts (a90/95 est atteint pour un diamètre d’environ 1mm), la réduction de risque est forte quand l’inspection est réalisée en fabrication. Dans ce cas, DARWIN nous permet de conclure qu’une méthode adaptée est nécessaire pour parvenir à une réduction de risque suffisante pour ce type de défaut, une technique

Grâce à la combinaison des simulations CIVA et DARWIN, toutes les zones ont pu être investiguées avec cette même méthodologie et pour différentes hypothèses. A la fin, une courbe synthétique peut être construite dans DARWIN pour évaluer le risque de rupture global sur la pièce entière.

6. Conclusions

Cet article présente un travail collaboratif réalisé par EXTENDE et SwRI basé sur une cosimulation entre les logiciels CIVA et DARWIN. CIVA a aidé à la conception d’une méthode d’inspection par ultrasons d’une pièce de rotor en titane et a produit des courbes POD spécifiques par zones en prenant en compte des paramètres incertains pour cette inspection. DARWIN a établi les différentes zones caractéristiques de la pièce en termes de contraintes mécaniques et de tailles initiales de défauts critiques ce qui a permis d’initialiser les modèles CIVA avec des données pertinentes. Finalement, les courbes POD calculées par CIVA ont été intégrées dans DARWIN pour lui permettre de calculer l’évolution des risques de rupture en fonction des cycles d’utilisation de la pièce, et en considérant différentes hypothèses en termes de performance CND et de programmation des inspections. Ce travail de cosimulation illustre le cercle vertueux induit par une collaboration rapprochée entre les acteurs du CND et du PDT (ou plus généralement de la mécanique de la rupture). Même si le cas décrit dans ce papier est un exemple illustratif et pourrait mériter un travail approfondi (optimisation de la technique d’inspection, vérification expérimentale du niveau de sensibilité et du rapport signal sur bruit, etc.), des conclusions prometteuses peuvent être affirmées :

- Les END améliorent la sûreté ! Même si les acteurs du CND sont probablement déjà convaincus de cela, DARWIN permet de le quantifier par une réduction du risque de rupture,
- Les calculs DARWIN permettent d'établir les types, tailles et localisations des défauts critiques, qui sont des informations « clés » pour le développement d'une méthode d'inspection END efficace,
- Les simulations CIVA permettent aux ingénieurs de générer à faible coût un grand volume de données pertinentes à même de construire des courbes POD spécifiques par zone et pas seulement une courbe POD globale, ce qui alimente ensuite les calculs de risque de rupture de la pièce via la méthode PDT,
- Les courbes de risque produites par DARWIN permettent aux ingénieurs de déterminer le niveau d'effort END, que ce soit en termes de planning d'inspection ou de performance de la méthode END, comme illustré respectivement pour les défauts plans de la zone 8 et les porosités de la zone 6, afin de trouver le meilleur compromis entre le coût et l'efficacité, c'est à dire l'efficience.

Les auteurs espèrent que ce type d'étude peut motiver de futurs travaux et recommandations pratiques en END et mécanique de la rupture sur la base de cette méthodologie PDT.

References

- [1] S. Mahaut, S. Chatillon, M. Darmon, N. Leymarie and R. Raillon, 2009, An overview of UT beam propagation and flaw scattering models in CIVA, QNDE.
- [2] M. Darmon, S. Chatillon, 2013, 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 No.3A, http://file.scirp.org/Html/8-1610079_36873.htm#txtF2.
- [3] A. Imperiale, E. Demaldent, "A macro-element strategy based upon spectral finite elements and mortar elements for transient wave propagation modeling. Application to ultrasonic testing of laminate composite materials", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2019;119:964–990. <https://doi.org/10.1002/nme.6080>
- [4] M.P. Enright, R.C. McClung, J.C. Sobotka, J.P. Moody, J. McFarland, Y-D. Lee, I. Gray, and J. Gray, 2018, "Influences of non-destructive inspection simulation on fracture risk assessment of additively manufactured turbine engine components," paper GT2018-77058, Proceedings of the 63rd ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, Lillestrom, Norway, June 11-15, 2018.
- [5] R.C. McClung, Y-D. Lee, J.C. Sobotka, J.P. Moody, V. Bhamidipati, M.P. Enright, D.B. Guseman, and C.B. Thomas, 2018, "Some recent advances in engineering fracture modeling for turbomachinery," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, 141 (2) pp 141(2): 021005.
- [6] M.P. Enright, J.P. Moody, and J.C. Sobotka, 2016, "Optimal automated fracture risk assessment of 3D gas turbine engine components," paper GT2016-58091, Proceedings of the 61st ASME International Gas Turbine & Aeroengine Technical Congress, Seoul, South Korea, June 13-17, 2016.
- [7] R.C. McClung, Y-D. Lee, M.P. Enright, and W. Liang, 2014, "New methods for automated fatigue crack growth and reliability analysis," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, 136 (6) pp. 062101 :1-7.
- [8] M.P. Enright and R.C. McClung, 2011, "A probabilistic framework for gas turbine engine materials with multiple types of anomalies," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, 133 (8) pp. 082502:1-10.
- [9] B. Chapuis, P. Calmon, F. Jenson, 2016, Best practices for the use of Simulation in POD Curves Estimation, IIW Collection, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62659-8>
- [10] F. Foucher et al, 2018, New tools in CIVA for Model Assisted Probability of Detection (MAPOD) to support NDE reliability studies, ASNT Aerospace Symposium, https://www.extende.com/files/extende/publications/2018_ASNT-Aerospace_Foucher_ToolsinCIVAforReliabilityStudies_EN.pdf
- [11] <https://www.extende.com/objectives-of-reliability-in-nde-training>
- [12] USA Department of Defense Handbook, 2009, MIL-HDBK-1823-A, NDE system reliability assessment.
- [13] Federal Aviation Administration, "Damage Tolerance for High Energy Turbine Engine Rotors," Advisory Circular 33.14-1, January 8, 2001.