

Imagerie par courant de Foucault des fissures et dépôts dans les GV par méthodes inverses

1. Contexte

Les générateurs de vapeur Les générateurs de vapeur représentent une composante particulièrement sensible en termes de sûreté car il constitue l'interface entre le circuit primaire et secondaire des réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP). L'un des moyens d'inspection les plus efficaces est l'utilisation de sondes à courants de Foucault (CF) afin de détecter divers types de dégradation dans le générateur de vapeur : dépôts colmatants, encrassement, fissures, usures, manques de matière etc... Les pratiques actuelles d'analyse des mesures CF reposent sur la simulation ou la réalisation de mesure sur maquette afin de comprendre la sensibilité de la mesure et le traitement du signal pour l'analyse des données d'inspection. Cette stratégie fonctionne bien quand la variabilité des dégradations est faible, en effet il est alors possible de réaliser des études expérimentales ou en simulation représentatives de cette variabilité puis de construire des algorithmes de traitement de données efficaces permettant de faire de la détection et de la quantification de défaut.

Inversement, cette approche est mise en défaut lorsque les pathologies sont très variables (formes diverses, propriétés matériaux inconnus, etc...) ou lorsque plusieurs pathologies influencent une même mesure (de façon non linéaire). Les travaux précédents se sont concentrés sur le premier point et le second n'a donc été abordé que de façon limitée. Par conséquent, le cœur du travail sera le développement de méthode d'inversion pour le second cas, par exemple en cas de fissures en présence de dépôts. En effet, la signature d'une fissure en présence d'un dépôt est différente de celle d'une fissure seule, d'un dépôt seul ou d'une combinaison linéaire des deux, rendant sa détection difficile à partir d'abaques. Dans cette optique une méthodologie d'inversion des paramètres du modèle représentant la physique de la mesure permet de reconstruire des situations de dégradation complexe. Ces méthodes ont de plus l'avantage de reconstruire directement les paramètres d'intérêt et donc d'éviter les phases de calibration nécessaires pour les méthodes de traitement de données qui sont parfois délicates [6]. On peut ajouter qu'elles permettent naturellement d'utiliser toutes les sources de données disponibles, comme différentes sondes, différentes fréquences, etc. car elles cherchent à reconstruire la grandeur physique influençant les différentes mesures. Leurs principaux désavantages sont liés à l'utilisation d'un modèle physique dont il faut équilibrer le cout de calcul potentiellement important avec sa précision.

Les problèmes inverses sont, en général, des problèmes mal posés c'est à dire qu'il n'existe pas de méthodes stables de reconstruction et qu'il n'y a pas unicité de la solution. Ceci est intrinsèquement lié à la physique et au nombre limité de mesures. Afin de mitiger cette réalité il est nécessaire de travailler sur trois leviers : une modélisation adaptée, des inconnues à reconstruire (c'est à dire réduisant au maximum le nombre de degrés liberté nécessaire à leur modélisation), l'incorporation de toute information a priori (telles que la

position a priori, une gamme de valeur, une régularité, etc...) et le développement de stratégies numériques et algorithmiques adaptées à l'inversion.

2. Etat de l'art et résultats antérieurs

Lors de la thèse de Zixian Ziang [1] des premiers travaux ont été menés pour montrer qu'il était possible de mettre en œuvre une stratégie d'inversion sur un modèle 2D représentatif de certains contrôles dans le générateur de vapeur. On a ainsi pu mettre en place une reconstruction de dépôt pour le cas du tube droit avec une sonde axiale (SAX). Ces premiers travaux exploratoires ont montré que l'on pouvait reconstruire des formes volumiques ou des dépôts fins avec de bons résultats, même en 3D [4].

Ces travaux se sont poursuivis avec la volonté de valider que les bons résultats constatés en 2D s'étendraient en 3D. Afin d'obtenir une inversion dans un temps satisfaisant, un travail important a été mené sur la modélisation du problème direct et inverse. Ces améliorations ont été apportées dans le travail de thèse de Hugo Girardon [2]. Elles ont notamment permis une inversion de dépôt colmatant les passages foliés d'une plaque entretoise pour des données acquies à l'aide d'une sonde multi éléments (SMX). Pour arriver à ces résultats, le problème direct a été reformulé puis résolu avec des outils adaptés aux calculs hautes performances. Il a également été adapté afin de passer d'une optimisation géométrique à une optimisation topologique. Finalement ces travaux de thèse ont également enrichi le modèle 2D original en y incorporant les développements liés à la simulation haute performance, mais aussi en explorant d'autres types de dégradations comme la recherche des paramètres physique des dépôts ou les imperfections de fabrication des tubes.

3. Objectifs

Les objectifs de cette thèse seront de poursuivre les travaux antérieurs en poursuivant l'amélioration conjointe des modèles directs et inverses, ainsi que l'introduction de nouvelles dégradations dans l'approche inverse. Tous les développements seront validés sur des données réelles issues de maquettes et de mesures sur sites, ou lorsque c'est impossible, à l'aide de simulations effectuées avec le code industriel C3D -CND[5].

3.1. Problématiques industrielles visées et données associées

Encrassement

Le phénomène d'encrassement se traduit par la présence de dépôt, à l'extérieur, sur la partie droite des tubes. Ce dépôt, lorsqu'il est important, entraîne une réduction du transfert thermique du circuit primaire vers le circuit secondaire réduisant la performance du générateur de vapeur et donc de la centrale. A ce titre il peut amener à la mise en œuvre d'un nettoyage chimique du GV. Pour cette dégradation, l'exploitant souhaite s'appuyer sur la sonde axiale afin d'évaluer l'épaisseur du dépôt dans une hypothèse axisymétrique.

Colmatage des plaques entretoises

Le colmatage des passages foliés des plaques entretoises est évaluée à l'aide de sonde SAX ou SMX. L'incertitude sur les caractéristiques du dépôt colmatant (forme, paramètres...)

induit une difficulté sur l'évaluation par courants de Foucault. Le premier objectif est donc d'estimer les paramètres physiques du dépôt.

Par ailleurs, la présence de dépôt rend difficile la détection et l'estimation de fissure. Le but est donc la reconstruction combinée des fissures/usures/manques de matières et des dépôts colmatant.

Amélioration de la détection de fissures avec traces d'outillages sur l'échangeur RCV-RRA

Cette problématique est a priori une ouverture pour la thèse, au cas où les deux autres applications auraient été traitées avec succès.

L'objectif est de détecter des fissures dans un échangeur comportant des traces d'outillages et une zone de transition de dudgeonnage rendant la détection difficile. Cette action permettra de mettre à profit les travaux sur les fissures pour travailler sur cette problématique. De plus, l'ingénierie d'EDF cherche à optimiser le processus de contrôle. Ces optimisations peuvent fournir des leviers complémentaires pour améliorer la détection de fissure.

Données associées

Afin d'avoir des données réalistes sur lesquelles réaliser et développer les méthodes d'inversion, il est possible d'utiliser le code de simulation numérique industrielle, C3D-CND. En interne C3D-CND permet a priori de fournir des données pour la problématique du colmatage et de la fissuration ainsi que pour la problématique de l'encrassement.

On dispose également de données de maquettes pour les problématiques associées : colmatage, entaille et fissuration réalistes. Des maquettes spécifiques pour le colmatage et l'encrassement sont prévu en 2021. Il existe également des maquettes pour la problématique de la transition de dudgeonnage du circuit RCV-RRA. Pour l'instant il n'existe pas de maquette avec des dégradations multiples.

Finalement, il sera possible de travailler sur des données issues de contrôle sur site. Pour celles-ci, nous ne disposons que d'indication sur le colmatage au travers d'examen télévisuel de certains passages foliés du générateur de vapeur et non de connaissance complète. Ces données permettront de vérifier que la méthode n'est pas impactée par des perturbations liées à l'acquisition sur site tout en contrôlant la cohérence des résultats avec la méthode des examens télévisuels.

3.2. Positionnement de l'approche proposée

L'approche inverse se positionne comme un outil complémentaire aux approches à très grand rendement de type traitement de signal. En effet, le recours à un modèle physique nécessitant des temps de calcul important, tout particulièrement en 3D, ne permet pas d'envisager un traitement de l'intégralité des tubes d'un GV. Par contre la méthode inverse fournit une méthodologie qui fait un lien direct entre grandeurs physiques d'intérêt et mesures, et elle simplifie ainsi l'interprétation des résultats en évitant une phase de calibration. En étant centré sur l'inconnu physique à reconstruire elle permet aussi d'intégrer relativement facilement des sources d'information variées (différentes fréquences, des a priori sur la géométrie, des données de plusieurs sondes, etc...)

Le gain d'interprétabilité apporté par un coût de calcul élevé en fait donc intrinsèquement une méthode d'expertise pour les cas qui sortent des hypothèses associées à la méthode de traitement de signal. On constate donc que du fait de son positionnement la méthode inverse doit être en mesure d'adresser les situations les plus complexes et donc que la minimisation de son coût de calcul est un point d'attention si ce n'est un objectif constant.

3.3. Détails des travaux et thématiques

Méthode géométrique pour l'imagerie en champ proche

Dans la continuité de [7], on mettra en place les méthodes de sampling pour notre cas d'application. Ces méthodes ont une précision plus faible mais ne nécessitent pas de résolution du problème physique. Si leur précision est suffisante elle apporte donc une réponse très efficace au problème d'imagerie considéré. Si leurs résultats sont trop grossiers alors elles fournissent une solution initiale de bonne qualité réduisant d'autant le temps de calcul de la méthode inverse itérative.

L'encrassement un cas d'étude industriel pour le modèle 2D axisymétrique

On s'attachera à étendre le modèle asymptotique développé dans [1, 2] pour ce type de dépôt c'est à dire prendre en compte le contraste de perméabilité et quantifier les performances de la méthode. Si le modèle asymptotique permet de traiter les gammes d'épaisseur de l'encrassement on favorisera cette approche afin d'obtenir de meilleure performance. Dans le cas où son domaine de validité serait insuffisant, on s'appuiera sur la représentation volumique du dépôt telle que développée dans [2]. Quelle que soit la solution finalement retenue, on appliquera et quantifiera les performances de la méthode sur des données réelles. Cette action doit permettre au doctorant de prendre en main les méthodes et outils.

Intégration de nouvelles dégradations : paramètres matériaux en plus de la forme des dépôts & fissures, manque de matière et usures

La recherche des paramètres physiques (conductivité et perméabilité) des dépôts en plus de leur forme comme effectuée dans [2] ne constitue pas en soi une difficulté particulière de mise en œuvre dans l'algorithme actuel. Néanmoins, il est probable que pour obtenir des résultats robustes, précis et rapides, coupler les approches d'optimisation développées actuellement avec les méthodes de reconstruction géométrique développées par [3] afin d'obtenir une bonne initialisation de la géométrie du dépôt permettrait un gain important.

D'autre part, la direction industrielle a également exprimé un intérêt fort pour la recherche de fissures, manque de matière ou usures en plus de dépôts. L'incorporation de ce type de dégradation constituera le cœur du travail de cette thèse. La stratégie la plus adaptée pour la prise en compte de ce type de défaut sera d'abord validée en 2D, dans la perspective de son inversion 3D. Étant donné la grande variété de dégradations à retrouver, il sera bénéfique d'utiliser les méthodes de reconstruction géométrique pour initialiser les grandeurs géométriques à retrouver.

Ces dégradations seront recherchées en utilisant des données SMX et/ou SAX pour plusieurs gammes de fréquences.

Amélioration du modèle direct et inverse en 3D

Un travail important a été mené dans [2] autour de la formulation et du développement de stratégie de résolution adaptée aux HPC pour la résolution du problème direct. Ce travail peut être complété au niveau de l'optimisation du maillage, des stratégies de discrétisation par éléments finis mais aussi de formulation approchée par exemple. Par ailleurs, de nombreuses pistes plus spécifiques aux problèmes inverses peuvent être explorées avec des gains de performance potentiellement substantiels. On peut citer, par exemple, le transfert d'information entre itérations du problème inverse ou encore l'échantillonnage intelligent et adaptatif des mesures prises en compte à chaque itération.

Finalement la prise en compte d'incertitudes sur certaines grandeurs induira probablement une hausse significative du temps de calcul qui appellera sans doute une réflexion spécifique sur la stratégie de résolution (petites variations).

Ouverture 1 : Optimisation des paramètres de l'acquisition

Pour d'autres échangeurs que le générateur de vapeur (tel que l'échangeur RCV-RRA), la direction industrielle cherche à optimiser la qualité des reconstructions en faisant varier certains paramètres de mesure afin de détecter des dégradations multiples. Parmi les paramètres à optimiser, on peut citer la fréquence d'acquisition, le nombre de bobines réceptrices pour les sondes multi éléments, le couplage de plusieurs sondes, etc.

Ouverture 2 : Analyse de sensibilité

Sur le cas des dépôts, nous proposons la mise en œuvre de premières méthodes d'analyses de sensibilité, de quantification d'incertitude et d'estimation des dépôts les plus favorables et les moins favorables. Ces méthodologies pourront être développées afin d'explorer les solutions qui reconstruisent les mesures de façon équivalente, afin d'aider à l'évaluation d'une situation.

4. Organisation, moyens et programme de travail

La thèse sera encadrée par Lorenzo Audibert du groupe P12 du département PRISME d'EDF R&D et Housseem Haddar de l'INRIA. Son financement sera assuré par le projet APEXIS. Cette thèse s'inscrivant dans la continuité de travaux de plus en plus matures, une interaction forte avec la direction industrielle sera assurée afin de spécifier des cas tests d'intérêt et de les valider au plus tôt sur des acquisitions réelles.

Le programme de travail prévu est le suivant :

- 3-6 mois : prise en main de la problématique sur le cas d'application de l'encrassement en 2D. Bibliographie et premiers tests pour la modélisation de la fissure/usure/manque de matière sur le cas 2D.
- 6-12 mois : Finalisation de l'inversion de la fissure/usure/manque de matière en 2D et prise en main du code 3D par la mise en œuvre de l'inversion des paramètres physiques
- 12-24 mois : Développement du modèle 3D pour la modélisation de la fissure/manque de matière/usures et première inversion. Mise en œuvre des méthodes reconstruction géométrique pour l'initialisation de la forme du dépôt à inverser.

- 24-36 mois : Finalisation de l'inversion 3D de la fissure/manque de matière/usure couplée à une inversion de dépôt et amélioration du code et du modèle 3D.

5. Risques

Le verrou scientifique majeur de ce travail est l'inversion de dégradations multiples (dépôt et fissure) en 3D de façon robuste et rapide. Les risques identifiés sont les suivants :

- Manque de précision des méthodes géométrique et/ou du modèle asymptotique pour les grandes épaisseurs d'encrassement ;
- Difficulté à trouver une formulation décrivant la fissure qui permette de conserver les performances associées à l'inversion de dépôts ;
- Manque de performance des méthodes géométriques pour l'initialisation de la forme des dépôts.

Pour le premier risque, on peut s'appuyer sur l'inversion volumique par level set avec comme contrepartie un coût de calcul élevé dû aux épaisseurs faibles de l'encrassement. La problématique industrielle d'intérêt étant 2D, le temps de calcul sera tout de même réaliste. Pour les deux autres risques, les parades sont identiques. En effet, ces deux risques induiraient une augmentation du nombre d'itération dans la résolution du problème inverse et donc du temps de calcul. La parade naturelle est donc de travailler à une réduction du temps de calcul par d'autres leviers : augmentation de la puissance informatique, ce qui implique une implémentation qui permet de profiter d'un usage plus important d'une architecture HPC, amélioration des algorithmes d'optimisation itératifs utilisés pour la résolution du problème inverse... Ces axes d'amélioration ont été identifiés par ailleurs et des recherches sur ces sujets sont en cours avec notre partenaire académique.

Il existe également un risque sur la qualité et la disponibilité des données. Les codes numériques sont aujourd'hui disponibles et validés, le seul risque qui leur est associé relève de la disponibilité des personnes capable de les faire fonctionner. Du point de vue des données réelles il faudra s'assurer de la disponibilité des maquettes et des acquisitions. A priori, les maquettes nécessaires existent déjà ou sont prévues pour chaque dégradation seule, mais il faut s'assurer que les acquisitions nécessaires soient réalisées, c'est à dire avec les sondes SAX et SMX.

6. Bibliographie

- [1] Jiang Z., Some inversion methods applied to non-destructive testings of steam generator via eddy current probe, PhD thesis, Ecole Polytechnique (2014)
- [2] Girardon H., Audibert L., Haddar H., Shape reconstruction of deposits inside a steam generator using eddy current measurements, Rapport de recherche, 2019
- [3] Inverse Scattering Theory and Transmission Eigenvalues, Cakoni F., Colton D., Haddar H., SIAM
- [4] Haddar H., Riahi M., Jiang Z., A robust inversion method for quantitative 3D shape reconstruction from coaxial eddy-current measurements, Journal of Scientific Computing, 2017
- [5] P. Thomas, B. Goursaud, C3D-CND : LA SIMULATION DES CND-CF COMPLEXES A LA PORTEE DES INGENIEURS, Journée Cofrend 2017

[6] Avis IRSN/2019-00098

[7] Haddar H., Riahi, Near-Field Linear Sampling Method for Axisymmetric Eddy Current Tomography