

# **SIMULATION D'UN CONTROLE PAR SONDE AXIALE D'UNE EPINGLE DE TUBE GV PAR L'INTERMEDIAIRE DU LOGICIEL ELEMENTS FINIS « FLUX® »**

*Simulation of a steam generator tube inspection with a internal coaxial  
probe using the FLUX® finite elements software*

LAVIE B., TOUDIC E. (DCNS CESMAN)  
FOUCHER F., BASTIN P. (EXTENDE)

## **RESUME**

Dans le cadre des évolutions réglementaires, la qualification de l'examen par courants de Foucault en sonde axiale du faisceau tubulaire des générateurs de vapeur du type K15 est exigée.

Le programme de qualification a permis d'identifier la liste des paramètres influents associés à cet examen. Ce document ne traite qu'un seul des paramètres identifiés, en l'occurrence la position de défauts dans la partie cintrée de l'épingle.

L'approche envisagée était d'évaluer les performances de détection de défauts par la réalisation d'essais. Notre choix s'était porté sur des entailles longitudinales et circonférentielles "externes" pour des positions intrados et extrados pour chacun des rayons de cintrage composant le faisceau tubulaire des GV K15.

Afin de conforter nos choix vis-à-vis de la commission de qualification, une action complémentaire a été menée entre DCNS et la société EXTENDE. Cette dernière a réalisé la simulation d'un contrôle par sonde axiale d'une épingle par l'intermédiaire du logiciel par Eléments Finis FLUX®.

Les conclusions de cette étude sont présentées.

## **ABSTRACT**

Following regulations evolutions, the qualification of steam generator tube bundle inspection by eddy current is now required for French submarine in service inspection.

A qualification program has identified a list of influential parameters for this application. This paper deals with only one of these parameters: defect position in the current section of the pin.

We initially planned to evaluate the detection performance by doing extensive tests on some specific cases supposed to be the worst: both longitudinal and circumferential external notch, for intrados and extrados, for each bending radius.

To confirm that the chosen cases were the worst, we have conducted a specific study with EXTENDE company. Using the finite elements software FLUX®, a quantitative simulation of the eddy current inspection of a pin with an internal coaxial probe have been computed. The results of this modelling study are detailed in this paper.

## **CONTEXTE**

Le générateur de vapeur est un des composants principaux des chaufferies nucléaires embarquées. Il assure le transfert de l'énergie thermique de la réaction nucléaire de l'eau du circuit primaire à l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur alimentant les turbines pour la production d'énergies électrique et mécanique de propulsion.

Dans le cadre des évolutions réglementaires, la qualification des procédés d'essais non destructifs utilisés pour le suivi en service des chaufferies nucléaires embarquées est exigée. L'examen par courants de Foucault en sonde axiale du faisceau tubulaire des générateurs de vapeur du type K15 fait partie de l'un de ces procédés soumis à qualification.

L'établissement du programme de qualification a permis d'identifier la liste des paramètres influents associés à cet examen. Ce document ne traite qu'un seul des paramètres identifiés, en l'occurrence la position de défauts dans la partie cintrée de l'épingle.

L'approche envisagée était d'évaluer les performances de détection de défauts par la réalisation d'essais. Mais compte tenu des nombreux cas à étudier (4 rayons de cintrage, 6 défauts artificiels, position intrados et extrados dans le cintre), seuls les cas les plus critiques peuvent être traités. Notre choix s'était porté sur des entailles longitudinales et circonférentielles "externes" pour des positions intrados et extrados pour chacun des rayons de cintrage composant le faisceau tubulaire des GV K15.

La question est de savoir si ce sont bien les cas les plus critiques ? Notamment le choix de la position « externe ».

## **DEMARCHE DE JUSTIFICATION**

Afin de conforter nos choix vis-à-vis de la commission de qualification GE-QEND (Groupe d'Experts pour la Qualification des Examens Non Destructifs) chargée de se prononcer sur la qualification conventionnelle de l'examen par courants de Foucault en sonde axiale du faisceau tubulaire des générateurs de vapeur type K15, une action complémentaire a été menée entre DCNS et la société EXTENDE.

Cette dernière a réalisé la simulation d'un contrôle par sonde axiale d'une épingle par l'intermédiaire du logiciel par Eléments Finis FLUX<sup>®</sup>.

Ceci a été mené dans le but d'estimer l'influence de la partie cintrée sur la sensibilité de détection de défauts et de manière simultanée de démontrer la pertinence de notre choix, en l'occurrence de ne réaliser que des défauts en paroi externe du tube.

## **DESCRIPTIF TECHNIQUE DE L'ETUDE**

L'examen par courants de Foucault des épingles composant le faisceau tubulaire des générateurs de vapeur type K15 est effectué sur toute la longueur du tube.

Comme expliqué précédemment, la zone sur laquelle notre étude s'est portée correspond à la partie cintrée du tube.

La configuration géométrique modélisée est la suivante :

- Diamètre externe : 14 mm
- Epaisseur : 1,35 mm
- Rayon de cintrage : 38 mm

Les tubes composant le faisceau tubulaire sont en Incoloy 800 de conductivité 1MS/m.

Les caractéristiques de la sonde utilisée correspondent à celles de la sonde SAX type A138098B de chez ZETEC (figure 1). Son diamètre externe est de 9,8 mm.



Figure 1 : Sonde SAX type A138098B de chez ZETEC

L'exigence définie dans le Cahier des Charges Fonctionnelles pour la zone cintrée est de détecter les défauts artificiels suivants :

- Entaille longitudinale interne « ELI » (10 x 0,2 x 50%)
- Entaille longitudinale externe « ELE » (10 x 0,2 x 50%)
- Entaille circonférentielle interne « ECI » (180° x 0,2 x 50%)
- Entaille circonférentielle externe « ECE » (180° x 0,2 x 50%)

Dans le cadre de cette étude, qui a pour but d'évaluer les performances de détection de défauts dans la zone cintrée de l'épingle, tous les défauts artificiels cités ci-dessus ont été étudiés à la fois en position extrados (figure 2) et en position intrados.

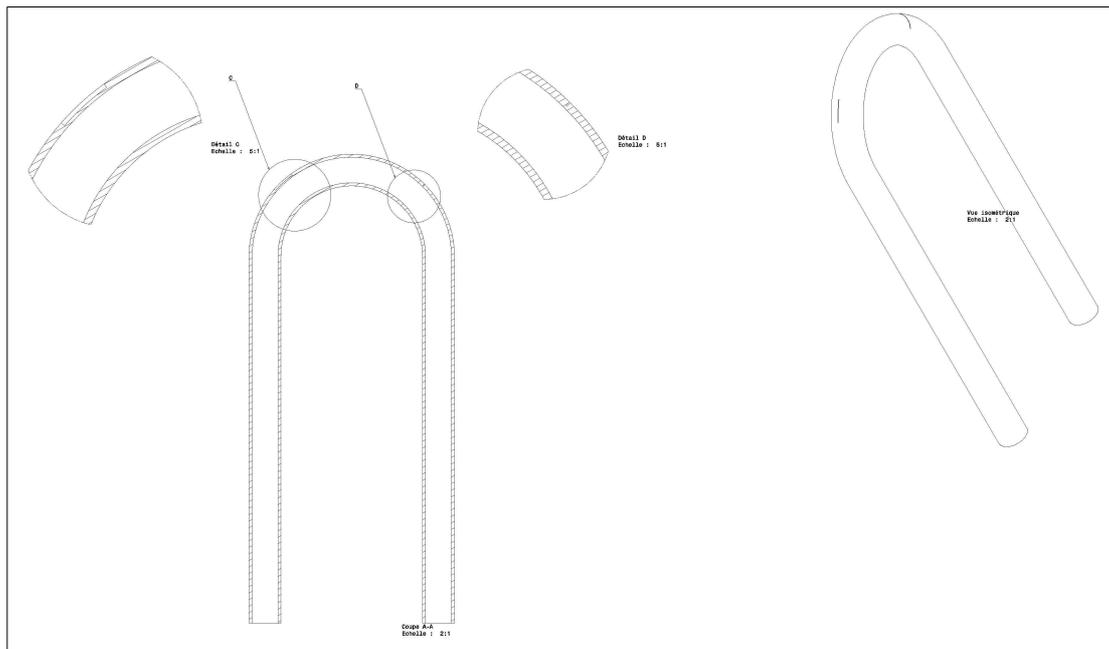


Figure 2 : Schéma d'une épingle comportant un défaut longitudinal et circonférentiel en partie extrados

## METHODOLOGIE D'EXAMENS

Conformément à la procédure faisant l'objet de la qualification, les parties cintrées des tubes sont examinées en réalisant une combinaison de signaux afin d'éliminer les signaux de géométrie dus aux cintres.

Les deux fréquences différentielles servant à la combinaison sont les suivantes :

- F1 = 170 kHz
- F3 = 35 kHz

Les canaux différentiels F1 et F3 doivent être étalonnés avant tout réglage de la combinaison, en l'occurrence nommée C2.

L'étalonnage des fréquences F1 et F3 est effectué à partir de 3 trous traversants espacés de 120° dans la même section et de diamètre 0,8 mm.

Les valeurs d'étalonnage en termes d'amplitude et de phase sont les suivantes (tableau 1):

	Amplitude (mV)	Phase (°)
<b>Voie F1 (170 kHz)</b>	926	22
<b>Voie F3 (35 kHz)</b>	1566	5

Tableau 1 : Valeurs d'étalonnage des fréquences F1 et F3

La voie combinée est ensuite elle-même étalonnée de manière à porter le signal obtenu sur les 3 trous traversants aux valeurs suivantes :

	Amplitude (mV)	Phase (°)
<b>Voie C2</b>	1820	0

Tableau 2 : Valeurs d'étalonnage de la voie combinée C2

## MODELISATION SOUS FLUX

La modélisation a été effectuée sous le logiciel FLUX<sup>®</sup>, développé par la société CEDRAT, dans sa version courante 10.3. Le logiciel FLUX<sup>®</sup> est un outil de simulation par éléments finis en électromagnétisme et en thermique. Il est largement utilisé de par le monde dans différents domaines d'applications (machines électriques, actionneurs magnétiques, traitement thermique, etc. [1]). FLUX<sup>®</sup> est également couramment utilisé sur des applications de Contrôle Non Destructif par méthode électromagnétique (Courants de Foucault, Magnétoscopie, etc., lire notamment [2],[3]). Des travaux mettant en œuvre un couplage avec le logiciel CIVA ont également été réalisés et appliqués notamment à la modélisation de contrôles CF sur des portions spécifiques des tubes GV de centrales nucléaires (voir par exemple [4]).

Le modèle de cintre réalisé sous FLUX<sup>®</sup> est visualisé ci-dessous (figure 3). Le défaut (ici entaille longitudinale interne extradados) est représenté en rouge et les 2 capteurs composant la sonde axiale sont représentés en noir et rose :

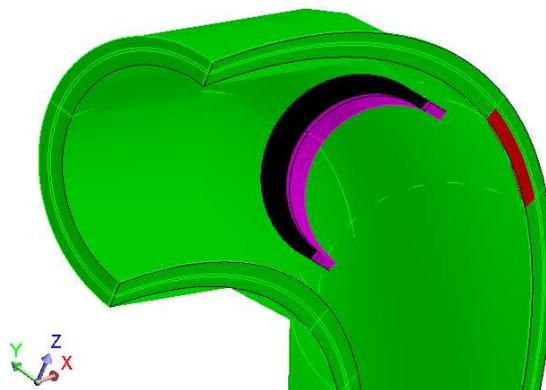


Figure 3 : Visualisation d'une configuration modélisée sous FLUX

Les entailles étant situées en plein cintre, on limite la portion de cintre représenté à un arc de 90°. De plus, la configuration présentant des symétries physiques par rapport au plan médian du tube, seule une moitié de tube est représentée permettant de réduire la taille du modèle éléments finis tout en prenant compte la globalité du système.

## SIMULATIONS REALISEES

L'ensemble des entailles définies ci-dessus ont été simulées, en position intrados et extrados, soit 8 défauts au total (figure 4).

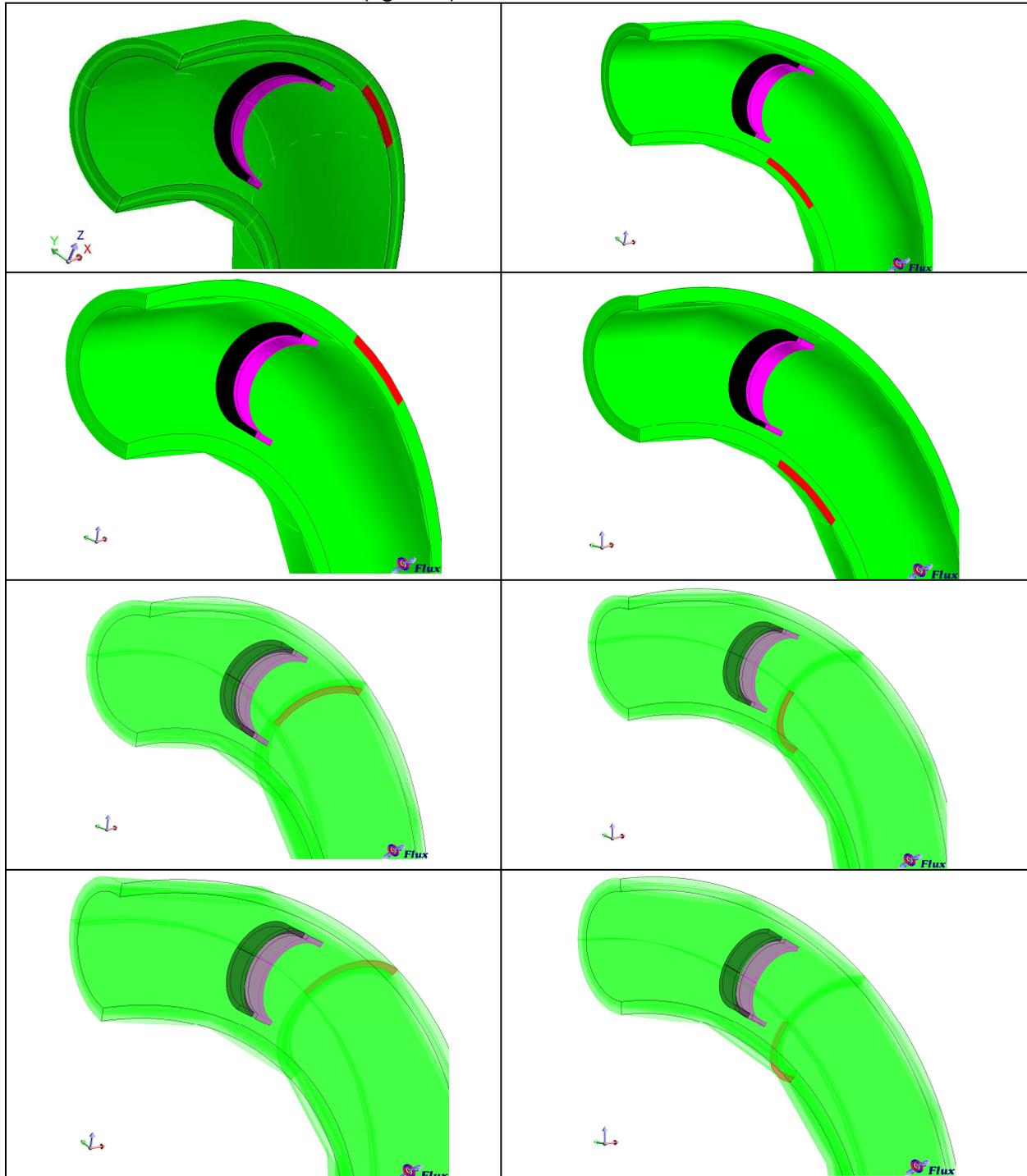


Figure 4 : Ensemble des entailles simulées (de haut en bas: Entaille Longitudinale interne et externe, entaille circumférentielle interne et externe, à gauche: extrados, à droite, intrados)

La procédure d'examen a été modélisée dans sa globalité. Ainsi la configuration d'étalonnage décrite plus haut (3 trous de diamètre 0.8mm en partie droite de tube) a d'abord été simulée sous FLUX<sup>®</sup> aux 2 fréquences 35kHz (voie F3) et 170kHz (voie F1), permettant de déterminer les coefficients d'étalonnage (amplification, rotation de phase) à appliquer aux signaux bruts obtenus par simulation de manière à obtenir le signal défini par la procédure (tableau 1). Ensuite, après obtention par simulation des signaux bruts sur les 8 défauts ci-dessus, les résultats sont normalisés à l'aide des coefficients d'étalonnage déterminés précédemment. Les 2 voies étalonnées sont alors combinées en appliquant une matrice de combinaison, permettant d'obtenir la voie C2 = F1 normalisé + [M] \* F2 normalisé. Les coefficients de la matrice de combinaison [M] sont directement extraits du logiciel d'analyse interne DCNS utilisé (JADE 1.9.0) pour l'examen du cintre considéré. Enfin, la voie C2 est elle-même normalisée d'après les coefficients d'étalonnage définis sur les 3 trous (voir tableau 2).

La prise en compte de l'ensemble de la procédure d'examen dans la simulation nous permettra une comparaison directe entre les résultats de modélisation et la mesure.

## RESULTATS

Les résultats des signaux obtenus après combinaison sur les 4 entailles en position extrados sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Défaut	Voie	Amplitude (mV)	Phase (degrés)*
ELI - Entaille longitudinale interne	C2	1931.7	4.1°
ELE – Entaille longitudinale externe	C2	1732.0	7.1°
ECI - Entaille circonférentielle interne	C2	1264.2	-0.7°
ECE - Entaille circonférentielle externe	C2	1178.0	3.3°

*Tableau 3 : Résultats obtenus pour la voie combinée C2 pour les 4 entailles en position extrados*

Les courbes de Lissajous représentant les voies X et Y des signaux dans le plan d'impédance sont ensuite affichées (figure 5). Les signaux des entailles sont superposés 2 à 2:

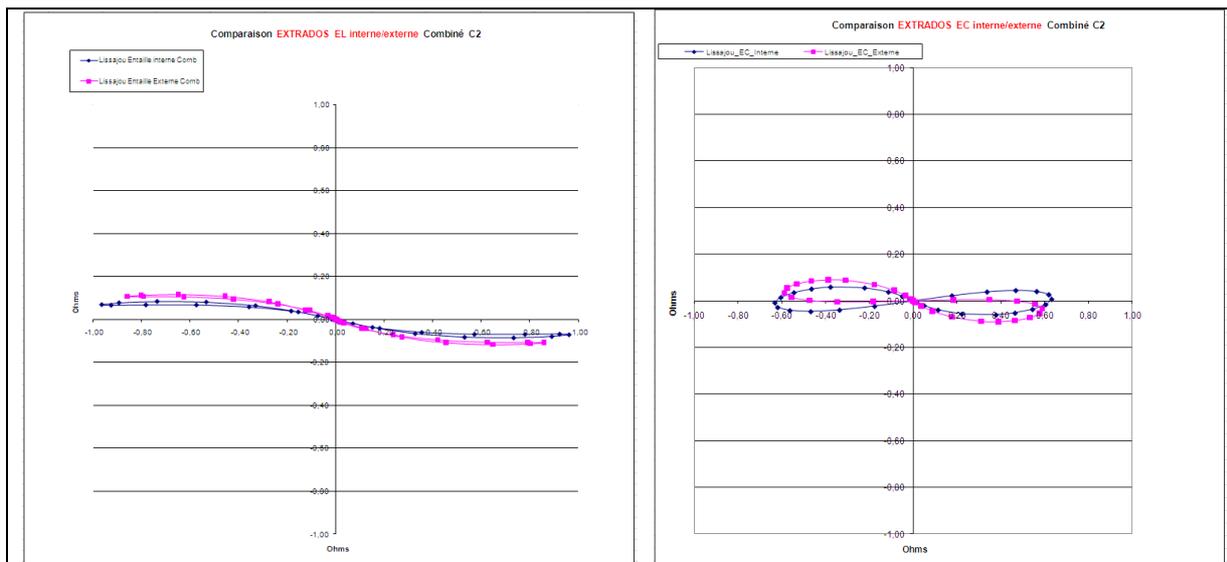


Figure 5 : Signaux dans le plan d'impédance en position Extrados : Entailles Longitudinales (à g.) et circonférentielles (à dr.), internes (en bleu) et externes (en rose)

Les résultats analogues sont présentés pour les entailles en position intrados sur le tableau et les figures ci-dessous.

Défaut	Voie	Amplitude (mV)	Phase (degrés)*
ELI - Entaille longitudinale interne	C2	1749.7	3.9°
ELE – Entaille longitudinale externe	C2	1483.2	6.8°
ECI - Entaille circonférentielle interne	C2	1349.5	-1.4°
ECE - Entaille circonférentielle externe	C2	1334.3	2.7°

Tableau 4: Résultats obtenus pour la voie combinée C2 pour les 4 entailles en position intrados

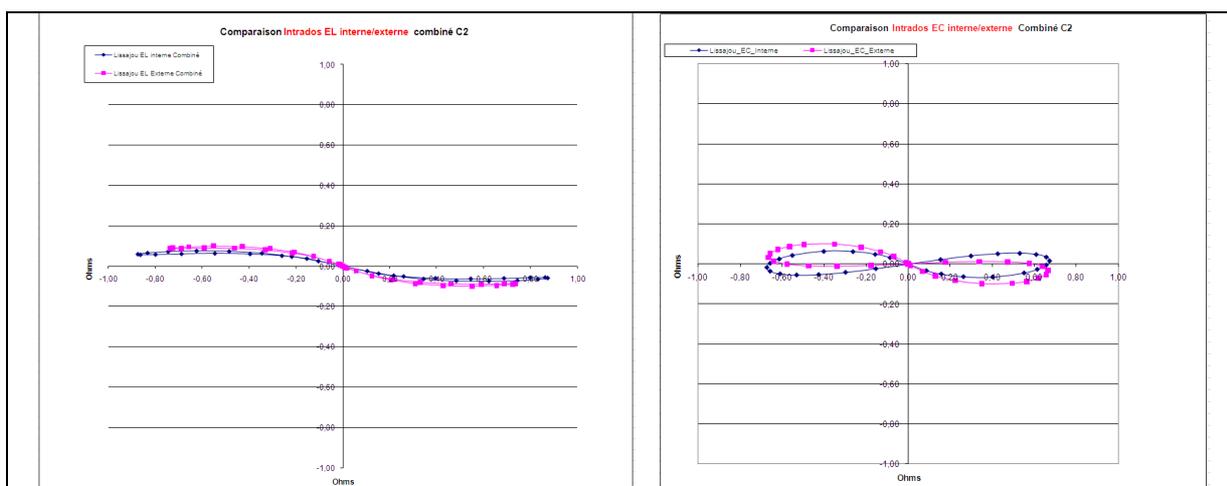


Figure 6 : Signaux dans le plan d'impédance en position Intrados : Entailles Longitudinales (à g.) et circonférentielles (à dr.), internes (en bleu) et externes (en rose)

Pour les 4 couples d'entailles, on constate que l'amplitude du signal obtenu sur l'entaille interne est toujours plus forte que l'amplitude obtenue sur l'entaille externe de même nature. La différence d'amplitude s'élève à :

- 1% sur les entailles circonférentielles intrados
- 7% sur les entailles circonférentielles extrados
- 11% sur les entailles longitudinales extrados
- 18% sur les entailles longitudinales intrados

Quelque soit le cas, on constate donc effectivement que la détection de l'entaille externe constitue le cas le plus critique pour ce contrôle par sonde axiale, ce qui confirme l'hypothèse initiale de l'entité de conception.

Il est également possible d'afficher dans FLUX<sup>®</sup> la représentation des densités de courant de Foucault dans le cintre autour du défaut. Cette visualisation permet de mieux comprendre les perturbations engendrées par le défaut sur la circulation des courants induits, et de mieux apprécier l'impact des paramètres du contrôle (propriété du matériau, fréquence, etc.) sur la profondeur de pénétration et la zone couverte par le champ induit (figure 7).

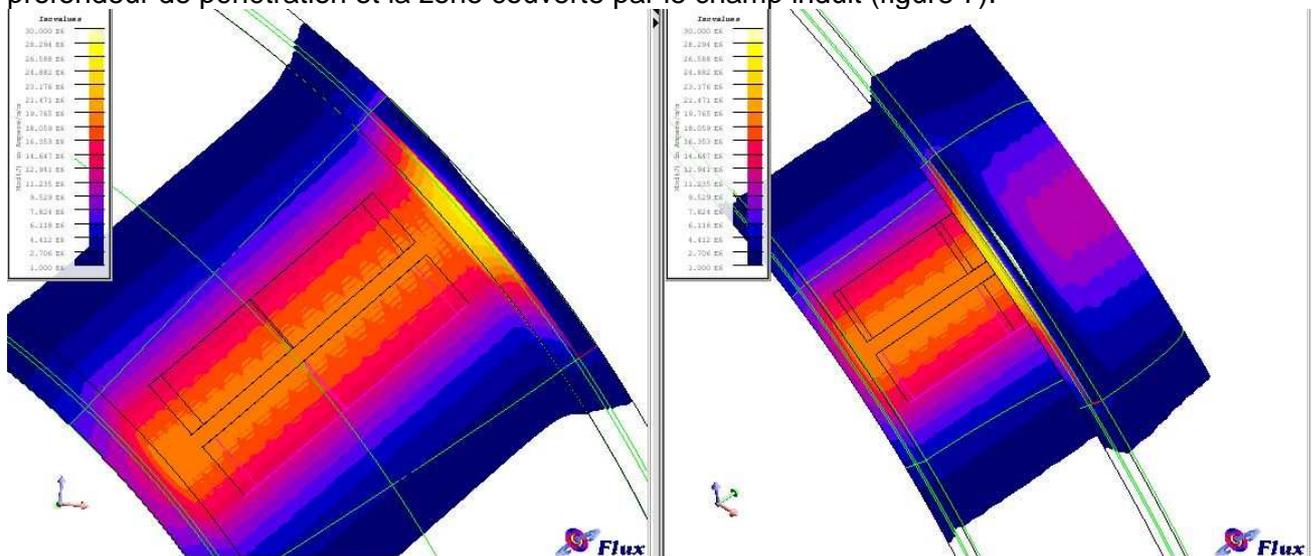


Figure 7 : Vues de la répartition des courants induits autour de l'entaille longitudinale externe extrados à 170kHz. Minimum seuillé à 3% de la valeur max

\*Dans la convention de mesure utilisée par DCNS, les phases sont notées positivement dans le sens des aiguilles d'une montre.

## VALIDATIONS

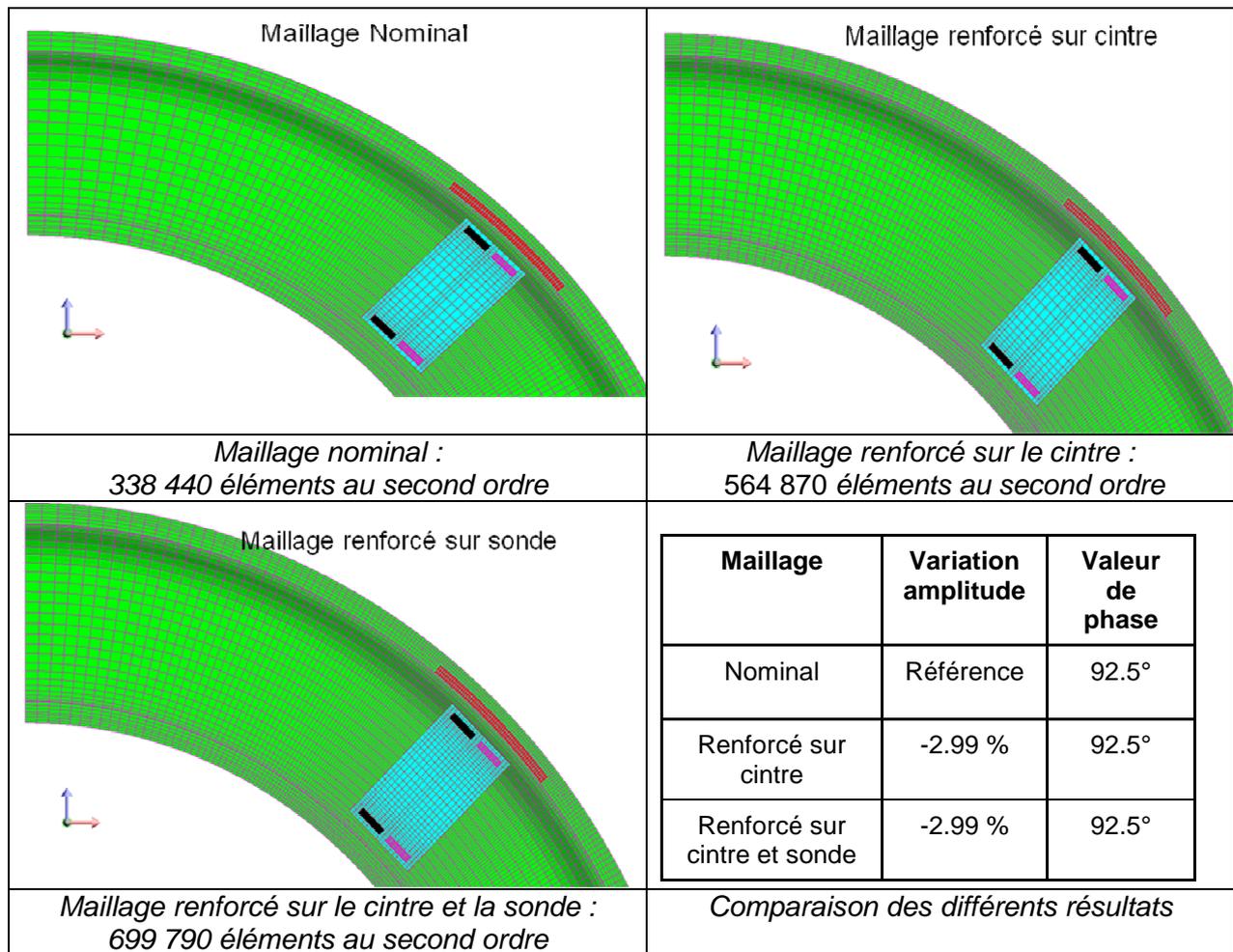
Les résultats de l'étude ont fait l'objet de différents points de validation.

Dans un premier temps, l'impact du maillage éléments finis a été évalué de manière à s'assurer de la stabilité du résultat en fonction de celui-ci.

Trois maillages ont ainsi été réalisés. Partant d'un maillage nominal, un raffinement de la discrétisation a été effectué sur le cintre puis, partant de ce second maillage, une troisième configuration a été testée avec un raffinement de maillage sur la sonde. Ce dernier représente un nombre total d'éléments presque 2 fois supérieur au maillage nominal.

On affiche ci-dessous une visualisation des 3 maillages réalisés (figure 8). On a alors comparé les résultats obtenus sur le cas de l'entaille longitudinale interne Extrados.

On constate un impact sur l'amplitude du signal inférieure à 3% et une valeur de phase constante. Les résultats de sensibilité liée aux différents maillages montrent une stabilité des grandeurs mesurées, renforçant la confiance sur le maillage et le modèle définis. L'ensemble de l'étude a pu alors être réalisée sur la base du maillage nominal.



*Figure 8 : Maillages réalisés et résultats correspondants*

Dans un second temps, un point de validation a pu être fait par rapport à des résultats expérimentaux mesurés sur les entailles longitudinales internes et externes en position extradados. La comparaison montre un très bon accord entre simulation et mesure avec moins de 4% d'écart en amplitude et moins de 1° d'écart en phase (tableau 5).

	Simulation	Expérience	Différence
Amplitude ELI	1931.7mV	1912mV	1%
Phase ELI	4.1°	5°	0.9°
Amplitude ELE	1732mV	1656mV	4%
Phase ELE	7.1°	7°	0.1°

*Tableau 5: Comparaison Simulation et expérience sur les Entailles Longitudinales EXTRADOS*

## CONCLUSION

Dans le cadre des évolutions réglementaires, la qualification de l'examen par courants de Foucault en sonde axiale du faisceau tubulaire des générateurs de vapeur du type K15 est exigée.

La position du défaut dans la partie cintrée de l'épingle est un paramètre jugé influent dans le programme de qualification. Pour traiter ce paramètre, une évaluation expérimentale était prévue sur des entailles longitudinales et circonférentielles "externes" pour des positions intrados et extrados pour chacun des rayons de cintrage composant le faisceau tubulaire des GV K15.

Mais est-ce que la position « externe » est la position la plus critique ?

Les résultats issus de la simulation sous FLUX<sup>®</sup> et la comparaison avec les résultats expérimentaux montrent d'une part la cohérence des résultats issus de la simulation et d'autre part la pertinence de notre choix vis-à-vis de la commission de qualification. En conclusion, la position « externe » est bien le cas le plus critique.

## Références bibliographiques

- [1] <http://www.cedrat.com/en/software-solutions/flux.html>
- [2] « Simulation du CND CF avec FLUX et CIVA », F. Foucher, X. Brunotte, A. Kalai, Y.Lefloch, G. Pichenot, D. Prémel, Journées COFREND, Beaune 2005
- [3] « Cofrend working group on ECT NDE simulation-review of activities », M. Mayos, M. Lambert, C. Gilles-Pascaud, M. Dessendre, N. Dominguez, F. Foucher, Ali Abakar, journées COFREND, Toulouse 2008
- [4] « A hybrid volume integral-finite elements approach for the simulation of eddy current inspection of steam generator tubes in the region of quadrifoiled support plate », A. Skarlatos, C. Gilles-Pascaud, G. Pichenot, G. Cattiaux, T. Sollier, QNDE 2009