

NIS-72-318

**Contribution de la modélisation ultrasonore  
au processus de qualification des méthodes de contrôle**



FR0107066

L. Le Ber : Commissariat à l'Energie Atomique  
P. Calmon : Commissariat à l'Energie Atomique  
E. Abittan : Electricité de France

## Introduction

Dans le cadre de l'amélioration de la sûreté des réacteurs nucléaires, des efforts substantiels sont menés pour qualifier les procédés de contrôles et offrir ainsi un grand niveau de sûreté. En France, le RSEM (1) (Règles de Surveillance en Exploitation des matériels Mécaniques des îlots nucléaires REP) établi et édité par l'AFCEN, décrit et définit non seulement les conditions opératoires des contrôles mais aussi la méthodologie de démonstration de performance d'une méthode. La version actuellement applicable du RSEM est celle de l'édition 1997. Avec les développements des outils de simulations, la modélisation devient de plus en plus efficace et peut permettre d'optimiser le processus de qualification technique. Depuis plusieurs années maintenant, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) a développé des outils logiciels basés sur la modélisation des principes physiques mis en jeu lors des opérations de contrôle de composants (2,3). En ce qui concerne les contrôles par ultrasons, ces outils sont capables, pour une géométrie de contrôle et un traducteur donnés, de reproduire de manière interactive les images ultra-sonores (C, Bscans) directement comparables aux résultats d'expériences.

C'est pourquoi, EdF et le CEA ont décidé de lancer une étude destinée à évaluer l'aide apportée par les outils de modélisation du CEA dans le cadre de la qualification technique de contrôles ultrasonores. Plusieurs cas d'inspections de composants d'un réacteur nucléaire ont ainsi été choisis. Nous décrivons dans cet article le cas de : l'inspection des soudures du dôme du générateur de vapeur.

La première partie de ce papier décrit l'apport des outils de modélisations. Puis, des cas concrets d'applications sont présentés.

## Quel est l'apport potentiel de la simulation des techniques de contrôle ?

Un processus de qualification technique est associé à chaque zone soumise à examen. Quel que soit le procédé et la méthode END (US, rayons X, courants de Foucault...), la qualification porte sur la technique utilisée, sa mise en oeuvre, le matériel de contrôle, la robotique etc.. Elle intègre également la formation de l'opérateur. On vérifie ainsi la cohérence entre la performance de contrôle requise et celle disponible lors de l'inspection en service.

De manière générale, toutes les qualifications de procédés sont justifiées sur la base :

- D'expériences réalisées sur maquettes représentatives
- D'une justification technique, tenant compte de l'état de l'art, des codes existant (RSEM...), du retour d'expérience ou de la modélisation

L'utilisation préférentielle de tel ou tel mode de justification dépend évidemment de chaque application, mais d'un point de vue technique et économique, il apparaît intéressant de tirer parti de la modélisation car les outils de simulations sont maintenant capables de traiter rapidement et efficacement des configurations complexes de contrôles. La souplesse de ces outils permet d'évaluer quantitativement l'effet de tel ou tel paramètre sur les résultats d'un contrôle, ce qui peut permettre de réduire significativement le nombre d'expériences nécessaires sur maquettes. De la même manière, le recours à la simulation peut être très utile pour évaluer le domaine de validité d'une procédure d'inspection, car il est possible de faire varier les paramètres de contrôle dans une large gamme.

Les paramètres dits "influentes" ainsi identifiés :

- permettent d'optimiser les besoins (ou exigences) en matière de blocs et maquette de qualification,
- sont repris dans la procédure d'examen, et le contrôleur peut à tout moment vérifier, pendant le contrôle, qu'il reste dans le champ d'application défini et qualifié.

## Les outils de simulations du CEA

Le CEA développe des outils de simulation dans le cadre du logiciel CIVA depuis de nombreuses années. La simulation ultra-sonore repose sur CHAMP-SONS (modélisation du champ ultra-sonore rayonné par un transducteur) et MÉPHISTO (modélisation de l'interaction faisceau défaut).

CHAMP-SONS est capable de calculer le champ ultrasonore 3D rayonné par une large gamme de transducteurs : mono-élément, multi-éléments, transducteurs immersion ou contact dans des composants dont la géométrie peut être simple (plane, cylindrique) ou complexe (dessiné par CAO).

Lorsque le champ incident est connu à l'intérieur d'une pièce, MÉPHISTO simule les échos créés par un ou plusieurs défauts pour chaque position du transducteur. Ce calcul, réalisé lui aussi en 3D, est basé sur la théorie de la diffraction de Kirchhoff. Il est possible de calculer les échos provenant de un ou plusieurs défauts ou de la géométrie du composant. Le logiciel calcule automatiquement les échos directs, les échos de coins et les échos indirects liés au rebond sur la géométrie de la pièce. L'existence d'ondes longitudinales ou transversales dans la pièce est prise en compte ainsi que les conversions de modes. Les échos liés à tel ou tel mécanisme sont calculés séparément puis sommés. On peut donc visualiser les résultats sous la forme d'images Cscan ou Bscan qui peuvent être directement comparées aux expériences ou interprétés à l'aide des outils d'analyse et de traitement du signal disponible dans l'environnement CIVA.

Pour le cas traité, la vérification des calculs a été réalisée à partir d'une comparaison des résultats de simulation calculs avec les essais expérimentaux.

### Modélisation de l'inspection en service du dôme du générateur de vapeur d'un réacteur à eau pressurisé

L'objectif de la collaboration entre le CEA et EdF est de montrer la capacité des modèles CHAMP-SONS et MÉPHISTO à alimenter le processus de la justification technique sur des cas concrets. On présente ici l'exemple du contrôle des soudures du dôme d'un générateur de vapeur (composant de la boucle secondaire d'un REP).

Les transducteurs modélisés sont ceux utilisés sur site, à savoir des transducteurs contacts 2 ou 4 MHz, en ondes T à 45° ou 60°. A partir des caractéristiques du transducteur (taille de la pastille piézo-électrique, fréquence centrale du signal...) données par le fabricant, les calculs des champs 3D sont réalisées par le code CHAMP-SONS. On peut donc en déduire les caractéristiques du champ ultra sonore (distance focale, diamètres focaux). Les résultats des calculs sont conformes aux données constructeur.

Dans la partie qui suit, on présente la modélisation de la phase de calibration du transducteur, puis la simulation de la phase de contrôle proprement dite.

#### Calibration du transducteur

En tout premier lieu, la calibration du transducteur consiste à calculer la réponse échographique en partie cylindrique (rayon 100 mm) du bloc de référence V1 (figure 1) tel qu'on le fait lors des phases d'étalonnages.

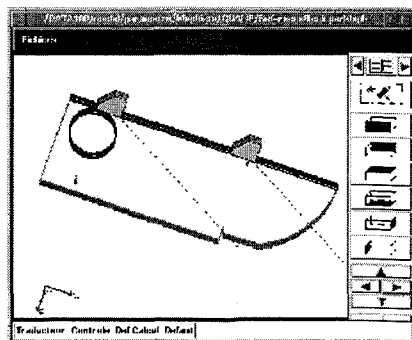


Figure 1 : Bloc de référence – Transducteur ondes transversales à 60°

Ensuite, dans la procédure d'inspection, chaque écho relevé est comparé à celui généré par la génératrice d'un trou de diamètre f 2 mm situé à la même profondeur. Si l'amplitude de l'écho relevé sur la pièce est supérieur à -6 dB relativement à celui de la génératrice de référence, on garde l'indication. La valeur de -6 dB est communément appelée seuil de notation et les amplitudes données sur les figures suivantes sont toutes données relativement à cette référence.

Les caractéristiques d'une indication sont sa position, sa réflectivité, ses dimensions, sa classification (défaut volumique / non volumique). Une étude complémentaire dite de "caractérisation" peut être menée si une indication change de classification, ou si l'augmentation de l'amplitude (ou de la longueur) est significative d'une inspection à l'autre.

On présente sur la figure 2, la comparaison entre l'expérience et la simulation de la courbe réponse des génératrices de référence de diamètre 2 mm à différentes profondeurs (traducteur T60° - 2 MHz). La courbe calculée montre une bonne correspondance avec la courbe extraite d'une compilation statistique d'expériences réalisées par EdF.

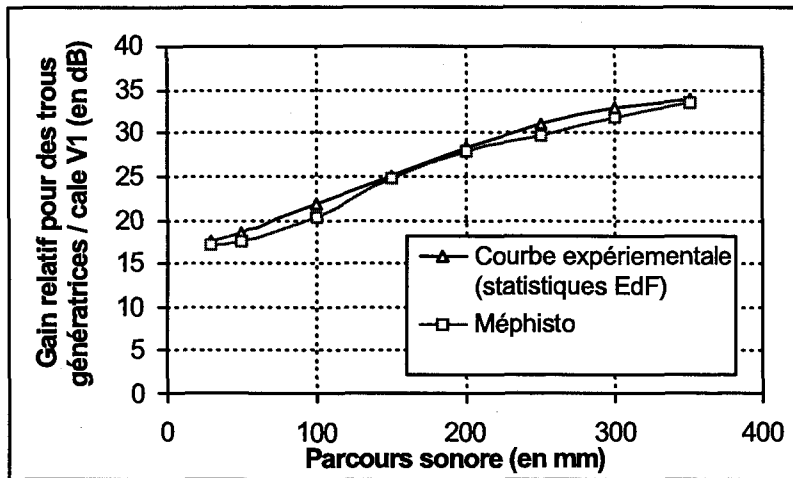


Figure 2 : Comparaison essais / calculs (trous génératrices F 2mm) – traducteur onde T 60

### Modélisation d'un contrôle

Dans cette partie, on présente les simulations de contrôles réalisées sur le générateur de vapeur (zones grisées de la figure 3)

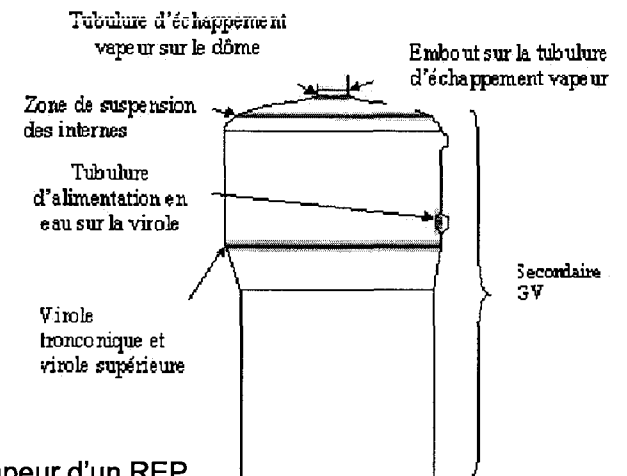


Figure 3 : Zone inspectées (grisées) d'un générateur de vapeur d'un REP

Nous simulons ici l'interaction du faisceau ultra-sonore et de défauts plans dont l'extension perpendiculaire au plan d'incidence du transducteur est supérieure à la taille du faisceau. Pour ce type défaut et cette configuration de contrôle, il est possible d'évaluer numériquement l'influence :

- des caractéristiques du défaut : type, position, orientation, dimensions
- du faisceau ultra-sonore : incidence, fréquence
- de la géométrie du composant

#### Influence des caractéristiques du défaut

Dans cette partie, l'effet des caractéristiques du défaut est examiné sur le contrôle d'une tubulure d'échappement vapeur (figure 4).

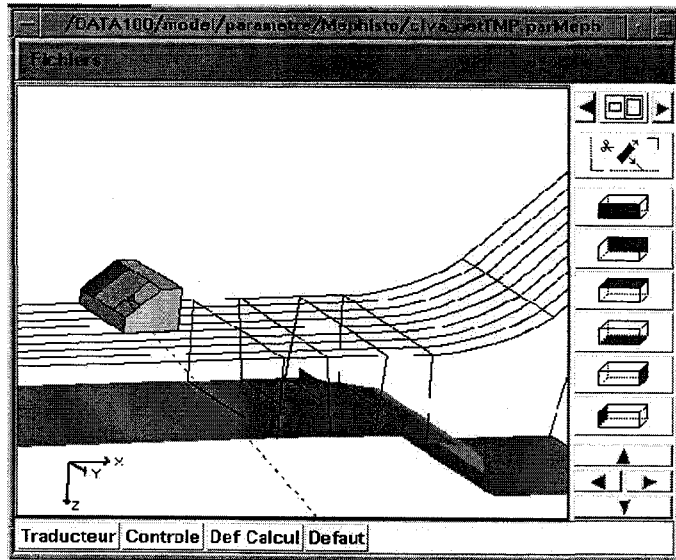


Figure 4 : Contrôle d'une tubulure d'échappement vapeur

L'interaction entre le faisceau ultra-sonore et un défaut plan de hauteur 3 mm et d'extension infinie est calculée pour différentes orientations dans le plan d'incidence (figure 5).

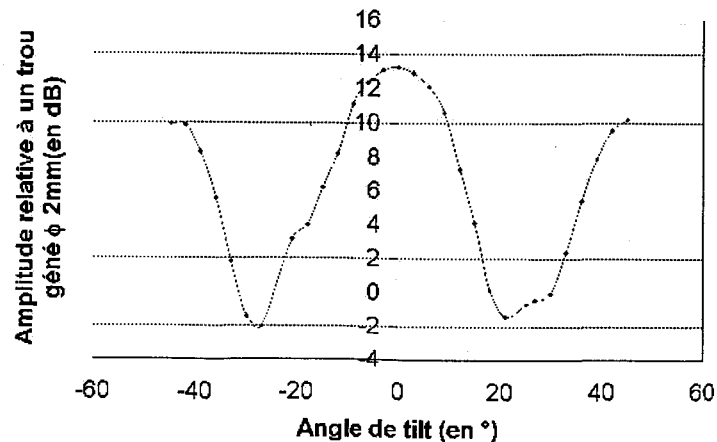


Figure 5 : Variation d'amplitude en fonction de l'orientation du défaut dans le plan d'incidence

Le graphe représente la variation d'amplitude relativement à cette orientation. Dans MÉPHISTO, chaque type d'échos est calculé séparément et recomposé ensuite en Bscan ce qui rend facile la détermination du phénomène étant à l'origine de l'écho prépondérant : en fonction de l'orientation, l'écho est principalement dû à un effet de coin (orientation proche de 0°), à une réflexion spéculaire autour de 45° et à une réflexion spéculaire après rebond sur le fond de la pièce (-45°). D'autres simulations ont été réalisées (figure 6) de manière à quantifier la brusque variation de l'écho lorsque le défaut est désorienté par rapport au plan d'incidence (angle de skew) La figure 7 montre, quant à elle, l'influence de la hauteur du défaut sur l'amplitude de l'écho de coin. On peut noter un effet important pour les faibles hauteurs. A partir d'une certaine hauteur, l'évolution de l'écho de coin n'est plus significative. Il est alors possible d'évaluer les limites de détection de la méthode de contrôle modélisée.

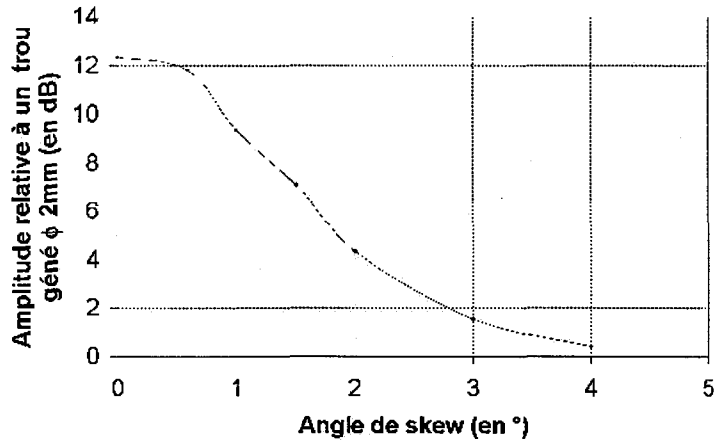
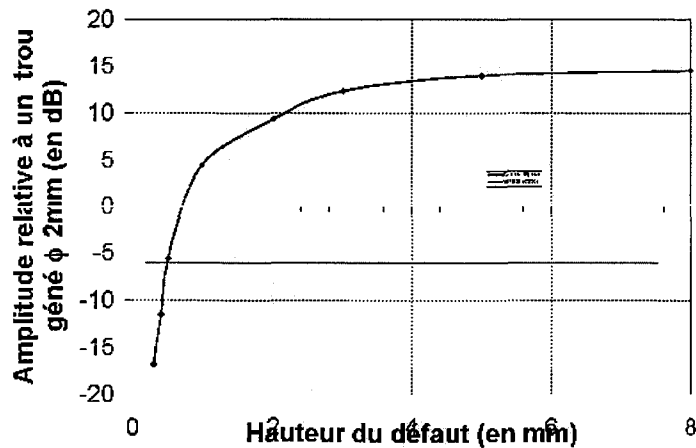


Figure 6 : Variation d'amplitude d'un défaut en fonction de la désorientation du défaut par rapport au plan d'incidence



## **Conclusion**

Dans ce papier, un exemple d'application concrète des outils de simulations issus de l'environnement CIVA a été présenté. La flexibilité et l'efficacité de ces outils permettent de traiter des situations complexes de contrôle. L'étude de l'influence de tel ou tel paramètre peut donc permettre de quantifier les performances d'une méthode de contrôle : le contrôleur peut donc vérifier, pendant le contrôle, qu'il reste dans le champ d'application de la procédure. La modélisation contribue ainsi à renforcer la démarche, analytique, de justification technique adoptée par le RSEM, tout en limitant le nombre d'essais nécessaires.

## **Références**

- 1.J. SAMMAN. La qualification des applications d'END en FRANCE Revue Générale Nucléaire n° 3 Mai - Juin 2000.
- 2.A. Lhémy, P. Calmon, I.Lecœur-Taïbi, L. Paradis Modeling tools for ultrasonic inspection of welds. Accepted for publication in NDT&E International.
- 3.P. Calmon, A. Lhémy, I.Lecœur-Taïbi , R. Raillon. Integrated models of ultrasonic examination for NDT expertise. 23rd Review of progress in Quantitative Non Destructive Evaluation- Vol.16- PP1861-1868 (1997)