

RECONSTRUCTION 3D DE DÉFAUTS EN RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE

Blandine LAVAYSSIERE, Catherine KLIFA

EDF - Direction des Etudes et Recherches
6, quai Watier - 78400 CHATOU

RÉSUMÉ

Certains matériels des centrales nucléaires soumis à de fortes contraintes sont contrôlés régulièrement par radiographies X ou gamma afin de vérifier leur intégrité. Or l'information donnée par un film radiographique ne permet pas de connaître l'orientation d'un défaut dans une pièce. L'étude consiste à reconstruire ces défauts dans l'espace 3D connaissant trois de leurs projections radiographiques. L'algorithme mis au point combine une reconstruction algébrique ART et une modélisation du volume 3D par des champs markoviens.

1. Introduction

Electricité De France utilise le Contrôle Non Destructif par radiographie X ou gamma pour l'inspection régulière des tubulures dans les centrales nucléaires. Les zones contrôlées, de type soudures ou pièces moulées, soumises à des contraintes physiques importantes peuvent présenter divers défauts répertoriés par des normes officielles. Ces clichés sont examinés par des experts radiographes dont le rôle est de détecter, reconnaître et quantifier des défauts éventuels, mais la qualité des radiogrammes (films gammagraphiques souvent très granulaires et faiblement contrastés) et les faibles dimensions des défauts (inclusions, fissures, retassures ...) rendent leur travail très difficile. De plus, l'information donnée par un film radiographique ne permet pas de connaître l'orientation du défaut dans la pièce contrôlée. Par exemple, si l'incidence de prise de vue n'est pas orientée correctement par rapport au défaut, le risque de non-détection du défaut est important. Dans ce contexte, certains films radiographiques sont alors soumis à une expertise supplémentaire comprenant numérisation à l'aide du système ENTRAIGUES* et traitement 3D de l'information qu'ils contiennent.

* ENTRAIGUES : Système d'aide à l'analyse d'images radiographiques, marque déposée EDF

ABSTRACT

Industrial radiography is a well-known non-destructive testing method which allows the detection of flaws in pipes. EDF studies the feasibility of 3D reconstruction of internal flaws, by using a limited number of their radiographic projections taken at different incidences. The goal is to know the flaw orientation within the piece under study. Our 3D reconstruction algorithm introduces a priori information on the solution in a regularizing method of ART type, combined with a 3D picture restoration using Markov Random Field.

2. Principe général

Electricité De France s'est intéressée au problème de reconstruction 3D d'un volume à partir d'un nombre restreint de ses projections dans le cadre du Contrôle Non Destructif des coudes moulés des circuits primaires des centrales nucléaires. Le but recherché est une estimation de l'orientation des défauts dans la pièce contrôlée. Suite à un espace de travail réduit en centrale et à des temps de pose très importants, le nombre de clichés disponibles d'un même défaut se limite à trois. La figure 1 nous présente de façon schématique les conditions réelles de prise de vue autour des coudes moulés.

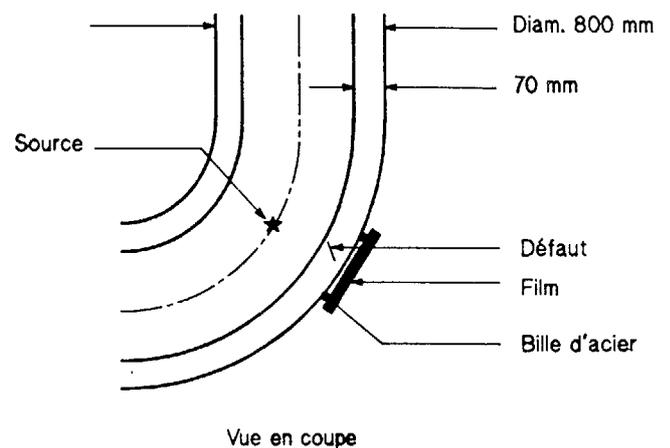


Figure 1 : Schéma de prises de vue en centrale



Ces contraintes expérimentales ont guidé notre étude non pas vers des méthodes analytiques classiques tomographiques, mais vers des méthodes algébriques de reconstruction.

L'étude s'est déroulée en quatre phases :

- une simulation des données expérimentales par une modélisation simple des projections en radiographie X, pour laquelle nous nous sommes limités à des objets parallélépipédiques contenant des défauts de formes très simples (sphérique, ellipsoïdale ou parallélépipédique) (fig.2),
- une étude de faisabilité d'une reconstruction 3D de la forme générale du défaut (enveloppe convexe), et non pas du défaut lui-même, à partir de ces données simulées,
- une phase d'amélioration du volume ainsi reconstruit,
- une application de la méthode proposée à des images radiographiques réelles d'un bloc d'acier contenant des défauts parfaitement calibrés.

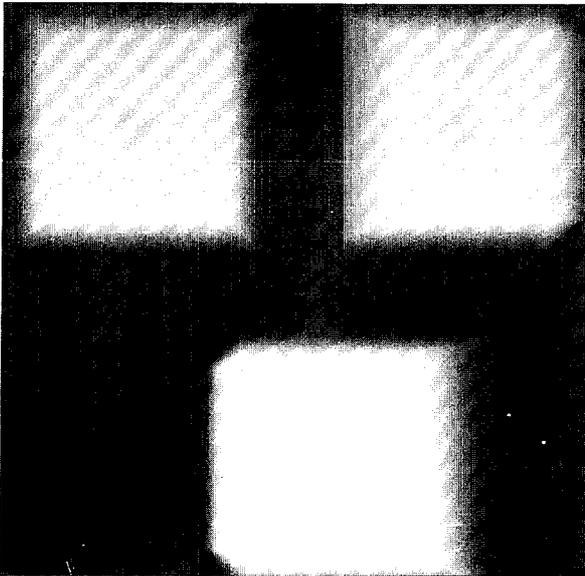


Figure 2 : Radiographies simulées

3. Approche algorithmique

La reconstruction est basée sur une méthode itérative ART (Algebraic Reconstruction Technique) qui consiste, pour un rayon donné, à corriger chaque volume élémentaire touché dans la pièce en fonction de la différence entre la projection détectée sur le film et la projection calculée sur l'ensemble des volumes élémentaires touchés (fig. 3). Ce calcul est effectué pour tous les rayons issus des diverses positions de la source vers le film numérique à chaque itération. Coûteuse en temps

calcul, cette méthode a pourtant donné des résultats satisfaisants.

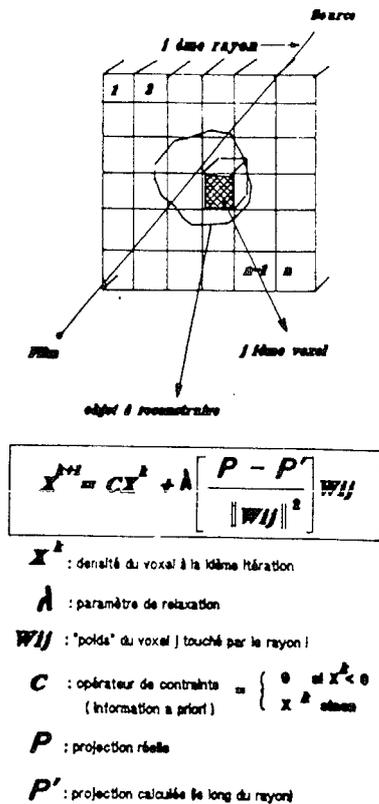


Figure 3 : Principe de l'ART

Suite à cette première étape, connaissant le volume 3D d'une manière grossière, notre étude s'est orientée vers une amélioration de ce volume suivant deux approches :

- une approche classique de filtrage des données 3D (filtre linéaire moyenneur, filtrage non linéaire dérivé de Nagao) ne tenant compte que des informations issues du volume reconstruit et dont les effets ont été fort médiocres,
- une approche bayésienne de restauration tridimensionnelle, basée sur une modélisation de la zone reconstruite par un champ de Markov introduisant des informations caractéristiques sur le défaut (topologiques, métriques).

L'algorithme mis au point (fig. 4) se compose de diverses étapes :

- initialisation de la contrainte de support utilisée dans l'algorithme ART à l'intersection des trois cônes de projection,
- reconstruction par une méthode itérative générale de type ART qui fournit un volume 3D contenant le défaut et présentant beaucoup d'artéfacts et de bruit liés à la reconstruction,

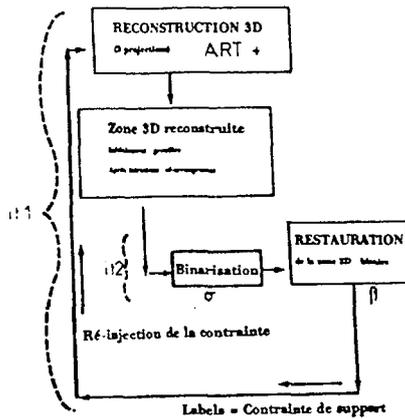


Figure 4 : Principe algorithmique

- segmentation grossière visuelle de la zone 3D reconstruite pour distinguer défaut et fond,
- restauration tridimensionnelle de la zone 3D segmentée par approche bayésienne, afin de prendre en compte les caractéristiques géométriques et locales des défauts dans la pièce (notion d'homogénéité locale),
- ré-injection dans l'algorithme de reconstruction de la zone 3D binaire restaurée définissant une nouvelle contrainte de support.

Le principe de la restauration est d'effectuer un ré-étiquetage de la contrainte de support en tenant compte d'informations a priori sur les données (homogénéité du défaut par rapport au fond) et sur le bruit de classification (critère d'erreur minimum entre l'étiquette K attribuée à un voxel et sa densité réelle).

Elle est effectuée à l'aide d'un estimateur ICM (Iterated Conditional Mode) appliqué sur un voisinage tridimensionnel autour de chaque voxel considéré. Le voisinage 3D choisi comporte les 26 voisins du voxel central. Sur ce voisinage sont définies des cliques composées de deux éléments dont l'un est le voxel central, l'autre est l'un des 26 voisins.

L'énergie à minimiser en chaque voxel Y_i , de voisinage défini V_i , utilisée dans notre contexte d'une modélisation markovienne, s'écrit alors :

$$U(K_i/Y_i) = - \beta \sum_{c \in C} \delta(K_i, K_j) + \frac{Y_i - K_i}{\sigma_K}$$

avec :

$$\delta(K_i, K_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i = K_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

K_i étiquette attribuée au voxel i ,

K_j étiquette attribuée au voxel j pour $j \in V_i$,
 σ_K seuil de densité portant l'étiquette K ,

Le premier terme est un terme de régularisation, le second représente l'attache aux données.

La restauration consiste à balayer la zone 3D (balayage régulier de plan en plan selon la direction verticale montante pour une itération et descendante pour l'itération suivante), à l'aide de la fenêtre tridimensionnelle d'analyse, en effectuant pour chaque voxel central une estimation de la valeur optimale qu'il doit prendre pour maximiser la probabilité a posteriori, c'est-à-dire pour minimiser l'énergie $U(K_i/Y_i)$. La valeur de l'étiquette de chaque voxel est donc modifiée de façon à minimiser ce terme. Une itération est finie lorsque toute la zone 3D a été balayée.

Divers critères ont été définis :

- critère de convergence classique pour ART et restauration,
- critère visuel pour la binarisation,
- critères de qualité afin de limiter le nombre d'itérations de l'ensemble (distance au défaut dans le cas des données simulées, pourcentages de voxels mal classés, écart entre projections mesurées et projections calculées).

D'autre part, nous avons étudié la réponse impulsionnelle de la reconstruction ART afin de déterminer les directions adéquates à prendre en compte pour utiliser éventuellement un modèle anisotrope de restauration. Les projections d'un objet constitué d'un pixel unique ont été alors simulées. La reconstruction qui théoriquement devrait fournir un voxel unique, a permis de mettre en évidence trois directions principales traduisant les trois directions de projection le long desquelles les voxels du volume sont corrigés (fig. 5). Les artéfacts de reconstruction se déplacent selon la position du voxel dans la pièce. Elles sont fonctions des directions des rayons définis entre la source et le film radiographique.

La mise en place d'une méthode de restauration tenant compte d'un modèle anisotrope devient donc inconcevable, compte tenu du temps de calcul qu'elle nécessiterait et de la portée très réduite du voisinage choisi dans la modélisation bayésienne.

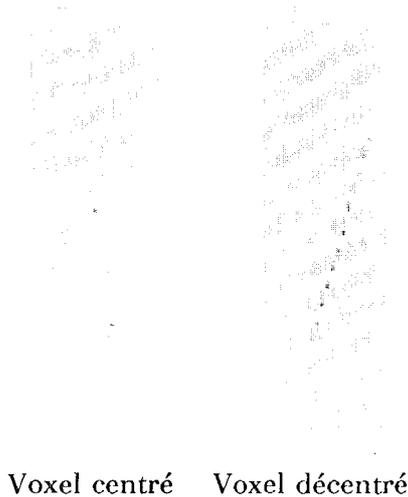


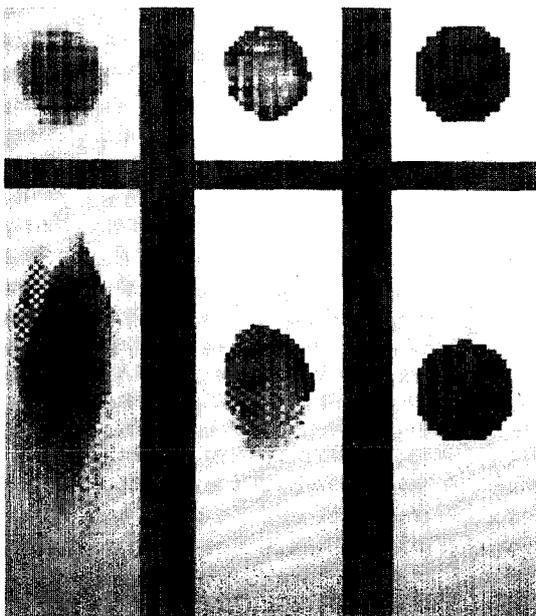
Figure 5 : Réponse impulsionnelle

4. Résultats

Les premiers essais ont été menés sur les images radiographiques simulées pour lesquelles quelques itérations du processus précédemment décrit ont permis d'obtenir des résultats corrects (fig. 6). Les figures suivantes comportent :

- en haut des coupes horizontales du volume après reconstruction en son centre,
- en bas des coupes verticales.

A gauche de la figure 6, l'objet simulé de référence est représenté pour comparer plus facilement les résultats obtenus entre l'ART et l'ART restaurée.



ART ART restaurée Référence

Figure 6 : Reconstruction

Ces images sont toutefois très peu représentatives de la réalité, car le processus réel d'obtention des images introduit des bruits d'origines diverses (acquisition, numérisation, ...). C'est pourquoi des expérimentations ont été menées sur des radiographies réelles pour des pièces d'acier parfaitement connues. Il s'agissait de bloc parallélépipédique contenant des défauts électro-érosés, eux-mêmes parallélépipédiques. Les résultats, à cause du nombre très limité des projections, sont décevants. Par contre, en augmentant sensiblement le nombre de sources et en les désaxant par rapport à la tubulure, le résultat obtenu permet de bien localiser le défaut à l'intérieur de la pièce.

Après avoir remis en cause la reconstruction ART, notre travail s'oriente vers une approche bayésienne de la reconstruction elle-même permettant d'introduire des informations de voisinage entre les voxels contribuant à une projection donnée.

REFERENCES

- (1) C. KLIFA, F.Y. BRIAND, B. LAVAYSSIERE
Reconstruction 3D de défauts par traitement d'images industrielles
Douzième colloque GRETSI, Juin 89
- (2) C. KLIFA
Thèse de Doctorat
Télécom Paris, Mai 1991
- (3) L. GARNERO
Reconstruction d'images tomographiques à partir d'un ensemble limité de projections
Thèse d'état, Université de Paris Sud, 1987