

Reconstruction tomographique 3D d'une soudure circulaire à partir de projections partielles issues d'images radioscopiques tangentielles.

Circumferential weld 3D tomographic reconstruction using incomplete projections from radioscopic data.

par Joseph MOYSAN¹, Cécile GUEUDRÉ¹, Hervé MOULINEC²

¹ Laboratoire de Caractérisation Non Destructive - EA 3153 - Université de la Méditerranée - IUT GMP Aix en Provence - avenue Gaston Berger - 13625 Aix en Provence

moysan@iut.univ-aix.fr

² Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique - UPR 7051 - CNRS - 31 chemin Joseph Aiguier - 13402 Marseille Cedex 20

résumé et mots clés

Le Contrôle Non Destructif fait partie intégrante des méthodes utilisées dans le domaine de la productique pour assurer la qualité de la fabrication d'une pièce puis son intégrité au cours de sa vie. L'étude porte sur une nouvelle méthode de contrôle en radioscopie X pour des pièces de révolution possédant une soudure circumférentielle. Nous présentons ici une démarche originale pour exploiter les images radioscopiques partielles de la pièce afin de reconstruire le volume de la soudure. La méthode exploite donc l'idée de la tomographie avec le problème de projections vides au centre. On pourra alors évaluer, en analysant la forme de cette soudure, la qualité du soudage. L'étude montre la faisabilité de cette nouvelle approche grâce à l'exploitation d'images simulées avec et sans bruit. Elle indique aussi les limites pour la détection des défauts de type cavité.

Radioscopie numérique, tomographie, contrôle non destructif, soudure

abstract and key words

Non Destructive Testing is commonly used in the manufacturing process to assess the quality of components. It enables also to guarantee the integrity of components during their life. This study is concerned with a new approach of radioscopic control dedicated to circumferential weld. We present an original method to make use of tangential radioscopic images in order to reconstruct the complete weld. These radioscopic images represent only a part of the whole component. This method exploits the basic idea of tomography with the problem of hollow projections. We can evaluate then the quality of the weld with the analysis of the weld shape. This work shows the feasibility of this new approach through simulated images. It indicates the limits of detection for spherical defects like-cavities

Radioscopy, tomography, nondestructive testing, weld

1. introduction

La tomographie X est une des modalités majeures de l'imagerie dans le domaine médical. C'est grâce au développement des scanners médicaux et, de façon plus générale, au fantastique bond en avant de l'imagerie médicale, que la technique tomographique a pu se développer. Elle est aussi employée pour former des images à caractère industriel, en particulier pour le Contrôle Non Destructif (CND). Le CND est un domaine très transversal qui recouvre pratiquement toute la physique : on y trouve les méthodes mettant en jeu un flux de matière (ressuage, détection de fuites), une perturbation de champs (magnétoscopie, courants de Foucault, thermographie infrarouge), un rayonnement (radiographie ou gammagraphie, tomographie, neutronographie), ou des phénomènes acoustiques (émission acoustique, ultrasons).

Par rapport à la technique radiographique où les informations obtenues sont issues d'une projection plane du volume de l'objet analysé, la tomographie clarifie l'interprétation dans le sens où elle ne conduit pas à une superposition de formes ou de défauts. Elle permet également une amélioration importante du contraste. La tomographie bidimensionnelle permet d'isoler une coupe de l'objet à contrôler. Le principe consiste à faire déplacer l'ensemble source-détecteur autour de l'objet, de façon à acquérir des informations indirectes sous différentes incidences. Ces informations représentent pour chaque incidence un profil d'atténuation qu'on désigne sous le nom de projection. L'étape suivante consiste à reconstruire l'image de la coupe désirée de l'objet à partir de ses projections, autrement dit à appliquer une transformée de Radon inverse aux projections. Lorsque l'on utilise un tomographe pour réaliser une tomodensimétrie X, on s'approche encore plus finement de l'analyse structurale de la pièce à partir de la connaissance de la densité des matériaux traversés. Il s'agit d'un problème inverse de milieu où, à partir des mesures expérimentales du rayonnement X, on retrouve les caractéristiques du milieu traversé. Ce problème inverse peut être résolu par différentes méthodes (méthodes de reconstruction algébriques, méthodes à base de transformée de Fourier) parmi lesquelles la méthode de rétroprojection filtrée est la plus communément utilisée [Herman][Peyrin].

Cependant, la tomographie implique un équipement lourd et coûteux et ne se conçoit aujourd'hui sur un plan industriel que pour le contrôle de petites séries d'objet. Les applications concernent des pièces de petites dimensions de hautes technologies et, grâce à des initiatives de partenariat entre entreprises et région, elle devient un outil accessible aux PME [Castellan]. Les utilisateurs de la tomographie en milieu industriel sont donc très loin d'avoir l'expérience et la connaissance des outils de reconstruction du milieu médical.

L'objet de cette étude est de fournir une solution pour contrôler une pièce de révolution dont le centre est constitué de matériaux

très absorbants. Cette pièce possède un cordon de soudure obtenu par faisceau d'électrons qui doit être finement caractérisé. Le cordon, volume de révolution, sera paramétré par sa position, sa pénétration, sa surface globale et sa symétrie. Le problème inverse consiste à quantifier ces paramètres à partir des mesures expérimentales obtenues sur cet objet. Les dimensions de cet élément mécanique autoriseraient un contrôle par tomographie, cependant la combinaison d'un matériau trop absorbant au centre et d'un grandissement important de la pièce a conduit au choix d'une radioscopie tangentielle. Les images radioscopiques que nous obtenons sont donc des projections partielles de l'objet. Actuellement le contrôle se fait par des mesures directes effectuées par un opérateur sur l'écran de radioscopie. Le contraste en fond de cordon de ces images est cependant très faible aussi il est source d'erreur humaine dans la mesure de la valeur de pénétration. On cherche donc à améliorer le contraste visuel de l'information de contrôle mais aussi à évaluer les possibilités de détection de défauts de type cavité.

La technique de contrôle en radioscopie tangentielle est assez couramment utilisée lorsque les pièces à contrôler sont volumineuses. Il devient difficile pour l'ensemble source-détecteur de tourner autour de l'objet. De même, si l'objet présente une atténuation très différente suivant l'angle d'incidence utilisé (cas de pièces allongées), un contrôle de cet objet par tomographie peut se révéler inadapté.

La tomosynthèse ou laminographie offre alors pour ce type de contrôle une alternative intéressante à la tomographie lorsque l'ensemble des projections ne peut être obtenu. Globalement il s'agit de rétroprojeter les quelques projections obtenues en tenant compte des mouvements linéaires ou circulaires de la source et du détecteur. Les solutions sont adaptées aux problèmes posés. Cette technique a été utilisée pour le contrôle de moteurs à propergol solide pour la détection des décollements et délaminages aux interfaces structure / protection thermique / propergol [Rizo]. La partie centrale est inaccessible, ce qui empêche l'utilisation des techniques tomographiques. L'inspection se fait alors par radioscopie tangentielle, où l'objet est animé d'un mouvement de rotation dont l'axe se trouve placé en dehors du champ de prise de vue. Le principe consiste à acquérir un ensemble d'images radioscopiques à des positions angulaires différentes de la pièce. L'étape d'inversion consiste à sommer, pour obtenir chaque point de l'image de reconstruction, l'ensemble des contributions correspondantes aux projections de ce point. L'image du plan contenant le défaut est ainsi reconstruite pixel par pixel. L'amélioration des images de radioscopie est ainsi obtenue par une mise en correspondance des informations contenues dans les radiosopies d'une même zone d'un objet vue sous des angles différents. Elle permet également de donner accès à des informations tridimensionnelles [Rizo]. De telles solutions sont adaptées pour le contrôle des aciers dans le béton [Ewert] ou de cartes électroniques [Gondrom]. On peut aussi chercher à améliorer la technique de rétroprojection

d'un ensemble limité de vues en utilisant un algorithme de type ART [Gondrom].

Une autre solution pour traiter notre problème consisterait à effectuer la fusion de deux images radioscopiques obtenues pour deux intensités différentes afin d'améliorer le contraste des défauts en fond de soudure. La méthode proposée par Anne Dromigny est basée soit sur la théorie de Bayes [Dromigny-1] soit sur la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer [Dromigny-2]. Elle l'applique sur des gradins d'épaisseurs constantes. Elle n'est cependant pas applicable pour nos images de radioscopie à cause de la présence d'un gradient de fond non constant.

Nous développons ici une troisième approche pour résoudre ce problème inverse car nous montrons que nous pouvons reconstruire presque complètement l'ensemble des projections. Nous privilégions donc une approche plus classique de tomographie. L'idée que nous allons développer est de combiner l'image obtenue pour un angle θ et celle obtenue pour un angle $\theta + \pi$ pour construire l'équivalent d'une projection complète de l'objet pour un angle θ , projection dont le centre sera vide. Il s'agira ensuite d'exploiter un algorithme classique de rétroprojection filtrée.

Nous traitons un problème de reconstruction tomographique avec des données incomplètes. Il est bien connu que quatre classes de problèmes existent : lorsque les projections sont des projections tronquées (objet plus grand que le détecteur), lorsque des angles de projections sont absents (angle de vue limité), lorsque les projections sont vides au centre, lorsque la source est inconnue (pour une reconstruction quantitative). Notre souci est donc de traiter un problème de projections vides au centre. Louis et Natterer abordent ce problème avec une méthode de reconstruction basée sur le développement en série de Fourier de la transformée de Radon en utilisant la formule d'inversion de Mac Cormak. Dans cette formulation les coefficients de la série (en coordonnées polaires) peuvent être calculés par une intégrale dont la borne inférieure peut être non nulle (r), aussi il est possible de faire le calcul pour $|r| > a$. Cependant ils montrent qu'une grande instabilité est possible car la formule contient un polynôme de Tchebychev dont les valeurs croissent exponentiellement lorsque l'ordre des coefficients croît. Aussi cette reconstruction sera extrêmement sensible aux erreurs de bruit et de discrétisation. Ce problème est aussi expliqué par Lewitt et Bates qui concluent que s'il existe une solution d'inversion directe grâce aux résultats de Mac Cormak en pratique elle échouera à cause du bruit de reconstruction [Lewitt-I]. Louis indique que pour ce type de problème des approches complétant les données sont intéressantes [Louis]. Lewitt développe plus en détail deux solutions pour compléter les projections dans le cas de données tronquées ou vides au centre [Lewitt-III].

Une autre solution est proposée par Aravindhan s'inspirant des travaux de Basseville [Basseville]. Il utilise la décomposition des projections en ondelettes. Les données absentes deviennent donc des coefficients d'ondelettes à estimer. Il utilise alors un

modèle prédictif de type AR pour calculer ces coefficients avant de faire la transformée inverse et d'obtenir une projection complétée. Puis il exploite un algorithme de rétroprojection filtrée pour obtenir son image finale. Ses résultats sont encourageants sur des fantômes composés d'ellipses [Aravindhan]. Cependant dans notre application nous ne cherchons pas à reconstruire le centre de l'image puisque ce n'est pas le but de notre contrôle, d'autant plus que ce centre est géométriquement très important par rapport à la taille du cordon de soudure.

Aussi nous allons nous attacher à développer une approche similaire à celle proposée par Lewitt et Bates. Il s'agit d'exploiter les singularités de nos données pour tenter de compléter directement les projections.

Pour valider la démarche que nous proposons et pour fournir des données précises et connues à l'algorithme de reconstruction, nous utilisons une modélisation de l'image radioscopique dont une étude antérieure a montré la bonne cohérence avec des images réelles [Gueudré-1]. Dans cette étude précédente, une autre approche pour résoudre le problème inverse de mesure de la pénétration a été proposée. A chaque position angulaire contrôlée, une image radioscopique était obtenue. La modélisation a montré que la section réelle de la soudure était caractérisée théoriquement dans l'image par un gradient de niveaux de gris nul. Cette information a été complétée par la connaissance de la distribution du bruit dans l'image. Gueudré a mis au point une analyse de la radioscopie par traitement d'images pour extraire les paramètres de la section. La méthode de traitement d'images exploitait notamment un contour déformable paramétré à partir de B-Splines. Chaque section de soudure était délimitée par ce contour dont les paramètres devenaient alors aisément calculables. La méthode a été complètement validée par la comparaison avec des mesures réalisées par des experts directement sur les images radioscopiques brutes [Gueudré-2].

L'étude de Gueudré a permis de résoudre le problème inverse posé avec de très bons résultats. On présente ici des travaux pour améliorer la technique d'acquisition et de traitement des données en vue de résoudre un problème inverse plus complexe : celui de caractériser le cordon de soudure et de caractériser aussi d'éventuels défauts présents dans la soudure. Cette étude répond à une application particulière mais est généralisable à toute configuration où l'épaisseur ou la densité du matériau empêche d'acquérir des données dans le centre de la pièce. Ces travaux ont été initiés en collaboration avec le CEN de Valduc. Ils sont inscrits dans le Programme Pluri-Formations Recherche Multidisciplinaire sur les Problèmes Inverses de Champs [Moysan][Moulinec].

Nous présentons tout d'abord la modélisation de l'image radioscopique puis la méthode de reconstruction utilisée. Nous discutons ensuite sur la validité des résultats obtenus et de leur exploitation pour le CND. Nous donnons enfin les perspectives d'avenir de cette solution.

2. description du problème et de la démarche choisie

La figure 1 représente une vue schématique de la configuration du contrôle pour une position angulaire de la pièce. La pièce est analysée par radioscopie X et des images bidimensionnelles sont obtenues pour différents angles de rotation de la pièce. Puisque le cylindre central absorbe entièrement les rayons X, seuls le cordon de soudure et la partie extérieure de la pièce sont couverts par les images : on parle alors de « radioscopie tangentielle ». En pratique le rapport des rayons R_{int} et R_{ext} est très voisin de un (figure 2)

Le but est d'extraire la section réelle de la soudure à partir des sections projetées sur l'image radioscopique issue du détecteur 2D. Pour vérifier la faisabilité de cette approche de tomographie, une double modélisation est développée. La première définit un modèle géométrique pour représenter la pièce mécanique analysée dans l'espace. Ce premier modèle est ensuite utilisé dans une seconde modélisation qui permet de simuler la formation de l'image radioscopique. L'image simulée permettra de quantifier le gain d'une reconstruction tomographique quant à la précision et à la robustesse de l'évaluation de la géométrie du volume de révolution recherché : le cordon de soudure.

L'étude doit permettre de montrer si une approche combinée, projections tangentielles et reconstruction par rétroprojection filtrée, peut améliorer les perspectives d'emploi des contrôles de soudure de pièces de révolution par radioscopie tangentielle. On veut évaluer la qualité de la reconstruction de la zone fondue (cordon de soudure) ce qui permettra d'envisager de développer le potentiel de cette méthode sur des images réelles et d'envisager aussi de reconstruire les défauts.

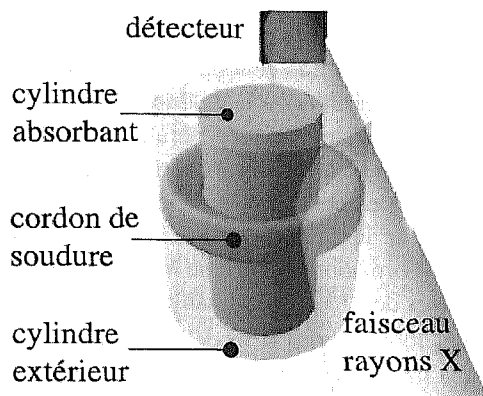


Figure 1. – Vue schématique de la pièce mécanique analysée et du principe de la radioscopie tangentielle.

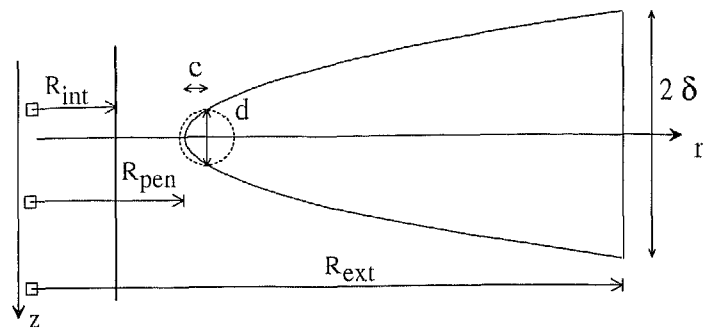


Figure 2. – Paramètres du modèle de cordon de soudure.

3. modèle de la pièce mécanique et modèle de formation de l'image radioscopique

La géométrie de la pièce mécanique est définie par les valeurs des rayons intérieur (R_{int}) et extérieur (R_{ext}) de la pièce. Par contre, la forme générale du volume de révolution n'est pas connue précisément. Nous choisissons de la modéliser à l'aide d'un polynôme de degré 2. Le cordon de soudure a donc une forme parabolique de largeur 2δ à la surface de la soudure et de longueur ($R_{ext} - R_{pen}$) correspondant à la pénétration de la soudure. Avec ces conditions aux limites, nous avons l'équation d'une section du volume de révolution (cf. figure 2) :

$$r = \frac{R_{ext} - R_{pen}}{\delta^2} z^2 + R_{pen} \quad (1)$$

Lors d'un contrôle radioscopique, le flux de rayonnement émis par la source est progressivement absorbé en fonction de l'épaisseur de matière traversée. Le flux transmis derrière l'objet est capté par un détecteur qui se charge, au moyen d'un convertisseur analogique-numérique, de créer une image. Le faisceau émergent présente une intensité plus faible que le faisceau incident, cette diminution est fonction de la nature et de l'épaisseur traversée. Pour modéliser cette variation d'intensité, plusieurs approches sont possibles suivant les hypothèses choisies. On peut considérer en première approximation que le faisceau est monochromatique aussi la valeur du coefficient d'atténuation du matériau traversé par les photons X est obtenue en se plaçant à une énergie équivalente de 45 keV. La soudure peut être réalisée par faisceau d'électrons ou par laser CO₂. Dans les deux cas, une bague de métal d'apport est placée entre les deux pièces soudées. Des essais micrographiques antérieurs ont montré que le taux de dilution du métal d'apport dans le métal de base est constant dans la direction des rayons X ce qui, avec l'hypothèse du faisceau monochromatique, justifie cette

hypothèse d'un coefficient d'atténuation qui ne varie pas dans l'épaisseur e de matière.

Les phénomènes de diffusion par effet Compton sont négligeables à une énergie équivalente de 45 keV, et la distance qui sépare l'objet du détecteur est suffisamment importante (grandissement par projection) pour négliger la diffusion.

La loi générale d'atténuation que nous utilisons est donc classiquement donnée par :

$$I = I_0 \exp[-\mu e] \quad (2)$$

où I est l'intensité de la radiation émergente non absorbée, I_0 l'intensité de la radiation incidente, e l'épaisseur de matière traversée, μ le coefficient d'atténuation linéique du matériau.

Le faisceau de rayons X est de type conique mais si l'on considère les dimensions réelles très petites de la zone contrôlée et sa distance à la source, nous avons montré que le choix d'une modélisation par faisceau parallèle est suffisant pour obtenir une image modélisée très proche de l'image réelle [Gueudré-1]. Il n'y a en effet pratiquement aucune différence entre les intensités émergentes de la pièce dans les deux cas de simulation. Il y a par contre une différence notable au niveau de la dimension de la soudure projetée sur le détecteur. En effet, en faisceau parallèle, le grandissement de la pièce est égal à 1, alors que dans le cas réel, l'objet se trouve nécessairement grandi par projection sur le détecteur. Le grandissement réel, connu, est utilisé de façon uniforme pour générer l'image modélisée.

La géométrie étant modélisée, les intensités qui conduisent à la formation d'une ligne de l'image radiante pour la coordonnée z sont obtenues en prenant en compte les deux matériaux traversés, le métal de base (mb) et la zone fondue (zf), d'épaisseurs respectives e_{mb} et e_{zf} , de coefficients d'atténuation μ_{mb} et μ_{zf} déterminés à l'énergie équivalente de 45 keV. Pour chaque valeur de r , variant entre le rayon intérieur et le rayon extérieur, la radiation émergente est :

$$I(r, z) = I_0 e^{[-\mu_{mb} e_{mb}(r, z) - \mu_{zf} e_{zf}(r, z)]} \quad (3)$$

Les valeurs numériques des épaisseurs sont obtenues par la connaissance des cotes de fabrication et le modèle parabolique de la forme du cordon. Ce calcul, reproduit pour toutes les lignes de l'image, permet de déterminer les intensités émergentes en chaque pixel de l'image.

On distingue l'image radiante caractéristique du rayonnement transmis au travers de l'objet à contrôler issue de la formule (3) de l'image numérique formée et transmise par le système de détection. Le système de détection transforme l'image radiante en une image numérique. La courbe réelle de réponse du détecteur donnant la relation entre intensité et niveau de gris doit être établie. On peut l'obtenir à partir de l'image réelle. Une fenêtre de taille $M_r \cdot M_z$ est sélectionnée manuellement ou automatiquement sous le cordon de soudure. A chaque côte r correspond une épaisseur traversée dans le métal de base $e_{mb}(r)$. On calcule donc dans chacune des plages de hauteur M_z le niveau de gris moyen $N_{gm}(r)$. La courbe de réponse C en intensité est obtenue par le biais de la relation (2), où l'on calcule à

partir des épaisseurs e_{mb} du métal de base et de son coefficient d'atténuation μ_{mb} les intensités émergentes I . La réponse du détecteur étant linéaire, une extrapolation de la droite pour des intensités émergentes plus faibles est effectuée afin de prendre en compte la réponse du détecteur pour les parties plus absorbantes de la pièce mécanique (figure 3). Les conditions opératoires, assez délicates avec un ajustement interne et automatique de la sensibilité du système d'acquisition, n'ont pas permis de mieux optimiser la dynamique du détecteur. La loi de conversion ou courbe de réponse du détecteur est mesurée expérimentalement et vaut :

$$C(I) = C_1 \cdot I + C_2 = 157,103I + 14,06 \quad (4)$$

où I est l'intensité du rayonnement normalisée par rapport à l'intensité incidente I_0 .

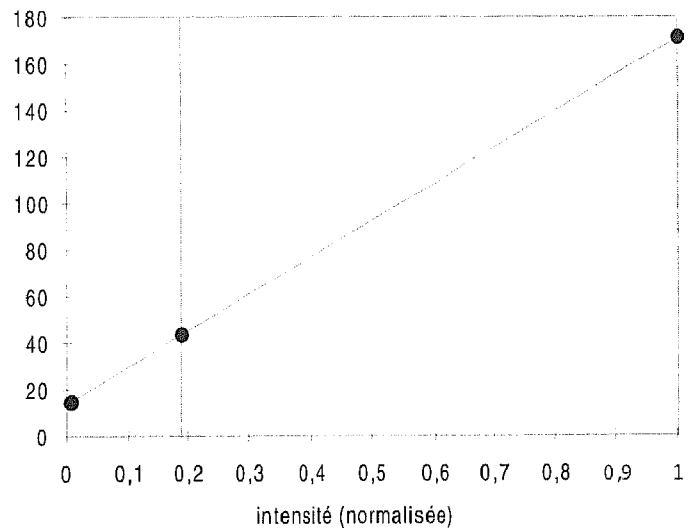


Figure 3. – Courbe de réponse du détecteur $C(I)$

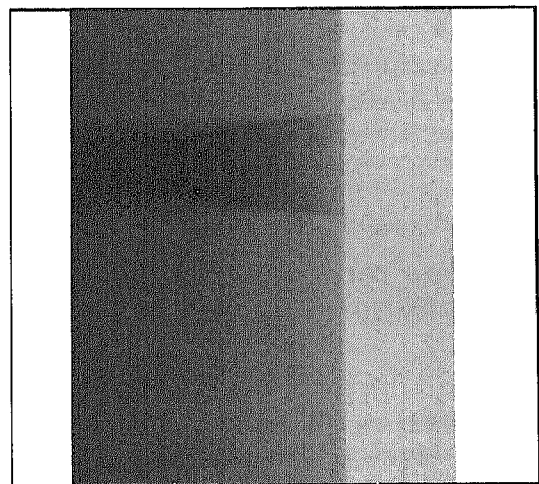


Figure 4. – Modélisation de la radioscopie de la pièce mécanique analysée.

L'image modélisée est présentée sur la figure 4, on s'aperçoit que le fond de cordon est particulièrement difficile à déterminer et ce en l'absence de bruit.

4. construction du volume de données tomographiques et reconstruction

4.1. les données

Les données sont des images radioscopiques simulées, elles représentent l'image par transmission de rayons X de l'objet étudié, selon un angle donné θ . L'image est donc intrinsèquement bien recalée et on a en abscisse et en ordonnée de cette image les coordonnées r et z d'un repère cylindrique dont l'axe est celui de la pièce de révolution. L'image simulée numérique est notée : $p_\theta(r, z)$.

Si l'on considère la famille d'images obtenues pour toutes les projections possibles, donc tous les angles θ possibles, on note cette famille $p(r, z, \theta)$. Dans notre cas les projections ne dépendent pas de l'angle puisque la pièce et la soudure sont supposés parfaitement cylindriques, nous avons donc :

$$p(r, z, \theta) = p(r, z, 0) = p_\theta(r, z) \quad \forall \theta, \forall r \geq 0 \quad (5)$$

et de même par symétrie :

$$p(-r, z, \theta) = p(r, z, 0) = p_\theta(r, z) \quad \forall \theta, \forall r \quad (6)$$

On peut se ramener aux projections P contenant les valeurs réelles de l'intensité des rayons X recueillis par les détecteurs, par la fonction C^{-1} inverse de la fonction C définie par la formule (4) et l'on a :

$$P(r, z, \theta) = C^{-1}(p(r, z, \theta)) \quad (7)$$

$p(r, z)$ est l'image numérique et $P(r, z)$ est l'image des intensités. P représente donc les projections avant la détection, soit l'image radiante.

4.2. la zone centrale opaque et apodisation des données

Si le centre du champ est opaque aux rayons X, on a :

$$P(r, z, \theta) = 0 \text{ si } |r| < R_{\text{int}} \quad (8)$$

Les projections sont donc incomplètes car l'opacité aux rayons X de la partie centrale de la pièce ne permet pas d'obtenir une

projection de tout le volume à reconstruire. Ceci rend inopérantes les méthodes usuelles de reconstruction tomographique. Il n'est en effet pas possible de simplement donner aux pixels de l'image de projection une valeur nulle. En effet, les méthodes de reconstruction font intervenir dans leurs calculs le logarithme de l'atténuation $-\log(I/I_0)$ qui prend alors une valeur infinie. Plus précisément dans notre étude I/I_0 vaut $C^{-1}(p(r, z, \theta))$.

Aussi, nous allons définir P' une transformation des données pour tenir compte de la zone opaque et permettre d'utiliser une technique de rétroprojection filtrée. Lewitt et Bates ont présenté une série de trois articles sur le problème général de la reconstruction de données incomplètes, en présentant tout d'abord les limites théoriques [Lewitt-I], puis les problèmes liés aux algorithmes de rétroprojection filtrée (choix du filtre, choix de l'interpolation) [Lewitt-II], dans une troisième partie Lewitt propose deux solutions pour compléter les données. La première solution complète la projection vide au centre grâce à une fonction d'interpolation qui nécessite un calcul de régression linéaire pour calculer les coefficients de la fonction. La méthode ne garantit la bonne jonction entre interpolation et projection réelle que sur un des deux points limites choisis (figure 5). La seconde méthode consiste à exploiter la continuité entre les projections qui ne sont pas indépendantes les unes des autres. Pour cela Lewitt propose une solution qui complète les coefficients angulaires de la transformée de Fourier des projections.

Lewitt indique que trois conditions améliorent l'efficacité de la reconstruction : si seulement une faible partie de la projection est vide, si on peut faire l'hypothèse que la pièce est cylindrique, si la projection complète varie faiblement dans la partie vide. La deuxième et la troisième condition sont obtenues ici. Par contre notre problème se caractérise par une projection vide grande par rapport à la projection complète. De plus nous savons que la projection au centre peut être considérée comme nulle au vu des matériaux traversés. Aussi nous n'allons pas utiliser une interpolation sur toute la partie vide mais seulement sur ses bords. Ce

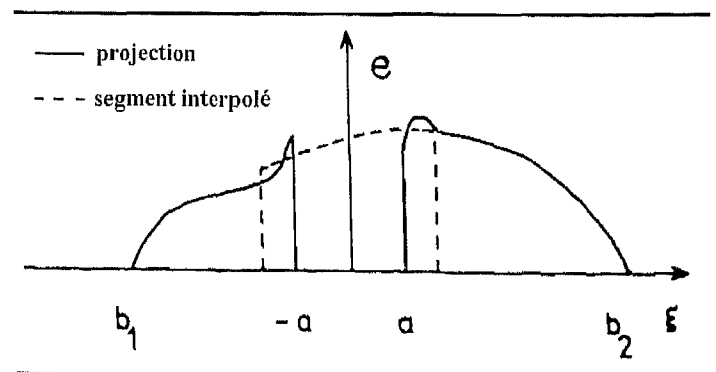


Figure 5. – Exemple d'interpolation proposée par Lewitt [Lewitt-III].

qui permet aussi de réduire les temps de reconstruction. La transformation P' est donc définie par :

$$P' = \begin{cases} \forall |r| < R_{\text{int}}, 0 \\ \forall |r| \in [R_{\text{int}}, R_{\text{ext}}], -\log(C^{-1}(p(r, z, \theta))) \\ \forall |r| > R_{\text{ext}}, 0 \end{cases} \quad (9)$$

La transformation exprimée par la formule (9) est une opération qui présente de brusques transitions aux limites génératrices d'artefacts de reconstruction car l'algorithme exploité utilise des transformées de Fourier. Une apodisation est donc nécessaire et nous avons choisi pour cela une loi gaussienne :

$$P' = \begin{cases} \forall |r| < R_{\text{int}}, -\log(C^{-1}(p(R_{\text{int}}, z, \theta))) \cdot e^{-\frac{(r - R_{\text{int}})^2}{\sigma^2}} \\ \forall |r| \in [R_{\text{int}}, R_{\text{ext}}] - \log(C^{-1}(p(r, z, \theta))) \\ \forall |r| > R_{\text{ext}}, -\log(C^{-1}(p(R_{\text{ext}}, z, \theta))) \cdot e^{-\frac{(r - R_{\text{ext}})^2}{\sigma^2}} \end{cases} \quad (10)$$

Le paramètre σ permet de moduler la rapidité avec laquelle on fait décroître les valeurs dans la zone opaque et à l'extérieur du cylindre.

4.3. reconstruction

Il est intéressant de remarquer que, pour un point à reconstruire donné, les trajectoires disponibles couvrent un angle α qui varie selon la cote r du point : pour un point tangent au cylindre central, donc sur le rayon intérieur R_{int} , cet angle est nul, alors que pour un point infiniment éloigné, il atteint la valeur maximale de π radians (Figure 6). On peut obtenir une relation permettant de calculer l'angle de recouvrement α à partir du triangle rectangle AOB par :

$$\alpha = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R_{\text{int}}}{r}\right) \quad (11)$$

L'algorithme de rétroprojection standard utilisé consiste à épancher chaque projection selon la direction de son angle d'acqui-

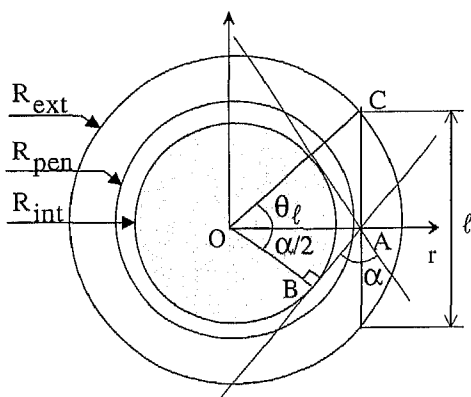


Figure 6. – Angles de projections disponibles pour un point donné à reconstruire selon sa cote.

tion θ , c'est-à-dire que l'on attribue à tous les pixels d'une droite orientée selon θ la valeur correspondante d'un point de la projection. L'image finale correspond à la sommation de ces rétroprojections. L'épandage de chaque projection ne conduit pas à l'image de la coupe mais à une version convoluée de celle-ci, un filtre de type Ram-Lak est utilisé [Macovski].

Le programme employé ayant été développé pour des données à reconstruire bidimensionnelles, il est appliqué successivement à chaque ligne des radiosopies tangentiellles. Dans la simulation étudiée, le volume étant supposé de révolution, la même radioscopie est reproduite selon autant d'angles autour de la pièce qu'on le souhaite. Les données reconstruites permettent d'obtenir une image tridimensionnelle de l'objet.

5. reconstruction des défauts

On peut se demander si la reconstruction de défauts est possible car seuls des chapelets de bulles (ensemble de cavités) sont détectés avec l'installation de radioscopie tangentielle.

La difficulté est de reconstruire les défauts en fond de cordon où le contraste est le plus faible. Si on prend un défaut de diamètre d , correspondant à une cavité, (cf. figure 2) on peut obtenir la position c où le diamètre peut s'inscrire dans le cordon avec :

$$c = \frac{R_{\text{ext}} - R_{\text{pen}}}{\delta^2} \cdot \frac{d^2}{4} \quad (12)$$

Ce qui nous donne la cote r dans le repère de la pièce avec $r = R_{\text{pen}} + c$. Le défaut de diamètre d donnera le contraste maximum possible pour cette cote r . On peut en déduire la longueur du trajet des rayons X dans la pièce à partir du triangle OAC (cf. figure 6)

$$\ell = 2 \cdot R_{\text{ext}} \sin\left(\arccos\left(\frac{R_{\text{pen}} + c}{R_{\text{ext}}}\right)\right) \quad (13)$$

Le rapport d/ℓ donne l'épaisseur du défaut rapportée à l'épaisseur traversée. On estime qu'une différence d'épaisseur est décelable par des moyens usuels de radiographie si ce rapport est supérieur à 1%. En tomographie X on peut espérer détecter des variations d'épaisseurs de 0,1% [Weight]. Connaissant le coefficient d'atténuation de la matière (zone fondue) on peut aussi calculer le contraste en pourcentage entre l'intensité I à la sortie d'une pièce sans défaut et l'intensité I_d d'une pièce comportant un défaut de taille d . On obtient à l'aide de la formule (2) :

$$\frac{I_d - I}{I} = e^{-\mu_z d} - 1 \quad (14)$$

Cette relation est indépendante de l'intensité initiale I_0 et donc de ℓ mais il s'agit de l'intensité de l'image radiante, il faut donc tenir compte de la courbe de réponse du détecteur. Le contraste en niveau de gris de l'image de radioscopie dépendra de cette

distance ℓ donnée par (13). A l'aide de la formule (4), le contraste en niveau de gris est en définitive donné par :

$$\frac{C(I_d) C(I)}{C(I)} = \frac{C_1 \cdot (I_d I)}{C_1 \cdot I + C_2} \quad (15)$$

6. modélisation du bruit dans l'image de radioscopie

Nous proposons dans cette partie d'introduire artificiellement du bruit dans l'image de modélisation, afin de vérifier la robustesse de l'algorithme de reconstruction. Dans de précédents travaux Gueudré s'est attachée à comprendre et à modéliser le bruit obtenu dans le cadre de ce contrôle par radioscopie tangentielle [Gueudré-1].

On suppose que le bruit de l'image réelle est uniquement de type photonique ou quantique, c'est-à-dire qu'on néglige les bruits issus du processus de détection des photons incidents par le scintillateur, et de l'électronique. Le bruit décrit alors un processus de Poisson, en pratique le bruit suit une loi gaussienne. Si on considère une colonne de l'image hors cordon de soudure, il s'agit d'une région homogène où l'épaisseur traversée est la même en chaque pixel de cette zone, la distribution des niveaux de gris Ng autour d'une valeur moyenne m est donnée par la densité de probabilité:

$$p(Ng) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(Ng - m)^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (16)$$

On utilisera les résultats de mesures expérimentales de m et σ_b pour chaque colonne afin de générer un bruit aussi proche de la réalité que possible et créer une image bruitée très réaliste. La comparaison avec le profil de niveaux de l'image réelle, calculé suivant le même axe, permet de constater que les amplitudes des fluctuations sont les mêmes dans les deux cas. Par contre, il semble que la répartition spatiale de ces fluctuations est différente. En effet, l'image modélisée possède des fluctuations qui sont beaucoup plus « rapides » que celles de l'image réelle. Si cela avait été nécessaire, on aurait pu prendre en compte la répartition spatiale du bruit de l'image réelle, pour former une image modélisée bruitée plus ressemblante [Gueudré-1].

7. résultats

7.1. image radioscopique modélisée sans bruit

Une coupe de l'image 3D reconstruite, effectuée dans le même plan que l'image de la figure 4 est représentée dans la figure 7.

A titre indicatif, la reconstruction d'une image 3D de $256 \times 256 \times 512$ voxels, représentant un volume de type parallélépipède tangent au cylindre interne, à partir de 1000 projections radioscopiques de 256×256 pixels chacune, dure environ 5mn sur une station de travail SGI Indigo 2 R1000 à 195MHz. Si nous appliquons la formule (11) qui permet de connaître l'angle de recouvrement, nous calculons que dans notre configuration l'angle de recouvrement est de l'ordre de 30° pour les points situés en fond de cordon ($r = R_{pen}$). Cet angle est suffisamment important pour considérer que le fond de cordon sera bien reconstruit, la qualité se dégrade bien sûr lorsque l'on se rapproche du rayon intérieur.

Sur cette figure nous avons construit une image où la première moitié est reconstruite avec 1000 projections ou coupes sans apodisation et la seconde avec 4000 projections simulées et une apodisation où le paramètre écart-type σ est fixé à environ 5% de la longueur de l'image utile, c'est-à-dire environ 5% de la longueur de pénétration. L'apodisation est donc somme toute rapide car les valeurs étaient déjà proches de zéro à proximité du rayon intérieur. Nous avons jugé suffisante la qualité d'une image reconstruite avec ces derniers paramètres. Elle apporte une amélioration qualitative très sensible : la zone proche du sommet de la parabole, c'est-à-dire le fond de cordon, qui apparaissait assez floue dans la figure 4 originelle, est notablement plus nette ici. Il subsiste la présence indésirable de lignes verticales. La visualisation plus complète de l'image 3D permet de montrer qu'il s'agit en fait de plans tangents au cylindre interne et que ce sont donc bien les artefacts de reconstruction liés à la réduction du nombre de projections disponibles lorsque l'on se rapproche du cylindre intérieur. Ces artefacts se réduisent à mesure qu'on augmente le nombre de projections radioscopiques autour de l'objet. L'apodisation améliore aussi grandement le contraste visuel de l'image reconstruite.

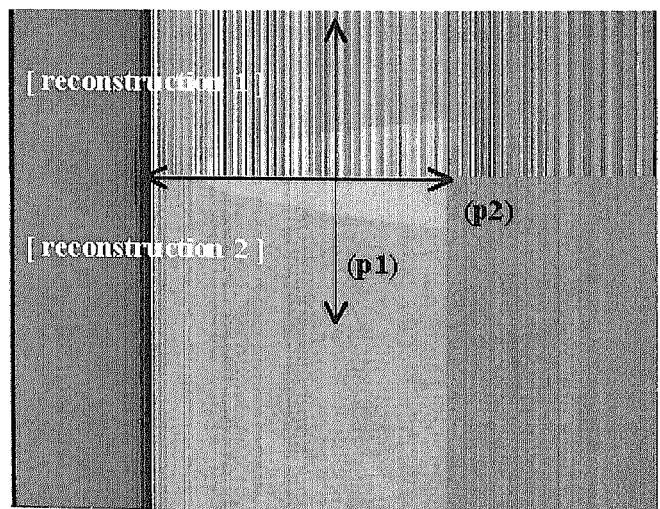


Figure 7. – Deux demi-coupes de la pièce reconstruite.
7a – Reconstruction 1 (en haut) avec 1000 coupes sans apodisation.
7b – Reconstruction 2 (en bas) avec 4000 coupes et apodisation.

Puisque le modèle de la pièce est formé de deux matériaux uniquement, nous attendons une image reconstruite où seuls deux niveaux de gris caractérisent la pièce. Les résultats sont encourageants : on visualise bien deux zones dans la zone reconstruite utile. Les niveaux de gris à l'intérieur de la zone fondue ne sont par contre pas constants : leurs valeurs oscillent le long des lignes. Une simulation sur 16 bits a permis de montrer que cet artefact n'est pas la conséquence d'une numérisation sur 8 bits qui crée des discontinuités légères mais bien marquées dans l'image modélisée. Il y a donc un bruit de reconstruction numérique assez fort lié à l'algorithme utilisé.

Nous comparons donc sur la figure 8 trois types de profils que nous normalisons pour avoir une échelle de représentation commune. Le profil théorique vaut 1 si nous sommes en présence de la soudure et 0 sinon. Il est représenté par des tirets sur la figure. Ce profil théorique est de type binaire et correspond à une segmentation idéale de la zone fondue. Le second type de profil est celui obtenu par la modélisation de l'image de radioscopie, le

plateau de gradient nul correspond bien à la largeur théorique de la zone fondue et est facilement identifiable (figure 8a). Le troisième type de profil est celui obtenu sur les images reconstruites. La présence du plateau de gradient nul est aussi très claire sur l'image reconstruite. Les transitions verticales sont amplifiées (gradient plus important) ce qui était le but de cette rétroprojection qui doit se rapprocher de profils rectangulaires. La méthode permet donc de reconstruire deux objets dans l'image : la zone fondue et le métal de base. De plus, la largeur de ce plateau correspond bien à celle du profil de cordon modélisé. Néanmoins la présence du bruit numérique complique l'extraction automatique du cordon par un algorithme de traitement d'image.

L'avantage décisif de cette solution de reconstruction réside dans le gain sur le contraste de la transition en fond de cordon quasiment imperceptible sur l'image modélisée et bien sûr encore plus difficilement sur une image réelle. Ici nous avons une transition très nette et correctement localisée, le contraste relatif est assez faible de l'ordre de 10% (figure 8b) mais suffisamment supérieur au bruit numérique de reconstruction pour que l'on obtienne de bons résultats. Visuellement l'image reconstruite dans la seconde moitié de la figure 7 est excellente.

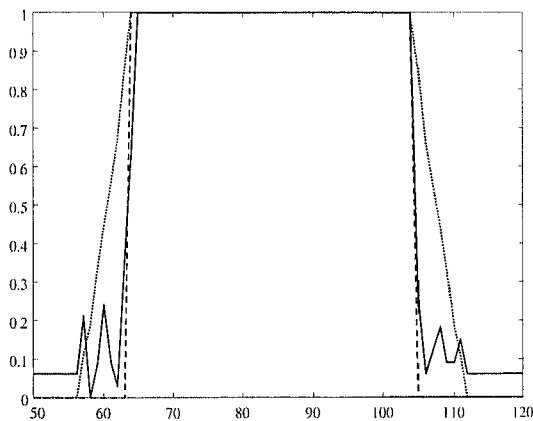
7.2. reconstruction des défauts

Avec nos données numériques le plus gros défaut volumique possible en fond de cordon donne un rapport d/ℓ de 0,89 % très faible. Le rapport théorique des intensités donné par la formule (14) est de 2,2% mais comme le système d'acquisition n'est pas optimisé pour ce seul ratio, le contraste en niveau de gris est bien plus faible, il descend à 0,1% (formule (15)). Ce défaut n'est donc quasiment pas détectable sur l'image radioscopique avec une dynamique de huit bits. Seuls les arrondis de calcul créent des pixels de niveaux de gris supérieurs d'une unité aux niveaux de références. On peut détecter le défaut par soustraction entre une image avec défaut et une image sans défaut, cela bien sûr parce que le bruit est nul. La reconstruction du défaut avec la méthode proposée ne donne rien car le bruit de reconstruction est bien supérieur au faible contraste du défaut.

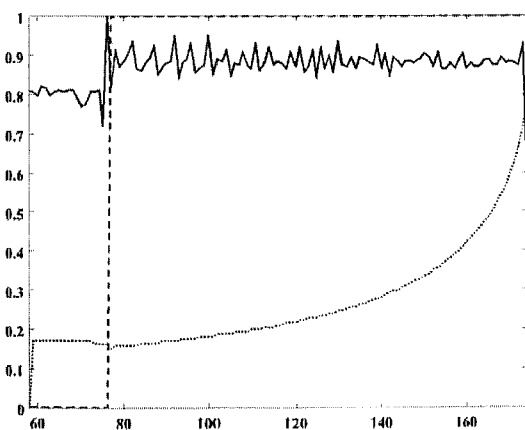
7.3. image radioscopique modélisée avec bruit

On peut comparer les profils de l'axe central de la soudure sur les figures 8b (image non bruitée) et 10 (image bruitée), on peut constater que le bruit dans cette installation de radioscopie donne des fluctuations du profil notables mais sans être trop importantes. Le rapport signal sur bruit défini par le rapport de la valeur moyenne sur l'écart type varie entre 60 et 75.

L'image reconstruite avec ces données bruitées reste très satisfaisante d'un point de vue qualitatif (figure 9) par contre si on



a) Profil de la colonne (p1) (cas de la reconstruction 2) figure 7



b) Profil ligne de l'axe central de la soudure (ligne (p2) de la figure 7)

Figure 8. – Comparaison des profils théoriques (tirets), profils reconstruits (traits continus), et profils obtenus en radioscopie modélisée (pointillés).

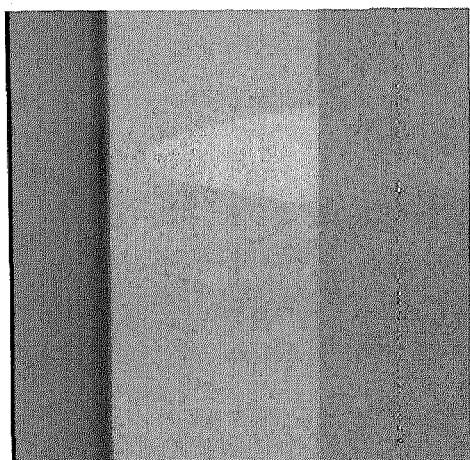


Figure 9. – Image reconstruite à partir d'une simulation bruitée.

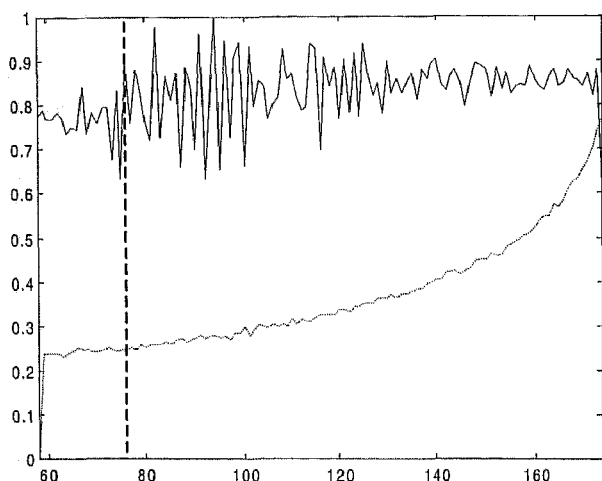


Figure 10. – Profil de l'axe de la soudure de l'image reconstruite à partir de données bruitées (trait continu) et profil obtenu en radioscopie modélisée bruitée (pointillés)

compare le profil central de la soudure dans les images reconstruites (lignes en trait continu dans les figures 7b et 10) on constate une dégradation de la clarté de la transition métal de base - zone fondue en fond de cordon.

Les images reconstruites, même bruitées, sont notablement plus lisibles en fond de cordon que les images radioscopiques initiales (figures 7, 9 et 4). L'opérateur de radioscopie pourra sélectionner beaucoup plus sûrement sur son écran la dimension de la soudure après reconstruction. Nous avons montré que la position du fond de cordon mesuré sur l'image reconstruite était bien celle introduite dans les données simulées. Par contre le bruit numérique de reconstruction empêche de construire une solution simple de traitement d'image pour extraire automatiquement les contours. La solution développée par Gueudré est de ce point de vue plus efficace [Gueudré-2].

8. conclusions

Nous avons montré que malgré des projections radioscopiques vides au centre, l'image reconstruite est tout à fait correcte car nous ne cherchons pas à reconstruire le centre de l'objet. Nous avons en quelque sorte presque toute l'information utile pour la reconstruction. Nous avons surtout montré comment mettre en forme cette information pour exploiter un algorithme de rétro-projection filtrée et chercher à estimer les limites de la méthode. Cette reconstruction permet donc de résoudre le problème inverse posé quant à la mesure de la longueur de pénétration, de la surface, et de la symétrie de la soudure. Les gains espérés sur la clarté de la transition entre métal de base et zone fondue sont nets mais ils sont aussi entachés d'artefacts de reconstruction qui peuvent être réduits par filtrage. Ces artefacts créent des discontinuités locales telles que seul l'effet intégrateur de l'œil permet de prendre la décision. Il serait difficile de mettre au point un algorithme de segmentation automatique sur les données reconstruites.

On a montré aussi que la reconstruction de défauts volumiques isolés est impossible avec les moyens employés, le contraste est insuffisant. On ne peut envisager la reconstruction de tels défauts que si on passe à une numérisation sur 12 bits ou plus, une reconstruction d'images soustraites serait aussi souhaitable. On peut aussi reprendre l'étude théorique pour un chapelet de bulles car lorsqu'un défaut apparaît à cause d'un mauvais réglage du faisceau d'électrons, les défauts sont rarement isolés. Une dernière étape dans cette étude concernera la reconstruction de l'objet à partir d'une série d'images réelles. Nous aurons alors le problème classique de repositionnement très précis des images comme pour la fusion de données. En effet, malgré des réglages soignés de l'acquisition, il existe un très léger faux rond résiduel qui entraîne un léger déplacement de la zone fondue qui est visible dans l'image radioscopique à cause du fort grandissement. De plus l'image réelle est plus complexe que l'image modélisée puisque, d'une part, la surface extérieure du cordon de soudure de l'image réelle est plutôt bombée et non arasée comme dans le modèle, et d'autre part la longueur de pénétration fluctue au lieu d'être constante. Cependant ces fluctuations de forme sont relativement faibles et lentes d'une section à l'autre aussi elles contribueront essentiellement à augmenter le bruit de l'image réelle.

remerciements

Nous remercions le laboratoire DFTN/SCAC/LCND du CEN Valduc pour avoir mis à notre disposition les images radioscopiques pour cette étude et plus particulièrement messieurs Jean Voisin et Philippe Bugeon.

BIBLIOGRAPHIE

- [Herman] G.T. Herman, "Image reconstruction from projections", *The fundamentals of Computerized Tomography*, Academic Press, 1980, 317p
- [Peyrin] F. PEYRIN, L. GARNERO, I. MAGNIN, "Reconstruction tomographique d'images 2D et 3D", *Traitement du Signal*, Vol.13, n°4, supplément, 1996, Saint Martin d'Hères, France, GRETSI.
- [Castellan] C. CASTELLAN, "Trois ans d'exploitation d'un tomographe industriel au service des entreprises", *Actes du Congrès COFREND sur les essais non destructifs*, Vol. 2, Nantes, France, 1997, p 459-464.
- [Rizo] Ph. RIZO, M. ANTONAKIOS, P. LAMARQUE, "Solid rocket motor non-destructive examination using tomosynthesis methods", *14th World Conference on Non Destructive Testing*, New-Delhi, Inde, 8-13 décembre, 1996, pp 453-456.
- [Gondrom] S. Gondrom, S. Schröpfer, "Digital computed laminography and tomosynthesis - functional principles and industrial applications", *International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology*, Berlin, Allemagne, 15-17 mars, 1999.
- [Ewert] U. Ewert, V. Baranov, K. Borchardt, "Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis techniques using imaging plates and 60Co radiation", *NDT & E International*, Vol. 30, n° 4, 1997, p 243-248.
- [Louis] A.K. Louis, F. Natterer, "Mathematical problems of computerized tomography", *proc. IEEE*, Vol. 71, n°3, 1983, p 379-389.
- [Lewitt-I] R.M. Lewitt, R.H.T. Bates, Image reconstruction from projections, Part I : General theoretical consideration, *Optik*, Vol. 50, n°1, 1978, p 19-33.
- [Lewitt-II] R.M. Lewitt, R.H.T. Bates, Image reconstruction from projections, Part II : Modified back-projection methods, *Optik*, Vol. 50, n°2, 1978, p 85-109.
- [Lewitt-III] R.M. Lewitt, R.H.T. Bates, Image reconstruction from projections, Part III : Projection completion methods (theory), *Optik*, Vol. 50, n°3, 1978, p 189-204.
- [Aravindhhan] K. Aravindhhan, K. Rajpogal, "Image reconstruction from incomplete projections data : a multiresolution approach", *14th World Conference on Non Destructive Testing*, New-Delhi, Inde, 8-13 décembre, 1996, p 1789-1793.
- [Basseville] M. Basseville, A. Benveniste, A.S. Willksy, "Multiscale Autoregressive Processes - Part I: Schur-Levinson parametrizations", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol.SP-40, n°8, août, 1992, p.1915-1934.
- [Dromigny-1] A. Dromigny, Y.M. Zhu, "Improving the Dynamic Range of Real-Time X-Ray Imaging Systems via Bayesian Fusion", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 16, n°3, 1997, p 147-160.
- [Dromigny-2] A. Dromigny, A. Rossato, Y.M. Zhu, "Fusion de données radioscopiques et ultrasonores via la théorie de l'évidence", *Traitement du Signal*, Vol. 14, n°5, 1997, p 499-510.
- [Gueudré-1] C. Gueudré "Caractérisation non destructive d'une soudure de révolution par traitement numérique d'images de radioscopie tangentielle", thèse ENSAM n°1997-36, 1997, 207p.
- [Gueudré-2] C. Gueudré, J. Moysan, G. Corneloup, "Geometrical characterization of a circumferential seam by automatic segmentation of digitized radioscopic images", *NDT&E International*, Vol. 30, n°5, 1997, p 279-285.
- [Moysan] J. Moysan, C. Gueudré, H. Moulinec, G. Corneloup, "Reconstruction tomographique d'une soudure de révolution après radioscopie tangentielle", *Deuxième colloque du PPF Problèmes Inverse de Champs, Publication du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique n°147*, avril 1998, p 91-96.
- [Moulinec] H. Moulinec, J. Moysan, C. Gueudré, "Reconstruction tomographique 3D à partir de projections partielles", *Deuxième colloque du PPF Problèmes Inverse de Champs, Publication du Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique n°147*, avril 1998, p 97-100.
- [Macovski] A. Macovski, G.T. Herman, "Principles of reconstruction algorithms", dans *Radiology of the skull an brain, Vol. 5, Technical aspects of computed tomography*, éditeurs T.H. Newton, D. G. Potts, Etats-Unis, 1981, p 3877-3903.
- [Weight] K. Weight, "An Overview of NDE methods For Thick Composites And A Proposal For Analysis of Computed Technology Data", *Army Research Laboratory, ARL-TR-516*, 1994, 13p.

Manuscrit reçu le 3 septembre 1999.

Les auteurs

Joseph MOYSAN



Joseph Moysan a obtenu le diplôme d'ingénieur ECAM Lyon en 1989, il a soutenu sa thèse de doctorat en 1992 à l'INSA Lyon. Il est Maître de Conférences à l'IUT GMP d'Aix en Provence. Son activité de recherche est consacrée à l'amélioration du diagnostic en contrôle non destructif par le traitement d'images. Ses travaux ont porté sur le seuillage automatique d'images par l'exploitation de la matrice de cooccurrence, appliqué aux images ultrasonores et courants de Foucault. Il a mené des recherches sur la segmentation d'images radioscopiques et s'intéresse à la reconstruction d'images et à la fusion de données.

Cécile GUEUDRÉ



Cécile Gueudré est diplômée de l'IUSTI de Marseille en 1994, docteur de l'ENSAM en 1997. Elle est Maître de Conférences à l'IUT GMP d'Aix en Provence. Ses travaux de thèse ont porté sur la caractérisation non destructive d'une soudure de révolution par traitement numérique d'images de radioscopie tangentielle. Elle poursuit ses travaux de recherche sur l'amélioration du diagnostic en contrôle non destructif, plus particulièrement à partir des imageries radiographiques et thermographiques.

Hervé MOULINEC



Hervé Moulinec est ingénieur de l'ENSIEG (1984) et docteur-ingénieur en traitement d'images de l'Université de Nice (1989). Il est ingénieur de recherche du CNRS au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. Ses activités portent sur le traitement des images tomographiques, et, surtout, sur la simulation numérique du comportement de matériaux composites-linéaires ou non-linéaires.