

PREMIER COLLOQUE IMAGE
Traitement, Synthèse, Technologie et Applications

BIARRITZ - Mai 1984 -

"MESURE DE DEFAUTS MATIERE A PARTIR D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES"

"MEASUREMENT OF METAL DEFECTS USING X-RAY IMAGES"

A. HERNANDEZ

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE - Centre d'Etudes de VAUJOURS - B.P. 7 77181 COURTRY

RESUME

Le contrôle d'objets au moyen de l'analyse d'images radiographiques soulève un certain nombre de difficultés d'autant plus aiguës que les contraintes de précision sont élevées.

Les images obtenues doivent être auto-étalonnables : nous rappelons les caractéristiques de ce critère et les problèmes que soulève son utilisation.

Les défauts doivent être parfaitement visibles sur l'image, ce qui astreint à une disposition particulière de l'objet à analyser relativement à la source et au film, et donc à la prise en compte de paramètres géométriques.

Enfin, l'analyse du (ou des) défaut comporte 2 étapes :

- Extraction du défaut de la partie réputée saine. On montre que les hypothèses classiques de distributions gaussiennes conduisent à des erreurs appréciables. Nous définissons un opérateur de classification itératif non linéaire qui utilise les caractéristiques de voisinage et réalise une application de l'espace indicateur D sur l'espace original I contenant l'image à analyser.
- Mesure des épaisseurs, volume, masse du défaut grâce à la possibilité d'auto-étalonnage et compte tenu des corrections locales géométriques nécessaires.

Nous donnons les résultats issus du traitement d'images de maquettes-étalons et de l'application de notre méthode à des images réelles.

SUMMARY

When checking metallic objects by means of radiograph, one can light upon a lot of troubles for the more precise the goal, the more difficult the solution of the problem.

Recorded images have to be self-calibrated : we point out how this constrain has to be taken into account, and problems one can encounter. Defects have to be quite perfectly visible on the image, that is objects have to be set in a special way between the source and the film, and most often geometric corrections have to be calculated.

Analyzing defects require two steps :

- Extracting defects from background - classical hypotheses with gaussian distributions lead to quite important errors. We define a non-linear iterative operator using neighbourhood properties and giving application from a binary indicator D - space to the image I - space.
- Getting out depth, volume and mass (or lack of mass) of the defects owing to the self-calibrating properties of the image and to local geometrical corrections.

As a conclusion, we give results we have got from test-objects with test-defects and in real cases.



1. POSITION DU PROBLEME

Lors du contrôle après usinage de pièces obtenues brutes de fonderie, se pose le problème de déterminer la présence éventuelle d'inclusions de corps étrangers ou de bulles dans l'épaisseur du matériau, et de mesurer dans la mesure du possible leur importance afin de pouvoir en déduire le degré de fragilisation de la pièce fabriquée, et donc de décider du rejet ou de l'acceptation.

La radiographie constitue l'un des moyens de diagnostic qui, couplé au traitement d'images, peut conduire à des résultats intéressants, voire pertinents.

Trois éléments interviennent dans la formation de l'image :

- la source, qui se caractérise par la dose fournie, son spectre énergétique, la dimension de la tache focale, le lobe d'émission ;
- l'objet à contrôler auquel il faut adjoindre un pénétromètre afin que l'étalonnage puisse être réalisé sur le film même, et disposé de telle sorte qu'il ne perturbe pas la mesure à effectuer, tout en demeurant lui-même mesurable ;
- le film qui comporte, outre la surface sensible et l'écran renforceur avec ses inconvénients propres, mais aussi le développement dont l'influence, difficilement modélisable et quantifiable, demeure très importante (voire dramatique quelquefois).

D'une manière générale, il n'est guère possible - pour un coût raisonnable - de dissocier la dégradation apportée par le film et la chaîne de développement de celles qui résultent du générateur et des phénomènes d'interactions au niveau de l'objet puis du couple écran-film. Cette observation nous conduit à réunir en une fonction de transfert unique les contributions de chacun des phénomènes perturbants.

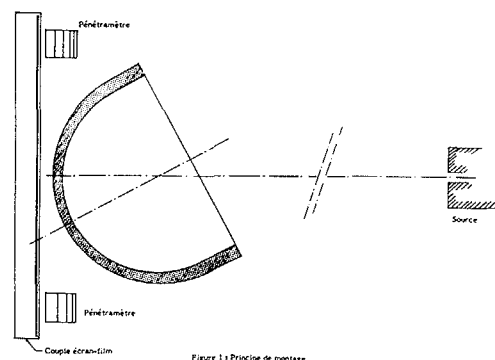
2. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Les objets à contrôler sont des récipients à symétrie de révolution et dont les surfaces interne et externe admettent pour génératrice une courbe du deuxième ordre.

La mise en place du montage physique s'opère de telle sorte que (cf. fig.1) :

- l'axe de révolution de l'objet est contenu dans le plan perpendiculaire au plan du film et passant par la source (plan normal) ;
- l'axe du faisceau perpendiculaire au plan du film passe par la zone centrale du défaut (normale principale) ;
- l'angle entre le plan du film (plan rectifiant) et le plan tangent à la surface extérieure de l'objet au point d'émergence de la normale principale, soit aussi réduit que possible ;
- la distance entre l'objet et le film soit aussi faible que possible ;
- la normale principale n'intersecte qu'une seule fois les surfaces externe et interne ;
- le pénétromètre soit aussi proche que possible de la zone défectueuse.

Ces conditions de montage doivent entraîner une réduction de la variation de l'épaisseur de matériau traversé (image de la zone saine aussi homogène que possible), un grandissement aussi proche de l'unité qu'il se peut, et un contraste optique $\Delta e/e$ aussi élevé que possible, en appelant e l'épaisseur traversée du matériau.



3. PRE-TRAITEMENT DES IMAGES

Compte-tenu des dimensions du défaut, de la distance source-objet, on peut considérer que dans un voisinage raisonnable contenant le défaut à analyser, l'image formée est due à une source plane. Ainsi, la seule correction à apporter sera la variation $\Delta e/e$ dans le champ d'analyse. Pour les mêmes raisons de dimensions

MESURE DE DEFAUTS MATIERE A PARTIR D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES
 MEASUREMENT OF METAL DEFECTS USING X-RAY IMAGES
 A. HERNANDEZ

réduites de la zone analysée relativement aux autres dimensions, une modélisation par une surface plane se révèle suffisante.

$$\frac{\partial}{\partial x} [\Delta e(x^*, y^*)] = \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial y} [\Delta e(x^*, y^*)] = k$$

avec x^*, y^* coordonnées centrées sur l'intersection de la normale principale avec le film (barycentre de l'image du défaut).

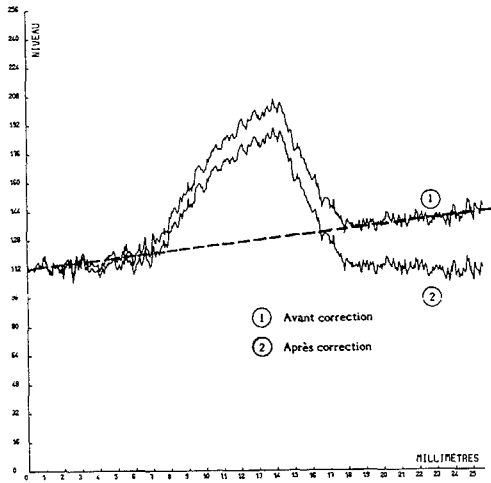


Figure 2 : Correction de la variation d'épaisseur de la partie saine

Compte tenu des dimensions de l'objet à contrôler et de la nécessité de disposer le pénétramètre (ou les pénétramètres) à proximité et non pas en superposition à celui-ci, il est nécessaire de tenir compte des corrections géométriques. Pour cela, on supposera la source ponctuelle.

Si θ est l'angle suivant le plan normal et ψ l'angle du faisceau suivant le plan osculateur, pour chacun des pavés du pénétramètre, on a :

$$\tilde{e}_i = \frac{e_i}{\cos \theta_i \cos \psi_i} \quad \text{pour le pavé numéro } i$$

Les variations $\Delta \theta_i$ et $\Delta \psi_i$ sont négligées eu égard aux dimensions de la fenêtre d'analyse sur chaque surface du pénétramètre. On relève D_i et σ_i , respectivement densité optique moyennée sur la surface retenue et σ_i écart-type des valeurs sur ce même domaine.

La suite $\{D_i, \tilde{e}_i\}$ permet de construire la courbe d'étalonnage, que pour des raisons de commodité nous approchons par un polynôme, de degré 4 le plus souvent.

4. SEPARATION DU DEFAUT ET DE LA PARTIE SAINTE

Une méthode immédiate consiste à considérer les points appartenant au défaut et ceux appartenant à la partie saine comme constituant 2 populations disjointes, séparables par les méthodes classiques qui s'appuient sur la théorie bayésienne de la décision.

Si les tailles des populations sont suffisantes, on peut modéliser chacune d'elles par une gaussienne. La population globale à l'intérieur de la zone d'analyse satisfait à une loi de probabilité de la forme :

$$p(x) = \frac{n_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x}_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{n_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x}_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$

avec n_1 et n_2 populations réduites des points appartenant au défaut et à la partie saine.

$$\text{On a donc } n_1 + n_2 = 1$$

Si s est la valeur retenue pour le seuil de séparation, on a : probabilité d'erreur de classement pour un point de la partie saine :

$$E_1(s) = \int_s^{+\infty} P_2(x) dx$$

de même, probabilité de classement pour un point du défaut :

$$E_2(s) = \int_{-\infty}^s P_1(x) dx$$

La probabilité globale d'une erreur de mauvais classement s'écrit :

$$E(s) = n_2 E_1(s) + n_1 E_2(s)$$

Cette probabilité est minimale pour

$$n_1 P_1(s) = n_2 P_2(s)$$



Soit en posant :

$$A = \sigma_1^2 - \sigma_2^2$$

$$B = 2(\bar{x}_1 \cdot \sigma_2^2 - \bar{x}_2 \cdot \sigma_1^2)$$

$$C = \sigma_1^2 \cdot \bar{x}_2^2 - \sigma_2^2 \cdot \bar{x}_1^2 + \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \ln \left(\frac{\sigma_1 n_1}{\sigma_2 n_2} \right)$$

s est déterminé par la solution de l'équation :

$$A s^2 + B s + C = 0$$

Si les 2 solutions sont distinctes, le choix se réalisera de manière heuristique.

Le seuil obtenu par cette technique conduit à une sous-évaluation systématique de la surface du défaut, et donc de la mesure du défaut de masse. La raison en est que l'hypothèse de stationnarité n'est pas vérifiée pour l'une des populations au moins, celle du défaut : en effet, l'épaisseur optique de la cavité incluse est une grandeur éminemment variable, alors que la partie saine a une population stationnaire (ou pouvant être rendue stationnaire !). Par ailleurs, le seuil déterminé par cette méthode correspond à une manière de barycentre des histogrammes : si ce seuil se révèle convenable lorsque les 2 populations sont disjointes (fig.3), on voit sur la figure 4 ce qui se produit dans la réalité.

SEPARATION BI-MODALE
 MAQUETTE TEST #1

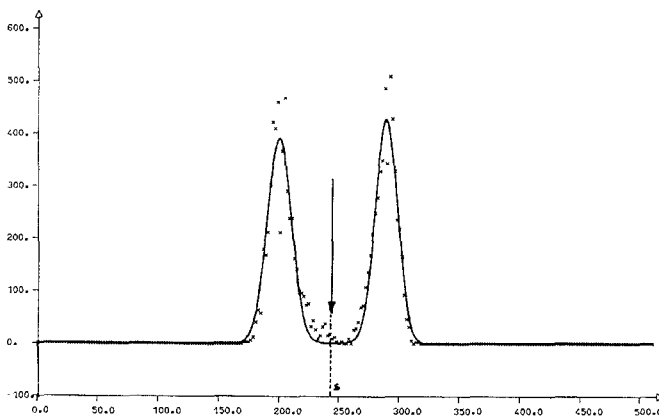


Figure 3 : Séparation optimale pour 2 distributions séparées

SEPARATION BI-MODALE
 MAQUETTE TEST #3

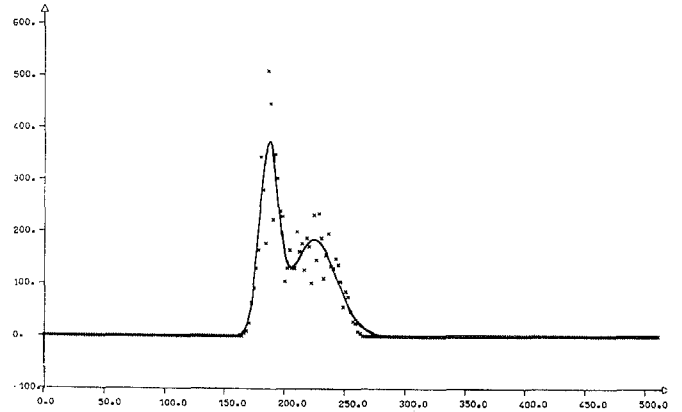


Figure 4 : Distributions à recouvrement

Une autre approche :

Puisque nous ne pouvons pas séparer le fond du défaut par une mesure dans chacun des domaines, nous allons rechercher les points qui appartiennent au fond dès l'instant où ils sont les seuls individus dont les propriétés statistiques nous soient accessibles et nous déciderons que les points rejetés appartiennent au défaut.

$$S = \{ k_{i,j} \} \text{ partie saine}$$

$$\bar{S} = \text{partie défectueuse}$$

$$S \cup \bar{S} = D : \text{domaine d'analyse}$$

$$S \cap \bar{S} = \emptyset$$

Soit I l'indicateur associé à D :

$$I = \{ P_{i,j} \} \quad P_{i,j} \in [0, 1]$$

$$\forall P_{i,j} \in S \Leftrightarrow I_{i,j} = 1$$

Soit F un sous-espace de I

$$F = \{ y_{i+k,j+l} \} \quad d = \text{Max} \{ |k|, |l| \}$$

$$k \in (-a, +a)$$

$$l \in (-a, +a)$$

$$a \in \mathbb{N}$$



MESURE DE DEFAUTS MATIERE A PARTIR D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES
 MEASUREMENT OF METAL DEFECTS USING X-RAY IMAGES
 A. HERNANDEZ

Soit $H(x)$ la fonction de distribution des échantillons

$$H(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$$

Soient les $a^2 - 1$ quantiles

$$G(x_{i,i+1}) = A_k \int_{x_i}^{x_{i+1}} H(x) dx$$

tels que

$$G(x_{i,i+1}) = G(x_j, x_{j+1}) \quad \forall i,j \leq a^2$$

et $A_k = K \cdot \sigma$

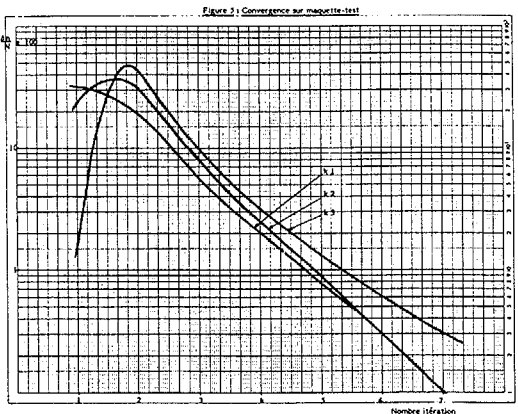
Compte tenu des définitions que nous venons de poser, un point $P_{i,j} \in S$ si :

- $p(x) \leq G(-\infty, x_1)$

$$\forall \left\{ \begin{array}{l} -p(x) \leq G(x_k, x_{k+1}) \\ \text{et Card}(F) = k \end{array} \right. \quad k = 1, a^2 - 1$$

alors $I_{i,j} = 1$, sinon $I_{i,j} = 0$

La répétition de cet algorithme conduit à la convergence en 7 à 8 itérations (fig.5). La convergence est définie de la manière suivante :



Si $N_0 \triangleq \text{Card}(I)$ à la phase initiale (itération 0)
 $\Delta N_i \triangleq N_i - N_{i-1}$

alors la convergence est obtenue pour

$$i \mid \Delta N_i \leq N_0/1000$$

Résultats obtenus

Deux maquettes ont été utilisées pour l'évaluation de l'algorithme.

Maquette n°1

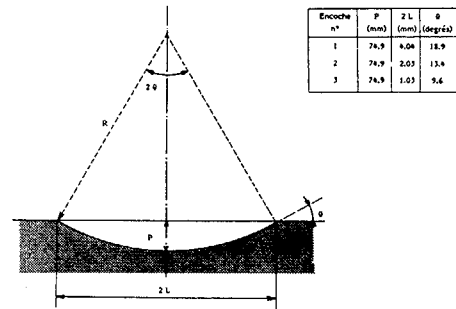


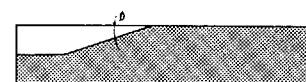
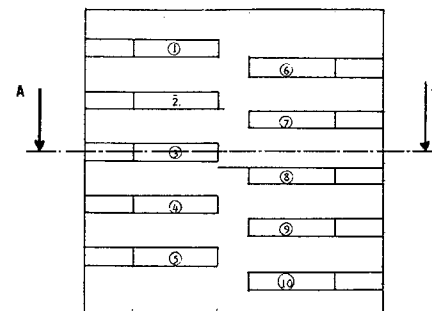
Figure 6 : Principe de la première maquette-test

Elle est constituée d'un bloc d'aluminium dans lequel ont été usinées 3 encoches à l'aide d'une même fraise circulaire (fig.6).

Numéro de l'encoche	1	2	3
Demi-angle au sommet	18,9°	13,4°	9,6°
Longueur de l'encoche (mm)	24,2	17,4	12,5
Profondeur max. (mm)	4,04	2,05	1,04
Longueur mesurée	23,4	15,8	10,5
Variation relative de surface (1)	-3,3	-9,1	-15,6
Erreur sur la profondeur max. (mm)	0,30	0,37	0,30

$$(1) S = \frac{S_{\text{mesurée}} - S_{\text{usinée}}}{S_{\text{usinée}}} \times 100$$

Maquette n°2



$$\beta = 1,5 \times \text{numéro de l'encoche}$$

Figure 7 : Principe de la deuxième maquette-test



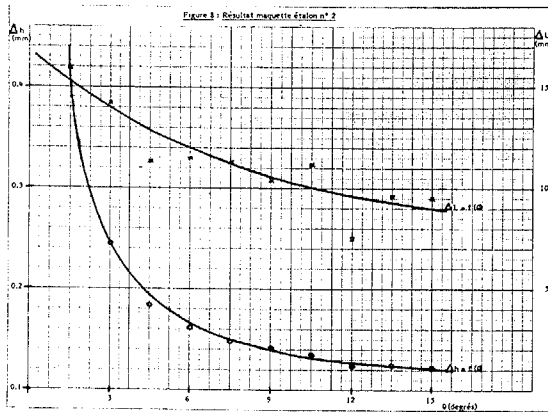
MESURE DE DEFAUTS MATIERE A PARTIR D'IMAGES RADIOGRAPHIQUES
MEASUREMENT OF METAL DEFECTS USING X-RAY IMAGES

A. HERNANDEZ

Cette maquette a été réalisée à partir d'un bloc d'aluminium sur lequel ont été usinées des rampes de largeur 70 mm et faisant un angle avec la surface du bloc de 1,5° à 15° par saut de 1,5° (fig.7).

Le but est d'essayer de mettre en évidence une corrélation éventuelle entre la limite moyenne de la frontière détectée partie saine - partie altérée et l'angle de la rampe, ou l'écart résiduel avec la surface du bloc d'aluminium.

Les résultats sont portés sur la figure 8.



Défaut réel

Nous illustrons l'application à un cas réel, sans qu'il nous ait été possible d'opposer nos résultats à ceux obtenus par une autre méthode. En particulier, la résolution en masse par rapport à l'objet entier n'est pas du même ordre de grandeur que celles obtenues par des mesures physiques, ne serait-ce que parce que le traitement d'images permet une analyse localisée.

Toutefois, nous ne désespérons pas d'avoir à travailler sur des objets de taille suffisamment réduite pour que les dimensions du défaut ne soient plus négligeables par rapport aux dimensions de l'objet. Il nous sera alors possible de pouvoir confronter des résultats obtenus par des voies totalement différentes.

CONCLUSION

La méthode que nous venons d'exposer est utilisée systématiquement pour nos problèmes de mesure de défaut matière. Elle est intégrée à un code hautement interactif puisque destiné à fonctionner en libre service auprès de physiciens. Les résultats apparaissent satisfaisants, la seule restriction provenant, ainsi que nous l'avons dit plus haut, de l'impossibilité dans laquelle nous nous sommes trouvés jusqu'à présent d'opérer des mesures contradictoires par une autre méthode qui ne mettrait en oeuvre aucun traitement informatique.

Nous n'avons pas abordé ici le problème de l'influence du bruit sur la précision du résultat. Nous entendons par bruit celui, microscopique, généré par le film et surtout par les écrans renforçateurs. La statistique de ces 2 bruits induit une contrainte sur le pas d'échantillonnage et donc sur la précision ultime des résultats. Cependant, l'expérience montre que cette contrainte n'est pas draconienne et que, d'une manière générale, le pas d'échantillonnage avait une singulière tendance à être choisi trop faible. Si la limite de résolution en profondeur est de l'ordre de 0,2 mm dans les circonstances favorables, elle se dégrade rapidement avec le niveau de bruit, imposant un filtrage avec l'altération du signal que cela entraîne. Des travaux sont actuellement en cours pour rendre l'algorithme plus robuste à l'égard du bruit.