

Extraction des joints de grains par ondelettes directionnelles et morphologie mathématique : application à l'évaluation de l'endommagement par fluage

S. Journaux^{*,**}, P. Gouton^{*}, M. Paindavoine^{*}, G. Thauvin^{**}

* Laboratoire d'Électronique Informatique Image,
Université de Bourgogne, Dijon

** Centre d'Essais et de Recherche sur les Matériaux,
ALSTOM Energy et SERMA Technologie, Belfort

La mesure de l'endommagement par fluage est un enjeu économique pour les fabricants de machines fonctionnant à haute température. La durée de vie résiduelle est un critère de nombreuses fois recherché par les constructeurs. Cet article est consacré à la description et à la mise au point d'une méthode d'analyse d'images destinée à évaluer le taux d'endommagement par fluage d'éprouvettes de laboratoire par comptage de vacuoles. Il est essentiellement destiné à l'étude préliminaire de l'extraction des informations pertinentes pour la mesure. L'extraction des joints de grains, information à caractère directionnel, constitue la problématique majeure pour la mise en œuvre de la méthode, à résoudre avant automatisation de la mesure. L'utilisation d'un détecteur optimal de ligne de crêtes conduit au développement d'un filtre par transformée en ondelettes directionnelles. Nous montrerons les résultats de cette méthode originale de filtrage et son application dans un processus industriel.

■ INTRODUCTION

Afin d'optimiser la maintenance et de prolonger la durée de vie des installations au-delà des durées initialement prévues, dans de bonnes conditions de sécurité, il est nécessaire de prévoir le plus précisément possible la durée de vie résiduelle des principaux composants d'un équipement industriel (centrales nucléaires, chaudières, turbines à vapeur ou à gaz, ...) (1, 2, 3). Pour les composants endommagés par fluage, de nombreuses méthodes sont proposées visant à mesurer cet endommagement et à le relier à la durée de vie résiduelle du matériau.

L'évaluation de la vie résiduelle du composant fonctionnant à haute température peut être faite à l'aide de la métallographie quantitative et de la connaissance de la relation entre un paramètre d'endommagement et la vie résiduelle par comptage de vacuoles. Nous présentons dans cet article une contribution des méthodes d'analyse d'images à l'analyse métallographique des matériaux métalliques endommagés par fluage. Pour parvenir à l'extraction des informations pertinentes, il faut s'inspirer de la méthode employée en métallographie classique.

Dans certains aciers, l'endommagement irréversible par fluage provoque la formation de vacuoles ou cavités intergranulaires (4). Les paramètres d'endommagement utilisés sont en relation avec la taille des vacuoles observées. Cet article entreprend la description et la mise au point d'une méthode d'analyse d'images destinée à évaluer le taux d'endommagement par fluage d'éprouvettes de laboratoire.

La première partie est principalement consacrée à la révélation des vacuoles dans la matrice métallique de l'acier étudié. La préparation de l'échantillon, en vue d'une quantification par analyse d'images, est une étape importante qu'il ne faut pas négliger (5). Un soin tout particulier a été apporté tant à la préparation métallographique qu'à l'acquisition d'images de qualité reproductible.

La seconde partie sera consacrée à l'extraction des informations pertinentes pour la mesure du taux d'endommagement. Le paramètre retenu nécessite la détection des vacuoles et des joints de grains. L'extraction des joints de

Manuscrit reçu le 5 février 2000, bon à publier le 30 août 2000.

© La Revue de Métallurgie 2001.

Evaluating creep in metals by grain boundary extraction using directional wavelets and mathematical morphology

S. Journaux*,**, P. Gouton*, M. Paindavoine*, G. Thauvin**

* Laboratoire d'Électronique Informatique Image,
Université de Bourgogne, Dijon

** Centre d'Essais et de Recherche sur les Matériaux,
ALSTOM Energy et SERMA Technologie, Belfort

In order to optimize maintenance and to extend the service life of installations safely beyond the time initially planned, it must be possible to accurately predict the residual service life of the main components of industrial plant and equipment (nuclear power station, boiler, steam turbine or gas media, etc.). Many methods have been proposed for measuring creep-induced damage in components and relating this to the material's remaining service life.

This paper sets about describing and refining an image analysis method for evaluating the extent of creep-induced damage in laboratory test pieces by cavities counting.

Part one concentrates on how to reveal voids in the matrix of the steel under study. Sample preparation for image analysis quantification is an important stage that must not be overlooked. Special care must be taken both with metallographic preparation and with the acquisition.

Slow creep in metallic materials is a continuous plastic deformation under stress applied at high temperatures (500-600°C) and after a relatively long period (thousands of hours). The study was carried out on special 20 CDV 5-08 steel (Cr-Mo-V steels) for turbine components. The chemical composition, heat treatment conditions and mechanical characteristics measured are set out.

The mechanism involved in creep-induced failure is cavity formation, growth, and coalescence, and then destruction of the material by cracking. The incipient damage characterized by the formation of voids occurs mainly between grains. It involves the appearance of very small cavities at grain boundaries or triple points.

Based on the experience of the CERM, the choice of metallographic preparation method fell on conventional methods for direct observation of the metallographic structure comprising a series of stages of mechanical polishing and chemical etching. Experience shows that Beuchet-Beaujard etching on 20 CDV 5-08 steel is the most suitable for revealing grain boundaries and voids.

Parameter A was chosen from all the existing metallographic quantification parameters. Although more troublesome to implement, it does have the advantage of being

surer and more robust as it requires the presence of voids at grain boundaries. Such parameters as void surface fraction or aggregate length are sensitive to experimental variations during surface preparation and especially to the extent of chemical etching.

Cane defines parameter A as the ratio of the number of damaged grain boundaries intercepted by a line parallel to the main stress direction to the total number of grain boundaries intercepted. By referring to the theoretical model of cavity growth under stress of Kachanov, parameter A was related experimentally to the material's service life.

Part two examines how grain boundaries are extracted in order to measure the extent of damage. Emphasis is placed on the damage parameter used for developing the image analysis software. Grain boundary extraction is the main obstacle to be overcome before measurement can be automated. The performance of the algorithm employed will be shown.

A light microscope paired with a black and white CCD camera was chosen as the observation method and so as the image acquisition technique. Damage evaluation by an image analysis technique is a two-stage process : grain boundary detection to ensure the flaws detected are voids and cavity detection.

The void extraction technique is based on the fact that the zones sought are homogeneous and bounded by an outline closed by mathematical morphology as a watershed mosaic and the threshold method by maximum entropy. The last step involves superposing information for voids and grain boundaries to validate the presence of the said voids. This is dependent on grain boundaries being successfully extracted.

Grain boundaries represent a sudden transition of one to a handful of pixels and is specific in that it contains directional information. Two points need to be developed in the context of image analysis processing.

The first step eliminates the noise due to metallographic etching within the grains without destroying the information yielded by the grain boundaries. This operation is carried out by a grey scale morphological filter by directional closure.

The second step extracts the relevant information from the grain boundaries. The profile produced for a grain boundary after reducing noise yields the shape illustrated by an even exponential function. This outline extraction technique involves the use of an optimum filter. The search for a linear operator subject to an optimization procedure based on the set of Canny's criteria has been developed. Its extension to two dimensions is based on filter separability.

Initial developments with recursive filters showed the need to increase the number of filtering directions. The preceding filter can be defined in a more general theoretical context of directional wavelets. The definitions and properties allows the construction of a directional wavelet from optimum filter. Straightforward rotation of the wavelet filter in directions $\theta = \pm 45^\circ$ fills the detection gaps.

Mathematical morphology, using the watershed technique provides a robust and rapid way of obtaining the outlines sought. The grain outline is obtained by two operations : watershed procedure and thresholding by maximum entropy.

The result yielded by the grain boundary extraction technique does not allow us to make direct conclusions about quantification of creep-induced damage using parameter A. The final image shows over-segmentation due to detection of the sub-structure. In order to illustrate the directional filtering technique, we extracted grain boundaries in a recrystallized molybdenum alloy.

We are currently investigating ways of reducing over-segmentation by adjacency graphs. Early results are promising. This seems to provide the solution needed for our application and is being refined to complete development of the software.

grains constitue la problématique majeure pour la mise en œuvre de la méthode à résoudre avant automatisation de la mesure. Nous montrerons les performances de l'algorithme mis en place.

■ LE FLUAGE ET SES CONSÉQUENCES MÉTALLURGIQUES

Le fluage dans les matériaux métalliques consiste en une déformation plastique continue dans le temps sous l'effet d'une contrainte appliquée à une certaine température. Il existe deux types de fluage : le fluage rapide et le fluage lent (6). Le fluage rapide survient à des températures basses sous forte contrainte. Lorsque la rupture intervient à des températures élevées (500 – 600°C) sous contrainte et au bout d'une durée relativement longue (milliers d'heures), on parle de fluage lent. C'est le cas le plus fréquemment rencontré pour les composants en aciers Cr-Mo-V ou Cr-Mo sollicités à faibles contraintes pendant de longues durées (supérieure à 100 000 h). Seul l'endommagement par fluage lent est ici considéré et conduit à la formation de vacuoles ou de cavités intergranulaires.

Endommagement par fluage

Le mécanisme mis en jeu pour la rupture par fluage (2, 4) est la germination, la croissance, la coalescence des cavités, phénomène connu sous le nom de cavitation, puis la ruine du matériau par fissuration.

L'amorçage de l'endommagement caractérisé par la germination des vacuoles est principalement intergranulaire. Cela correspond à l'apparition de cavités très petites (typiquement de moins de 1 μm dans les joints de grains ou aux points triples). On les trouve principalement dans les aciers à faible plasticité où elles sont toujours situées dans les joints de grains.

Quatre mécanismes de base sont invoqués pour la germination (7) (fig. 1) :

- le glissement intergranulaire sous l'effet de la contrainte de cisaillement entre deux grains voisins ;
- la condensation de lacunes par diffusion, favorisée par la contrainte normale aux joints de grains ;
- la décohésion de l'interface entre précipités intergranulaires et matrice ;
- le blocage des déformations intergranulaires hétérogènes (bandes de glissement par les joints de grains).

La croissance est le stade secondaire de l'endommagement. Après l'apparition des vacuoles intergranulaires, elle est la combinaison de deux processus :

- la condensation des lacunes par diffusion,
- la croissance par déformation plastique qui est proportionnelle à la déformation par fluage. La croissance est alors caractérisée par le diamètre des vacuoles. Les vacuoles ont une forme ovoïdale pouvant atteindre 5 μm .

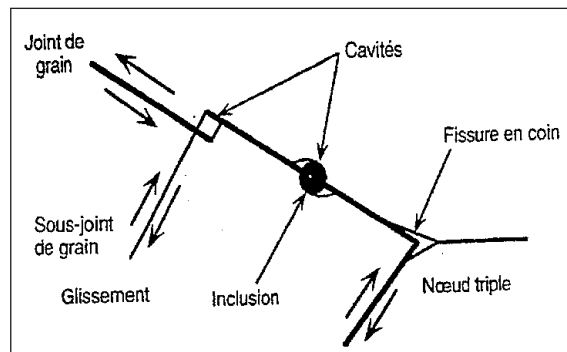
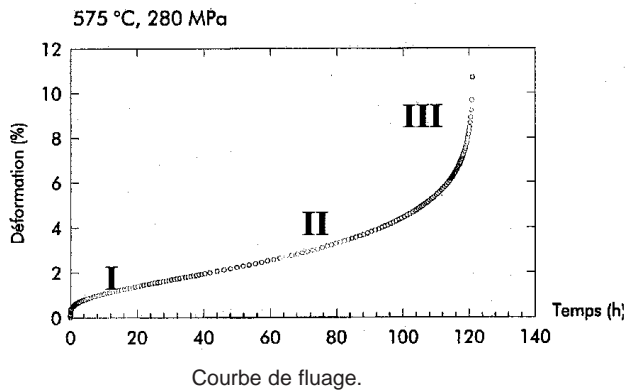


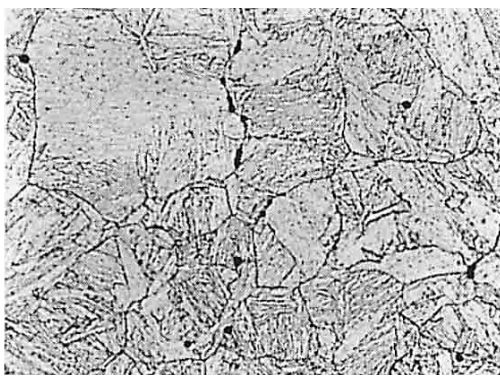
Figure 1 – Mécanisme de germination par fluage.

Figure 1 – Nucleation mechanism by creep.

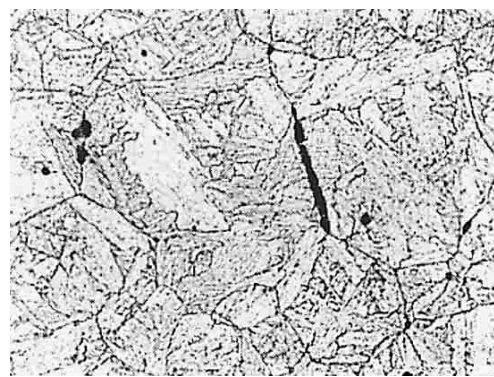


I : Vacuole isolée.

↔ direction des contraintes principales.



II : Coalescence.



III : Microfissures.

Figure 2 – Evolution de l'aspect métallographique des cavités de fluage.

Figure 2 – The changing metallographic appearance of creep cavities.

Puis, on observe la coalescence orientée des vacuoles. Ce phénomène est lié à l'apparition de microfissures qui se propagent de cavité en cavité en restant macroscopiquement normales à l'effort de traction. L'apparition de microfissures conduit rapidement à la rupture représentée par le stade tertiaire de l'endommagement. Le taux d'endommagement est caractérisé par l'augmentation du nombre de vacuoles et de la taille de ces vacuoles.

Nous pouvons maintenant donner la définition d'une vacuole pour l'identification par une technique d'analyse d'images. Pour des taux d'endommagement faibles (stade I et II, fig. 2), une vacuole (chapelet de vacuoles ou fissure) est une cavité plus ou moins grande, sombre, située à l'intersection de trois joints de grains (point triple) ou isolée sur un joint de grains. Pour des taux d'endommagement supérieurs (stade III, fig. 2), la présence de fissures dans le matériau ne nécessite pas forcément d'attaque métallographique. Une surface correctement polie laisse nettement apparaître les fissures. Par ailleurs, cela signifie la fin de vie du matériau et n'a pas d'intérêt pour l'estimation de la durée de vie résiduelle.

TABLEAU II – Conditions de traitement thermique et caractéristiques mécaniques de l'acier étudié.

TABLE II – Conditions of thermal treatment and mechanical characteristics of the steel studied.

Traitement thermique	Caractéristiques mécaniques		
		20°C	550°C
État initial (barre 40 × 100 mm) :	R _m (MPa)	830 – 860	550
- Austénitisation	R _{p0.2} (MPa)	725 – 760	480
- Trempe à l'eau	R _{p0.02} (MPa)	705 – 715	375
- Revenu 4 h à 700°C	R _e (MPa)	670 – 690	-
- Revenu 6 h à 680°C	A – 5d (%)	23 – 21	21
	E (x 10 ⁻³)	193 – 202	170

TABLEAU I – Composition chimique (%) / TABLE I – Chemical composition (%).

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu	Co	As	Sn	Sb	Al	Ti
0.20	0,005	0,005	0,31	0,47	1,4	0,15	0,82	0,28	0,07	0,03	0,24	0,005	0,003	<1 ppm	<0,005	<0,005

Conditions expérimentales

L'étude a été menée sur un acier 20 CDV 5-08 spécifique aux composants des turbines provenant de la coulée HX7121/01-02 d'Aubert et Duval sous forme de barre. La composition chimique, les conditions de traitement thermique ainsi que les caractéristiques mécaniques mesurées à réception sont rappelées dans les *tableaux I et II*.

Les éprouvettes ont été endommagées par fluage de 550 à 600°C sous 150 à 300 MPa sollicité en traction et pour des durées inférieures à 30 000 h, sous atmosphère ambiante, avec les machines WICK du Centre de Recherche.

■ MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FLUAGE : ÉTAT DE L'ART

On distingue les méthodes de mesure directe ou morphologique et les méthodes de mesure indirecte de l'endommagement à partir d'une propriété physique.

Les mesures directes sont des méthodes d'observations micrographiques (4) du matériau à la surface ou à cœur par microscopie. Elles permettent la mise en évidence du type de défaut, la localisation, mais ne donnent pas de renseignements tridimensionnels. Parmi elles, l'analyse d'images métallographiques obtenues par microscopie optique ou électronique conduit à l'évaluation directe de l'endommagement.

Les mesures indirectes sont qualifiées ainsi car elles étudient l'évolution, au cours de la déformation, d'une propriété du métal dont la variation est essentiellement gouvernée par l'endommagement. On répertorie parmi ces méthodes (7, 8) :

- les mesures de densité : variation du volume par jauge de déformation ;
- les mesures de variation du module d'Young et du coefficient de Poisson ;
- l'émission acoustique et les méthodes ultrasonores ;
- la diffusion aux petits angles des rayons X (SAXS) ou des neutrons (SANS) ...

Les mesures indirectes conduisent à des résultats plus reproductibles, mais les grandeurs mesurées ne sont pas exclusivement caractéristiques de l'endommagement. La reproductibilité concerne un problème d'échantillonnage géostatistique (18). La grandeur morphologique est une variable régionalisée dont l'estimation dépend de l'implantation et du nombre de champ de mesure en relation avec la texture du matériau. L'évaluation des grandeurs physiques se fait sur un grand volume. L'aspect échantillonnage ne se pose pratiquement plus.

Choix de la préparation métallographique

Le choix de la préparation métallographique a reposé sur l'expérience du CERM et du paramètre de quantification de l'endommagement. Le choix s'est porté sur des méthodes classiques pour une observation directe de la structure métallographique (9, 10), méthodes constituées d'étapes de polissage mécanique et d'attaques chimiques successifs. Le polissage mécanique entraîne un écoulement de matière qui recouvre partiellement ou totalement les cavités. Une légère attaque est suffisante pour les déboucher, ce qui entraîne l'apparition de la structure métallographique.

Les éprouvettes (*fig. 3*) sur toute leur partie utile sont enrobées, ramenées à mi-diamètre par abrasion, puis polies suivant la gamme acier du Centre de Recherche.

L'expérience montre que l'attaque de Beuchet-Beaujard (11) sur l'acier 20CDV 5.08 est la plus adaptée, dans l'état actuel de notre technique, pour la révélation des joints de grains et celle des vacuoles (*fig. 4*).

Cette attaque est réalisée à partir d'une solution aqueuse saturée d'acide picrique, additionnée de 0,5 % d'un alkyl-sulfonate de sodium (teepol), destinée à améliorer la mouillabilité de la solution sur le métal. Ce réactif fait ressortir les anciens joints de grains austénitiques en attaquant les ségrégations de phosphore. L'attaque est réalisée lorsque le réactif est en ébullition. Deux attaques consécutives à deux polissages sont suffisantes pour mettre à jour la présence des vacuoles et des joints de grains. Le temps d'attaque est de l'ordre de 20 s. Le premier polissage est mécanique suivant la gamme acier, le second manuel sur drap avec diamant 1 µm.



Figure 3 – Schéma de l'éprouvette de fluage.

Figure 3 – Diagram of the test tube of creep.



Figure 4 – Attaque de Beuchet-Beaujard (× 400).

Figure 4 – Beuchet-Beaujard etching.

Analyse quantitative de l'endommagement par fluage d'un acier 20CDV 5.08 : le choix du paramètre A

Sur l'ensemble des paramètres de quantification métallographique existants, le paramètre 'A' a été retenu.

Cane définit le paramètre A (6, 13-15) comme le rapport du nombre de joints de grains endommagés interceptés par une ligne parallèle à la direction principale des contraintes (axe des éprouvettes) sur le nombre total de joints de grains interceptés. Cette méthode nécessite l'établissement de règles de jugement de l'endommagement des joints. Selon Cane, un minimum de 400 joints de grains doivent être étudiés à un grossissement adéquat (15).

En se référant à la stéréologie (18), le nombre de joints par unité de longueur est proportionnel à la surface de joints par unité de volume. Le paramètre A n'est autre que le rapport de la surface des joints endommagés sur la surface totale des joints.

A partir du modèle théorique de croissance sous contrainte des cavités de Kachanov (2, 16), le paramètre 'A' a pu être relié expérimentalement à la durée de vie du matériau sous la formulation suivante :

$$A = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_r}\right)^{\frac{\lambda-1}{n\lambda}} \quad [1]$$

avec t_r temps à la rupture, $\lambda = \epsilon_r/\epsilon_s$ (déformation à la rupture/déformation secondaire) et n coefficient de correction.

Sa mise en œuvre est fastidieuse, mais elle présente l'avantage d'être plus sûre et plus robuste, puisqu'elle exige la présence des vacuoles sur les joints de grains. En effet, les paramètres comme la fraction surfacique de vacuoles ou les longueurs cumulées (12) se révèlent être sensibles aux variations expérimentales lors de la préparation de la surface, en particulier au degré de l'attaque chimique. Plus le temps de l'attaque est grand, plus les vacuoles apparaissent longues et larges.

Acquisition des images et choix du grandissement

Le choix de la méthode d'observation – par conséquent de la technique d'acquisition d'image à utiliser – s'est porté sur la microscopie optique couplée à une caméra CCD (N&B).

L'observation par microscopie électronique à balayage n'apporte pas d'amélioration sensible, malgré deux modes d'acquisition d'images par émission d'électrons secondaires (fig. 5) ou rétrodiffusés (fig. 6). Bien que la technique par électrons secondaires semble faire apparaître des vacuoles de grandes tailles (irisation des bords) au détriment de la présence des joints de grains, elle ne permet pas l'observation des petites cavités sans fort grandissement.

Le choix du grandissement utilisable pour la quantification des vacuoles est résumé dans le *tableau III*.

TABLEAU III – Choix du grandissement utilisable pour la quantification des vacuoles.

TABLE III – Selection of the magnification required for the quantitative assessment of cavities.

Grandissement	Possibilités
100	vision globale de la structure, présence ou non d'endommagement important type microfissure.
200	comptage des vacuoles, forme et orientation perceptibles
400	tout endommagement supérieur à 1 µm est visible ; observation des joints de grains et des points triples ; distinction joints de grains/structure interne
1000	observation d'une vacuole particulière

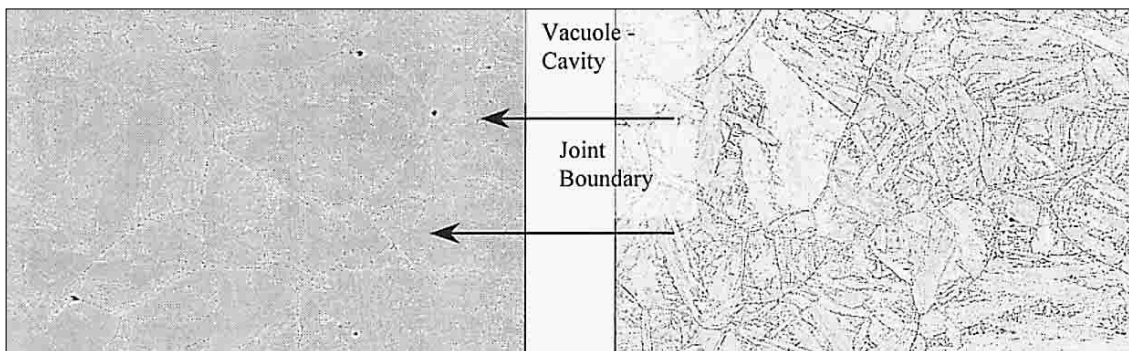


Figure 5 – Image MEB d'électrons secondaires (× 400).
Figure 5 – SEM secondary electron image.

Figure 6 – Image MEB d'électrons rétrodiffusés (× 400).
Figure 6 – SEM retrodiffused electron image.

Il apparaît qu'un grossissement de 400 fois est optimal pour l'étude quantitative des vacuoles sur cette nuance d'acier et ces traitements thermiques (taille de grains). La visualisation des informations pertinentes par l'œil du métallographe à 400 fois sera suffisante en termes de définition digitale des joints et vacuoles pour le traitement par analyse d'images.

Les images fournies par le microscope optique ont une dimension de 512 par 512 pixels avec une résolution de 0,2 µm/pixel. La taille des vacuoles observées (stade I et II, fig. 2) varie de 2 à 5 µm de diamètre.

■ MODE OPÉRATEUR POUR L'ANALYSE D'IMAGES

L'évaluation de l'endommagement par une technique d'analyse d'images va comprendre deux parties de développement :

- la détection des joints de grains afin de garantir le label vacuole aux défauts détectés,
- la détection des vacuoles ou cavités.

Le développement du logiciel d'évaluation de l'endommagement par fluage est conditionné par les futurs résultats sur l'extraction des joints de grains.

Méthode d'extraction des vacuoles

Les vacuoles sont des petites cavités de couleur sombre qui présentent une frontière fermée. La technique d'extraction des vacuoles est relativement simple et s'inspire du fait que les zones recherchées sont homogènes et délimitées par un contour fermé.

L'extraction des vacuoles s'effectue en quatre étapes :

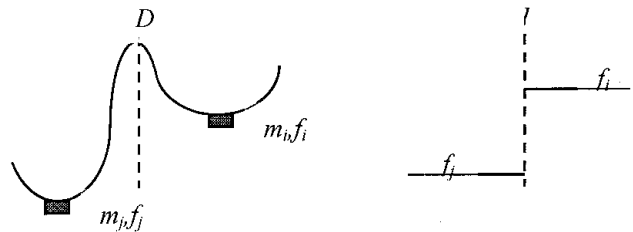


Figure 7 – Principe de la LPE mosaïque.

Figure 7 – The watershed mosaic principle.

1) La première opération va être réalisée par une ligne de partage des eaux (LPE) mosaïque (17, 18). Pour cette opération, on réalise une LPE à partir de l'image gradient (morphologique dont la taille de l'élément structurant de forme carrée est égale à 1). L'image résultante est sur-segmentée. Cette sur-segmentation est due à la présence du bruit qui constituent les minima de la fonction gradient de l'image. A chaque minimum m_i est associée une région délimitée par une digue D qui est constituée par la LPE. Chaque région est alors « inondée » à la valeur en niveau de gris correspondant à la moyenne f_i de son minimum m_i (fig. 7 et 8).

2) La seconde étape consiste à seuiller automatiquement l'image mosaïque par la méthode du seuillage par maximum d'entropie (19) (fig. 9).

3) La troisième étape consiste à effectuer une ouverture binaire par un élément structurant « circulaire » de taille 2 (0,4 µm/pixel). Le but de cette opération est d'éliminer les digues de LPE tout en conservant les informations surfaciques de taille supérieure à 1 µm² (fig. 10).

4) La quatrième étape est la superposition de l'information entre vacuoles et joints de grains pour la validation de la présence desdites vacuoles. Elle est conditionnée par la réussite de l'extraction des joints de grains.

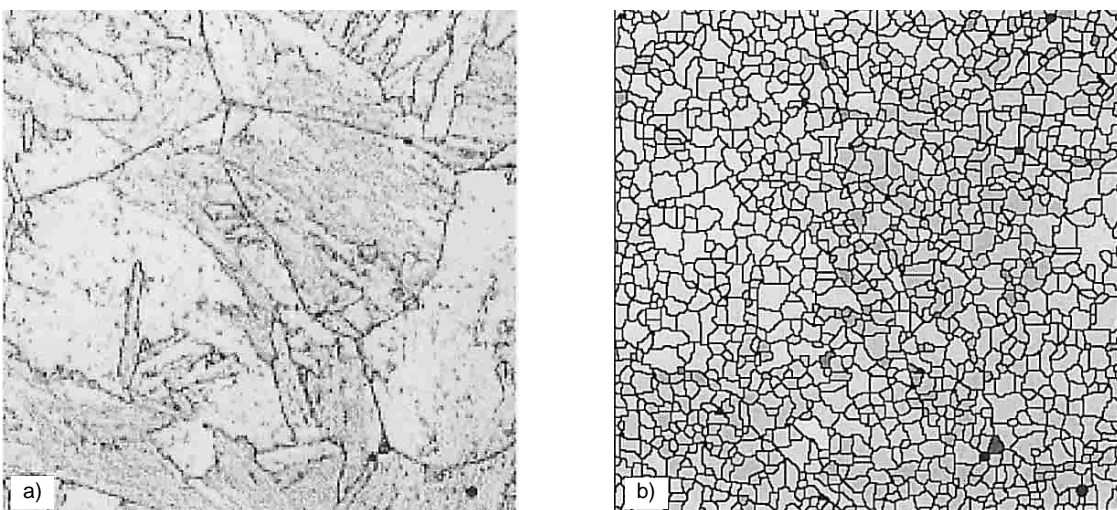


Figure 8 – Image initiale (gauche) et résultat de la LPE mosaïque (droite).

Figure 8 – Left : unfiltered image ; right : watershed mosaic results.

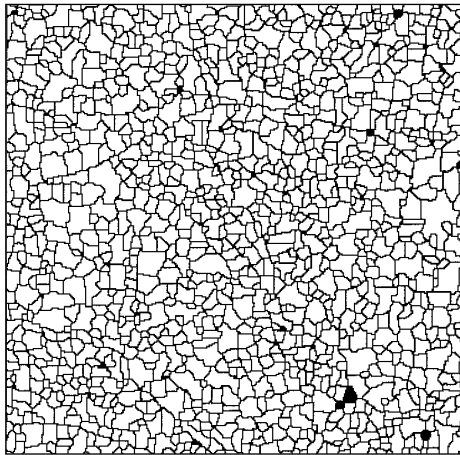


Figure 9 – Extraction des digues de LPE.
Figure 9 – Watershed dike extraction.

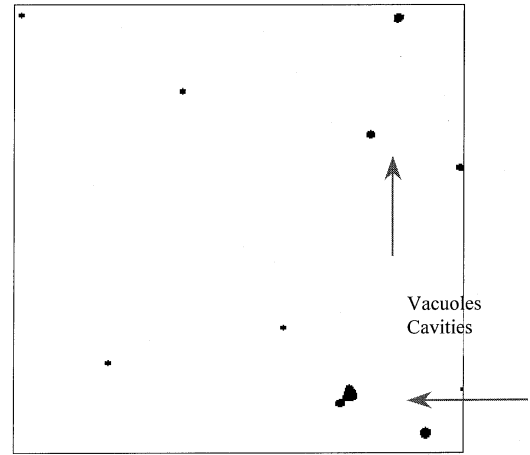


Figure 10 – Résultat après ouverture.
Figure 10 – Results after opening.

Comparée aux méthodes comme celle dite de chapeau haut de forme (18) ou celle à base de seuillage et reconstruction de voisinage, la technique développée est rapide en termes d'exécution et s'affranchit surtout de la détection des joints de grains. Le paragraphe suivant expose les premiers essais pour l'extraction des joints de grains.

Méthodes pour l'extraction des joints de grains : premier essai

Les joints de grains, sur nos images digitalisées, représentent généralement une transition brutale de un à quelques pixels. Les grains présentent :

- une sous-structure due à la nature même du matériau, dont l'épaisseur informative doit être du même ordre de grandeur que les joints de grains (structure martensitique) ;
- une information perturbatrice (ou bruit) due à l'attaque métallographique.

Deux points sont à développer dans le cadre d'un traitement par analyse d'images :

- éliminer le bruit présent à l'intérieur des grains sans détruire l'information délivrée par les joints de grains ;
- extraire des informations pertinentes que représentent les joints de grains. Les matériaux à grains ont la particularité de présenter des informations directionnelles (20).

Réduction du bruit

Le but de ce pré-traitement est de conserver l'information directionnelle donnée par les joints tout en réduisant considérablement la présence du bruit dû à l'attaque métallographique. Cette opération est effectuée par un filtre morphologique (18) en niveaux de gris par fermeture directionnelle. Ce filtre est construit par application de combinaisons de fermetures linéaires dans huit directions et l'union numérique.

Les directions sont définies par l'orientation d'éléments structurants linéaires, de taille égale à 6 et d'angle 0°, 27°, 63°, 45°, 90°, 117°, 133°, 153°. Le résultat du filtrage est illustré par la figure 11.

$$F_{i,d_n} = \bigvee_{d_n} (F_{d_n}^i, \dots, F_{d_1}^i) \quad [2]$$

où $F_{d_n}^i$ est la fermeture par un élément structurant linéaire de taille i et de direction d_n et \bigvee_{d_n} l'union numérique (sup) dans toutes les directions. Les informations pertinentes fournies par les joints de grains sont conservées alors que le fond de l'image lissée ne présente plus le bruit dû à la préparation métallographique.

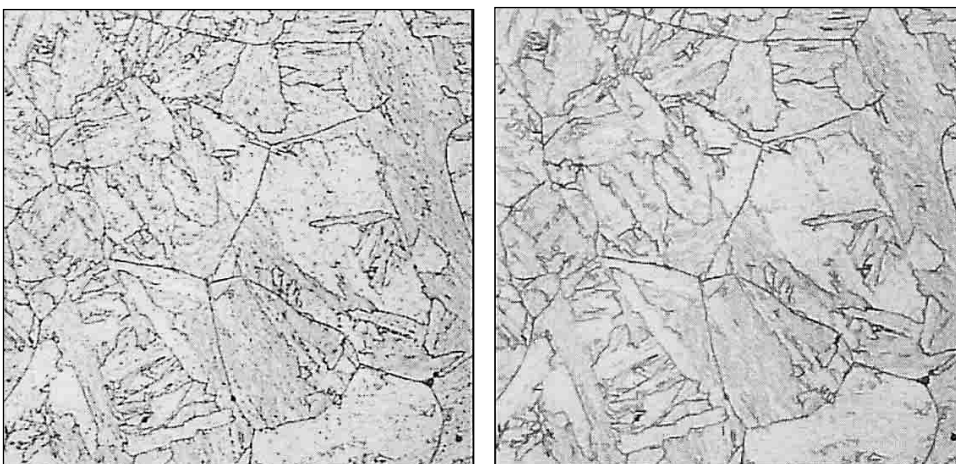


Fig. 11 – Réduction du bruit par fermeture linéaire (gauche : image initiale ; droite : image filtrée).
Figure 11 – Noise reduction by linear closure (left : unfiltered image ; right : filtered image).

Extraction des lignes de crêtes par filtre optimal

La détection de contours a été abordée de très nombreuses fois, mais chaque filtre développé est adapté à un type de contour. La majorité des détecteurs existants sont destinés aux contours de type marche (21, 22). Ce type de contour est le plus répandu dans une image, mais il s'avère inefficace pour notre problématique.

Dans nos images, nous rencontrons un unique modèle de contour (fig. 12) en forme de pic ou toit (23). On appelle ligne de crête les variations du niveau de gris dans l'image correspondant à un toit ou une crête d'une largeur de quelques pixels.

Cette technique d'extraction des contours en forme de ligne de crête, développée au laboratoire LE2I, fait appel à une approche par filtre optimal. Le principe de cette approche est de se donner un modèle de contour (fig. 12) à détecter et d'ajuster convenablement les paramètres du modèle. Afin de faciliter la recherche de contour, on admettra que le bruit est un bruit blanc gaussien. Parmi plusieurs approches par filtre optimal (24, 22), la recherche d'un opérateur linéaire soumis à une procédure d'optimisation basée sur l'ensemble des critères de Canny a été développée. Son extension en deux dimensions est basée sur la séparabilité du filtre.

Une coupe transversale de l'image d'étude montre bien que les contours recherchés sont des lignes de crêtes (fig. 12). Pour plus de détail sur l'élaboration de ces filtres, voir les travaux (12), (25), (26). Cette démarche a conduit à l'obtention de la fonction filtre $f(x)$:

$$f(x) = e^{-\alpha|x|} (-A \sin(\omega|x|) + \cos(\omega|x|)) - B e^{-s|x|} \quad [3]$$

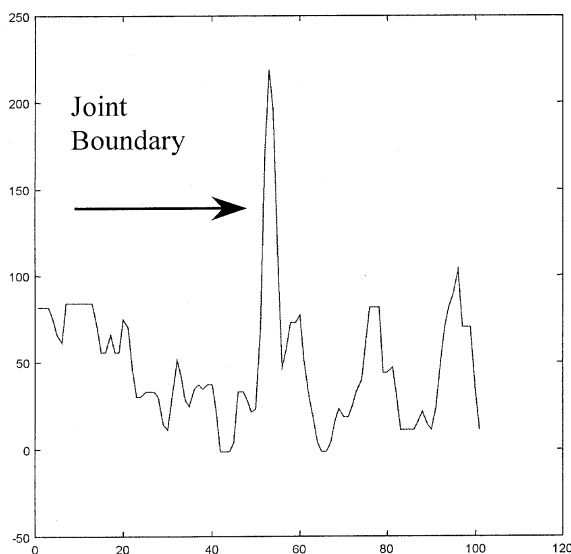


Figure 12 – Profil réel et modèle du contour défini par [3] ; $s = 0,5$.
Figure 12 – Real profile and outline model defined by [3].

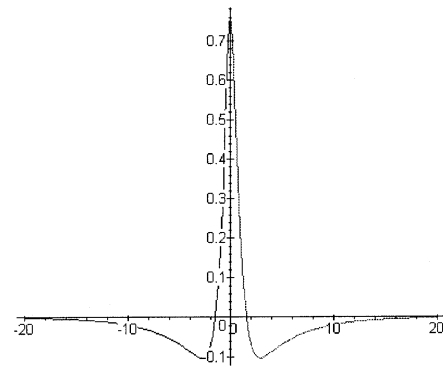


Figure 13 – Forme du filtre dérivateur.
Figure 13 – Derivating filter shape, $\alpha = 2$, $\omega = 0.5$, $s = 0.5$.

La fonction filtre $f(x)$ appelée « dérivateur » dépend de trois paramètres : $\alpha > 0$, $0 \leq \omega \leq 1$, $s > 0$. Les valeurs de A et B sont obtenues à partir des conditions aux limites.

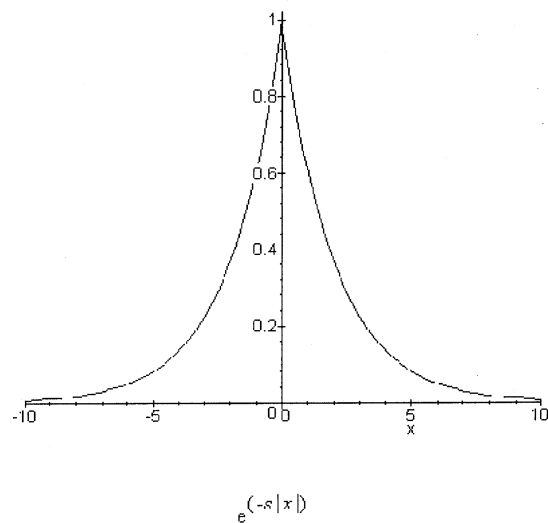
Elles sont fonction de α , ω , s , et leurs expressions sont données par :

$$A = \frac{-\alpha(\alpha^2 + \omega^2 - s^2)}{\omega(\alpha^2 + \omega^2 + s^2)} \quad [4]$$

$$B = \left(\frac{A\omega + \alpha}{s} \right) \quad [5]$$

Extension bi-dimensionnelle du filtre

Le filtre $f(x)$ à une dimension permet la détection des variations du signal de type ligne de crête, plus exactement il va les amplifier.



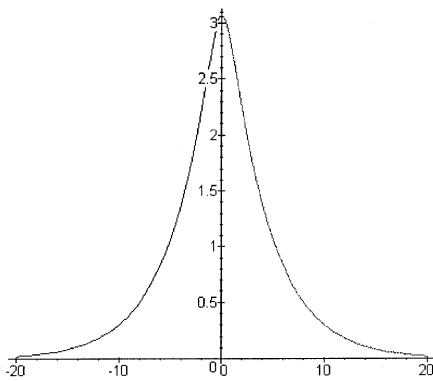


Figure 14 – Représentation du lisseur.
Figure 14 – Smoothing filter appearance.

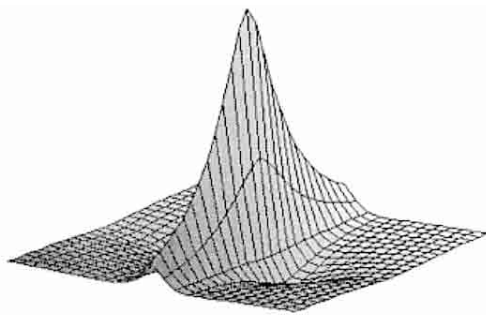


Figure 15 – Représentation 3D spatiale du filtre D.
Figure 15 – 3D spatial representation of filter D.

Pour une image 2D, il est nécessaire d'étendre le filtre $f(x)$ à deux dimensions. En se basant sur l'hypothèse de la séparabilité du filtre, son extension peut être effectuée par l'utilisation de deux filtres séparables et directionnels. A chaque direction orthogonale correspond un opérateur qui est le produit de la fonction de détection f avec une fonction de projection g . Cette fonction de projection $g(x)$ est déterminée en réalisant un filtre de régularisation à partir de l'opération de filtrage (25, 26).

Le filtre $g(x)$ lisseur (fig. 14) est donné par l'intégrale double de la fonction $f(x)$ définie par [3] dont l'expression est donnée :

$$g(x) = e^{-\alpha|x|} (\kappa \sin(\omega|x|) + \beta \cos(\omega|x|)) - \delta e^{-s|x|} \quad [6]$$

avec :

$$\kappa = \frac{2\omega\alpha + (\alpha^2 - \omega^2)A}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} \quad [7]$$

$$\beta = \frac{2\omega\alpha A - \alpha^2 + \omega^2}{(\alpha^2 + \omega^2)^2} \quad [8]$$

$$\delta = \frac{B}{s^2} \quad [9]$$

Le filtre 2D (fig. 15) séparable défini par l'équation suivante, favorise la détection de l'information dans une direction

$$D(i, j) = f(i) \cdot g(j) \quad [10]$$

L'approche la plus simple pour mettre en évidence les joints de grains est de convoluer l'image originale $X(i, j)$ par deux filtres, l'un $D_x(i, j)$ horizontal et l'autre $D_y(j, i)$ vertical, et de calculer le contour de l'image à partir du maximum de chaque direction :

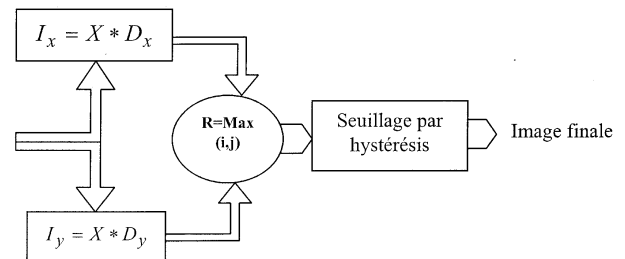
$$I_x = X * D_x \text{ et } I_y = X * D_y \quad [11]$$

L'image résultante est donnée par :

$$R(i, j) = \max(I_x(i, j), I_y(i, j)) \quad [12]$$

L'extraction des maxima locaux par la méthode du gradient (seuillage par hystérésis) de l'image R définie par [12] donne le résultat illustré par la figure 16 (seuil bas = 80, seuil haut = 110).

Nous résumons dans le schéma suivant la chaîne d'extraction des lignes de crêtes par filtre optimal dans les directions horizontale et verticale suivie du seuillage :



Les premières tentatives d'extraction des joints de grains sont effectuées dans deux directions (horizontale et verticale) par implémentation récursive (26).

Le filtre étant directionnel, on constate que les contours ne sont pas détectés dans des directions obliques (fig. 16). Les flèches portées sur cette figure indiquent les lacunes de détection.

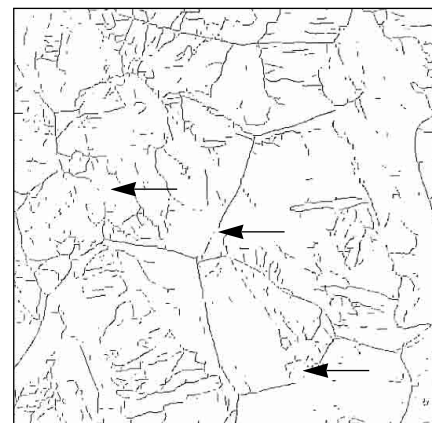


Figure 16 – Résultat en sortie de filtre.
Figure 16 – Output result of the filter.

La nécessité d'augmenter le nombre de directions de détections a déjà été préconisée (20) ; elle nous a conduits, intuitivement, à vouloir faire subir une rotation au filtre D . Deux voies simples s'offrent à cet exercice par simple rotation du support d'analyse et non de l'image : le filtrage par masque fini de convolution ou le filtrage fréquentiel.

Le filtre précédent peut être défini dans un cadre théorique plus général des ondelettes directionnelles.

■ **ONDELETTE DIRECTIONNELLE POUR L'EXTRACTION DES JOINTS DE GRAINS**

L'origine et la prise en compte du caractère directionnel pour les ondelettes a été introduit pour la première fois par l'étude de l'ondelette de Morlet multidimensionnelle (27). Les définitions et propriétés de cette ondelette pourront être consultées dans (12), (28).

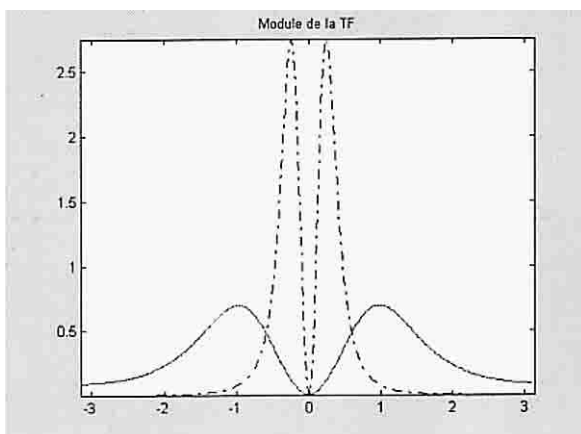
Pour mener à bien la suite de l'exposé, nous avons besoin d'étudier le comportement spectral des filtres f et g dans le domaine des signaux numériques.

Transformation de Fourier discrète

La transformation de Fourier du signal numérique $f(n)$ est la transformée en Z évaluée sur le cercle unité $F(e^{j\xi})$ que l'on note abusivement $F(\xi)$. À partir de la définition [13], on déduit la transformation de Fourier discrète :

$$\hat{F}_d(\xi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n)e^{-jn\xi} \quad [13]$$

$$\hat{F}_d(\xi) = \frac{C_3 \cos(3\xi) + C_2 \cos(2\xi) + C_1 \cos(\xi) + C_0}{2(B_3 \cos(3\xi) + B_2 \cos(2\xi) + B_1 \cos(\xi)) + B_0} \quad [14]$$



$\alpha = 2, \omega = 0,5, s = 1$ (—), $s = 0,5$ (- - -)

Figure 17 – Module de la TF de la fonction f .
Figure 17 – FT modulus of the derivation function f .

Les coefficients sont donnés dans les travaux (12).

Cette définition implique une périodicité de la transformée de Fourier de 2π . On trouve la particularité que $\hat{F}_d(0) = 0$ quels que soient les trois paramètres α, ω, s . f est un filtre passe-bande dont la transformée de Fourier discrète est une fonction réelle paire à décroissance rapide et n'introduit aucun déphasage lié à la nature même du filtre.

De même pour le lisseur, la transformation de Fourier du signal $g(n)$ devient :

$$\hat{G}_d(\xi) = \frac{A_3 \cos(3\xi) + A_2 \cos(2\xi) + A_1 \cos(\xi) + A_0}{2(B_3 \cos(3\xi) + B_2 \cos(2\xi) + B_1 \cos(\xi)) + B_0} \quad [15]$$

Les représentations en fonction du module $|\hat{F}_d(\xi)|$ et $|\hat{G}_d(\xi)|$ sont illustrées par les figures 17 et 18.

Définition de l'ondelette mère directionnelle

Le filtre f peut être utilisé pour générer une famille Ψ d'ondelette analysante. En effet, la transformée de Fourier \hat{F} du filtre f répond au critère d'admissibilité (29) qui s'écrit souvent :

$$\hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0 \quad [16]$$

A partir d'une ondelette analysante ou ondelette mère, on définit une famille d'ondelettes par des opérations de dilatation (s ou facteur d'échelle), translation (b) et rotation (r) :

$$\Psi_{s,b,r}(x) = \frac{1}{s^{n/2}} \Psi\left(\frac{1}{s}r^{-1}(x-b)\right) \quad s \in \mathbb{R}^{+*}, b \in \mathbb{R}, r \in SO(n) \quad [17]$$

En posant $\alpha = ms$ et $\omega = ks$, on obtient une ondelette analysante multi-échelle où s joue le rôle du facteur d'échelle.

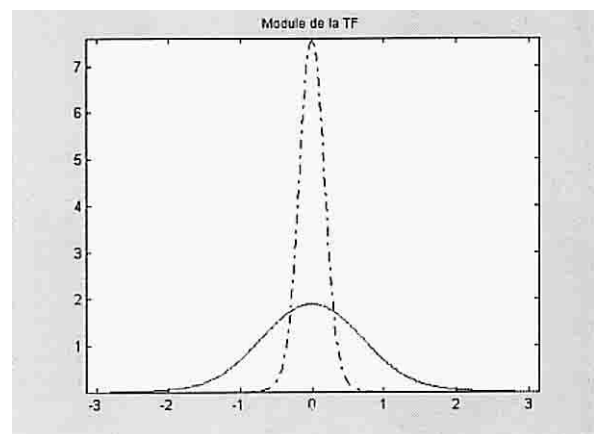


Figure 18 – Module de la TF de la fonction g .
Figure 18 – FT modulus of regulation function g .

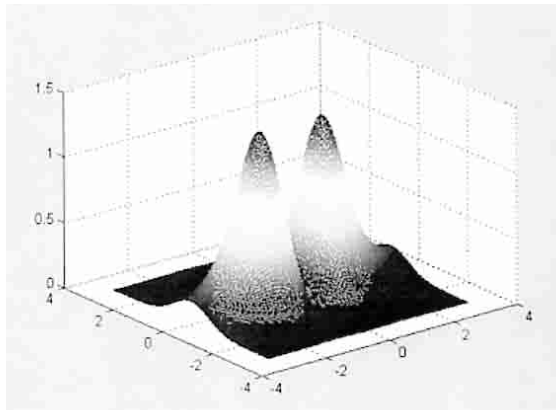


Figure 19 – Représentation 3 D du module de Ψ normalisé.
 Figure 19 – 3D representation of the normalized Ψ modulus.

Paramètres : $\theta = 0,9$, $\omega = 0,5$, $s = 0,5$. \updownarrow

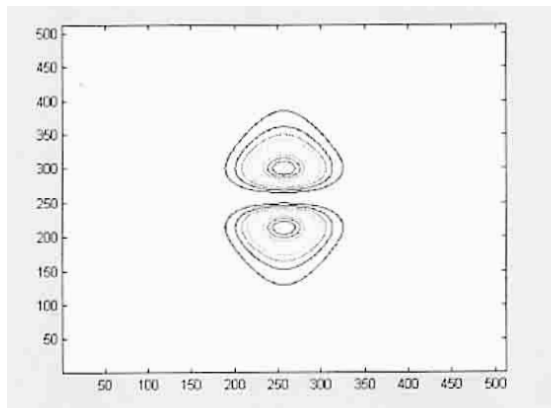


Figure 20 – Module 2D de Ψ dans la direction horizontale par courbe de niveau.

Figure 20 – 2D representation of Ψ in the horizontal direction by height contour.

Construction de l'ondelette directionnelle séparable

La propriété suivante permet la construction d'une ondelette directionnelle à partir du filtre f . Si f est une ondelette analysante unidimensionnelle dont la TF est à décroissance rapide et g une fonction dont la TF admet un support à ε près (synonyme d'une décroissance rapide) et de centre O , alors $\Psi(x,y) = g(y)f(x)$ est une ondelette directionnelle de direction horizontale.

La propriété ci-dessus donne un moyen simple de construction d'une ondelette directionnelle séparable et est vérifiée pour notre filtre précédent (12) (fig. 19). A partir de la définition de cette ondelette, on définit une famille d'ondelettes par des opérations de dilatation (s ou facteur d'échelle), translation (b) et rotation (r) (28) :

$$\Psi_{s,b,r}(x,y) = \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{1}{s} r_{\theta}(x-b_x, x-b_y)\right) \quad [18]$$

où r_{θ} est la rotation d'angle θ et s'écrit $r_{\theta}(x,y) = (x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta)$, b le vecteur de translation et Ψ une ondelette directionnelle de direction $\theta \bmod [2\pi]$.

La qualité directionnelle de la fonction Ψ va dépendre de la largeur du filtre de régulation g (fig. 20). L'augmentation de la qualité directionnelle, qui entraîne une diminution du support de g , sera au détriment de la localisation spatiale (principe d'incertitude d'Heisenberg).

■ APPLICATION À L'EXTRACTION DES JOINTS DE GRAINS

Les premiers développements par filtres récursifs ont montré la nécessité d'augmenter le nombre de directions de filtrage. La superposition du filtre (fig. 21) dans les directions horizontales et verticales montre les lacunes de détection dans la direction à 45° et confirme la nécessité d'augmenter le nombre de directions. Une simple rotation du filtre d'ondelettes dans les directions $\theta = 45^\circ$ comble ces lacunes de détection.

Pour notre application, nous nous limitons à quatre directions. Nous disposons alors de quatre masques numériques fréquentiels déduits des équations [14] et [15]. Le choix de l'échelle s est déterminé par les coefficients précédents afin d'avoir la meilleure représentation angle - échelle pour notre image.

Le calcul va nécessiter : le calcul de la FFT (Fast Fourier Transform) de l'image, le produit simple du résultat précédent et les quatre masques numériques fréquentiels, et pour finir de quatre FFT inverses qui procurent quatre images directionnelles I_{Dn} .

L'image résultante est donnée comme précédemment par la valeur maximale en chaque point dans les quatre directions (fig. 22) :

$$R(i,j) = \max(I_{D1}, I_{D2}, I_{D3}, I_{D4})_{i,j} \quad [19]$$

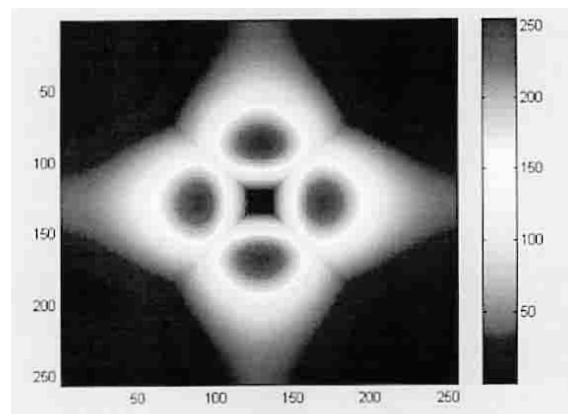


Figure 21 – Superposition des filtres directionnels (horizontal et vertical).

Figure 21 – Directional filter superposition.



Figure 22 – Image R après filtrage directionnel.
 Figure 22 – Image R after directional filtering.

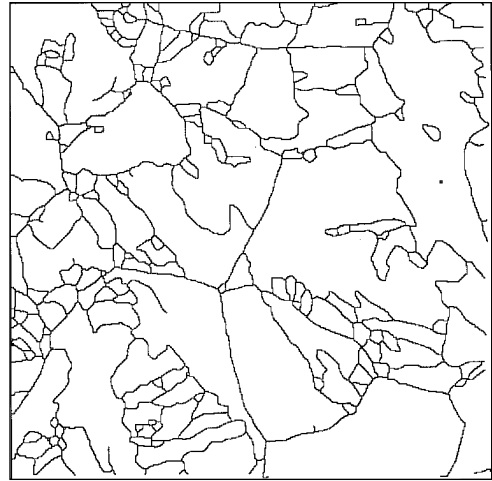
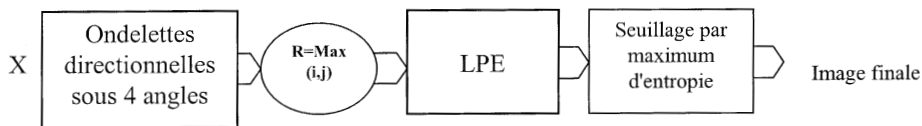


Figure 23 – Image finale après LPE et seuillage.
 Figure 23 – Final image after watershed and threshold procedures.



Le choix de la technique d'extraction des maxima locaux par seuillage par hystérésis produit des contours disjoints qui nécessitent une procédure de fermeture de contour. La morphologie mathématique, par la technique de la Ligne de Partage des eaux (LPE), nous fournit un moyen robuste et rapide pour l'obtention des contours recherchés.

Le contour des grains est obtenu par deux opérations : la LPE et le seuillage par maximum d'entropie. En effet, dans le but d'extraire des contours fermés amincis (29), la LPE est l'outil adapté.

L'image intermédiaire réalisée par la LPE présente des digues qui sont apparues à une certaine hauteur au cours de l'immersion. Le seuillage par maximum d'entropie fournit la valeur de seuil h pour laquelle on conserve les digues dont la hauteur est supérieure à h .

Nous résumons, dans le schéma ci-dessus, la chaîne d'extraction des joints de grains par ondelettes directionnelles dans les quatre directions suivies de la fermeture de contour par LPE et du seuillage (fig. 23).

Résultat sur l'acier 20 CDV 5-08

L'image finale (fig. 24) fait apparaître une sur-segmentation. La présence de la sous-structure est détectée. Certains joints apparaissent en plus. Ils sont liés à la technique de la LPE.

Le résultat fourni par la technique d'extraction des joints de grains ne permet pas de conclure directement sur la quantification par le paramètre A de l'endommagement par fluage.

En effet, l'image finale fait apparaître une sur-segmentation qui est due à la présence de la sous-structure détectée. Il nous reste à aborder les améliorations possibles pour la réduction de la sous-structure dans nos images.

Certains « joints » apparaissent en plus. Ils sont révélés par la technique d'extraction des digues de la LPE par le seuillage global (maximum d'entropie). Le calcul du paramètre A est possible à travers une tâche automatique si l'image finale ne conserve que les joints primaires des grains et les vacuoles (fig. 24).

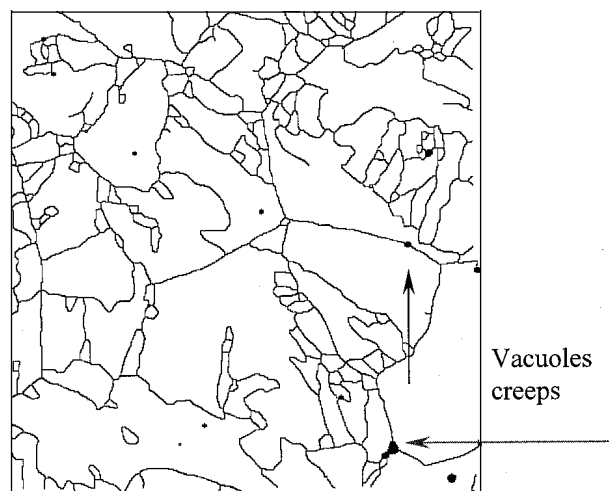


Figure 24 – Superposition joints de grains / vacuoles.
 Figure 24 – Superposition boundaries of creep grains.

Résultat sur l'alliage de molybdène

Dans le but d'illustrer cette technique par filtrage directionnel, nous avons réalisé l'extraction des joints de grains dans un alliage de molybdène recristallisé (fig. 25).

Cet alliage présente les joints de grains de un à quelques pixels pour un grandissement de 200 fois. Certaines zones (indiquées par une flèche) indiquent des joints d'épaisseur variable.

L'application du filtre directionnel dans les quatre directions principales de la trame de digitalisation fournit l'image (fig. 26).

L'application de la LPE suivie du seuillage automatique par maximum d'entropie fournit l'image finale de la figure 27.

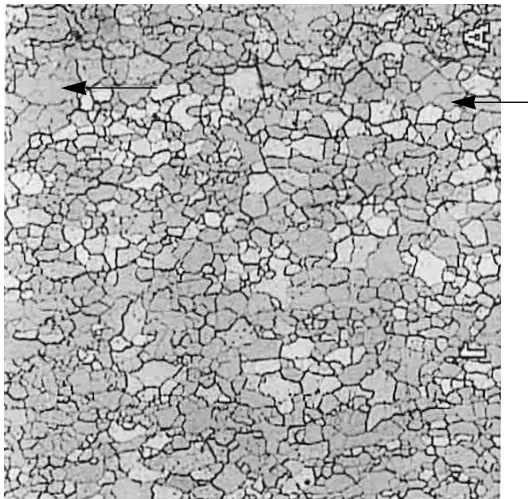


Figure 25 – Structure de l'image initiale.

Figure 25 – Initial image structures.



Figure 26 – Image en sortie du filtrage directionnel.

Figure 26 – Image output after directional filtering.

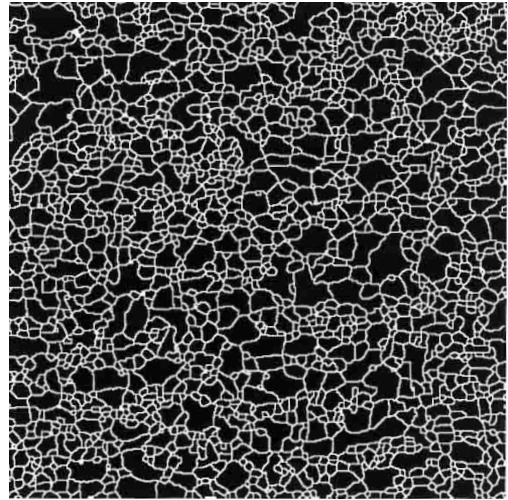


Figure 27 – Image finale après LPE et seuillage.

Figure 27 – Final image after watershed and threshold procedures.

On constate que les joints de faible épaisseur ont été détectés par notre algorithme. La mesure de la taille de grains est alors envisageable sans fermeture des contours et selon les spécifications ASTM.

■ CONCLUSION

Cet article a été consacré à la description et la mise au point d'une méthode d'analyse d'images destinée à évaluer le taux d'endommagement par fluage d'éprouvettes de laboratoire. Au cours de cette étude préliminaire, nous avons montré la méthodologie pour l'extraction des informations nécessaires à la mesure.

La première partie a été principalement consacrée à la révélation des vacuoles dans la matrice métallique de l'acier étudié. Un soin particulier a été apporté tant à la préparation métallographique qu'à l'acquisition d'images. Le choix du paramètre 'A' a été retenu pour le développement du logiciel d'analyse d'images suite à la préparation métallographique.

La seconde partie, quant à elle, a été consacrée à l'extraction des informations pertinentes de la structure pour la mesure du taux d'endommagement. L'extraction des joints de grains constituait la problématique majeure pour la mise en œuvre de la méthode. La construction d'un filtre directionnel par transformée en ondelettes et LPE, procure une partie du résultat escompté.

La validation métrologique de la technique mise en œuvre pour estimer le paramètre 'A' va dépendre de la réduction de la sur-segmentation.

La réduction de la sur-segmentation par graphe d'adjacence est actuellement à l'étude et semble une voie prometteuse. Elle semble apporter la solution à notre application et est développée pour la fin du développement du logiciel.

bibliographie

- (1) EVANS (R.W.), WILSHIRE (B.) – Introduction to Creep. The Institute of Materials (1993).
- (2) VERMET-LOZACH (P.) – Mécanismes et mécanique de l'endommagement de fluage. Cas de l'alliage 800 à 550°C. PhD ENS Mines, Paris (1990).
- (3) EGGELER (G.), BREAR (J.M.), CANE (B.J.), MARTINEZ-OÑA (R.), BAÑES-FERNANDEZ (J.), BORREGAN (J.M.), NAVARRO (A.) – Parameters for creep damage quantification and their correlation with results from ultrasonic velocity, attenuation and energy evaluation. Proc. of the International conference on « Creep and fracture of engineering materials and structures », University College, Swansea (April 1990), edited by B. Wilshire, R.W. Evans, The Institute of Metals, London (1990) p. 931-940.
- (4) LEVAILLANT (C.) – Approche métallographique de l'endommagement d'aciers inoxydables austénitiques sollicités en fatigue plastique ou en fluage : description et interprétation des interactions fatigue-fluage-oxydation. Thèse d'État, Compiègne (1984).
- (5) WOJNAR (L.) – Image analysis. Applications in materials Engineering. CRC Press (1998).
- (6) VISWANATHAN (R.) – Damage mechanisms and life assessment of high temperature components. ASM (1989).
- (7) GRISOT (O.) – Revue bibliographique des méthodes non destructives d'évaluation de l'endommagement par fluage des aciers. Direction des Études et Recherches EDF, n° 95NB00127 (1995).
- (8) MONTHEILLET (F.), MOUSSY (F.) – Physique et mécanique de l'endommagement. Les Éditions de Physique (1986).
- (9) WECK (E.), LEISTNER (E.) – Metallographic instructions for colour etching by immersion. Deutscher Verlag für Schweisstechnik, 2e édition, tomes I, II, III (1995).
- (10) THAUVIN (G.), CHIPPAULT (J.M.) – Method of examination of creep cavities in CrMoV steel damage assessment. Proceedings of International metallography conference, MC95, Colmar (May 10-12, 1995).
- (11) BEUCHET (S.), BEAUJARD (L.) – **La Revue de Métallurgie**, 52, n° 10 (1955), p. 830-836.
- (12) JOURNAUX (S.) – Évaluation de l'endommagement de pièces métalliques par analyse d'images ; endommagement par piqûre de corrosion, endommagement par fluage. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France (1999).
- (13) STRANG (A.), BEECH (S.M.), GOOCH (D.J.) – Remanent life evaluation of 1CrMoV steam turbine rotors (1994).
- (14) VISWANATHAN (R.), GEHL (S.M.) – Life assessment technology for power plant components, JOM (February 1992).
- (15) CANE (B.J.) – Mechanistic control regims for intergranular cavity growth in 2.25 Cr-1 Mo steel under various stresses and stress states. **Met. Sci.**, 15 (1981), p. 302-310.
- (16) KACHANOV (L.M.) – Introduction to continuum damage mechanics. Kluwer Academic Publishers (1986).
- (17) BEUCHER (S.) – Watershed, hierarchical segmentation and waterfall algorithm. Mathematical morphology and its applications to image processing, Ed. J. Serra and P. Sole, Kluwer Academic Publishers (1994), p. 69-76.
- (18) SERRA (J.) – Image analysis and mathematical morphology. Vol. 1 : Academic Press (1982) and vol. 2 : Theoretical Advances Academic Press (1988).
- (19) KAPUR (J.N.), SAHOO (P.K.), WONG (A.K.C.) – A new method for gray level picture thresholding using the entropy histogram. **Computer Vision, Graph. Image Proc.**, 29 (1985), p. 273-285.
- (20) KURDY (M.B.), JEULIN (D.) – Directional mathematical morphology operations. Acta Stereologica, vol. 8/2, Proc. 5th European congress of stereology (1994), p. 473-480.
- (21) DERICHE (R.) – Using Canny's criteria derive a recursively implemented optimal edge detector. **Intern. J. of Computer Using**, 1, No.2 (May 1987), p. 167-187.
- (22) CANNY (J.) – A computational approach to edge detection. **IEEE Trans. PAMI**, 8, No.6 (November, 1986), p. 679-698.
- (23) DAVIGNON (A.) – Détection des arêtes dans les images de distances. **Traitement du Signal**, 9, n°1 (1991), p. 45-56.
- (24) PETROU (M.), KITTLER (J.) – Optimal edge detectors for ramp edges. **IEEE Trans. on PAMI**, 13, No.5 (May 1991), p. 1483-1491.
- (25) GOUTON (P.), LAGGOUNE (H.), KOUASSI (R-K.), PAINDAVOINE (M.) – Optimal detector for crest lines. **Optical Engineering**, 39, No.6 (June 2000), p. 1602-1611.
- (26) DERICHE (R.) – Recursively implementing the Gaussian and its derivatives. INRIA report No.1893, Sophia-Antipolis (May 1993).
- (27) ANTOINE (J.P.), CARETTE (P.), MURENZI (R.) – **Signal Proc.**, n° 31 (1993), p. 241-272.
- (28) BOURNAY-BOUCHEREAU (E.) – Analyse d'images par transformée en ondelettes. Application aux images sismiques. Thèse de Doctorat, Université J. Fourier, Grenoble (1997).
- (29) MALLAT (S.), ZHONG (S.) – Characterization of signals from multiscales edges. **IEEE PAMI**, 14, No.7 (July 1992), p. 710-732.