

ISO/TS 24597:2011

JUIN 2011

www.afnor.org

Ce document est à usage exclusif et non collectif des clients AFNOR.
Toute mise en réseau, reproduction et rediffusion, sous quelque forme que ce soit,
même partielle, sont strictement interdites.

This document is intended for the exclusive and non collective use of AFNOR customers.
All network exploitation, reproduction and re-dissemination,
even partial, whatever the form (hardcopy or other media), is strictly prohibited.

AFNOR

Pour : GN-MEBA

Client : 23432617

le : 24/09/2018 à 22:01

Diffusé avec l'autorisation de l'éditeur

Distributed under licence of the publisher

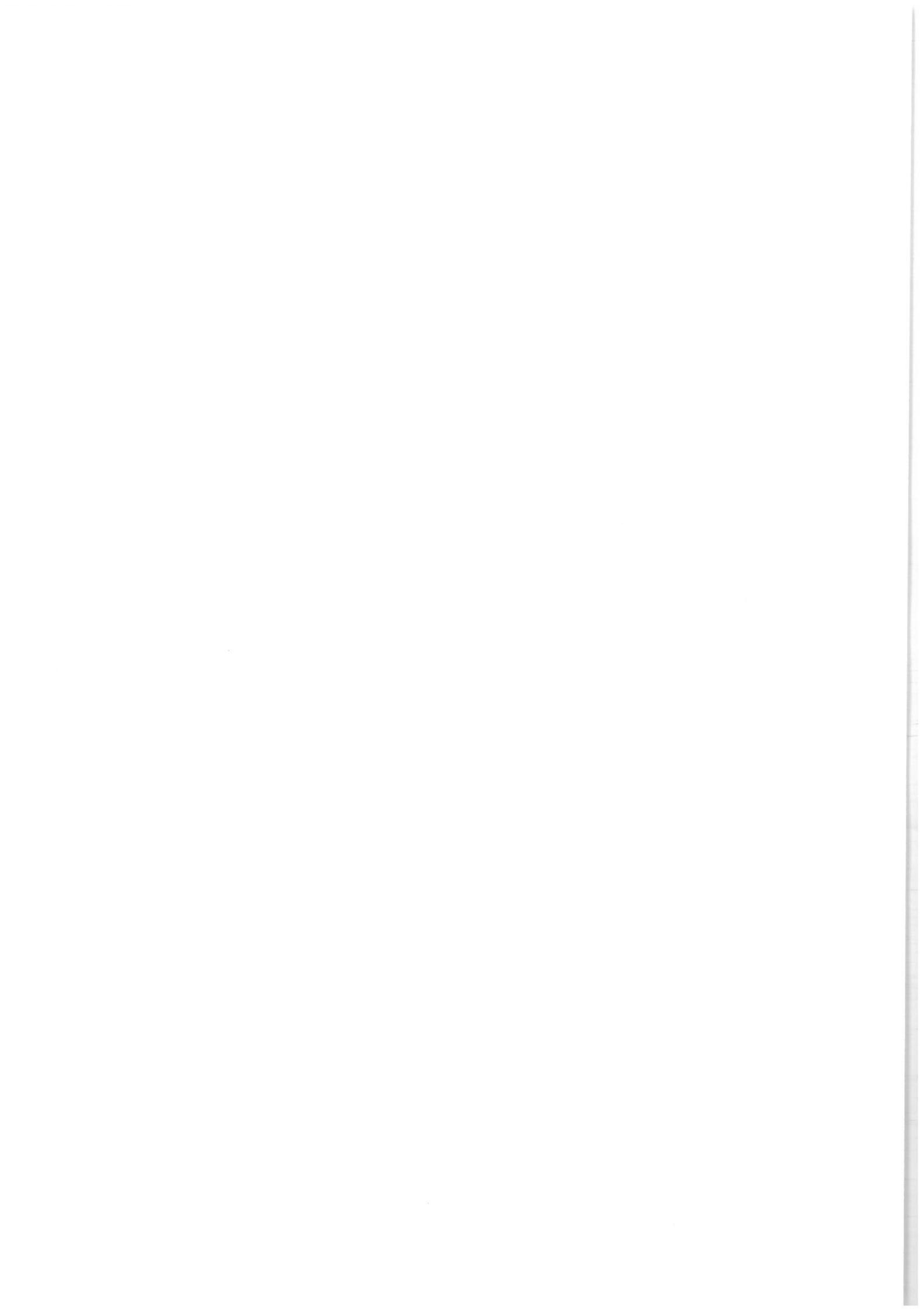


**DOCUMENT PROTÉGÉ
PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans accord formel.

Contacteur :
AFNOR – Norm'Info
11, rue Francis de Pressensé
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél : 01 41 62 76 44
Fax : 01 49 17 92 02
E-mail : norminfo@afnor.org

afnor



SPÉCIFICATION TECHNIQUE

ISO/TS 24597

Première édition
2011-06-15

Analyse par microfaisceaux — Microscopie électronique à balayage — Méthodes d'évaluation de la netteté d'image

*Microbeam analysis — Scanning electron microscopy — Methods of
evaluating image sharpness*



Numéro de référence
ISO/TS 24597:2011(F)

ISO/TS 24597:2011(F)



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2011

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'ISO à l'adresse ci-après ou du comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

	Page
Avant-propos	iv
Introduction.....	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Termes et définitions	1
4 Étapes pour l'acquisition d'une image MEB	2
4.1 Généralités	2
4.2 Échantillon	2
4.3 Inclinaison de l'échantillon	3
4.4 Sélection du champ balayé	3
4.5 Sélection de la dimension d'un pixel	3
4.6 Brillance et contraste de l'image	4
4.7 Rapport contraste sur bruit de l'image	5
4.8 Focalisation et astigmatisme de l'image	7
4.9 Interférence provenant de facteurs externes	7
4.10 Contraste erroné	7
4.11 Fichier de données d'une image MEB	7
5 Acquisition d'une image MEB et sélection d'une zone de l'image	7
6 Méthodes d'évaluation	8
6.1 Généralités	8
6.2 Rapport contraste sur bruit	9
6.3 Méthode de la transformée de Fourier (TF)	9
6.4 Méthode contraste sur gradient (CG)	12
6.5 Méthode de la dérivée (DR)	16
7 Rapport d'essai	18
7.1 Généralités	18
7.2 Contenu du rapport d'essai	18
Annexe A (normative) Détails sur le rapport contraste sur bruit (CNR)	19
Annexe B (normative) Détails sur la méthode de la transformée de Fourier (TF)	24
Annexe C (normative) Détails de la méthode contraste sur gradient (CG)	40
Annexe D (normative) Détails de la méthode de la dérivée (DR)	51
Annexe E (informative) Contexte de l'évaluation de la netteté d'image	72
Annexe F (informative) Caractéristiques et adéquation des différentes méthodes d'évaluation	77
Annexe G (informative) Méthode de préparation des échantillons d'essai pour évaluer la netteté d'image	81
Annexe H (informative) Exemple de rapport d'essai	83
Bibliographie	86

ISO/TS 24597:2011(F)

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les Normes internationales sont rédigées conformément aux règles données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La tâche principale des comités techniques est d'élaborer les Normes internationales. Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

Dans d'autres circonstances, en particulier lorsqu'il existe une demande urgente du marché, un comité technique peut décider de publier d'autres types de documents normatifs:

- une Spécification publiquement disponible ISO (ISO/PAS) représente un accord entre les experts dans un groupe de travail ISO et est acceptée pour publication si elle est approuvée par plus de 50 % des membres votants du comité dont relève le groupe de travail;
- une Spécification technique ISO (ISO/TS) représente un accord entre les membres d'un comité technique et est acceptée pour publication si elle est approuvée par 2/3 des membres votants du comité.

Une ISO/PAS ou ISO/TS fait l'objet d'un examen après trois ans afin de décider si elle est confirmée pour trois nouvelles années, révisée pour devenir une Norme internationale, ou annulée. Lorsqu'une ISO/PAS ou ISO/TS a été confirmée, elle fait l'objet d'un nouvel examen après trois ans qui décidera soit de sa transformation en Norme internationale soit de son annulation.

L'ISO/TS 24597 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 202, *Analyse par microfaisceaux*, sous-comité SC 4, *Microscopie électronique à balayage*.

Introduction

L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) attire l'attention sur le fait qu'il est déclaré que la conformité avec les dispositions du présent document peut impliquer l'utilisation d'un brevet intéressant la méthode contraste sur gradient (CG) traitée en 6.4.

L'ISO ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à la portée de ces droits de propriété.

Le détenteur de ces droits de propriété a donné l'assurance à l'ISO qu'il consent à négocier des licences avec des demandeurs du monde entier, à des termes et conditions raisonnables et non discriminatoires. À ce propos, la déclaration du détenteur des droits de propriété est enregistrée à l'ISO. Des informations peuvent être demandées à:

Détenteur du brevet: Hitachi, Ltd.

Adresse: Marunouchi Center Bldg., 6-1, Marunouchi 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo,
100-8220, Japon

L'attention est d'autre part attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété autres que ceux qui ont été mentionnés ci-dessus. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de l'identification de ces droits de propriété en tout ou partie.

Analyse par microfaisceaux — Microscopie électronique à balayage — Méthodes d'évaluation de la netteté d'image

1 Domaine d'application

La présente Spécification technique spécifie des méthodes d'évaluation de la netteté d'images numérisées produites par un microscope électronique à balayage (MEB) au moyen de la méthode de la transformée de Fourier (TF), la méthode contraste sur gradient (CG) et la méthode de la dérivée (DR).

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence (y compris les éventuels amendements) s'applique.

ISO 16700:2004, *Analyse par microfaisceaux — Microscopie électronique à balayage — Lignes directrices pour l'étalonnage du grandissement d'image*

ISO/CEI 17025:2005, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

ISO 22493, *Analyse par microfaisceaux — Microscopie électronique à balayage — Vocabulaire*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 16700 et l'ISO 22493, ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

pixel

plus petite unité d'image non divisible sur une image MEB numérisée

3.2

dimension d'un pixel

longueur d'un pixel de l'échantillon, en nanomètres, dans une image MEB

NOTE Il convient que la dimension horizontale et la dimension verticale du pixel soient identiques.

3.3

image MEB binaire

image MEB traitée dans laquelle il n'y a que deux niveaux de brillance

3.4

image convoluée

image obtenue par convolution d'une image MEB binaire par un profil gaussien bidimensionnel

3.5

facteur de netteté

double écart-type (2σ) du profil gaussien utilisé pour générer une image convoluée

ISO/TS 24597:2011(F)

3.6

netteté d'image

facteur de netteté divisé par la racine carrée de 2 (soit $2\sigma/\sqrt{2}$), le facteur de netteté d'une image MEB étant considéré identique à celui d'une image convoluée produite par un profil gaussien avec un écart-type σ

3.7

rapport contraste sur bruit

CNR

rapport de $I_A - I_B$ sur σ_n , où I_A et I_B sont les intensités de l'objet et du fond de l'image, et σ_n est l'écart-type du bruit de l'image

3.8

méthode de la transformée de Fourier

méthode TF

méthode d'évaluation de la netteté d'image par comparaison des profils de la transformée de Fourier d'une image MEB avec les profils des images convoluées

3.9

méthode contraste sur gradient

méthode CG

méthode d'évaluation de la netteté d'image utilisant les gradients de la moyenne harmonique pondérée de la carte bidimensionnelle de distribution de la brillance d'une image MEB

3.10

méthode de la dérivée

méthode DR

méthode d'évaluation de la netteté d'image en ajustant les profils de la fonction d'erreur aux profils des gradients des bords des particules dans une image MEB

3.11

champ balayé

zone d'un échantillon qui correspond à la totalité de l'image MEB

4 Étapes pour l'acquisition d'une image MEB

4.1 Généralités

Pour l'acquisition d'une image MEB, il est important d'ajuster dans un premier temps les conditions du microscope (par exemple, voir l'Annexe B de l'ISO 16700:2004). La netteté d'image dépend (i) de l'échantillon lui-même, (ii) de la régularité structurale de l'avant-plan et du fond de l'image, (iii) de la brillance et du contraste et (iv) du rapport contraste sur bruit (CNR). En conséquence, suivre les procédures décrites en 4.2 à 4.10, correspondant aux paramètres ci-dessus afin d'évaluer la netteté d'image par les trois méthodes ici décrites. Une attention particulière doit être apportée à l'ajustement du courant de la sonde électronique et aux conditions de focalisation afin d'obtenir des exigences optimales pour la brillance et le contraste (voir 4.6) et le rapport contraste sur bruit (voir 4.7).

4.2 Échantillon

À la date de publication de la présente Spécification technique, aucun matériau de référence certifié (CRM) n'a été désigné. Des résultats acceptables peuvent cependant être obtenus en utilisant un échantillon préparé par la méthode décrite à l'Annexe G. Sélectionner un échantillon ayant une surface lisse et plane. Pour évaluer la netteté d'image, choisir une partie de l'échantillon qui contient des particules circulaires déposées sur le substrat. Obtenir les images souhaitées avec le grandissement choisi conformément à 4.4.

NOTE Un matériau sensible au faisceau d'électrons n'est pas approprié comme échantillon pour l'évaluation de la netteté d'image.

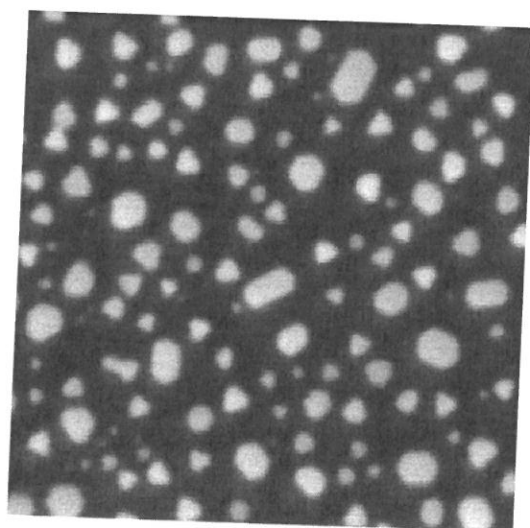
4.3 Inclinaison de l'échantillon

Fixer l'angle d'inclinaison de l'échantillon à 0° (condition de non-inclinaison).

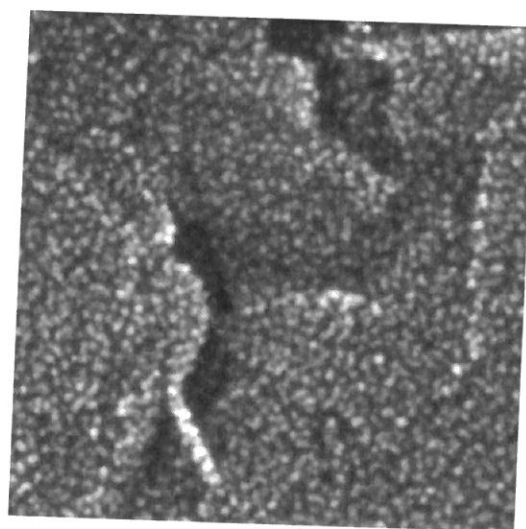
NOTE Une erreur de $\pm 3^\circ$ de l'angle d'inclinaison de l'échantillon n'affectera pas l'évaluation de la netteté d'image.

4.4 Sélection du champ balayé

Sélectionner le champ balayé de sorte qu'il contienne une surface plane et lisse, car la netteté d'image varie en fonction de l'uniformité (ou plutôt de l'irrégularité) de la structure de la surface. Les Figures 1 a) et 1 b) montrent des champs balayés acceptables et inacceptables, respectivement. Choisir des particules de plusieurs dizaines de pixels [voir Figure 1 a)].



a) Image acceptable



b) Image inacceptable

Figure 1 — Images MEB ayant des images d'avant-plan structurées a) acceptables et b) inacceptables

4.5 Sélection de la dimension d'un pixel

4.5.1 Généralités

Avant d'évaluer la netteté d'image, il est nécessaire d'étalonner le grandissement de l'image et/ou le marqueur d'échelle conformément à l'ISO 16700.

4.5.2 Détermination de la dimension d'un pixel à partir d'un champ balayé

La dimension d'un pixel L_p (en nm) est déterminée à partir de l'équation:

$$L_p = \frac{L_{FOV}}{N_p}$$

où

L_{FOV} est la largeur du champ balayé horizontal sur une image MEB, en nm;

N_p est le nombre de pixels contenu dans la largeur du champ balayé horizontal.

ISO/TS 24597:2011(F)

4.5.3 Détermination de la dimension d'un pixel à partir d'un marqueur d'échelle

La dimension d'un pixel L_p (en nm) est calculée en utilisant un marqueur d'échelle comme suit:

$$L_p = \frac{L_{scale}}{N_{scale}}$$

où

L_{scale} est la valeur «indicatrice» (par exemple la valeur nominale, en nm) du marqueur d'échelle;

N_{scale} est le nombre de pixels contenu dans la longueur du marqueur d'échelle.

4.5.4 Conversion de la dimension d'un pixel

La netteté d'image dérivée des méthodes décrites ici (R_{PX}) est en pixels. La netteté d'image R_L , convertie en nanomètres, est ensuite donnée par l'expression:

$$R_L = L_p \times R_{PX}$$

où L_p est la dimension d'un pixel.

Fixer la dimension d'un pixel à environ 40 % de la valeur attendue de la netteté d'image. Par exemple, fixer la dimension d'un pixel à 0,8 nm lorsque la netteté attendue des images est de 2 nm.

4.6 Brillance et contraste de l'image

Il convient que l'intensité du signal de l'image soit largement distribuée. Les Figures 2 a), b), c) et d) montrent des exemples d'images présentant une brillance et un contraste acceptables et inacceptables. Les profils de raie correspondant aux lignes pointillées à la même position verticale de chaque image sont montrés comme aide visuelle.

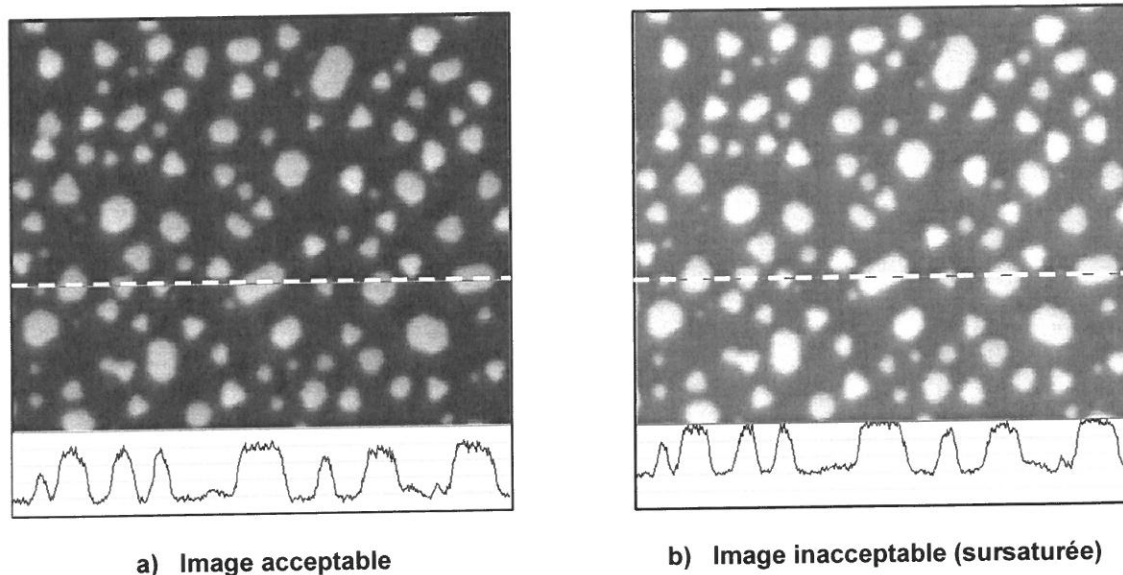


Figure 2 (suite)

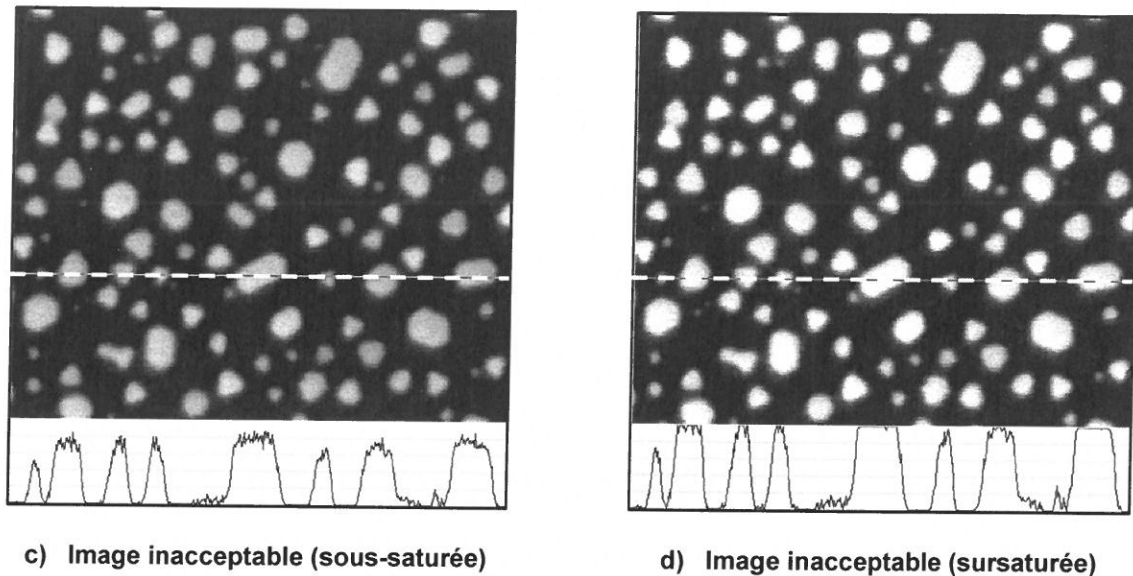


Figure 2 — Images MEB présentant une brillance et un contraste acceptables et inacceptables

4.7 Rapport contraste sur bruit de l'image

Le rapport contraste sur bruit (CNR) de l'image doit être de 10 ou plus. Ici, le rapport CNR est défini comme étant le rapport entre le contraste de l'image C_{image} et l'écart-type σ_n du bruit de l'image (voir Figure 3).

$$\text{CNR} = C_{\text{image}} / \sigma_n$$

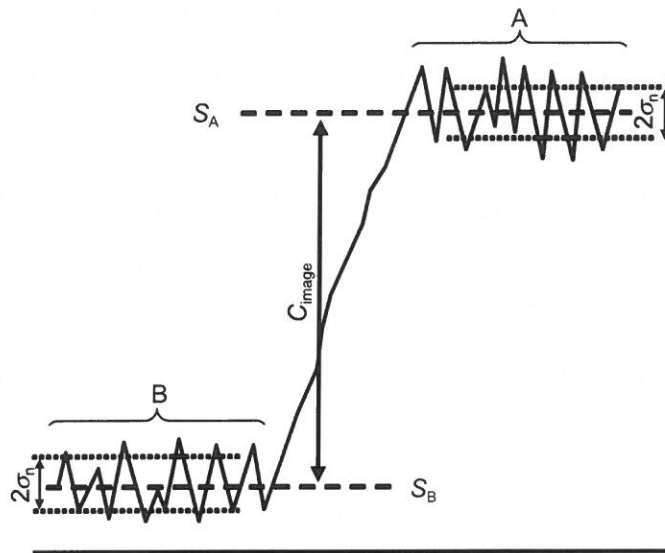
Une procédure de détermination du rapport CNR est donnée à l'Annexe A.

La Figure 4 montre l'apparence simulée d'images ayant un CNR de 5, 10, et 50.

La Figure 5 montre des exemples d'images MEB ayant des CNR différents d'environ 4 et 30.

NOTE Afin d'obtenir des images MEB ayant un bon CNR, il est nécessaire d'ajuster le courant de sonde et/ou la durée d'acquisition de l'image. Il convient d'être conscient du fait que les variations des paramètres ci-dessus affecteront les résultats de l'évaluation de la netteté d'image.

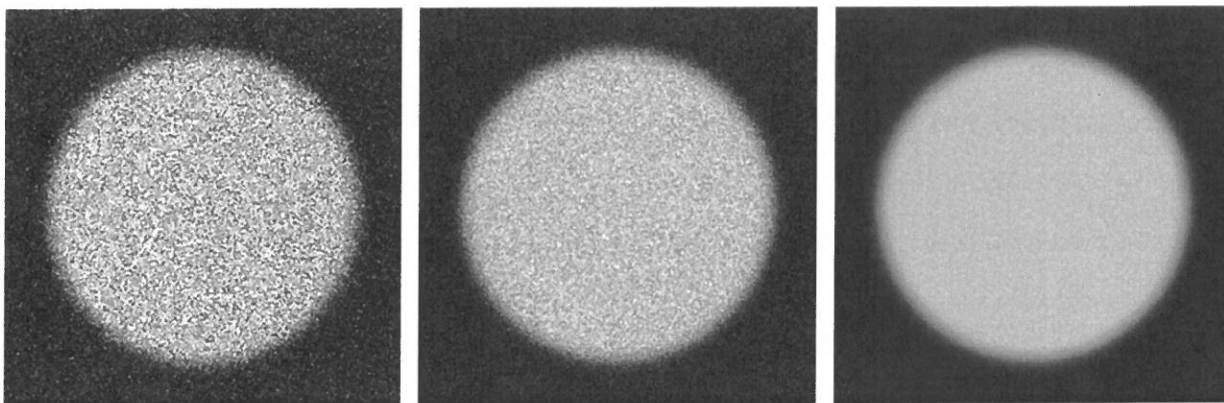
ISO/TS 24597:2011(F)



Légende

- A région A
- B région B

Figure 3 — Profil d'intensité d'une image

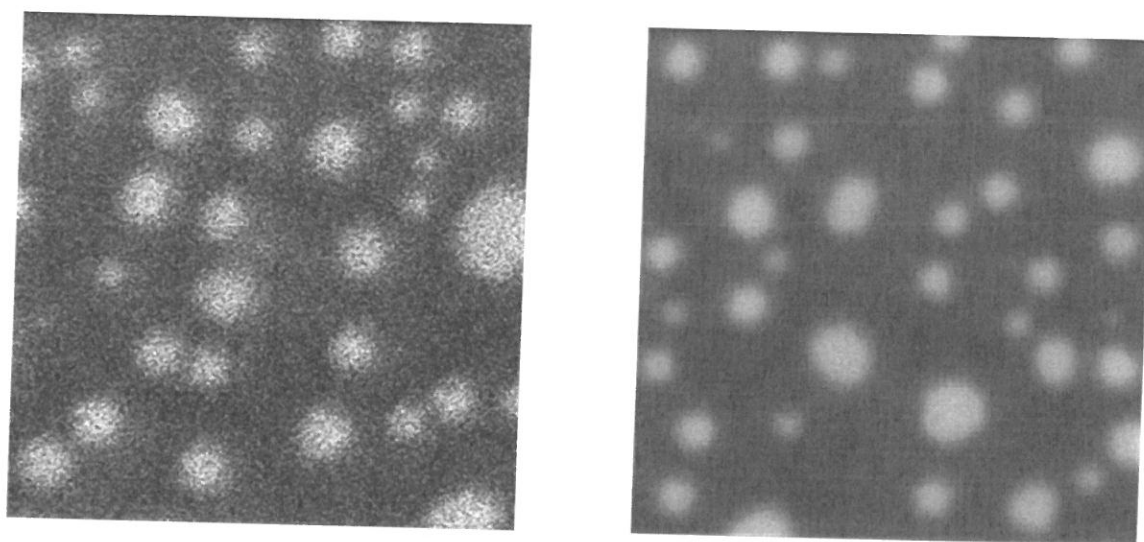


a) CNR = 5

b) CNR = 10

c) CNR = 50

Figure 4 — Images simulées ayant des rapports contraste sur bruit différents



a) Rapport contraste sur bruit faible (CNR \approx 4) b) Rapport contraste sur bruit élevé (CNR \approx 30)

Figure 5 — Images MEB ayant des rapports contraste sur bruit différents

4.8 Focalisation et astigmatisme de l'image

Focaliser le faisceau d'électrons le mieux possible. Utiliser une image exempte autant que possible d'astigmatisme.

4.9 Interférence provenant de facteurs externes

Les facteurs externes tels que les vibrations mécaniques, la distorsion par les champs magnétiques et les facteurs énumérés à l'Annexe B de l'ISO 16700:2004 affectent la netteté d'image. S'assurer, autant que possible, que les images utilisées ne sont pas affectées par ces facteurs.

4.10 Contraste erroné

S'assurer que les images ne contiennent pas de contraste erroné (par exemple un contraste dû à une charge de l'échantillon).

4.11 Fichier de données d'une image MEB

Les données d'image, qui sont directement sauvegardées à partir d'un MEB, doivent être sous forme numérique avec des niveaux de gris d'au moins 8 bits de profondeur. Le fichier de données de l'image doit être sous forme d'un fichier numérique non compressé, par exemple un fichier bitmap non compressé ou un fichier TIF non compressé.

Ne pas utiliser les données obtenues à partir d'une image MEB imprimée.

5 Acquisition d'une image MEB et sélection d'une zone de l'image

La procédure décrite dans le présent article est commune à toutes celles utilisées dans la présente Spécification technique (voir Article 6).

- a) Utiliser un échantillon préparé selon la procédure décrite en 4.2. Acquérir une image en prêtant une attention particulière aux instructions données en 4.3 à 4.10.

ISO/TS 24597:2011(F)

- b) Sélectionner une zone carrée dans l'image MEB (désignée ci-après par le terme d'image) comprenant au moins 256×256 pixels. La zone ne doit pas avoir de données parasites superposées (par exemple affichage du grandissement, marqueur d'échelle, caractères, flèches, etc.).

Choisir une zone contenant des images de particules de préférence non superposées.

- c) Stocker l'image MEB sélectionnée dans un fichier de données sous forme d'un fichier numérique non compressé spécifié en 4.11.

6 Méthodes d'évaluation

6.1 Généralités

Les méthodes d'évaluation décrites en 6.3 à 6.5 sont basées sur la supposition que le faisceau d'électrons présente un profil gaussien. Les résultats obtenus par ces méthodes ne représentent donc pas la dimension réelle du faisceau (voir E.4). La Figure 6 montre un diagramme général de l'évaluation d'une image MEB incluant la procédure courante d'évaluation du CNR donnée à l'Article 5.

Les procédures de base pour obtenir la netteté d'image sont les suivantes.

- a) Sélectionner une image MEB en suivant l'Article 5.
- b) Déterminer le CNR pour l'image MEB sélectionnée (voir 6.2) et s'assurer qu'il est supérieur ou égal à 10 avant de poursuivre.
- c) Calculer le facteur de netteté 2σ de l'image MEB sélectionnée, dans l'espace des fréquences ou l'espace réel (selon la méthode utilisée). Ici, la netteté d'une image MEB est déterminée à partir d'une image équivalente produite par convolution d'une image MEB binaire par un profil gaussien bidimensionnel avec un facteur de netteté 2σ (c'est-à-dire un double écart-type).

NOTE La procédure de calcul dépend de la méthode utilisée.

- d) La netteté d'image est définie comme étant $k \times 2\sigma$, où $k = 1/\sqrt{2}$.

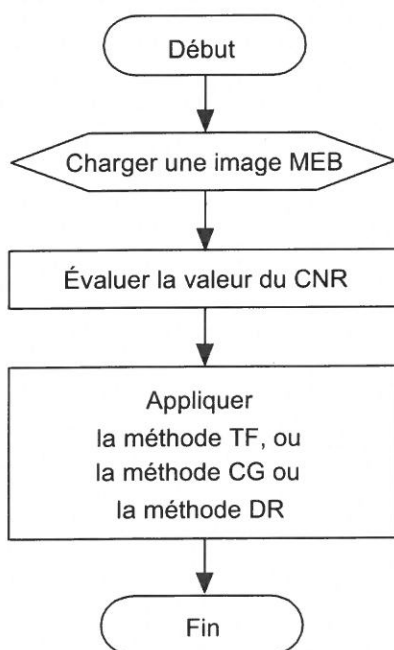


Figure 6 — Diagramme général de l'évaluation d'une image MEB

6.2 Rapport contraste sur bruit

Le concept de base du rapport contraste sur bruit (voir 4.7) a été développé dans le domaine de l'imagerie médicale. Le CNR de l'image MEB sélectionnée étudiée doit être évalué. Seules les images ayant un CNR = 10 ou supérieur peuvent être soumises à l'étape suivante de détermination de la netteté d'image. La Figure 7 montre un bref diagramme de l'évaluation du CNR suivant les routines a) et b). Des détails sur les routines sont donnés à l'Annexe A.

Si la valeur du CNR < 10, éliminer l'image MEB. Acquérir une nouvelle image MEB avec un bruit plus faible et procéder à nouveau à l'évaluation.

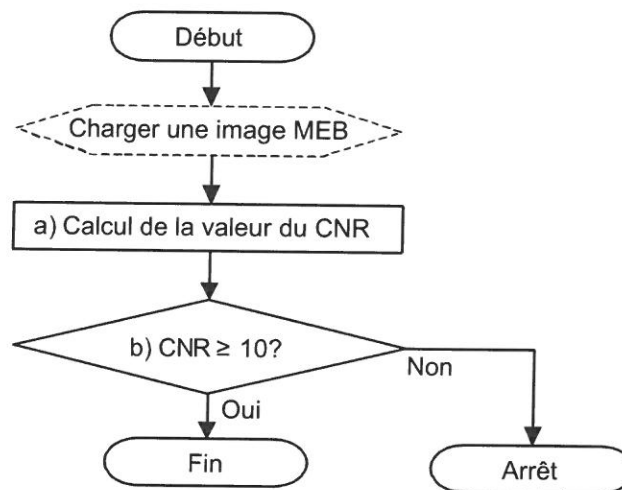


Figure 7 — Diagramme de l'évaluation du CNR

6.3 Méthode de la transformée de Fourier (TF)

Pour évaluer la netteté d'image, la méthode de la transformée de Fourier (TF) est utilisée avec les composants de fréquence spatiale donnés par la TF d'une image MEB. Les composants de fréquence spatiale de l'image MEB sont comparés à ceux des images obtenues par la convolution de l'image MEB binarisée par des profils gaussiens avec différents facteurs de netteté 2σ (voir Figures 8 et 9). Des détails sur les procédures de la méthode TF sont donnés à l'Annexe B.

NOTE L'intensité du signal d'une image I_m est exprimée par $I_m(i, j)$, et les coordonnées i et j sont choisies comme étant 0, 1, ..., $L - 1$ pour une image avec des dimensions x et y de L ($= 256, 512, \dots$). Cependant, les coordonnées i et j sont traitées comme des nombres entiers compris entre $-L/2$ et $(L/2) - 1$ pour le modèle de TF.

ISO/TS 24597:2011(F)

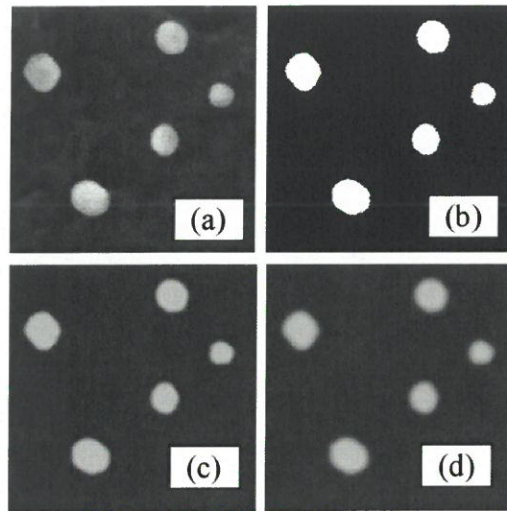
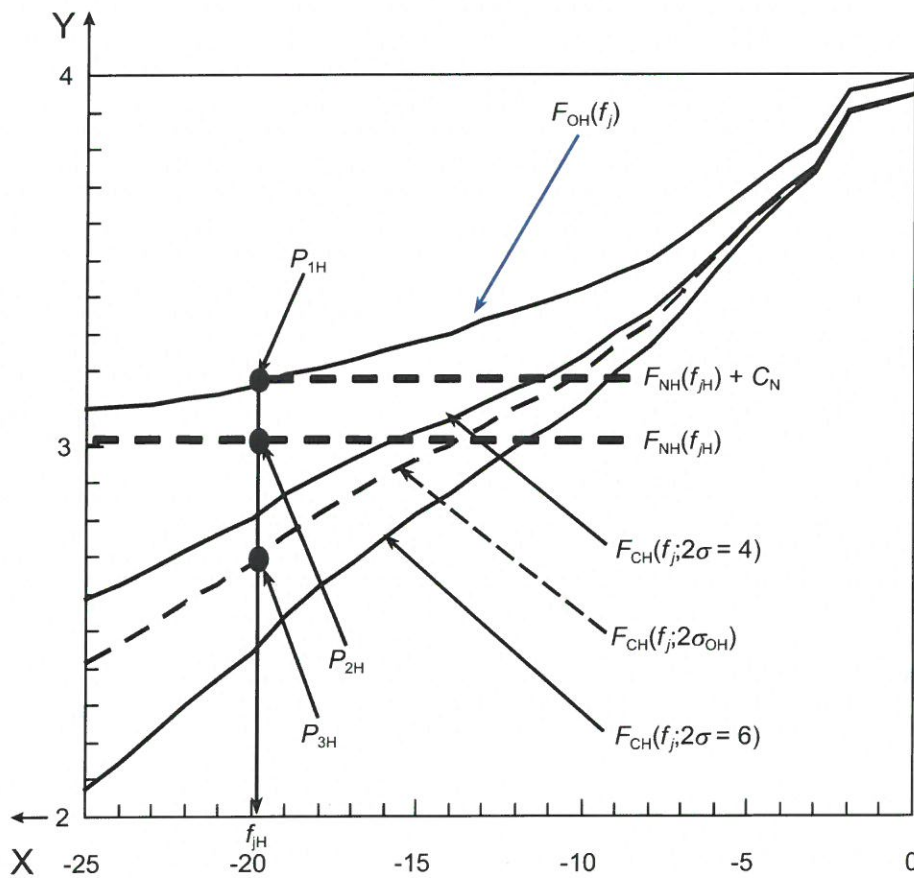


Figure 8 — (a) Image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$, dimension de l'image $L = 256$, (b) image binarisée $I_B(i, j)$, (c) et (d) images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ avec $2\sigma = 4$ pixels, et $I_C(i, j; 2\sigma)$ avec $2\sigma = 6$ pixels, respectivement



Légende

X coordonnée horizontale, f_j (pixels)

Y intensité de la TF, $F_{*H}(f_j)$

* signifie C, N ou O.

Figure 9 — Courbes TF moyennées et lissées tracées en logarithme décimal: $F_{OH}(f_j)$ pour l'image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$ et $F_{CH}(f_j; 2\sigma)$ et $F_{CH}(f_j; 2\sigma_{OH})$ pour les images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ et $I_C(i, j; 2\sigma_{OH})$, respectivement

ISO/TS 24597:2011(F)

- a) Génération d'une image convoluée
- 1) Générer une image filtrée $I_{OF}(i, j)$ par un filtre médian 3×3 , d'une image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$.
 - 2) Produire un histogramme $H(S)$ de $I_{OF}(i, j)$, et obtenir ensuite un histogramme lissé $H_s(S)$ en utilisant une moyenne mobile de 9 points. Puis calculer $h_s(S) = \log_{10}[H_s(S) + 1]$.
 - 3) Déterminer S_L et S_H , qui correspondent aux intensités du substrat et des particules respectivement, et déterminer le niveau seuil $(S_L + S_H)/2$ en utilisant $h_s(S)$.
 - 4) Produire une image binarisée $I_B(i, j)$ en utilisant $(S_L + S_H)/2$.
 - 5) Ajouter le bruit blanc à l'image sélectionnée $I_O(i, j)$ en fixant SNR_p (rapport signal sur bruit des particules) égal à 30 pour l'intensité du signal $S = 192$.
 - 6) Générer les images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ par la convolution de l'image binarisée $I_B(i, j)$ par des profils gaussiens bidimensionnels avec différents facteurs de netteté $2\sigma = 2\sigma(N)$ en commençant par $2\sigma(1) = 1$, chaque σ correspondant à l'écart-type de la distribution gaussienne et $N (=1, 2, \dots)$ étant le numéro de l'étape.
 - 7) Ajuster l'intensité des différentes images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ de sorte que les intensités maximale et minimale soient S_H et S_L , respectivement.
- b) Génération des courbes des modèles de TF
- 1) Effectuer la TF pour l'image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$ et les différentes images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$. $G_O(f_i, f_j)$ et $G_C(f_i, f_j; 2\sigma)$ représentent les modèles de TF correspondant à $I_O(i, j)$ et $I_C(i, j; 2\sigma)$, respectivement.
 - 2) Obtenir la valeur moyennée et lissée horizontalement de $|\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]|$ et la valeur moyennée et lissée verticalement de $|\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]|$, et calculer les courbes $F_{OHA}(f_j)$ et $F_{OVA}(f_i)$ en utilisant leur logarithme décimal.

NOTE $\text{Re}[\dots]$ désigne la partie réelle, et $|\dots|$ désigne la valeur absolue.
 - 3) Obtenir les courbes moyennées de $F_{OH}(f_j)$ et $F_{OV}(f_i)$ en appliquant une moyenne mobile de 5 points le long des directions horizontale f_j et verticale f_i pour les courbes $F_{OHA}(f_j)$ et $F_{OVA}(f_i)$, respectivement.
 - 4) Obtenir les courbes moyennées $F_{CHB}(f_j; 2\sigma)$ et $F_{CVB}(f_i; 2\sigma)$ pour $G_C(f_i, f_j; 2\sigma)$, d'une manière similaire.
- c) Calcul de la netteté temporaire des images R_{PXO}
- 1) Déterminer les zones de bruit pour les deux courbes $F_{OH}(f_j)$ et $F_{OV}(f_i)$, et obtenir ensuite les fonctions de bruit respectives $F_{NH}(f_j)$ et $F_{NV}(f_i)$ dans les zones de bruit, par approximation linéaire.
 - 2) Calculer les courbes corrigées $F_{CH}(f_j; 2\sigma)$ et $F_{CV}(f_i; 2\sigma)$ à partir des courbes moyennées $F_{CHB}(f_j; 2\sigma)$ et $F_{CVB}(f_i; 2\sigma)$ en utilisant les intensités du signal et du bruit à l'origine de (f_i, f_j) .
 - 3) Obtenir la valeur $f_j = f_{jC}$ en utilisant $F_{OH}(f_j)$, $F_{NH}(f_j)$ et une constante donnée C_N , et calculer ensuite la coordonnée horizontale f_{jH} à partir de f_{jC} en utilisant une interpolation linéaire.
 - 4) À partir des fonctions obtenues, déterminer les coordonnées des trois points, P_{1H} [sur la courbe $F_{OH}(f_j)$], P_{2H} [sur la droite $F_{NH}(f_j)$] et P_{3H} [sur la courbe $F_{CH}(f_j; 2\sigma_{OH})$] situés sur une droite verticale ayant comme coordonnée horizontale f_{jH} , comme illustré à la Figure 9.
 - 5) Déterminer les coordonnées des trois points, P_{1V} [sur la courbe $F_{OV}(f_i)$], P_{2V} [sur la droite $F_{NV}(f_i)$] et P_{3V} [sur la courbe $F_{CV}(f_i; 2\sigma_{OV})$], d'une manière similaire.

ISO/TS 24597:2011(F)

- 6) Obtenir les facteurs de netteté $2\sigma_{OH}$ et $2\sigma_{OV}$ par interpolation linéaire pour $2\sigma(N)$, en augmentant le numéro de l'étape N .
 - 7) Calculer le facteur de netteté $2\sigma_O$ à l'aide de $2\sigma_O = (2\sigma_{OH} + 2\sigma_{OV})/2$.
 - 8) Calculer la netteté temporaire des images R_{PXO} à l'aide de $R_{PXO} = 2\sigma_O / \sqrt{2}$.
- d) Calcul de la netteté d'image R_{PX}
- 1) Calculer le coefficient C_F à partir du facteur de netteté $2\sigma_O$ utilisé pour l'étalonnage.
 - 2) Obtenir le facteur de netteté étalonné $2\sigma_C$ en utilisant le coefficient C_F .
 - 3) Évaluer la netteté d'image R_{PX} à l'aide de $R_{PX} = 2\sigma_C / \sqrt{2}$.

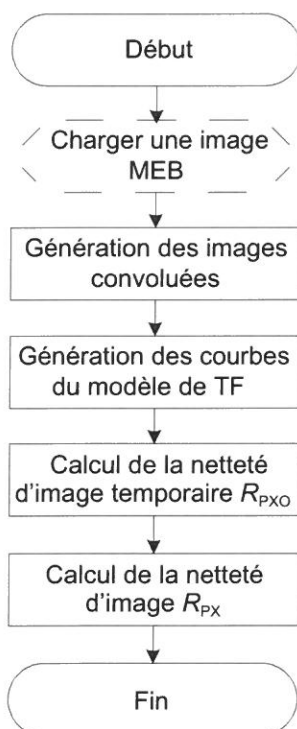
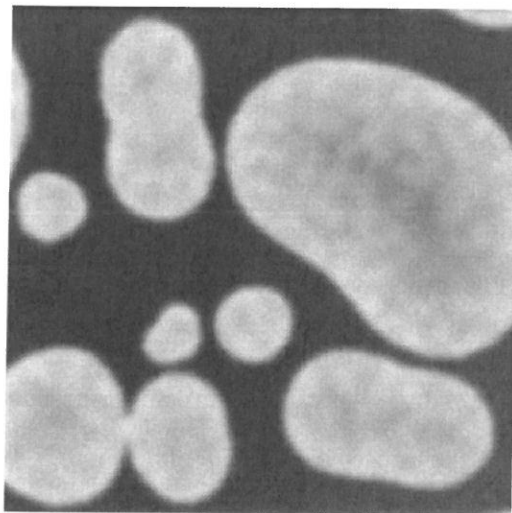


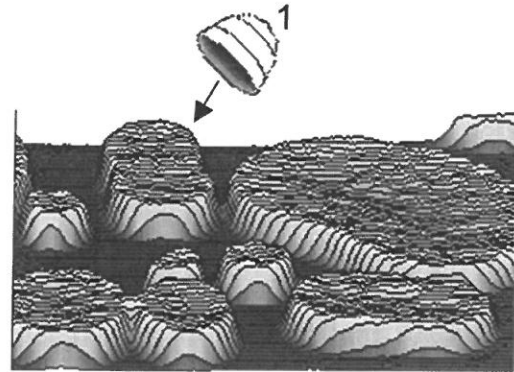
Figure 10 — Bref diagramme du traitement par la méthode TF

6.4 Méthode contraste sur gradient (CG)

La méthode contraste sur gradient (CG) est basée sur l'extraction du gradient d'intensité de chaque pixel de l'image en ajustant une surface quadratique de 3×3 , sur chaque pixel [voir Figure 11 b)]. La netteté d'image CG R_{CG} est inversement proportionnelle à la moyenne harmonique pondérée des gradients. Enfin, la netteté d'image CG R_{CG} est convertie en netteté d'image R_{ES} en utilisant des images de référence ayant différents facteurs de netteté 2σ .



a) Image MEB originale



b) Image de profondeur correspondant à l'image originale, avec une surface quadratique typique 3 × 3 ajustée sur chaque pixel

Légende

1 surface quadratique

Figure 11 — Image MEB originale et ajustement d'une surface quadratique 3 × 3, sur chaque pixel de l'image de profondeur correspondante

La netteté d'image présente une faible dépendance au bruit et est évaluée en fonction du CNR comme paramètre donné. La Figure 12 montre un bref diagramme de la méthode CG composée des routines suivantes a) à d). Des détails sur les routines sont donnés à l'Annexe C.

a) Calcul de la netteté d'image CG R_{CG} pour l'image originale

Un certain nombre d'images réduites est généré en utilisant un facteur de réduction r égal à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 et 20. Chaque image réduite est désignée comme étant une image de dimension $(1/r)$ (dimension 1/2, dimension 1/4, etc.). Avec la convention ci-dessus, l'image de dimension $(1/r)$ pour $r = 1$ est l'image originale. La réduction de l'image permet de réduire le bruit de l'image au détriment de la fréquence d'échantillonnage de l'image. Pour la routine b) donnée ci-dessous, les quatre types de netteté suivants sont calculés: la netteté locale, la netteté directionnelle, la netteté directionnelle moyenne et la netteté d'image CG. Les trois premiers types de netteté sont calculés pour chaque image réduite. Le dernier type de netteté qui caractérise l'image est déterminé à partir des courbes de R et $\Delta R/R$ en fonction de r , où ΔR est la fluctuation de R .

1) Netteté locale

Dans chaque image, la netteté locale d'un pixel (i, j) est calculée comme suit:

$$R_p(i, j; \theta) = 2 \Delta C / g(i, j; \theta),$$

où

ΔC est le contraste seuil;

$g(i, j; \theta)$ est le gradient local, selon la direction θ .

Le gradient local est obtenu en ajustant une surface quadratique de 3 × 3 sur chaque pixel (i, j) . L'erreur d'ajustement Δg fournit la fluctuation de R_p , c'est-à-dire ΔR_p .

ISO/TS 24597:2011(F)

2) Netteté directionnelle

La netteté directionnelle R_k , définie comme étant la moyenne harmonique pondérée de la netteté locale dans le k ème secteur de l'angle azimutal θ de l'image, est calculée. Les valeurs de $\Delta R_k/R_k$ sont également calculées en utilisant $\Delta R_p/R_p$.

3) Netteté directionnelle moyenne

La netteté directionnelle moyenne R , définie comme la moyenne de la racine carrée de R_k , est calculée. Les valeurs de $\Delta R/R$ sont également calculées en utilisant $\Delta R_k/R_k$.

4) Netteté d'image CG

La netteté d'image CG R_{CG} est définie comme suit. Les graphiques de R et $\Delta R/R$ en fonction de r sont tracés, où R et $\Delta R/R$ sont les valeurs de R_r et $\Delta R_r/R_r$ pour $r = 1$, pour toutes les images réduites. La valeur de réduction r_{min} , pour laquelle $\Delta R/R$ a la valeur minimale est alors obtenue. La netteté d'image CG R_{CG} est définie comme étant R à $r = r_{min}$. La netteté d'image CG est considérée comme étant une netteté fiable car $\Delta R/R$ a la valeur minimale. Elle est influencée intrinsèquement par le niveau de bruit.

b) Génération d'images de référence et calcul de leur netteté CG R_{CG}

Les images de référence sont des images floues formées en effectuant une convolution d'une image MEB binaire par un profil gaussien avec différents facteurs de netteté 2σ connus et en ajoutant le bruit aléatoire gaussien de manière que le rapport contraste sur bruit de l'image de référence soit égal à celui de l'image MEB originale.

c) Étalonnage des constantes de conversion, A et B

Les constantes de conversion, A et B varient avec à la fois la structure et la dimension de l'image MEB et le bruit de l'image. Ainsi, les constantes sont étalonnées pour chaque image MEB évaluée, en utilisant les images de référence avec différents facteurs de netteté 2σ connus.

d) Conversion de la valeur R_{CG} en netteté d'image R_{ES} en utilisant les constantes étalonnées A et B

$$R_{ES} = k \times 2\sigma$$

où

$$k = 1/\sqrt{2};$$

2σ est le facteur de netteté, donné par

$$2\sigma = A \times R_{CG} + B$$

Ici, la netteté d'image R_{ES} montre une faible dépendance au bruit et est évaluée en fonction du CNR.

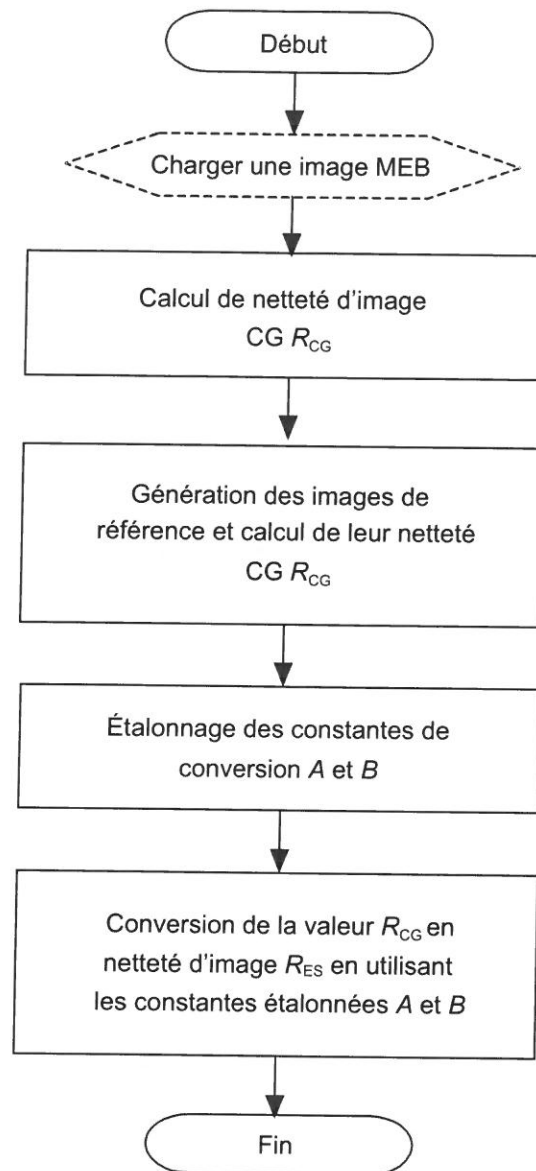
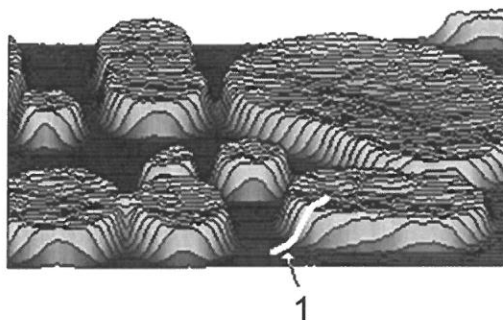


Figure 12 — Bref diagramme de la méthode CG

ISO/TS 24597:2011(F)

6.5 Méthode de la dérivée (DR)

La méthode de la dérivée est basée sur l'extraction des profils des bords et l'ajustement des fonctions d'erreur à ceux-ci. La méthode repose sur le fait que la netteté de bord est liée à un paramètre défini par le critère de Rayleigh-Abbe. La méthode peut ainsi déterminer la netteté de bord. Pour ce faire, les profils de bord sont modélisés comme des fonctions d'erreur. Si la fonction d'étalement du point est supposée être un profil gaussien, le profil d'un bord d'une image MEB peut être approximé par une fonction d'erreur. Cette fonction d'erreur est ajustée à tous les profils extraits de l'image (voir Figure 13). De leur moyenne, le facteur de netteté, qui est par définition lié à la netteté d'image, est dérivé.



Légende

- 1 ajustement de la fonction d'erreur

Figure 13 — Concept de base de la méthode de la dérivée (DR)

La Figure 14 montre un bref diagramme de la méthode DR composée des routines suivantes a) à d). Des détails sur les routines sont donnés à l'Annexe D.

- a) Génération d'une image du masque binaire $M(x, y)$
- 1) L'amplitude de gradient $G_M(x, y)$ est calculée en effectuant une convolution de l'image originale par une dérivée du premier ordre des profils gaussiens d'écart-type σ égal à 2 pixels.
 - 2) Une image binaire $B(x, y)$ est calculée à partir de $G_M(x, y)$ sur la base d'un seuil entre deux moyennes.
 - 3) Une image du masque binaire $M(x, y)$ est calculée par nettoyage de $B(x, y)$ par fermeture binaire de taille 1. Puis tous les pixels d'objets qui sont proches des bords de l'image sont fixés à zéro et tous les objets qui contiennent peu de pixels sont éliminés.
- b) Génération d'une carte de position des bords $E(x, y)$
- 1) Une image de l'emplacement des bords $P_L(x, y)$ est calculée en effectuant une convolution de l'image originale par des dérivées du premier ordre et du second ordre des profils gaussiens d'écart-type σ .
 - 2) Un masque binaire $M_1(x, y)$ est calculé à partir de la valeur maximale de $[P_L(x, y) - |P_L(x, y)|]$ sur la base d'un seuil entre deux moyennes dans $M(x, y)$.
 - 3) Une image binaire initiale de la carte des bords $E_1(x, y)$ est calculée par squelettisation à partir du résultat de la fermeture binaire de taille 1 effectuée sur $M_1(x, y)$.
 - 4) Une carte de position des bords $E(x, y)$ est calculée à partir de $E_1(x, y)$ en considérant uniquement les positions le long d'un contour qui sont séparées les unes des autres d'une distance d'au moins 10 pixels.

ISO/TS 24597:2011(F)

- c) Extraction des profils de bord $P_j(x, y)$ et ajustement d'une fonction d'erreur
- 1) Le gradient normalisé $G_N(x, y)$ est calculé pour toutes les positions de $E(x, y)$ sur la base de la normalisation de $G_M(x, y)$.
 - 2) Les positions de profil d'un sous-pixel $P_{S_i}(x, y)$ sont calculées à partir des positions des bords initiales données par $E(x, y)$ le long des deux directions de $G_N(x, y)$ pour un total de 41 positions avec un pas de 0,5 pixel.
 - 3) Les valeurs de l'intensité d'un sous-pixel $P_j(x, y)$ à $P_{S_i}(x, y)$ sont extraites à partir de l'image originale aux positions de profil par interpolation cubique.
 - 4) Une fonction d'erreur est ajustée à chaque $P_j(x, y)$, et la netteté de bord s_j est calculée et stockée.
- d) Calcul de la netteté d'image R_{DR}
- 1) La netteté de bord globale s est calculée comme étant la moyenne des nettetés de bord de toutes les pentes de bord déterminées.
 - 2) La netteté d'image R_{DR} est calculée comme étant $R_{DR} = \sqrt{2}s$.

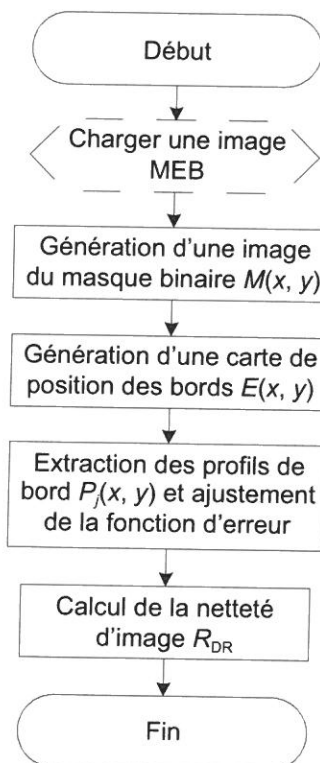


Figure 14 — Bref diagramme de la méthode DR

ISO/TS 24597:2011(F)

7 Rapport d'essai

7.1 Généralités

Le rapport d'essai préparé par le laboratoire doit être précis, clair et non ambigu, et conforme aux instructions spécifiques des méthodes d'évaluation décrites dans la présente Spécification technique.

En plus des résultats de l'évaluation, les informations prescrites en 5.10.2 de l'ISO/CEI 17025:2005 doivent être fournies. Les résultats peuvent être communiqués d'une façon simplifiée, suite à un accord écrit avec un client externe ou par compréhension mutuelle avec des clients internes. Les informations prescrites en 5.10.2 de l'ISO/CEI 17025:2005, qui ne font pas l'objet d'un rapport au client, doivent être facilement accessibles dans le laboratoire qui a effectué les essais.

7.2 Contenu du rapport d'essai

Le rapport d'essai doit comprendre les éléments donnés ci-dessous et toute autre information appropriée, qui peut affecter les résultats communiqués dans celui-ci (un exemple de rapport d'essai est donné à l'Annexe H):

- a) titre du rapport d'essai;
- b) nom et adresse du laboratoire;
- c) numéro d'identification du rapport d'essai;
- d) nom et adresse du client si approprié;
- e) identification de la méthode utilisée (c'est-à-dire ISO/TS 24597, méthode TF, méthode CG ou méthode DR);
- f) nom du fabricant, nom du modèle et numéro de série de l'instrument employé;
- g) nom du ou des matériau(x) de référence utilisé(s);
- h) valeurs opératoires spécifiques de la tension d'accélération (en kV), de la distance de travail (en mm) et du grandissement réglé, ainsi que toute information supplémentaire considérée comme nécessaire (mode d'imagerie, vitesse de balayage, etc.);
- i) l'image ou les images MEB originale(s), la ou les dimension(s) d'image correspondante(s) et les fichiers de données avec le ou les nom(s) de fichier, le ou les nom(s) de fichier de l'image sélectionnée, les fichiers d'image MEB binaire avec le ou les nom(s) de fichier et leur dimensions d'image (nombre de pixels);
- j) nom de la personne qui a effectué l'évaluation;
- k) date et heure de l'évaluation;
- l) nom(s), fonction(s) et signature(s) de la (des) personne(s) autorisant le certificat d'évaluation;
- m) le cas échéant, un rapport attestant que les résultats se rapportent seulement aux parties testées.

Les fichiers de données des images MEB originales et les images MEB sélectionnées utilisées pour obtenir les résultats rapportés doivent être conservés pendant une période obligatoire spécifiée.

Les laboratoires éditant un rapport d'essai doivent spécifier que le rapport ne peut être reproduit qu'en entier, et avec la permission écrite du laboratoire.

Annexe A (normative)

Détails sur le rapport contraste sur bruit (CNR)

La présente annexe fournit des détails sur l'évaluation du rapport contraste sur bruit (CNR). Un diagramme de l'évaluation du CNR est donné à la Figure A.1.

NOTE L'explication s'applique à une image avec $L = 512$ ou 256 et des niveaux de gris de 8 bits afin de faciliter la compréhension.

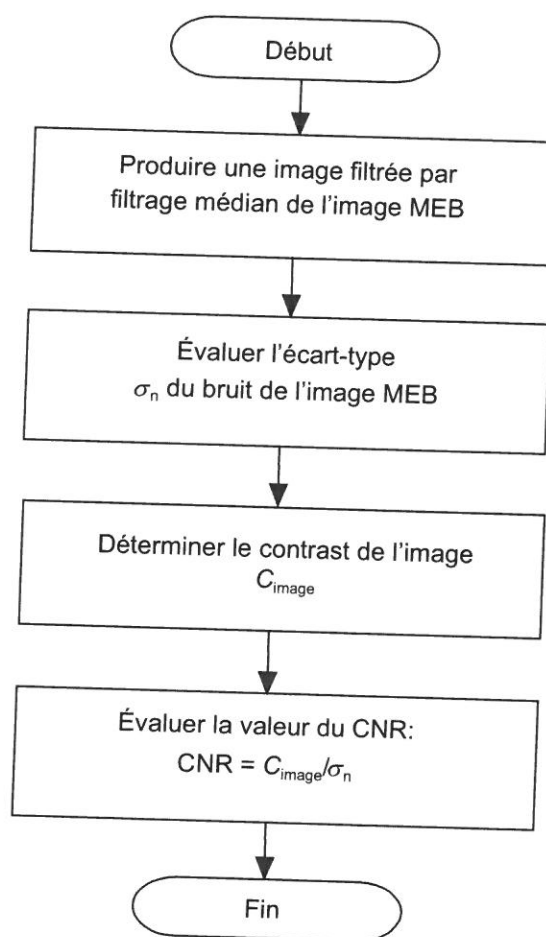


Figure A.1 — Diagramme de l'évaluation du CNR

- a) Produire une image filtrée par filtrage médian en effectuant un filtrage médian (3×3 non pondéré) trois fois successivement de l'image MEB. La matrice de filtre est une matrice 3×3 . Ci-après, l'image résultante est appelée image filtrée par filtrage médian.

NOTE 1 Le principe du filtrage médian 3×3 est représenté à la Figure A.2. Le filtrage médian est calculé en triant dans un premier temps les intensités des pixels contenus dans le carré de 3×3 par ordre croissant (ou décroissant) et ensuite en remplaçant l'intensité de pixel $I(i, j)$ du pixel (i, j) par l'intensité de pixel centrale (ou la cinquième).

NOTE 2 Toute position d'un pixel de l'image est exprimée par (i, j) , où i (et j) = 0, 1, 2, ..., et i_{max} (et j_{max}).

Annexe D (normative)

Détails de la méthode de la dérivée (DR)

D.1 Généralités

La présente annexe fournit des détails relatifs aux procédures de la méthode de la dérivée (DR).

Celles-ci comptent quatre routines: D.2, génération d'une image du masque binaire $M(x, y)$; D.3, génération d'une carte de position des bords $E(x, y)$; D.4, extraction des profils de bord $P_j(x, y)$ et ajustement du modèle et D.5, calcul de la netteté d'image R .

D.2 Génération d'une image du masque binaire $M(x, y)$

- a) Calculer les gradients $G_x(x, y)$ et $G_y(x, y)$ d'une image MEB sélectionnée $I_N(x, y)$ en utilisant des dérivées gaussiennes de paramètre d'échelle s ($s = 2$ pixels), comme suit:

$$G_x(x, y) = \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{n-1} I_N(p, q) \times \frac{p-x}{2\pi s^4} \times \exp\left(-\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{2s^2}\right) \quad (\text{D.1a})$$

$$G_y(x, y) = \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{n-1} I_N(p, q) \times \frac{q-y}{2\pi s^4} \times \exp\left(-\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{2s^2}\right) \quad (\text{D.1b})$$

NOTE 1 n et m sont les dimensions x et y , respectivement, de l'image et sont typiquement de 512. Pour les coordonnées (x, y) de l'image, $x = 0, 1, \dots, n-1$ et $y = 0, 1, \dots, m-1$.

NOTE 2 Une image MEB peut avoir tout type de donnée réelle, mais les données sont généralement des valeurs entières de 8 bits.

Il est recommandé d'utiliser la transformée de Fourier rapide et la transformée de Fourier inverse rapide pour le calcul de la convolution.

- b) Calculer l'amplitude du gradient $G_M(x, y)$ à l'aide de

$$G_M(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (\text{D.2})$$

- c) Calculer une image binaire $B(x, y)$ à partir de $G_M(x, y)$ à l'aide des étapes suivantes 1) à 5).

- 1) Générer un histogramme $h(g)$ de $G_M(x, y)$.
- 2) Déterminer la valeur minimale g_{\min} et la valeur maximale g_{\max} de g , dans l'historgramme $h(g)$ qui ont des valeurs non nulles (voir Figure D.1).
- 3) Fixer la valeur initiale T_i à 128 pour l'itération.
- 4) Puis répéter l'itération suivante jusqu'à ce que la valeur de T_i soit stable.

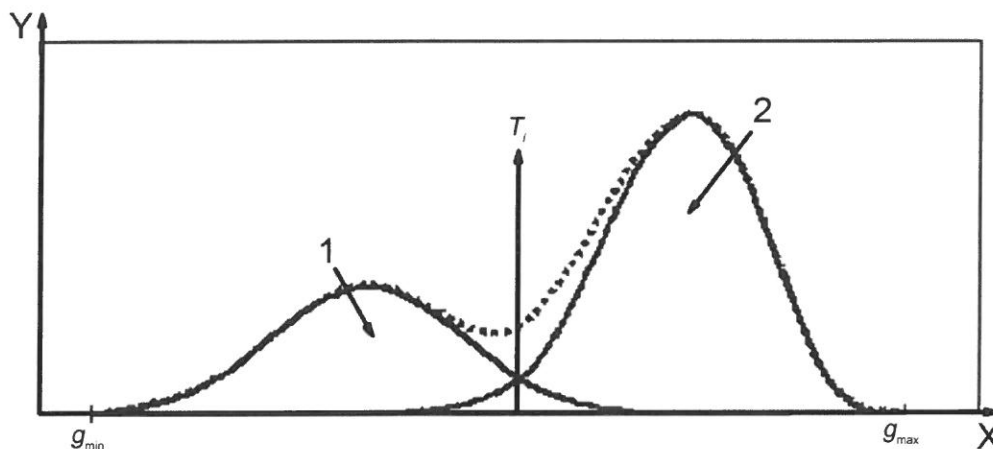
ISO/TS 24597:2011(F)

$$T_i = \frac{T_l + T_r}{2}$$

où

$$T_l = \frac{\sum_{g=g_{\min}}^{T_i} g \times h(g)}{\sum_{g=g_{\min}}^{T_i} h(g)} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{\sum_{g=T_i}^{g_{\max}} g \times h(g)}{\sum_{g=T_i}^{g_{\max}} h(g)}$$

Sélectionner la valeur pour juger de la convergence de l'itération à 0,1 pour des raisons pratiques.



Légende

X niveau de gris

Y occurrence

1 fond

2 objet

Figure D.1 — Exemple de seuillage

5) Générer une image binaire $B(x, y)$ en appliquant la valeur seuil T_i à $G_M(x, y)$.

NOTE Les images binaires contiennent uniquement les valeurs logiques 0 et 1.

Des exemples d'images MEB des types générés dans les procédures ci-dessus sont illustrés à la Figure D.2.

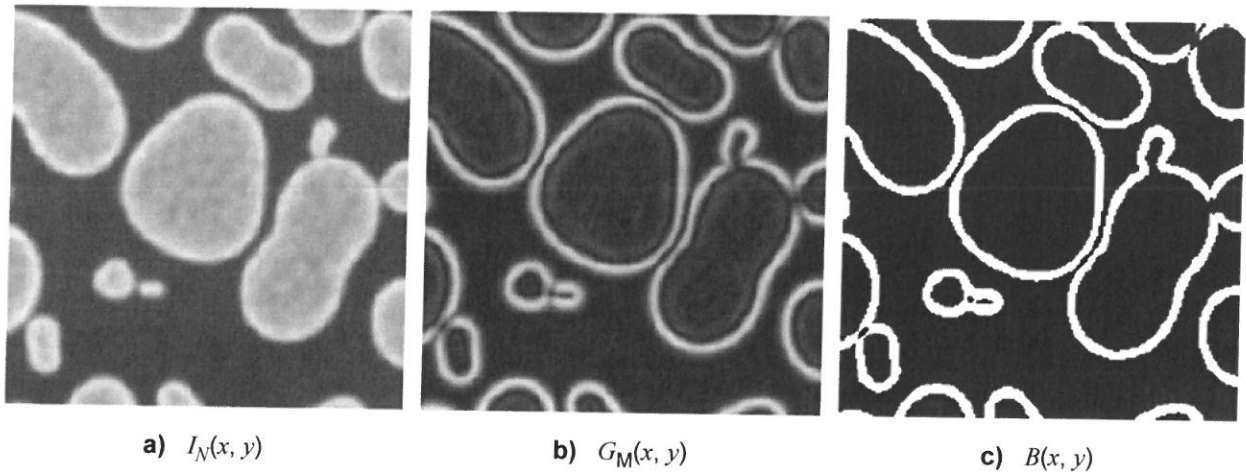


Figure D.2 — Exemples d'une image MEB $I_N(x, y)$, d'une image de l'amplitude du gradient $G_M(x, y)$, et d'une image binaire $B(x, y)$
(toutes les images sont affichées étirées linéairement sur leur gamme dynamique pour une meilleure visualisation)

- d) Calculer une image du masque binaire $M(x, y)$ à partir de $B(x, y)$ en utilisant une fermeture binaire de taille 1 (avec un élément structurant 3×3), à l'aide des étapes suivantes:
- 1) Dilatation binaire (voir D.8 pour les pseudo-codes);
 - 2) Érosion binaire (voir D.8 pour les pseudo-codes).
- e) Mettre à zéro tous les pixels dans $M(x, y)$ qui sont situés à moins de 30 pixels du bord de l'image. Concernant l'élimination des pixels frontières, voir D.8 pour les pseudo-codes.
- f) Éliminer tous les objets dans $M(x, y)$ qui sont inférieurs à 50 pixels à l'aide des étapes suivantes:
- 1) Numérotter les objets (voir D.8 pour les pseudo-codes).
 - 2) Compter le nombre de pixels par objet (voir D.8 pour les pseudo-codes).
 - 3) Éliminer les objets ayant moins de 50 pixels (voir D.8 pour les pseudo-codes).

Un exemple d'une image du $M(x, y)$ générée par les opérations décrites dans le présent article est illustré à la Figure D.3.

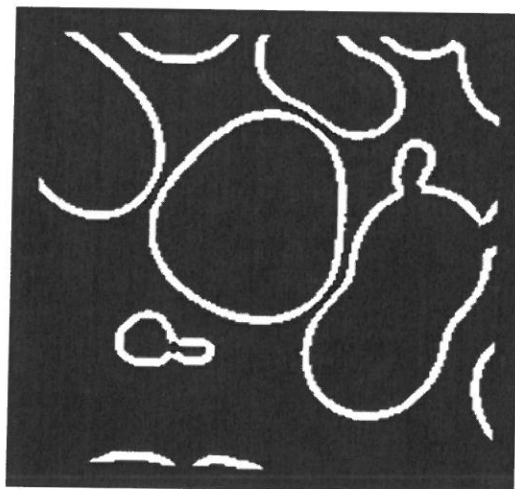


Figure D.3 — Exemple d'une image du $M(x, y)$ comme résultat des opérations décrites en D.2

ISO/TS 24597:2011(F)

D.3 Génération d'une carte de position des bords $E(x, y)$

a) Calculer une image de l'emplacement des bords $P_L(x, y)$ comme étant la somme de l'image $L(x, y)$ et de la dérivée seconde en direction du gradient $SDGD(x, y)$ de l'image, comme suit.

1) Calculer $G_{xx}(x, y)$ et $G_{yy}(x, y)$ à l'aide des équations

$$G_{xx}(x, y) = \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{n-1} I_N(p, q) \times \frac{(x-p)^2 - s^2}{2\pi s^6} \times \exp\left(-\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{2s^2}\right) \quad (D.3a)$$

$$G_{yy}(x, y) = \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{n-1} I_N(p, q) \times \frac{(y-q)^2 - s^2}{2\pi s^6} \times \exp\left(-\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{2s^2}\right) \quad (D.3b)$$

Il est recommandé d'utiliser la transformée de Fourier rapide et la transformée de Fourier inverse rapide pour le calcul de la convolution.

2) Calculer $L(x, y)$ comme suit:

$$L(x, y) = \sqrt{G_{xx}(x, y)^2 + G_{yy}(x, y)^2} \quad (D.4)$$

3) Calculer $G_{xy}(x, y)$ comme suit:

$$G_{xy}(x, y) = \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{n-1} I_N(p, q) \times \frac{(x-p)(y-q)}{2\pi s^6} \times \exp\left(-\frac{(x-p)^2 + (y-q)^2}{2s^2}\right) \quad (D.5)$$

Il est recommandé d'utiliser la transformée de Fourier rapide et la transformée de Fourier inverse rapide pour le calcul de la convolution.

4) Calculer $SDGD(x, y)$ comme suit:

$$SDGD(x, y) = \frac{G_{xx}G_x^2 + 2G_{xy}G_xG_y + G_{yy}G_y^2}{G_x^2 + G_y^2} \quad (D.6)$$

NOTE Pour simplifier, les coordonnées (x, y) ont été omises dans la partie droite de l'Équation (D.6).

5) Calculer $P_L(x, y)$ comme suit:

$$P_L(x, y) = L(x, y) + SDGD(x, y)$$

b) Calculer une image binaire $M_1(x, y)$ de $T_1(x, y)$, comme suit.

1) Calculer

$$T_1(x, y) = T_0(x, y) \times M(x, y) \quad (D.7)$$

où

$$T_0(x, y) = \max[P_L(x, y)] - |P_L(x, y)|$$

NOTE La multiplication $T_0(x, y) \times M(x, y)$ est effectuée pixel par pixel.

2) Calculer une image binaire $M_1(x, y)$ comme en D.2 c), pour $T_1(x, y)$.

ISO/TS 24597:2011(F)

- c) Calculer une carte des bords initiale $E_1(x, y)$, à l'aide des étapes suivantes:
- 1) Calculer $M_2(x, y)$ par fermeture binaire de taille 1 de $M_1(x, y)$ comme en D.2 d).
 - 2) Calculer le squelette binaire de $M_2(x, y)$ et le stocker comme $E_1(x, y)$. Voir D.8 pour les pseudo-codes du squelette binaire.
- d) Éliminer suffisamment de points de $E_1(x, y)$ de sorte que les distances entre les points restants soient d'au moins 10 pixels et stocker le résultat comme $E(x, y)$. Voir D.8 pour les pseudo-codes des points éliminés.

Les Figures D.4 et D.5 illustrent des exemples.

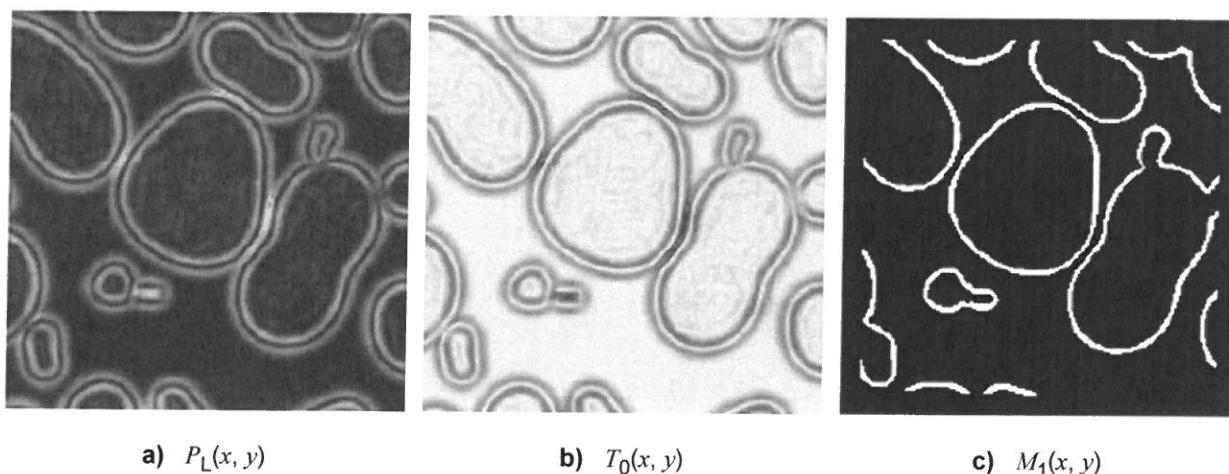


Figure D.4 — Exemples des images $P_L(x, y)$, $T_0(x, y)$ et $M_1(x, y)$
(toutes les images sont affichées étirées linéairement sur leur gamme dynamique pour une meilleure visualisation)

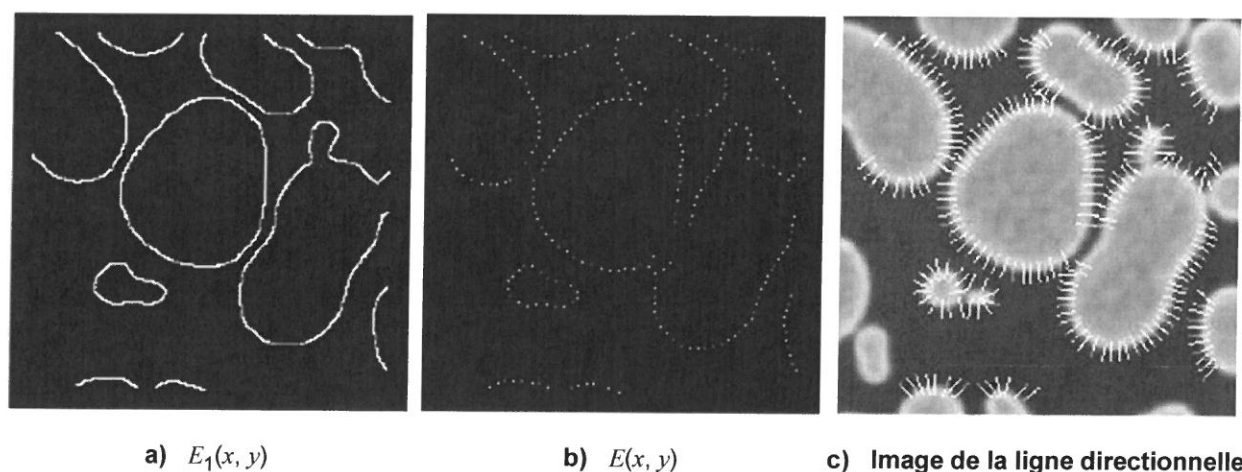


Figure D.5 — Exemples des images $E_1(x, y)$, $E(x, y)$ et d'une ligne directionnelle
(l'image de la ligne directionnelle est donnée à titre de référence)

ISO/TS 24597:2011(F)

D.4 Extraction des profils de bord $P_j(x, y)$ et ajustement du modèle

a) Calculer les gradients normalisés $G_{N_x}(x, y)$ et $G_{N_y}(x, y)$ comme suit:

$$G_{N_x} = G_x(x, y) / \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (D.8a)$$

$$G_{N_y} = G_y(x, y) / \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (D.8b)$$

b) Calculer tous les profils de bord $P_j(\lambda)$ en répétant les étapes suivantes pour toutes les valeurs $j (= 1, 2, \dots, N)$.

N est donné par

$$N = \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{m-1} E(x, y)$$

1) Les coordonnées de la position d'un sous-pixel ($p_{jx}(\lambda), p_{jy}(\lambda)$) sont données par

$$\begin{aligned} p_{jx}(\lambda) &= x_j + \lambda \times G_{N_x}(x_j, y_j) \\ p_{jy}(\lambda) &= y_j + \lambda \times G_{N_y}(x_j, y_j) \end{aligned} \quad (D.9)$$

où $\lambda = -10, -9,5, -9, \dots, 0, 0,5, \dots, 9,5, 10$.

Le nombre de positions d'un sous-pixel est de 41 pour chaque profil de bord.

NOTE Le symbole (x_j, y_j) désigne les coordonnées de la carte des bords $E(x, y)$ ayant la j ème valeur ($j = 1, 2, \dots, N$).

2) Extraire les profils de bord $P_j(\lambda)$ à partir de $I_N(x, y)$ aux 41 positions d'un sous-pixel ($p_{jx}(\lambda), p_{jy}(\lambda)$), en utilisant la méthode d'interpolation cubique, comme suit:

$$P_j(\lambda) = I_N(p_{jx}(\lambda), p_{jy}(\lambda)) = \sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{nm} x^n y^m \quad (D.10)$$

NOTE Les valeurs obtenues par interpolation cubique à la position d'un sous-pixel ($p_{jx}(\lambda), p_{jy}(\lambda)$) sont données par les valeurs des pixels aux positions entières de $I_N(x, y)$ (voir D.7 pour les valeurs des coefficients).

3) Calculer:

$$m_0 = \text{médiane de } [P_j(\lambda = 0)] \text{ sur tous les } j = 1 \dots, N$$

$$m_r = \text{médiane de } [P_j(\lambda = -10)] \text{ sur tous les } j = 1 \dots, N$$

$$m_l = \text{médiane de } [P_j(\lambda = +10)] \text{ sur tous les } j = 1 \dots, N$$

$$d_y = (m_r + m_l) / 2$$

$$m_d = m_0 - d_y / 4$$

$$m_b = m_0 + d_y / 4$$

ISO/TS 24597:2011(F)

Éliminer tous les profils de bord pour lesquels l'une quelconque des conditions suivantes est satisfaite:

$$P_j(\lambda) > m_d \text{ pour } \lambda = -10, -9,5, \dots, -7$$

$$P_j(\lambda) < m_b \text{ pour } \lambda = 7, 7,5, \dots, 10$$

- 4) Déterminer les quatre coefficients b , h , m et σ_j de sorte que l'erreur d'ajustement suivante F_j soit minimisée:

$$F_j = \sum_{x=-20}^{20} [f_j(x/2) - P_j(x/2)]^2 \quad (\text{D.11})$$

où

$$f_j(x) = b + h \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{x - m}{\sigma_j \sqrt{2}} \right) \right]$$

NOTE La fonction $\operatorname{erf}(z)$ désigne la fonction d'erreur, et est définie comme suit:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt \approx 1 - \frac{1}{(1 + Az + Bz^2 + Cz^3 + Dz^4 + Ez^5 + Fz^6)^{16}}$$

où $A = 0,070\ 523\ 078\ 4$, $B = 0,042\ 282\ 012\ 3$, $C = 0,009\ 270\ 527\ 2$, $D = 0,000\ 152\ 014\ 3$, $E = 0,000\ 276\ 567\ 2$ et $F = 0,000\ 043\ 063\ 8$.

Si $z > 10$, $\operatorname{erf}(z) = 1$, et si $z = 0$, $\operatorname{erf}(z) = 0$, pour des raisons pratiques.

Les valeurs initiales de l'ajustement sont recommandées comme suit:

$$b = \min[I_N(x, y)]$$

$$h = \max[I_N(x, y)]$$

$$m = 0$$

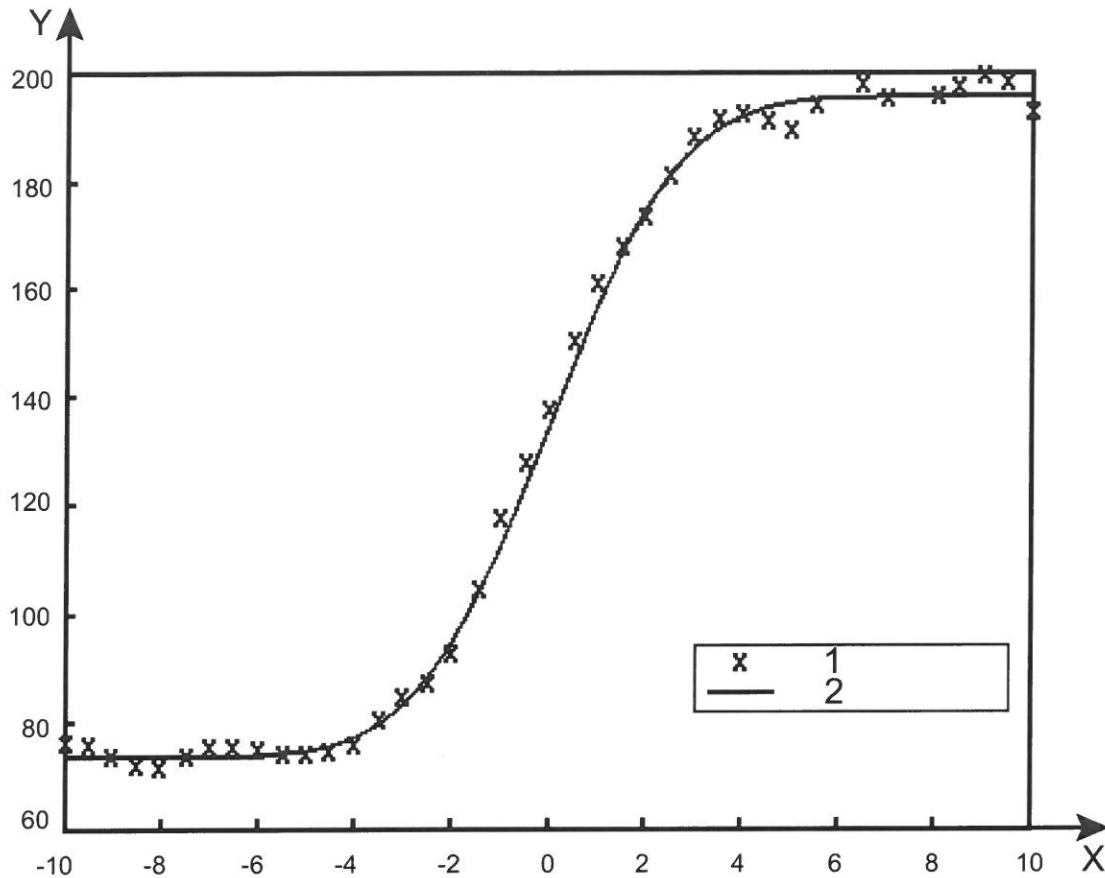
$$\sigma_j = 2$$

Voir la seconde moitié de D.7 pour les valeurs ajustées σ_j en minimisant l'erreur d'ajustement donnée par l'Équation (D.11).

- c) Stocker toutes les valeurs ajustées σ_j ($j = 1 \dots, N$).

Un exemple est illustré à la Figure D.6.

ISO/TS 24597:2011(F)



Légende

- X position perpendiculaire au bord
- Y intensité
- 1 intensités de bord
- 2 ajustement de la fonction d'erreur

Figure D.6 — Exemple d'ajustement de la fonction d'erreur aux intensités obtenues par interpolation cubique d'une image MEB

D.5 Calcul de la netteté d'image R

- a) Calculer la netteté de bord moyenne σ à partir de tous les paramètres de netteté de bord ajustés, comme suit:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \tag{D.12}$$

NOTE Voir D.9 pour vérifier la fiabilité de la valeur σ obtenue.

- b) Obtenir la netteté d'image selon $R = \sqrt{2}\sigma$

D.6 Diagrammes

Des diagrammes sont donnés aux Figures D.7 à D.11 pour les procédures ci-dessus.

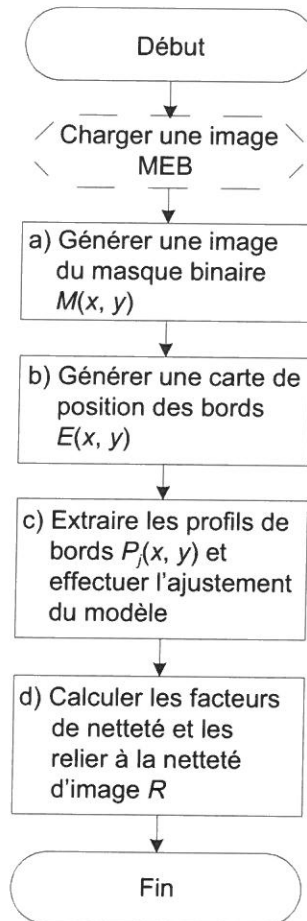


Figure D.7 — Diagramme de l'évaluation de la méthode DR

ISO/TS 24597:2011(F)

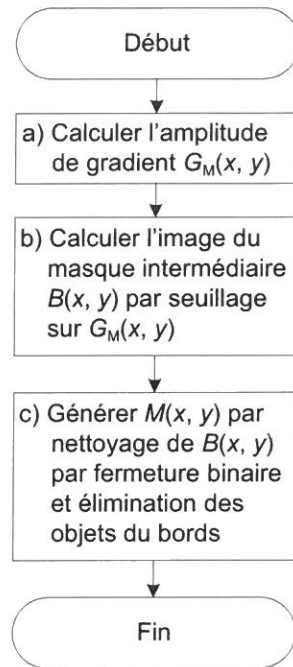


Figure D.8 — Diagramme de la sous-routine en D.2 pour la génération d'une image du masque binaire $M(x, y)$

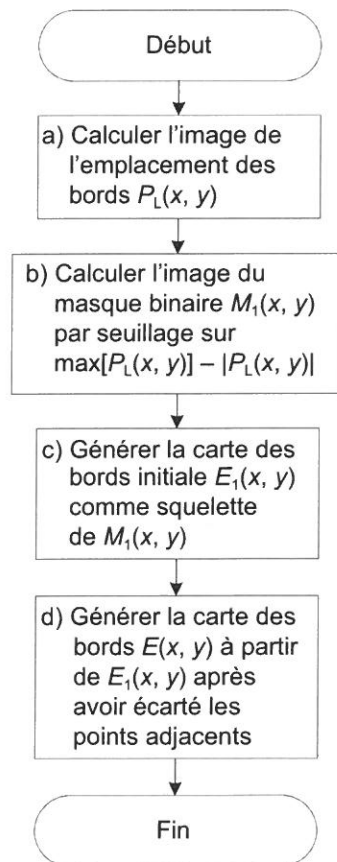


Figure D.9 — Diagramme de la sous-routine en D.3 pour la génération d'une carte de position des bords $E(x, y)$

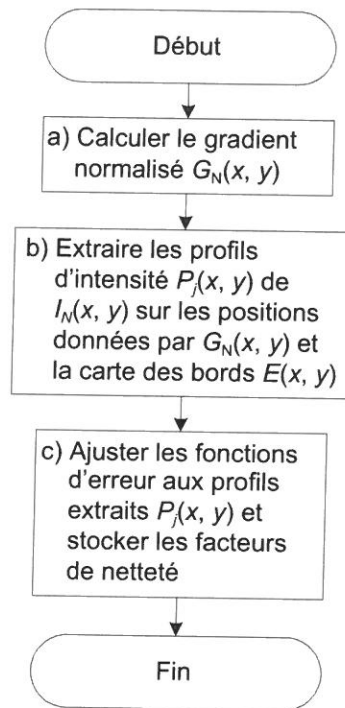


Figure D.10 — Diagramme de la sous-routine en D.4 pour l'extraction des profils de bord $P_f(x, y)$ et l'ajustement du modèle

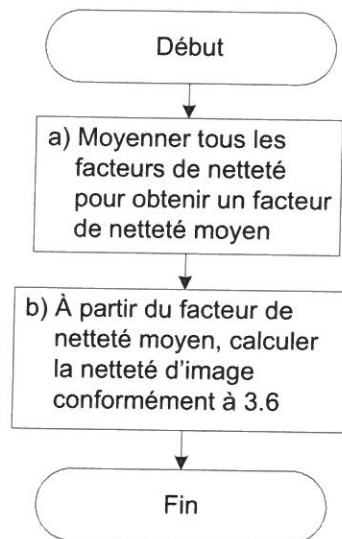


Figure D.11 — Diagramme de la sous-routine en D.5 pour le calcul de la netteté d'image

ISO/TS 24597:2011(F)

D.7 Supplément 1

L'interpolation cubique est donnée par

$$I_N(p_{jx}(\lambda), p_{jy}(\lambda)) = \sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^3 a_{nm} x^n y^m$$

Pour l'équation ci-dessus, les coefficients a_{nm} sont donnés en fixant $xt = p_{jx}(\lambda)$ et $yt = p_{jy}(\lambda)$ comme suit:

$$a_{00} = p_{00}$$

$$a_{01} = p_{y00}$$

$$a_{02} = -3p_{00} + 3p_{01} - 2p_{y00} - p_{y01}$$

$$a_{03} = 2p_{00} - 2p_{01} + p_{y00} + p_{y01}$$

$$a_{10} = p_{x00}$$

$$a_{11} = p_{xy00}$$

$$a_{12} = -3p_{x00} + 3p_{x01} - 2p_{xy00} - p_{xy01}$$

$$a_{13} = 2p_{x00} - 2p_{x01} + p_{xy00} + p_{xy01}$$

$$a_{20} = -3p_{00} + 3p_{10} - 2p_{x00} - p_{x10}$$

$$a_{21} = -2p_{xy00} - p_{xy10} - 3p_{y00} + 3p_{y10}$$

$$a_{22} = 9p_{00} - 9p_{01} - 9p_{10} + 9p_{11} + 6p_{x00} - 6p_{x01} + 3p_{x10} - 3p_{x11} + 4p_{xy00} + 2p_{xy01} + 2p_{xy10} + p_{xy11} \\ + 6p_{y00} + 3p_{y01} - 6p_{y10} - 3p_{y11}$$

$$a_{23} = -6p_{00} + 6p_{01} + 6p_{10} - 6p_{11} - 4p_{x00} + 4p_{x01} - 2p_{x10} + 2p_{x11} - 2p_{xy00} - 2p_{xy01} - p_{xy10} - p_{xy11} \\ - 3p_{y00} - 3p_{y01} + 3p_{y10} + 3p_{y11}$$

$$a_{30} = 2p_{00} - 2p_{10} + p_{x00} + p_{x10}$$

$$a_{31} = p_{xy00} + p_{xy10} + 2p_{y00} - 2p_{y10}$$

$$a_{32} = -6p_{00} + 6p_{01} + 6p_{10} - 6p_{11} - 3p_{x00} + 3p_{x01} - 3p_{x10} + 3p_{x11} - 2p_{xy00} - p_{xy01} - 2p_{xy10} - p_{xy11} \\ - 4p_{y00} - 2p_{y01} + 4p_{y10} + 2p_{y11}$$

$$a_{33} = 4p_{00} - 4p_{01} - 4p_{10} + 4p_{11} + 2p_{x00} - 2p_{x01} + 2p_{x10} - 2p_{x11} + p_{xy00} + p_{xy01} + p_{xy10} + p_{xy11} \\ + 2p_{y00} + 2p_{y01} - 2p_{y10} - 2p_{y11}$$

ISO/TS 24597:2011(F)

où

$$p_{00} = I_N(\text{floor}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{01} = I_N(\text{floor}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{10} = I_N(\text{ceil}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{11} = I_N(\text{ceil}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{x00} = G_x(\text{floor}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{x01} = G_x(\text{floor}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{x10} = G_x(\text{ceil}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{x11} = G_x(\text{ceil}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{y00} = G_y(\text{floor}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{y01} = G_y(\text{floor}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{y10} = G_y(\text{ceil}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{y11} = G_y(\text{ceil}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{xy00} = G_{xy}(\text{floor}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{xy01} = G_{xy}(\text{floor}(xt), \text{ceil}(yt))$$

$$p_{xy10} = G_{xy}(\text{ceil}(xt), \text{floor}(yt))$$

$$p_{xy11} = G_{xy}(\text{ceil}(xt), \text{ceil}(yt))$$

NOTE $\text{ceil}(\dots)$ désigne le plus petit nombre entier supérieur à une fraction particulière (c'est-à-dire arrondissement vers le haut) et $\text{floor}(\dots)$ désigne le plus grand nombre entier inférieur à une fraction particulière (c'est-à-dire élimination de la fraction après la décimale).

// Calculer $\sigma[p]$ ($p = 1, 2, \dots, N$) en minimisant l'erreur d'ajustement donnée par l'Équation (D.11)

POUR $p = 1, 2, \dots, N$

// N = nombre d'ensembles de données obtenus

// sqrt_2 = racine carré de 2

// sqrt_pi = racine carré de 3,14159265358979323846

// valeurs initiales

$b = \text{params}[0] = \min(\text{IN}(x,y))$

$h = \text{params}[1] = \max(\text{IN}(x,y))$

$m = \text{params}[2] = 0$

ISO/TS 24597:2011(F)

```
sigma[p] = params[3] = 2
alpha = 1/(params[3]*sqrt_2)
// Calculer la valeur chisq initiale
Fixer chisq = 0
POUR i = 0, 1, ..., 40
// x[0] = -20, x[1] = -19, ..., x[40] = 20
erf_app = erf(alpha*(x[i]/2 - m))
modèle = b + h*(0,5 + 0,5*erf_app)
déviation = P(x[i]/2) - modèle
chisq += déviation*déviation
FIN POUR
POUR iter = 0, 1, ..., 99
Fixer grad[i] = 0 pour i = 0, 1, ..., 3
Fixer Hessien[i][j] = 0 pour i, j = 0, 1, ..., 3
POUR i = 0, 1, 2, ..., 40
// x[0] = -20, x[1] = -19, ..., x[40] = 20
erf_app = erf(alpha*(x[i]/2 - m))
modèle = b + h*(0,5 + 0,5*erf_app)
déviation = P(x[i]/2) - modèle
Gauss = exp(-(x[i]/2 - m)*(x[i]/2 - m)*alpha*alpha)
d[0] = 1
d[1] = 0,5 + 0,5*erf_app
d[2] = -(h/sqrt_pi)*alpha*Gauss
d[3] = (h/sqrt_pi)*(x[i]/2 - m)*Gauss
grad[0] += -2*d[0]*déviation
grad[1] += -2*d[1]*déviation
grad[2] += -2*d[2]*déviation
grad[3] += -2*d[3]*déviation
POUR j, k = 0, 1, ..., 3
Hessien[j][k] += d[j]*d[k]
```

ISO/TS 24597:2011(F)

```
FIN POUR
FIN POUR
Fixer lamda = 0,001
Fixer diff_chisq = -chisq
POUR iter_line = 0, 1, ..., 49
    POUR k = 0, 1, ..., 3
        Hessien[k][k] *= (1 + lamda)
    FIN POUR
    //Décomposition de Cholesky du Hessien
    Fixer cholesky[j][k] = 0 pour j, k = 0, 1, ..., 3
    POUR k = 0, 1, ..., 3
        Fixer somme = 0
        POUR n = 0, 1, ..., k-1
            somme += cholesky[n][k]*cholesky[n][k]
        FIN POUR
        // sqrt_d = racine carré de d
        d = Hessien[k][k] - somme
        cholesky[k][k] = sqrt_d
        POUR l = k+1, k+2, ..., 3
            Fixer somme2 = 0
            POUR n = 0, 1, ..., k-2
                somme2 += cholesky[n][l]*cholesky[n][k]
            FIN POUR
            cholesky[k][l] = (Hessien[k][l] - somme2)/(cholesky[k][k] + 1,0e-7)
        FIN POUR
    FIN POUR
    // Résolution du vecteur de mise à jour
    // Transmission de la substitution - solution intermédiaire
    Fixer sol1[0] = 0
        sol1[1] = 0
```

ISO/TS 24597:2011(F)

sol1[2] = 0

sol1[3] = 0

POUR k = 0, 1, ..., 3

Fixer somme = 0

POUR n = 0, 1, ..., k-2

somme += cholesky[n][k]*sol1[n]

FIN POUR

sol1[k] = (-0,5*grad[k] - somme)/(cholesky[k][k] + 1,0e-7)

FIN POUR

// Substitution arrière - le vecteur de mise à jour actuel

Fixer mise à jour[0] = 0

mise à jour[1] = 0

mise à jour[2] = 0

mise à jour[3] = 0

POUR k = 3, 2, ..., 0

Fixer somme = 0

POUR n = k+1, k+2, ..., 3

somme += cholesky[k][n]*mise à jour[n]

FIN POUR

mise à jour[k] = (sol1[k] - somme)/(cholesky[k][k] + 1,0e-7)

FIN POUR

b_n = b + mise à jour[0]

h_n = h + mise à jour[1]

m_n = m + mise à jour[2]

alpha_n = alpha + mise à jour[3];

Fixer chisq_n = 0

POUR i = 0, 1, ..., 40

erf_app = erf(alpha_n*(x[i]/2 - m_n));

modèle = b_n + h_n*(0,5 + 0,5*erf_app)

chisq_n += (P(x[i]/2) - mode)*(P(x[i]/2) - modèle)

ISO/TS 24597:2011(F)

```
FIN POUR

SI chisq_n < chisq

    b = b_n

    h = h_n

    m = m_n

    alpha = alpha_n

    lamda = lamda*0,1

    diff_chisq = chisq - chisq_n

    chisq = chisq_n

    interruption

SINON

    lamda = lamda*10,0

FIN SI

FIN POUR// fin de boucle pour iter_line

// Critère d'arrêt

SI (diff_chisq > 0) et (diff_chisq < 0,01)

    interruption

FIN SI

FIN POUR// fin de boucle pour iter

sigma[p] = 1/(alpha*sqrt_2)

FIN POUR// fin de boucle (p = 1, 2, ..., N)
```

D.8 Supplément 2

```
// dilatation binaire

Fixer M0[x][y] = 0 pour x = 0, 1, ..., n-1 et y = 0, 1, ..., m-1.

POUR les emplacements des sur-pixels de x = 1, 2, ..., n-2 et y = 1, 2, ..., m-2

    SI B[x][y] == vrai OU B[x-1][y] == vrai OU B[x+1][y] == vrai OU B[x][y-1] == vrai OU B[x][y+1] == vrai

        M0[x][y] = vrai

    FIN SI

FIN POUR
```

ISO/TS 24597:2011(F)

// érosion binaire

Fixer $M[x][y] = M0[x][y]$ pour $x = 0, 1, \dots, n-1$ et $y = 0, 1, \dots, m-1$.

POUR les emplacements des sur-pixels de $x = 1, 2, \dots, n-2$ et $y = 1, 2, \dots, m-2$

SI $M0[x-1][y] == \text{faux}$ OU $M0[x+1][y] == \text{faux}$ OU $M0[x][y-1] == \text{faux}$ OU $M0[x][y+1] == \text{faux}$

$M[x][y] = \text{faux}$

FIN SI

FIN POUR

// élimination des pixels frontières

POUR les emplacements des sur-pixels de $x = 0, 1, \dots, n-1$ et $y = 0, 1, \dots, m-1$

SI $x < 30$ OU $x > n-30$ OU $y < 30$ OU $y > m-30$

$M[x][y] = 0$

FIN SI

FIN POUR

// marquage des objets

Fixer matrice $C[i] = i$ ($i = 0, 1, \dots, nm$), $LA(x,y) = M(x,y)$, et $NewLabel = 0$, comme valeurs initiales.

POUR les emplacements des sur-pixels de $x = 1, 2, \dots, n-2$ et $y = 1, 2, \dots, m-2$.

SI $LA(x,y) == \text{vrai}$

$lp = LA(x-1,y)$

$lq = LA(x,y-1)$

SI $lp == \text{faux}$ et $lq == \text{faux}$, incrémenter $NewLabel$ par 1, et ensuite fixer $lx = NewLabel$.

SINON SI $lp \neq \text{faux}$, et $lq \neq \text{faux}$,

SI $C[lp] \neq C[lq]$,

POUR ALL $k=0, 1, \dots, NewLabel$

SI $C[k] == C[lp]$, fixer $C[k] = C[lq]$.

FIN POUR

FIN SI

Fixer $lx = lq$.

SINON SI $lp = \text{faux}$ et $lq \neq \text{faux}$, fixer $lx = lq$.

SINON SI $lp \neq \text{faux}$ et $lq = \text{faux}$, fixer $lx = lp$.

FIN SI

Fixer $LA[x,y] = lx$.

FIN SI

FIN POUR

POUR les emplacements des sur-pixels de $x = 0, 1, \dots, n-1$ et $y = 0, 1, \dots, m-1$.

SI $LA(x,y) \neq \text{faux}$, fixer $LA(x,y) = C[LA(x,y)]$.

FIN POUR

Fixer $NO = NewLabel$.

ISO/TS 24597:2011(F)

```
// comptage du nombre de pixels par objet
Fixer matrice OS[0] = OS[1] = ..... = OS[NO+1] = 0.
POUR les emplacements des sur-pixels de x = 0, 1, ..., n-1 et y = 0, 1, ..., m-1
    incrémenter OS[LA[x][y]] par 1.
FIN POUR

// élimination des objets ayant moins de 50 pixels
POUR les positions des sur-pixels x = 0, 1, ..., n-1 et y = 0, 1, ..., m-1
    SI OS[LA[x][y]] < 50
        LA[x][y] = 0
    FIN SI
FIN POUR

// squelette binaire
Effectuer la routine suivante jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de pixel squelette.
E1[x][y] = M2[x][y] pour x = 0, 1, ..., n-1 et y = 0, 1, ..., m-1.
POUR les emplacements des sur-pixels de x = 1, 2, ..., n-2 et y = 1, 2, ..., m-2
    SI M2[x-1][y] == faux OU M2[x+1][y] == faux
        OU M2[x][y-1] == faux OU M2[x][y+1] == faux
        // condition 1) ne pas éliminer les pixels simples et condition 3) ne pas rompre la connectivité
        SI trois ou quatre des conditions ci-dessus sont vérifiées
            CONTINUER
        FIN SI
        // condition 2) ne pas rompre la connectivité
        SI deux des conditions ci-dessus sont vérifiées
            SI M2[x-1][y] == faux et M2[x+1][y] == faux
                CONTINUER
            FIN SI
            SI M2[x][y-1] == faux et M2[x][y+1] == faux
                CONTINUER
            FIN SI
        FIN SI
    FIN SI
    E1[x][y] = faux
FIN SI
FIN POUR
```

ISO/TS 24597:2011(F)

// élimination des points

Fixer $i = 0$.

POUR les emplacements des sur-pixels de $x = 0, 1, \dots, n-1$ et $y = 0, 1, \dots, m-1$

SI $E1[x][y]$ est vrai

$px[i] = x$

$py[i] = y$

incrémenter i par 1

FIN SI

FIN POUR

Vérifier la distance entre deux points quelconques de 10 ou plus, durant la boucle suivante.

POUR $j = 0$ à $i - 1$

SI $\text{mod}(j, 10)$ est vrai

$E[px[j]][py[j]] = \text{vrai}$

SINON SI

$E[px[j]][py[j]] = \text{faux}$

FIN SI

FIN POUR

D.9 Supplément 3

La netteté de bord moyenne σ , telle que donnée par l'Équation (D.12), est comme suit:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i$$

Dans un premier temps, vérifier la forme de la distribution de σ_j ($j = 1, 2, \dots, N$).

NOTE Si la forme de la distribution est loin d'être gaussienne, la netteté de bord moyenne σ obtenue est moins fiable (voir Figure D.12).

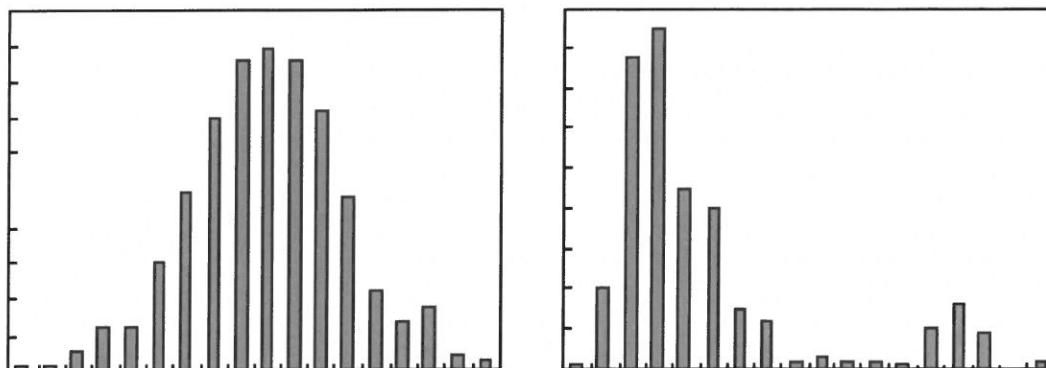


Figure D.12 — Exemples de distribution de σ_j

Puis, vérifier la fiabilité de la netteté de bord moyenne σ comme suit:

- a) Calculer la variance à l'aide de

$$V^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma - \sigma_i)^2}{N}$$

- b) Calculer le facteur F_R pour la limite de confiance à l'aide de

$$F_R = \frac{t_\alpha \times \sqrt{V^2}}{\sqrt{N-1}}$$

en utilisant une valeur de t_α obtenue par interpolation à partir des valeurs données dans le Tableau D.1.

Tableau D.1
(Fiabilité de 90 %)

N	t_α
10	1,812
20	1,725
30	1,697
40	1,684
60	1,671
120	1,658
Infini	1,645

NOTE La valeur moyenne de la netteté de bord se situe dans l'intervalle $(\sigma - F_R, \sigma + F_R)$ avec une fiabilité de 90%. Ici, la netteté de bord moyenne σ (l'écart-type du profil gaussien) est la moyenne de l'échantillon. Par exemple, si $\sigma = 3$ et $F_R = 1$, le «vrai σ » se situe dans l'intervalle donné par $2 < \text{«vrai } \sigma \text{»} < 4$ avec une fiabilité de 90 %.

- c) Si $F_R > 1$, la valeur σ obtenue n'est pas considérée comme suffisamment fiable.

D.10 Supplément 4

La transformée de Fourier (TF) de la fonction de distribution gaussienne est donnée par

$$\text{FT}[\exp(-ax^2)] = \frac{1}{\sqrt{2a}} \exp\left(-\frac{\omega_x^2}{4a}\right) \quad \text{pour } a > 0$$

et, la TF de la fonction dérivée est donnée par

$$\text{FT}\left[\frac{d^n f(x)}{dx^n}\right] = (-\sqrt{-1})^n \times \omega_x^n \times F(\omega_x)$$

où

$$F(\omega_x) = \text{FT}[f(x)];$$

ω_x est la fréquence angulaire ($2\pi \times$ fréquence) correspondant à x .

Ces équations peuvent être utilisées pour le calcul de la convolution.

ISO/TS 24597:2011(F)

Annexe E
(informative)

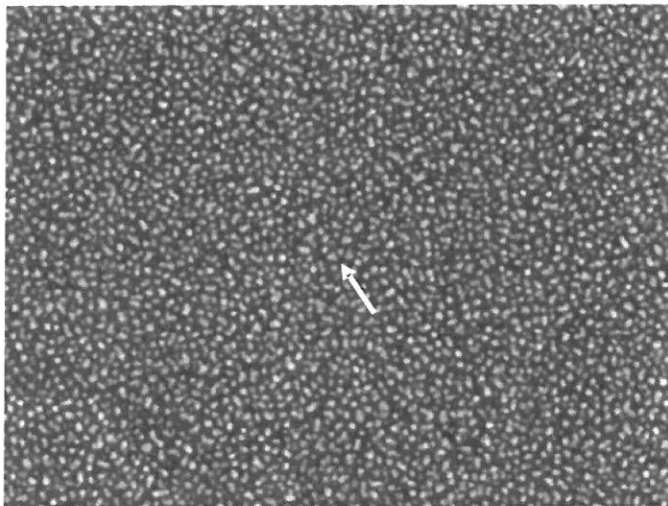
Contexte de l'évaluation de la netteté d'image

E.1 Généralités

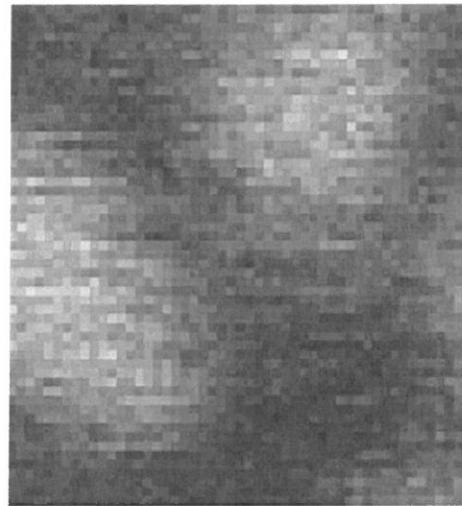
La présente annexe fournit le contexte de l'évaluation de la netteté d'image et le contexte théorique de la définition de la netteté d'image utilisée dans la présente Spécification technique.

E.2 Méthode conventionnelle d'évaluation de la netteté d'image

La netteté d'une image MEB est définie comme étant la distance minimale entre deux particules voisines qui peuvent seulement être résolues. En conséquence, la netteté dépend du contraste et du bruit de l'image, c'est-à-dire du rapport contraste sur bruit. Une méthode d'évaluation type de la netteté d'image en MEB est une méthode de mesure des intervalles. Dans cette méthode, la netteté d'image est évaluée en mesurant l'intervalle entre deux particules voisines dans une image MEB comme le montre la Figure E.1 a). La Figure E.1 b) montre l'image agrandie numériquement au niveau de l'intervalle indiqué par la flèche sur la Figure E.1 a).



a) Image MEB utilisée pour évaluer la netteté d'image



b) Image agrandie numériquement au niveau de l'intervalle

Figure E.1 — Image MEB et une image agrandie au niveau de la zone de l'intervalle

Comme le montre la Figure E.1 b), il est difficile de déterminer clairement les frontières de l'intervalle à cause du bruit de l'image. Par conséquent, le résultat de l'évaluation de la netteté d'image par la méthode conventionnelle des intervalles est tributaire de l'erreur humaine car la largeur de l'intervalle entre des particules voisines dans une image MEB est mesurée à l'œil humain sur la base de la netteté observée des bords de ces particules. Afin d'éviter les erreurs, il est préférable d'utiliser des techniques de traitement d'image appropriées à l'évaluation de la netteté d'image de sorte qu'un même résultat soit obtenu par tous.

E.3 Concept de la netteté d'image tel que défini dans la présente Spécification technique

Jusqu'à présent, plusieurs algorithmes informatiques tels que la méthode de la transformée de Fourier (TF), la méthode contraste sur gradient (CG), la méthode de la dérivée (DR) ont été développés pour évaluer la netteté d'une image MEB (voir Annexes B à D). La méthode de la transformée de Fourier (TF) a été développée sur la base d'une méthode de TF classique en ajoutant un nouvel algorithme pour extraire la composante du bruit de la composante de l'image dans une image MEB. D'autre part, la méthode contraste sur gradient (CG) et la méthode de la dérivée (DR) ont été développées afin d'évaluer la netteté d'image en utilisant un concept similaire à celui de la méthode conventionnelle utilisant les informations sur la netteté observée aux bords. Cependant, aucun des algorithmes n'a été autorisé comme référence pour un usage international. La présente Spécification technique permet de normaliser les algorithmes informatiques utilisés pour évaluer la netteté d'image sur la base de la méthode conventionnelle nouvellement améliorée (méthode TF) et les méthodes CG et DR nouvellement développées, de sorte que l'on puisse déterminer la netteté d'image à partir d'une image MEB sans intervention humaine. La mesure varie en fonction de la méthode utilisée parce que chaque méthode utilise une procédure différente pour prendre en compte le bruit de l'image. Cependant, les différences entre les résultats obtenus pour la netteté d'image peuvent être maintenues à un niveau acceptable en utilisant des images ayant un rapport contraste sur bruit de 10 ou plus (voir Annexe F). Il est à noter que, bien que les profils de faisceau réels en MEB présentent des formes variées, les images utilisées pour l'évaluation dans la présente Spécification technique sont celles produites par la convolution d'une image binaire par un profil gaussien de facteur de netteté 2σ , où σ est l'écart-type de la distribution gaussienne. Le concept utilisé dans l'ensemble du présent document consiste à déterminer dans un premier temps le facteur de netteté (2σ) à partir de l'image convoluée et ensuite à calculer la netteté de l'image à partir de la formule $2\sigma\sqrt{2}$. Afin d'évaluer la netteté d'image en utilisant la présente Spécification technique, il est nécessaire d'utiliser un échantillon approprié pour obtenir l'image MEB.

E.4 Comparaison de la définition de la netteté d'image dans la présente Spécification technique avec les définitions utilisées conventionnellement

Le critère de Rayleigh est généralement appliqué à la définition de la netteté d'image pour des objets ponctuels. Selon le critère de Rayleigh, la netteté est définie comme étant la distance (R_d) entre deux objets ponctuels lorsque le creux concave des profils superposés représente 74 % du maximum, comme le montre la Figure E.2. La distance R_d est donnée par

$$R_d = 0,61\lambda\alpha$$

où

λ est la longueur d'onde;

α est une ouverture numérique (NA).

ISO/TS 24597:2011(F)

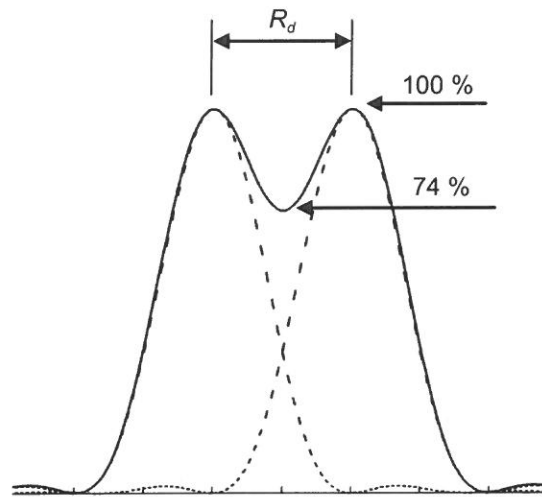


Figure E.2 — Deux profils superposés (modèles d'Airy) répondant au critère de Rayleigh

D'autre part, il est impossible d'évaluer la netteté d'images MEB d'objets ponctuels car tous les objets dans les images MEB ont des dimensions finies. La Figure E.3 montre a) une image binaire de deux objets circulaires ayant un diamètre de 20 pixels et avec une séparation de 14 pixels et b) son image convoluée avec un facteur de netteté (2σ) de 20 pixels. La séparation de 14 pixels à la Figure E.3 a) correspond à $2\sigma\sqrt{2}$ (le critère de netteté utilisé dans la présente Spécification Technique) lorsque le facteur de netteté (2σ) est de 20 pixels. La Figure E.4 montre un profil de raie de l'image convoluée b) à la Figure E.3. La profondeur du creux entre les deux particules est de 60 % du maximum, correspondant à un contraste équivalent ou à un meilleur contraste par comparaison avec le critère conventionnel proposé par Rayleigh (voir Figure E.2). Ainsi, la définition de la netteté d'image comme étant $2\sigma\sqrt{2}$ est pratique comparée au critère conventionnel.

NOTE La netteté d'image définie dans la présente Spécification technique est la moitié de la valeur utilisée par le critère de Rayleigh ($4\sigma\sqrt{2}$).

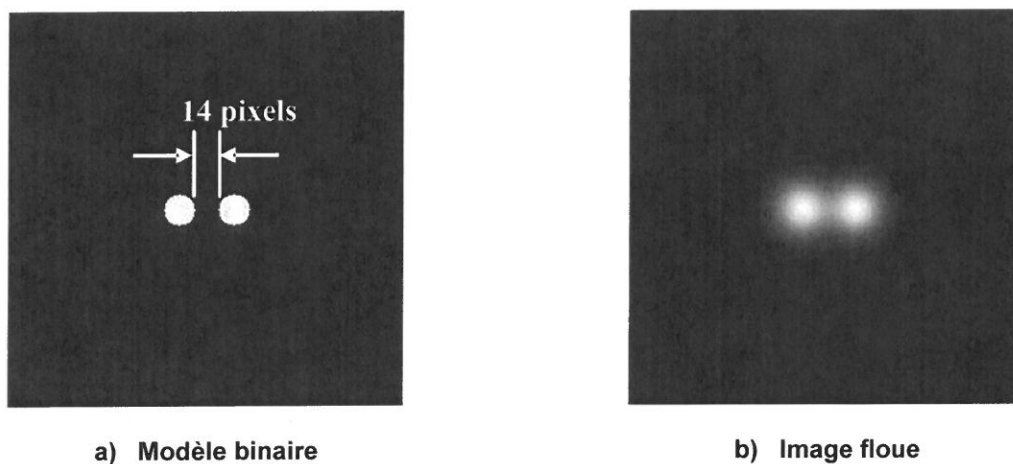
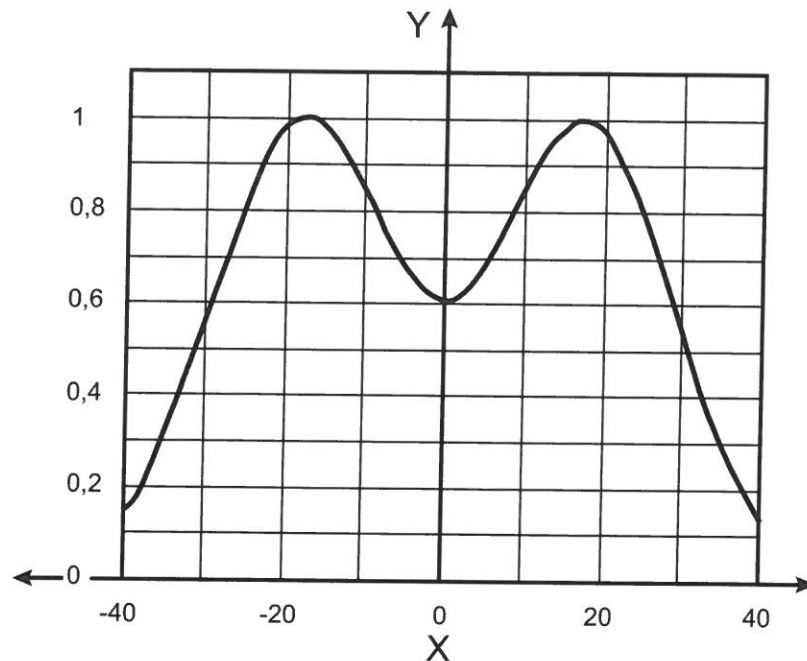


Figure E.3 — Modèle binaire, a), et image floue, b) produite par un profil gaussien avec un facteur de netteté (2σ) de 20 pixels (le modèle binaire est constitué de deux cercles voisins ayant un diamètre de 20 pixels distants de 14 pixels)



Légende

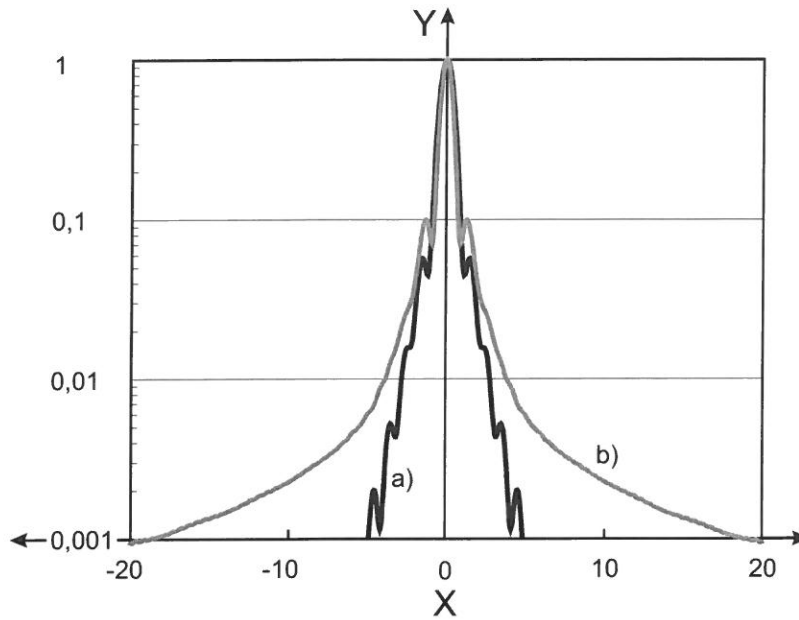
- X position du profil de raie (pixels)
- Y intensité du signal (unités arbitraires)

Figure E.4 — Profil de raie d'une image floue

E.5 Difficultés pour déterminer la taille de sonde à partir des images MEB

Le profil d'un faisceau primaire dans un MEB est généralement considéré comme étant une distribution gaussienne et la taille du faisceau est souvent définie comme étant la largeur à mi-hauteur (FWHM). Cependant, en réalité, le profil de faisceau d'un MEB présente des formes variées en fonction de l'importance de la diffraction des électrons et des aberrations des lentilles. La Figure E.5 montre les profils de faisceau calculés dans différentes conditions de faisceaux dans les cas où a) la diffraction des électrons est dominante dans le système optique et b) les aberrations de la lentille sont dominantes dans le système optique. Le profil de faisceau a) à la Figure E.5 peut être approximé grossièrement à une distribution gaussienne. Toutefois, le profil de faisceau b) à la Figure E.5 présente une forte divergence par rapport à la distribution gaussienne du fait d'un important élargissement du faisceau produit par les aberrations de la lentille. Du fait que les profils de faisceau a) et b) représentés à la Figure E.5 ont les mêmes valeurs FWHM, les tailles de faisceau, lorsqu'elles sont simplement définies comme étant la FWHM, sont identiques pour les deux profils. La Figure E.6 montre les images MEB obtenues dans les conditions représentées par les profils a) et b) à la Figure E.5. Comme le montre la Figure E.6, la qualité de l'image MEB a) est très différente de celle de l'image MEB b), même si les valeurs FWHM des faisceaux sont identiques. Généralement, les profils de faisceau réels ne sont pas connus lors de l'évaluation de la netteté d'image. Le contraste des images MEB est affecté par l'interaction entre l'échantillon et les électrons primaires. Il est impossible de déterminer le profil de faisceau (ou la taille de faisceau) simplement à partir de l'image MEB. C'est la raison pour laquelle la présente Spécification technique ne s'applique pas à la mesure de la taille du faisceau (sonde) d'un MEB.

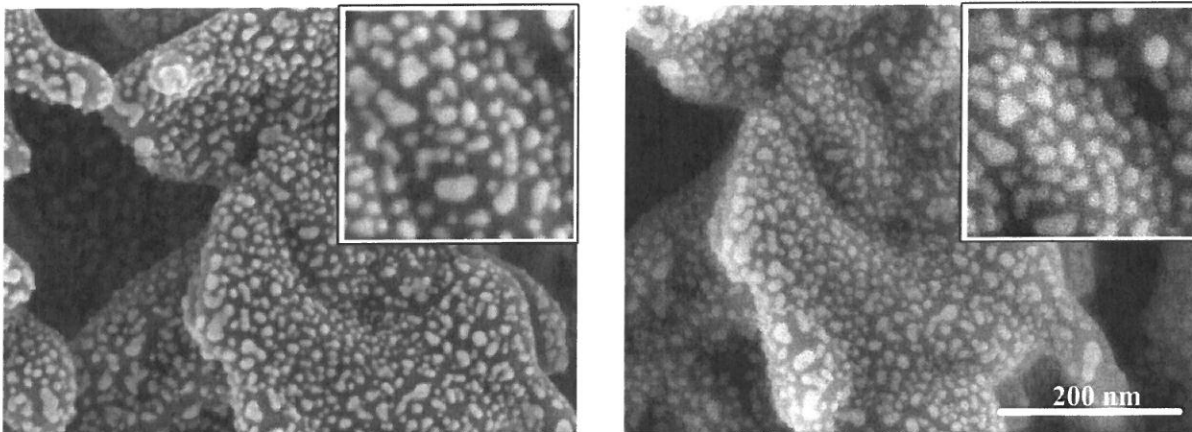
ISO/TS 24597:2011(F)



Légende

- X position du profil de faisceau (nm)
- Y intensité relative (unités arbitraires)

**Figure E.5 — Profils de faisceau calculés dans différentes conditions de faisceaux:
a) principalement diffraction des électrons et b) principalement aberrations des lentilles**



a) Image influencée principalement par la diffraction

b) Image influencée principalement par les aberrations des lentilles

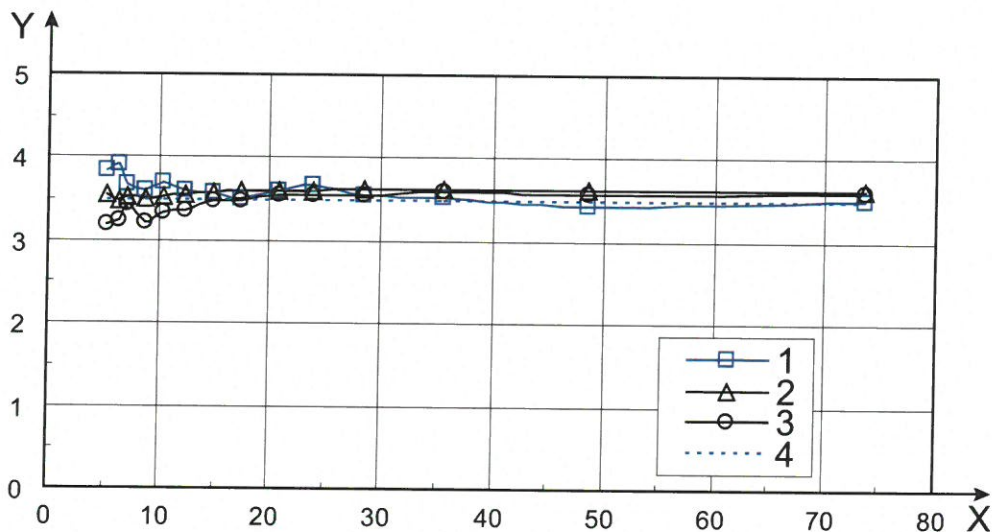
Figure E.6 — Images MEB obtenues dans différentes conditions de faisceaux

Annexe F (informative)

Caractéristiques et adéquation des différentes méthodes d'évaluation

F.1 Dépendance de la netteté d'image au bruit de l'image

La netteté d'image dépend généralement du rapport contraste sur bruit (CNR) de l'image MEB. La Figure F.1 montre la dépendance de la valeur évaluée de la netteté d'image à la valeur du CNR pour les méthodes TF, CG et DR. Pour les évaluations, il convient que la valeur du CNR soit de 10 ou plus.



Légende

X CNR

Y netteté d'image évaluée R

1 méthode FT

2 méthode CG

3 méthode DR

4 théorique

Figure F.1 — Exemple de la dépendance de la netteté d'image à la valeur du CNR pour une image simulée avec une netteté ($\sqrt{2}\sigma$) de 3,472 pixels

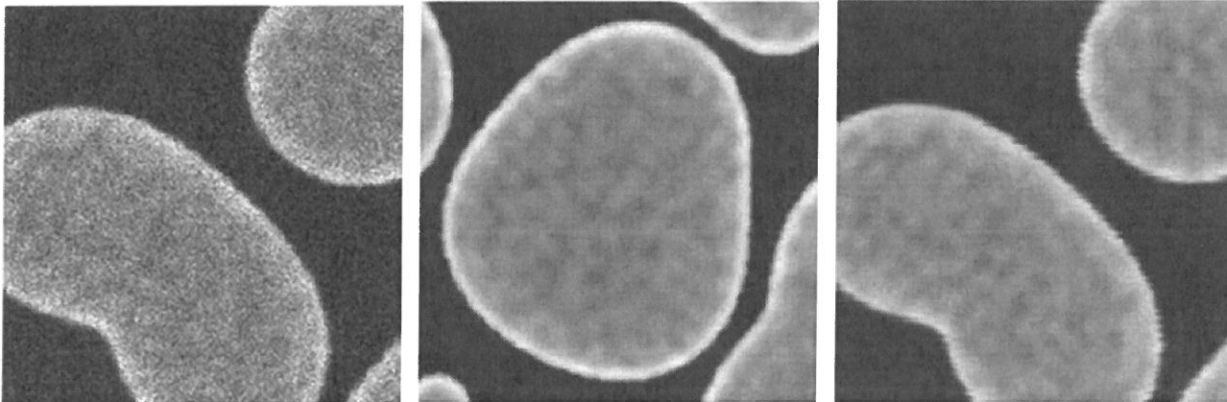
F.2 Paramètres à utiliser pour les méthodes TF, CG et DR ayant une influence sur les images

La netteté d'image est influencée par le bruit, l'effet de bord, la vibration, l'astigmatisme, la défocalisation et la densité des particules. Le Tableau F.1 montre les limites maximales de ces paramètres pour les méthodes d'évaluation. La Figure F.2 montre des exemples d'images MEB influencées de façon notable par chacun de ces paramètres.

ISO/TS 24597:2011(F)

Tableau F.1 — Limites maximales

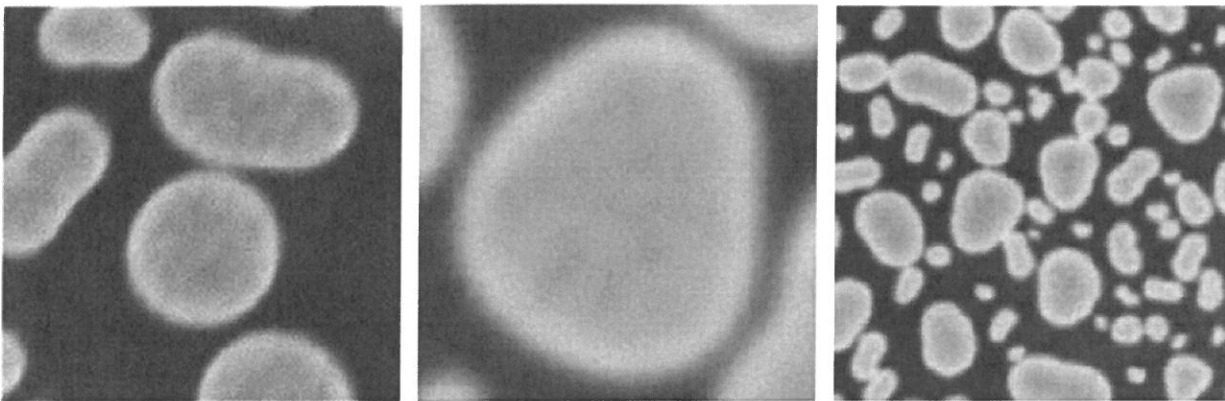
	Importance de l'effet				
	Très faible	Faible	Moyen	Important	Très important
Bruit					
Effet de bord					
Vibration					
Astigmatisme					
Défocalisation					
Densité des particules					



a) Bruit (CNR ≈ 10)

b) Effet de bord

c) Vibration



d) Astigmatisme

e) Défocalisation

f) Densité des particules

NOTE 1 Les bords des particules dans ces images (excepté l'image défocalisée) ont été amincis pour une meilleure visualisation.

NOTE 2 Il convient que les images soient constituées par des particules. Les images constituées par des motifs ligne-et-espace sont inacceptables.

Figure F.2 — Exemples d'images MEB à utiliser pour les méthodes TF, CG et DR
 [une partie seulement (210 × 210 pixels) des images est représentée]

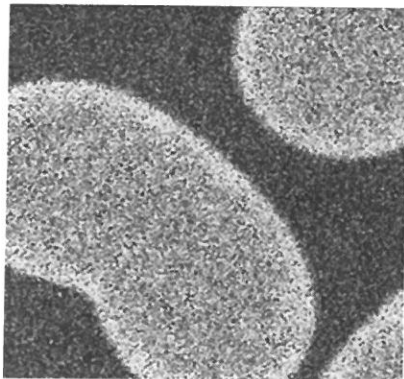
F.3 Adéquation des méthodes TF, CG, DR et CNR

Le Tableau F.2 montre l'adéquation des méthodes TF, CG, DR et CNR jugée en fonction de l'effet des différents paramètres qui influencent l'image MEB. La Figure F.3 montre des exemples d'images ayant un niveau de bruit très élevé, un effet de bord très important, un niveau de vibration très élevé, un astigmatisme très important, une défocalisation très importante ou un contraste très faible, correspondant aux indications données dans le Tableau F.1.

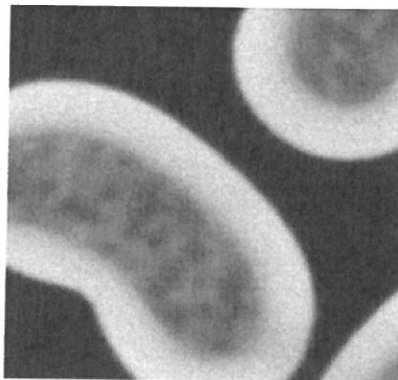
Tableau F.2 — Adéquation des méthodes TF, CG, DR et CNR

Méthode d'évaluation	Niveau de bruit très élevé	Effet de bord très important	Niveau de vibration très élevé	Astigmatisme très important	Défocalisation très importante	Densité des particules très importante	Très faible contraste
TF	G	NGNB	B	B	NGNB	NGNB	G
CG	B	NGNB	NGNB	G	G	G	G
DR	G	G	B	B	NGNB	NGNB	B
CNR	G	G	B	G	G	G	G

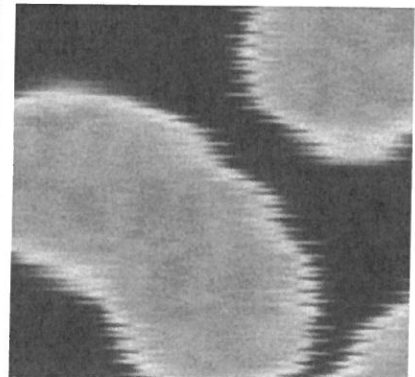
G: bonne;
 B: mauvaise;
 NGNB: ni bonne ni mauvaise.



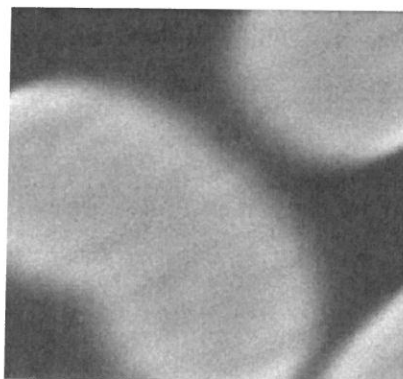
a) Niveau de bruit très élevé



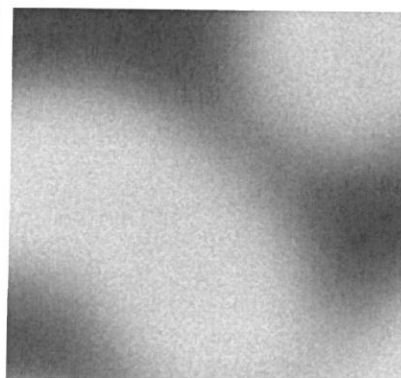
b) Effet de bord très important



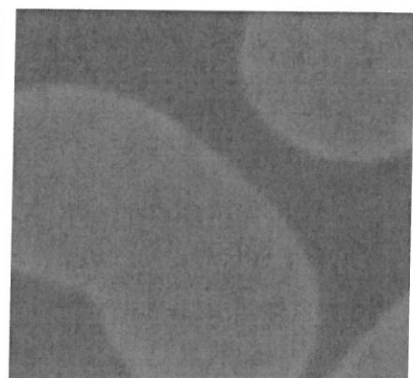
c) Niveau de vibration très élevé



d) Astigmatisme très important



e) Défocalisation très importante



f) Contraste très faible

Figure F.3 — Exemples d'images ayant un niveau de bruit très élevé, un effet de bord très important, un niveau de vibration très élevé, un astigmatisme très important, une défocalisation très importante ou un contraste très faible [une partie seulement (200 × 200 pixels) des images est représentée]

ISO/TS 24597:2011(F)

F.4 Valeur minimale de la netteté d'image

Il convient de que la netteté d'image R soit supérieure ou égale à 2,0 pixels. Si $R < 2,0$ pixels, acquérir une nouvelle image MEB avec une dimension de pixel inférieure (ou avec un grandissement d'image plus élevé), et effectuer à nouveau l'évaluation.

Annexe G (informative)

Méthode de préparation des échantillons d'essai pour évaluer la netteté d'image

G.1 Généralités

La présente annexe fournit les techniques de base sur la façon de préparer des échantillons d'essai avant d'effectuer l'imagerie et l'évaluation de la netteté d'image.

G.2 Particules d'or déposées sur un substrat de carbone en utilisant l'évaporation sous vide

Des particules d'or sur un substrat de carbone sont utilisées pour évaluer la netteté des images MEB. La combinaison de particules d'or et d'un substrat de carbone est essentielle pour maximiser la visibilité des bords de grain afin d'évaluer la netteté des images MEB. Des particules d'or de différentes tailles sont largement utilisées comme échantillons d'essai. Le dépôt sous vide est l'une des techniques les plus populaires pour préparer des films métalliques minces sur des substrats solides.

Un substrat de carbone poli ou un substrat de HOPG (graphite pyrolytique fortement orienté) est souvent traité par bombardement d'un faisceau d'ions ou par décapage plasma afin d'obtenir une distribution homogène des particules d'or déposées par évaporation. La Figure G.1 est une image MEB de particules d'or déposées sur un substrat de HOPG en utilisant l'évaporation sous vide. Le substrat a été traité par décapage plasma pendant 5 min avant dépôt des particules d'or.

G.3 Particules d'or nanométriques déposées sur un substrat de HOPG en utilisant un évaporateur

Une autre technique de préparation de l'échantillon proposée pour évaluer la netteté d'image dans une gamme de grandissement élevé consiste en l'utilisation de particules d'or nanométriques déposées sur un substrat de HOPG au moyen d'un évaporateur conventionnel afin d'obtenir une épaisseur moyenne d'environ 1 nm. La taille des particules d'or peut être aisément contrôlée en faisant varier la durée de pulvérisation. Avant de procéder à l'observation au MEB, un recuit de l'échantillon à environ 180 °C sous vide sec est efficace pour réduire le dépôt d'une contamination induite par le faisceau. La granularité et la distribution homogène des particules d'or sur HOPG ont été démontrées à un grandissement de $\times 800k$. La taille moyenne des grains est de 3,2 nm et l'écart-type est de 1,3 nm lorsque les particules d'or sont enrobées sur HOPG avec une épaisseur moyenne de 0,7 nm. Un exemple d'une image MEB de particules d'or nanométriques sur un substrat de HOPG est représenté à la Figure G.2.

ISO/TS 24597:2011(F)

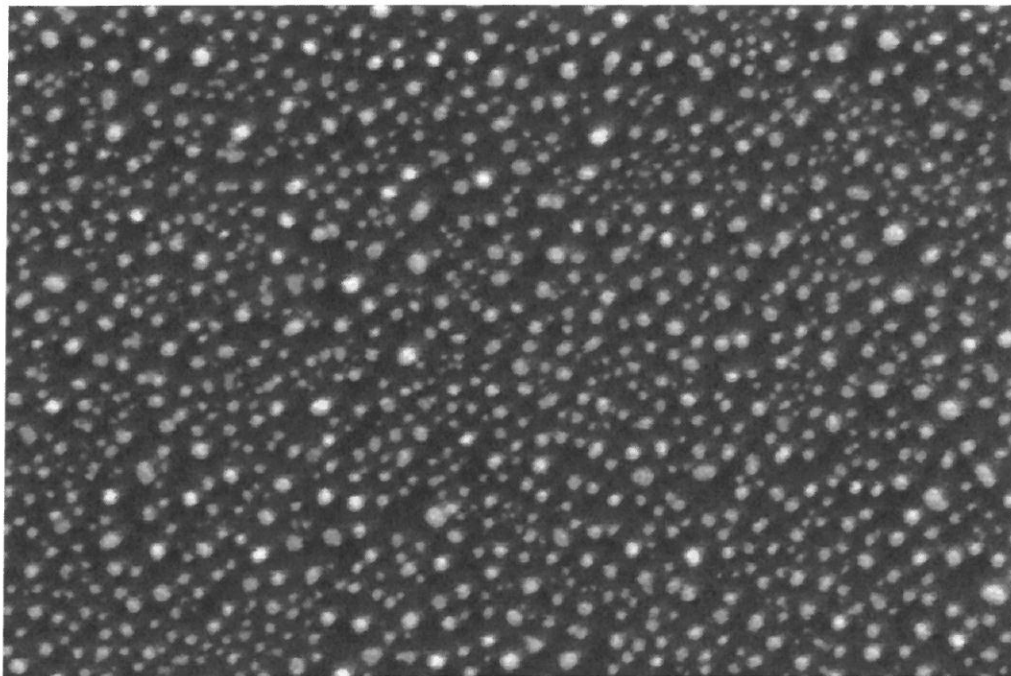


Figure G.1 — Image MEB de particules d'or déposées sur un substrat de HOPG en utilisant l'évaporation sous vide (le substrat a été traité par décapage plasma avant dépôt)

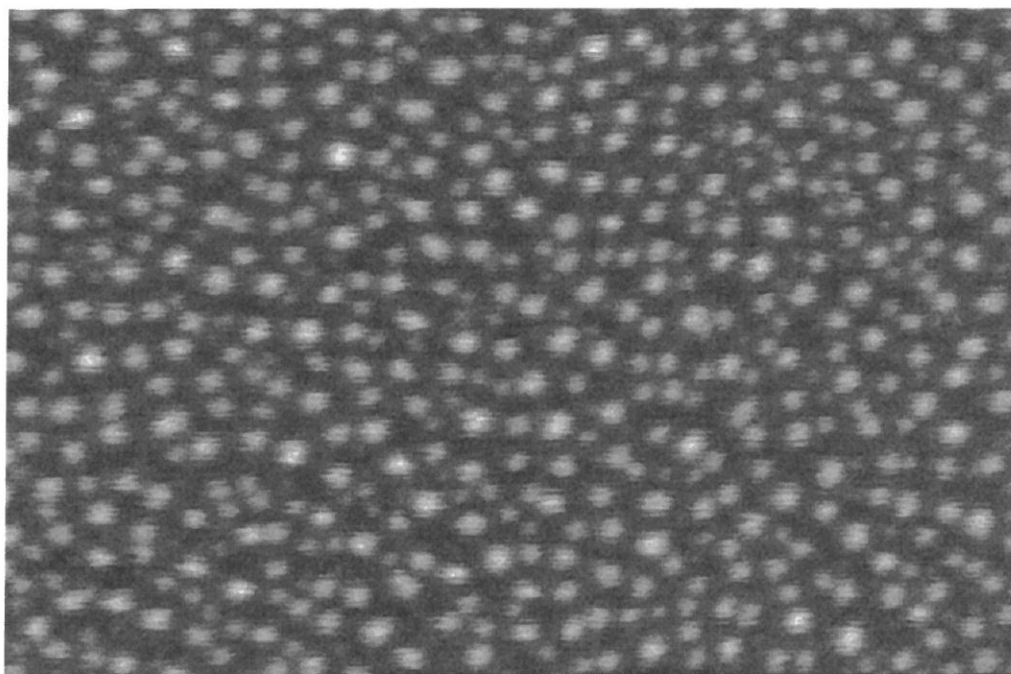


Figure G.2 — Image MEB de particules d'or nanométriques sur un substrat de HOPG (les particules d'or ont été déposées à l'aide d'un évaporateur)

Annexe H (informative)

Exemple de rapport d'essai

H.1 Rapport d'essai pour l'évaluation de la netteté d'image

Un exemple de rapport d'essai est donné sur la page suivante.

Le rapport d'essai comporte deux tableaux. Le Tableau 1 est destiné aux informations relatives au fichier d'image original. Le Tableau 2 est destiné aux informations relatives à la méthode d'évaluation et aux résultats obtenus pour l'image évaluée.

Il convient que l'image utilisée pour l'évaluation, sélectionnée à partir d'une image originale, soit conservée.

ISO/TS 24597:2011(F)

Rapport d'essai de la netteté d'image

Identification de l'établissement	Identification du client	
Nom du laboratoire:	Nom du client:	Date:
Adresse du laboratoire:	Adresse du laboratoire:	Matériau de référence:
Numéro du rapport d'essai:		
Identification de l'autorité et de l'opérateur	Identification du modèle de l'appareil	Référence ISO: ISO/TS 24597
Nom et signature de la personne ayant autorité:	Nom du fabricant:	
.....	Modèle:	
.....	Numéro de série:	
Nom de l'opérateur:		

Tableau 1: Informations relatives à l'image originale

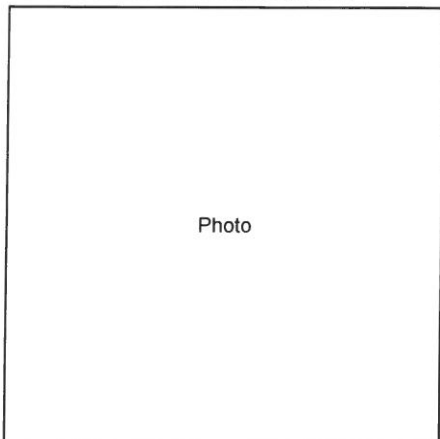
Nom du fichier de l'image originale	Taille d'image (pixels)	Tension d'accélération (kV)	Distance de travail (mm)	Grandissement d'image	L_{image} (mm)	N_p (pixels)	L_{scale} (nm)	N_{scale} (pixels)	L_p (nm)	Remarques
Taille d'image: 640×480, 1280×960, 2560×1920, etc.					L_{image} : Largeur horizontale de l'image originale N_p : Nombre de pixels sur la largeur horizontale de l'image originale L_{scale} : Longueur du marqueur d'échelle sur l'image originale N_{scale} : Nombre de pixels contenu dans la longueur du marqueur d'échelle L_p : Dimension d'un pixel (voir 4.5.2 et 4.5.3)					

Tableau 2: Résultats de l'évaluation

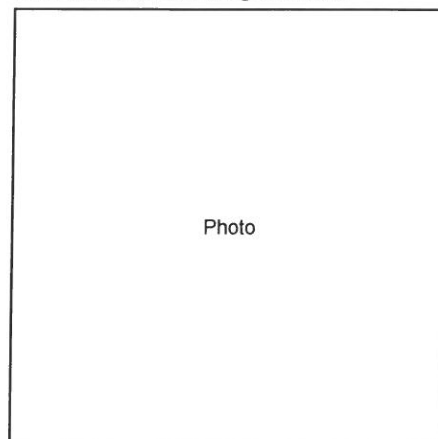
N°	Nom du fichier de l'image évaluée	Nom du fichier binarisé	Dimension de l'image sélectionnée (pixels)		Méthode d'évaluation			R_{PX} (pixels)	R_L (pixels)	Remarques
			512×512	autre	FT	CG	DR			
Nom du fichier de l'image évaluée:		Image sélectionnée à partir de l'image originale								
Nom du fichier binarisé:		Image binarisée de l'image sélectionnée (si nécessaire)								
Dimension de l'image (pixels):		512×512 ou autre (spécifier le nombre de pixels)								
Méthode d'évaluation:		FT, CG ou DR								
R_{PX} :		Netteté d'image (pixels)			$R_{PX} = 2\sigma/\sqrt{2}$					
R_L :		Netteté d'image (nm)			$R_L = L_p \times R_{PX}$					

Images jointes

Nom du fichier de l'image originale:



Nom du fichier de l'image évaluée:



ISO/TS 24597:2011(F)

Bibliographie

Méthode FT

- [1] BRIGHAM, E.O., *The first Fourier Transform*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974
- [2] BURRUS, C.S. and PARKS, T.W., *DFT/FFT and Convolution Algorithms*, Wiley, 1984
- [3] COOLEY, J.W. and TUKEY, J.W., An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comput.*, **19**, pp. 297-301, 1965
- [4] DODSON, D.A. and JOY, D.C., Fast Fourier transform techniques for measuring SEM resolution. *Proc. 12th Int. Congr. Electron Microscopy*, pp. 406-407, 1990
- [5] ERASMUS, S.J., HOLBURN, D.M. and SMITH, K.C.A., On-line computation of diffractograms for the analysis of SEM images. *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **52**, pp. 73-76, 1980
- [6] FRANK, J., Determination of source size and energy spread from electron micrographs using the method of Young's fringes, *Optik*, **44**, pp. 379-391, 1976
- [7] FRANK, J., "The role of correlation techniques in computer image processing" in *Computer Processing of Electron Microscope Images*, pp. 187-222, Springer-Verlag, 1980
- [8] JOY, D.C., KO, Y-U. and HWU, J.J., Metrics of resolution and performance for CD-SEMs, *Proc. SPIE Metrology Inspection and Process Control for Microlithography XIV*, **3998**, pp. 108-115, 2000
- [9] JOY, D.C., SMART — a program to measure SEM resolution and image performance, *J. Microsc.*, **208**, pp. 24-34, 2002
- [10] LORUSSO, G.F. and JOY, D.C., Experimental resolution measurement in critical dimension scanning electron microscope metrology, *Scanning*, **25**, pp. 175-180, 2003
- [11] MARTINE, H., PERRET, P., DESPLAT, C. and REISSE, P., New approach in scanning electron microscope resolution evaluation, *Proc. SPIE Integrated Circuit Metrology, Inspection, and Process Control IX*, **2439**, pp. 310-318, 1995
- [12] MATSUYA, M. and SAITO, M., Noise effect on the measurement of SEM resolution, *Proc. 3rd Symposium on Charged Particle Optics*, September 18-19, pp. 13-16, 2003
- [13] MATSUYA, M. and SAITO, M., Effective parameters of estimating SEM resolution by a Fourier transform (FT) method, *Proc. 8th Asia-Pacific Conference on Electron Microscopy (8APEM)*, Kanazawa, Japan, June 7-11, pp. 50-51, 2004
- [14] MATSUYA, M., YOSHIDA, K. and SAITO, M., A New Algorithm to Estimate SEM Image Resolution Using the Fourier Transform, *Proc. 16th International Microscopy Congress (IMC16)*, Sapporo, Japan, September 3-8, Vol. 2, p. 580, 2006
- [15] OHO, E., HOSHINO, Y. and OGASHIWA, T., New generation scanning electron microscopy technology based on the concept of active image processing, *Scanning*, **19**, pp. 483-488, 1997
- [16] OHO, E. and TOYOMURA, K., Strategies for optimum use of superposition diffractogram in scanning electron microscopy. *Scanning*, **23**, pp. 351-356, 2000

ISO/TS 24597:2011(F)

Méthode CG

- [17] ISHITANI, T. and SATO, M., Influence of a combination of random noise and pattern-edge width (in pixels) on contrast-to-gradient image sharpness in scanning electron microscopy, *J. Electron Microscopy*, **55**, pp. 253-2607, 2006
- [18] ISHITANI, T. KAMIYA, C and SATO, M., Influence of random noise on the contrast-to-gradient image-sharpness in scanning electron microscopy, *J. Electron Microscopy*, **54**, pp. 85-97, 2005

Méthode de la dérivée

- [19] LORUSSO, G.F. and JOY, D.C., Experimental Sharpness Measurement in Critical Dimension Scanning Electron Microscope Metrology, *Scanning*, **25(4)**, pp. 175-180, 2003
- [20] DIJK, J. *et al.*, A new sharpness measure based on Gaussian lines and edges, N. Petkov and M.A. Westenberg (editors), *10th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns* (Groningen, The Netherlands), Volume 2756 of LNCS, pp. 149-156, 2003
- [21] PARK, S. REICHENBACH, S. and NARAYANSWAMY, R., Characterizing digital image acquisition devices, *Opt. Eng.*, **30(2)**, pp. 170-177, 1991
- [22] PHAM, T.Q., Spatiotonal Adaptivity in Super-Sharpness of Under-Sampled Image Sequences, PhD. thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (Chapter 5.3 and Appendix B.2), 2006

Références concernant l'algorithme de traitement d'image (dans la méthode de la dérivée)

- [23] VERBEEK, P.W. and VAN VLIET, L.J., On the location error of curved edges in low-pass filtered 2-D and 3-D images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16(7)**, pp. 726-733, 1994
- [24] KOENDERINK, J.J., The Structure of Images, *Biological Cybernetics*, **50**, pp. 363-370, 1984
- [25] MARR, D. and HILDRETH, E., Theory of edge detection, *Proceedings of the Royal Society of London B*, **207**, pp. 187-217, 1980
- [26] SERRA, J., *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, 1982
- [27] SOILLE, P., *Morphological Image Analysis — Principles and Applications*, Springer-Verlag, 1999
- [28] JONKER, P.P., Skeletons in N Dimensions using Shape Primitives, *Pattern Recognition Letters*, **23(6)**, pp. 677-686, 2002
- [29] RIEGER, B., TIMMERMANS, F.J., VAN VLIET, L.J. and VERBEEK, P.W., On curvature estimation of iso-surfaces in 3D grey-value images and the computation of shape descriptors, *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, **26(8)**, pp. 1088-1094, 2004
- [30] LINDBERG, T., Scale-Space for Discrete Signals, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12(3)**, pp. 234-254, 1990

Préparation de l'échantillon

- [31] OKAYAMA, S., HARAICHI, S. and MATSUHATA, H., Reference sample for the evaluation of SEM image sharpness at high magnification — Nanometer-scale Au particles on an HOPG substrate, *J. Electron Microsc.*, **54**, pp. 345-350, 2005

ISO/TS 24597:2011(F)

ICS 37.020

Prix basé sur 87 pages

ISO/TS 24597:2011(F)

NOTE 3 i_{\max} et $j_{\max} = 511$ (ou 255) (en fonction du nombre de pixels de l'image MEB originale, en l'occurrence, 512×512 ou 256×256).

NOTE 4 Les pixels de bord sont traités d'une façon spéciale pour le filtrage médian (voir la fin de la présente annexe).

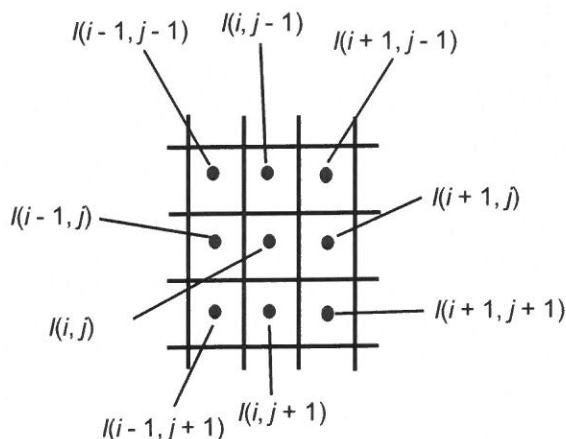


Figure A.2 — Principe du filtrage médian 3 × 3: la figure montre le pixel (i, j) concerné et les pixels voisins contenus dans le carré de 3 × 3

b) Évaluer l'écart-type σ_n du bruit de l'image:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{j=0}^{j_{\max}} \sum_{i=0}^{i_{\max}} [I_{\text{med}}(i, j) - I(i, j)]^2}{(i_{\max} + 1) \times (j_{\max} + 1)}} \quad (\text{A.1})$$

où $I_{\text{med}}(i, j)$ et $I(i, j)$ sont les intensités de pixel à la position du pixel (i, j) des images filtrées par filtrage médian et des images MEB, respectivement.

NOTE Le dénominateur $(i_{\max} + 1) \times (j_{\max} + 1)$ correspond au nombre total de pixels dans la région filtrée par filtrage médian (voir Figure A.3).

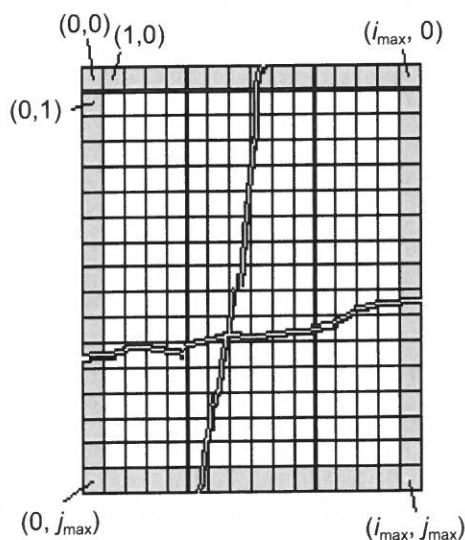
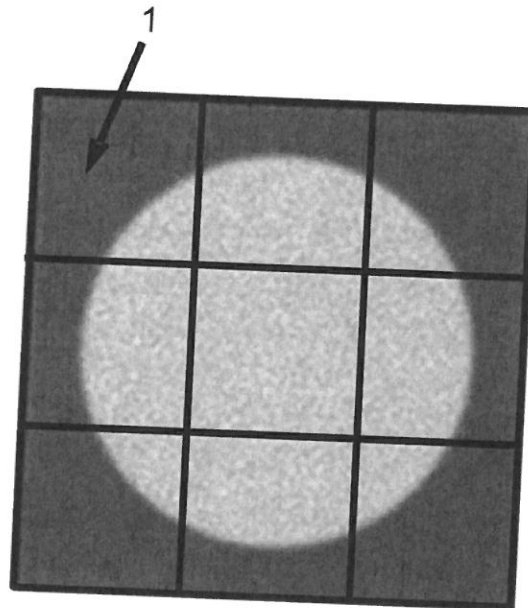


Figure A.3 — Intensités d'une image filtrée par filtrage médian

- c) Déterminer le contraste de l'image C_{image} .
- 1) Diviser l'image MEB filtrée par filtrage médian en neuf (ou 3×3) images segmentées comme le montre la Figure A.4.

NOTE La région i (ou j) est divisée en trois gammes de 1 à 170, 171 à 340, et 341 à 510 pour i_{max} (ou $j_{\text{max}} = 511$, et de 1 à 84, 85 à 169, et 170 à 254 pour l'image de i_{max} (ou $j_{\text{max}} = 255$).

- 2) Pour chaque segment s , appliquer une séquence d'intensité croissante ou décroissante comme le montre la Figure A.5.
- 3) Pour chaque segment s , calculer $z_{\text{max,av},s}$ en effectuant une moyenne arithmétique des q premiers éléments de la séquence d'intensité descendante, et calculer $z_{\text{min,av},s}$ en effectuant une moyenne arithmétique des q premiers éléments de la séquence d'intensité ascendante. Ici, q est un nombre entier qui correspond à 0,2 % du nombre d'éléments de la séquence. La valeur minimale de q est 1.

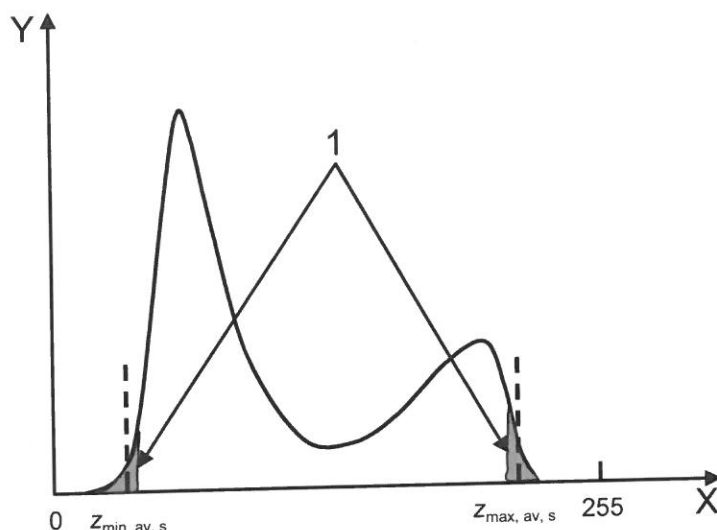


Légende

1 image segmentée

Figure A.4 — Neuf images segmentées

ISO/TS 24597:2011(F)



Légende

- X niveau d'intensité
- Y nombre d'éléments
- 1 0,2 % du nombre d'éléments de la séquence

Figure A.5 — Séquence d'intensité pour l'image segmentée s

- 4) Déterminer l'intensité seuil $z_{\text{seuil},s-\text{av}}$ comme suit:

$$z_{\text{seuil},s-\text{av}} = [\text{Maximum}(z_{\text{max},\text{av},0}, z_{\text{max},\text{av},1}, \dots, z_{\text{max},\text{av},8}) + \text{Minimum}(z_{\text{min},\text{av},0}, z_{\text{min},\text{av},1}, \dots, z_{\text{min},\text{av},8})] / 2 \quad (\text{A.2})$$

- 5) Déterminer les moyennes $Avz_{\text{max},\text{av},s}$ et $Avz_{\text{min},\text{av},s}$ à partir des équations suivantes:

$$Avz_{\text{max},\text{av},s} = \text{Moyenne (uniquement pour } z_{\text{max},\text{av},s} > z_{\text{seuil},s-\text{av}} \text{) de } (z_{\text{max},\text{av},0}, z_{\text{max},\text{av},1}, \dots, z_{\text{max},\text{av},8}) \quad (\text{A.3})$$

$$Avz_{\text{min},\text{av},s} = \text{Moyenne (uniquement pour } z_{\text{min},\text{av},s} < z_{\text{seuil},s-\text{av}} \text{) de } (z_{\text{min},\text{av},0}, z_{\text{min},\text{av},1}, \dots, z_{\text{min},\text{av},8}) \quad (\text{A.4})$$

- 6) Calculer le contraste temporaire C_{temp} de l'image à partir de l'équation suivante:

$$C_{\text{temp}} = Avz_{\text{max},\text{av},s} - Avz_{\text{min},\text{av},s} \quad (\text{A.5})$$

- 7) Déterminer le contraste de l'image C_{image} en corrigeant C_{temp} en utilisant un terme de correction $k_{\text{corr}} \times \sigma_n$, où $k_{\text{corr}} = 1,38$ (valeur empirique), comme suit:

$$C_{\text{image}} = C_{\text{temp}} - k_{\text{corr}} \times \sigma_n \quad (\text{A.6})$$

- d) Évaluer la valeur du CNR de l'image MEB comme suit:

$$\text{CNR} = C_{\text{image}} / \sigma_n \quad (\text{A.7})$$

Les valeurs de $Avz_{\text{max},\text{av},s}$ et $Avz_{\text{min},\text{av},s}$ doivent être dans les gammes $245 \geq Avz_{\text{max},\text{av},s} \geq 170$ et $80 \geq Avz_{\text{min},\text{av},s} \geq 10$ (pour des niveaux de gris de 8 bits), respectivement. Si les valeurs ne sont pas dans leurs gammes correspondantes, éliminer l'image MEB.

ISO/TS 24597:2011(F)

Filtrage médian 3 × 3:

$$F_{\text{OUT}}(i, j) = M_{\text{ED}}[F_{\text{IN}}(i-1, j-1), F_{\text{IN}}(i-1, j), F_{\text{IN}}(i-1, j+1), F_{\text{IN}}(i, j-1), F_{\text{IN}}(i, j), F_{\text{IN}}(i, j+1), \\ F_{\text{IN}}(i+1, j-1), F_{\text{IN}}(i+1, j), F_{\text{IN}}(i+1, j+1)]$$

où

$F_{\text{IN}}(i, j)$ est la donnée d'image d'entrée pour $511 \geq i, j \geq 0$ (pour une image MEB avec 512×512 pixels);

$F_{\text{OUT}}(i, j)$ est la donnée filtrée par filtrage médian 3×3 .

La fonction de filtrage médian $M_{\text{ED}}(a_1, a_2, \dots, a_N)$ trie les valeurs a_n ($n = 1, 2, \dots, N$) par ordre croissant et détermine la valeur médiane pour les nombres N impairs, ou la valeur moyenne de la $(N/2)$ ième et de la $[(N/2) + 1]$ ième valeurs de la série pour les nombres N pairs.

NOTE Si $i-1 < 0$, $i+1 > 511$, $j-1 < 0$, ou $j+1 > 511$, éliminer le $F_{\text{IN}}(\dots, \dots)$ correspondant et effectuer $M_{\text{ED}}[\dots]$.

ISO/TS 24597:2011(F)

Annexe B
(normative)

Détails sur la méthode de la transformée de Fourier (TF)

B.1 Généralités

La présente annexe fournit des détails relatifs à la procédure utilisée pour la méthode de la transformée de Fourier (TF).

La Figure B.1 illustre un exemple d'image MEB.

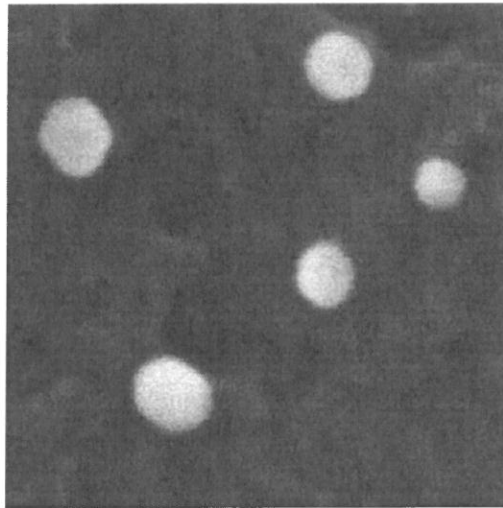


Figure B.1 — Exemple d'une image MEB

B.2 Génération des images convoluées

- a) Préparer une image filtrée $I_{OF}(i, j)$ traitée trois fois successivement par un filtre médian 3×3 non pondéré d'une image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$ en utilisant la procédure décrite en B.6.1.
- b) Produire un histogramme $H(S)$ (où $S = 0, 1, 2, 3, \dots, 255$) de l'image filtrée $I_{OF}(i, j)$.
- c) Obtenir un histogramme lissé $H_s(S)$ à partir de $H(S)$ en appliquant les procédures en B.6.2, en utilisant neuf points. Puis calculer $h_s(S) = \log_{10}[H_s(S) + 1]$.
- d) Obtenir deux intensités de signal S_L et S_H à partir de l'historgramme lissé, puis déterminer une valeur seuil S_T à l'aide de la procédure suivante:
 - 1) Déterminer les valeurs maximales de $h_s(S)$, $h_s(S_1)$ et $h_s(S_2)$ dans les intervalles $[0, 127]$ et $[128, 255]$, respectivement, qui vérifient les conditions suivantes:

$$h_s(S_1 - 16) < h_s(S_1) \text{ et } h_s(S_1 + 16) < h_s(S_1);$$

$$h_s(S_2 - 16) < h_s(S_2) \text{ et } h_s(S_2 + 16) < h_s(S_2);$$

$$96 < S_2 - S_1, h_s[(S_1 + S_2)/2] < h_s(S_1) - 0,02 \text{ et } h_s[(S_1 + S_2)/2] < h_s(S_2) - 0,02.$$

Puis fixer S_1 à S_L et fixer S_2 à S_H , et procéder à l'étape 3). Sinon aller à l'étape 2).

Si $S_1 - 16 < 0$ ou $255 < S_2 + 16$, utiliser $h_s(0)$ ou $h_s(255)$ au lieu de $h_s(S_1 - 16)$ ou $h_s(S_2 + 16)$, respectivement.

- 2) Obtenir les valeurs maximale S_A et minimale S_B de l'intensité de signal S de sorte que la somme des intensités de l'histogramme pour $H_s(S)$ dans chacun des intervalles $[0, S_A - 1]$ et $[S_B + 1, 255]$, respectivement, soit le plus proche de 0,2 % (mais inférieur à 0,2 %) de L^2 . Puis, calculer les deux intensités de signal S_L et S_H comme suit:

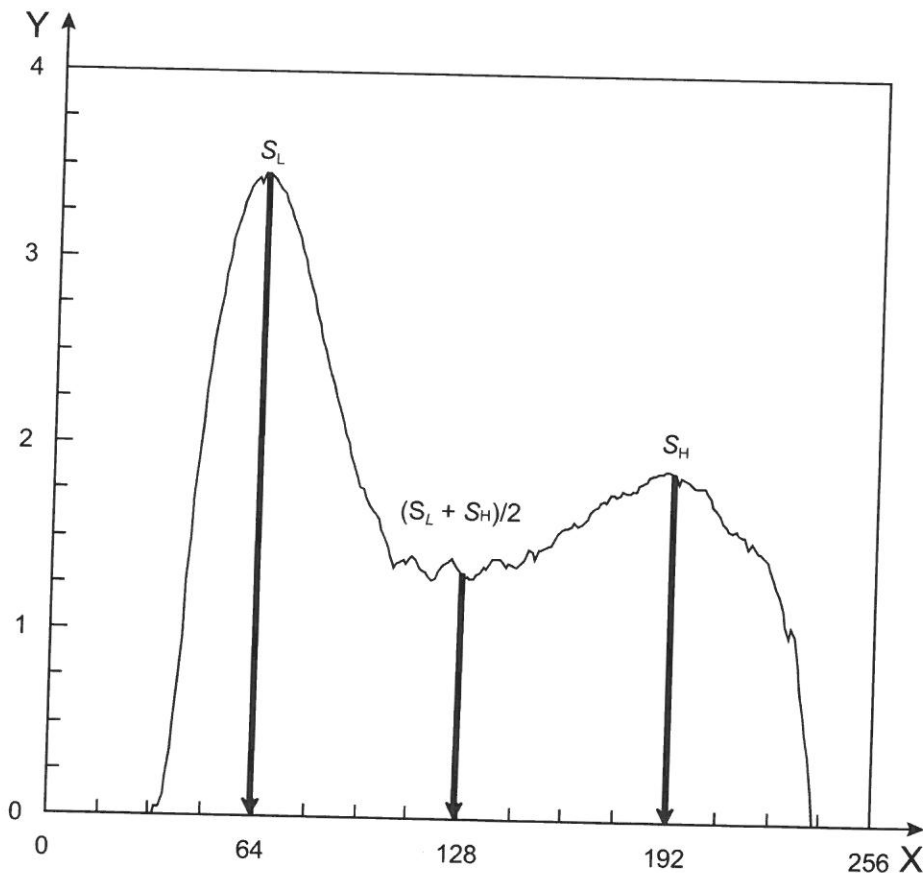
$$S_L = S_A + C_R \sqrt{S_A} \text{ et } S_H = S_B - C_R \sqrt{S_B}$$

où $C_R = (S_B - S_A)/128$

- 3) Calculer la valeur seuil S_T (voir Figure B.2) comme suit:

$$S_T = (S_L + S_H)/2$$

- e) Obtenir une image binarisée $I_B(i, j)$ en appliquant la valeur seuil S_T (voir Figure B.3).



Légende

- X intensité du signal S (de 0 à 255)
 Y $h_s(S)$ (valeurs logarithmiques)

Figure B.2 — Exemple d'un histogramme lissé

ISO/TS 24597:2011(F)

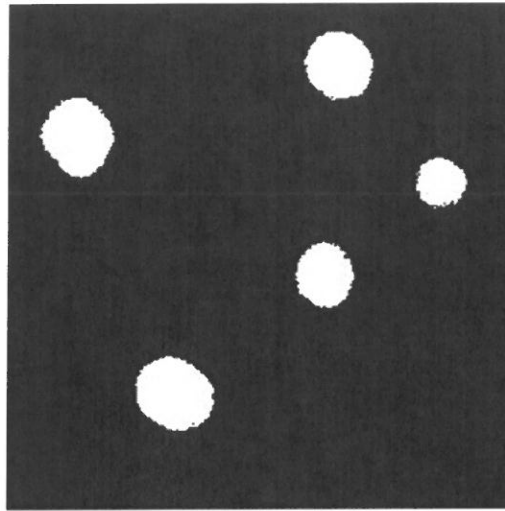


Figure B.3 — Exemple d'une image binarisée $I_B(i, j)$

f) Ajouter le bruit blanc à l'image sélectionnée $I_O(i, j)$ de sorte que l'effet d'un faible bruit corrélé soit négligé comme suit:

1) Fixer SNR_p (rapport signal sur bruit pour les particules) à 30 pour l'intensité de signal $S = 192$, et calculer l'intensité du bruit $s_n(i, j)$ pour l'intensité de l'image sélectionnée $I_O(i, j)$ comme suit:

$$s_n(i, j) = [I_O(i, j) \cdot S]^{1/2} / SNR_p = [I_O(i, j) \cdot 192]^{1/2} / 30$$

2) Obtenir l'intensité $I_{ON}(i, j)$ de l'image bruitée comme suit:

$$I_{ON}(i, j) = I_O(i, j) + s_n(i, j) \cdot r_G$$

où r_G est une valeur aléatoire qui obéit à une distribution normale avec une valeur moyenne de 0 et un écart-type de 1.

NOTE Cela est fait en fixant $I_{ON}(i, j; 2\sigma)$ à 0 si $I_{ON}(i, j; 2\sigma) < 0$, et en fixant $I_{ON}(i, j; 2\sigma)$ à 255 si $255 < I_{ON}(i, j; 2\sigma)$.

3) Fixer $I_{ON}(i, j)$ à $I_O(i, j)$.

g) Générer les images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ en utilisant la convolution de l'image binarisée $I_B(i, j)$ et des profils gaussiens bidimensionnels $I_G(i, j; 2\sigma)$ ayant différents facteurs de netteté 2σ , donnés par

$$I_G(i, j; 2\sigma) = \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(i^2 + j^2)\right]$$

où σ est l'écart-type de la distribution gaussienne.

1) Fixer le facteur de netteté $2\sigma(N = 1)$ à 1 dans un premier temps. Au cours du processus d'évaluation, $2\sigma(N)$ est augmenté de la façon suivante:

$$\text{si } 1 \leq N \leq 8, \text{ alors } 2\sigma(N) = N,$$

$$\text{si } 9 \leq N, \text{ alors } 2\sigma(N) = 2^{Q+1} + 2^{Q-1} \cdot (N - 4Q),$$

où Q est la partie entière $N/4$ ($N = 4Q + \text{reste}$).

NOTE N est le numéro de l'étape. Les valeurs maximales de N et de $2\sigma(N)$ sont $24 + 4[(\log_2 L) - 8]$ et $L/2$, respectivement.

- 2) Calculer le modèle de transformée de Fourier $G_B(f_i, f_j)$ de l'image binarisée $I_B(i, j)$.
- 3) Calculer le modèle de transformée de Fourier $G_G(f_i, f_j; 2\sigma)$ du profil gaussien $I_G(i, j; 2\sigma)$ avec un facteur de netteté 2σ égal à $2\sigma(N)$ pour la N ème étape, d'une manière similaire.

- 4) Calculer le produit de $G_B(f_i, f_j)$ et de $G_G(f_i, f_j; 2\sigma)$:

$$G_{BG}(f_i, f_j; 2\sigma) = G_B(f_i, f_j) \cdot G_G(f_i, f_j; 2\sigma)$$

- 5) Obtenir l'image $I_{BG}(i, j; 2\sigma)$ à partir de $G_{BG}(f_i, f_j; 2\sigma)$ en appliquant la transformée de Fourier inverse.
- 6) Obtenir les images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ (voir Figure B.4) comme suit:

$$I_C(i, j; 2\sigma) = \frac{S_H - S_L}{\max[|I_{BG}(i, j; 2\sigma)|]} |I_{BG}(i, j; 2\sigma)| + S_L$$

où le symbole mathématique $|...|$ signifie «la valeur absolue de», et $\max[...]$ signifie «la valeur maximale de».

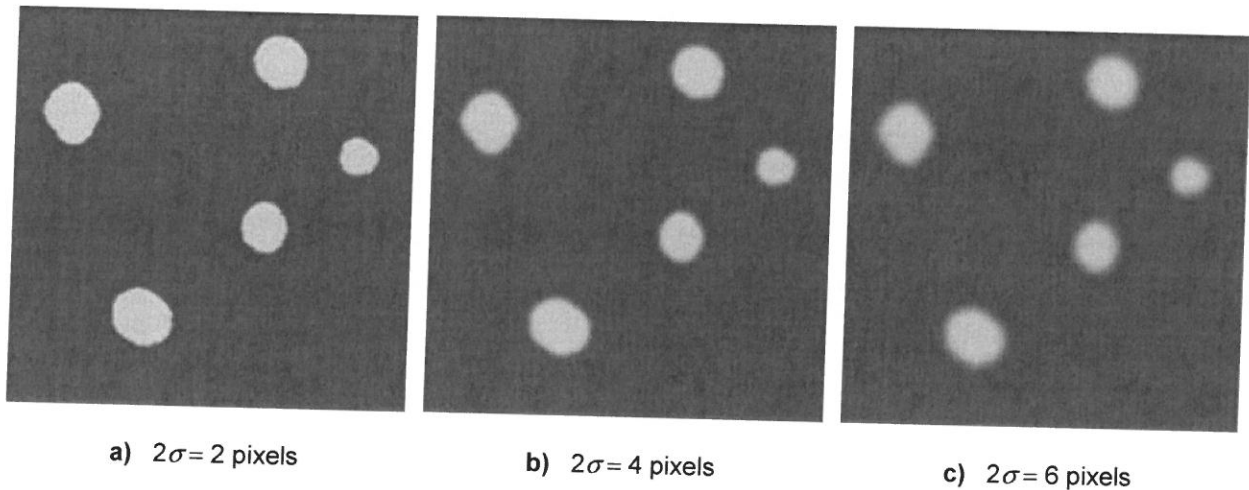


Figure B.4 — Exemples d'images convoluées $I_C(i, j; 2\sigma)$ avec une dimension d'image $L = 256$

ISO/TS 24597:2011(F)

B.3 Génération des courbes des modèles de TF

Les procédures suivantes a), c), d) et e) sont effectuées une fois pour l'image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$ lorsque le numéro de l'étape $N = 1$.

- Calculer le modèle de transformée de Fourier $G_O(f_i, f_j)$ de l'image $I_O(i, j)$.
- Calculer le modèle de transformée de Fourier $G_C(f_i, f_j; 2\sigma)$ pour l'image convoluée $I_C(i, j; 2\sigma)$.
- Prendre la partie réelle $\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]$ de $G_O(f_i, f_j)$, et ensuite prendre la valeur absolue $|\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]|$ de la partie réelle $\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]$.
- Obtenir la valeur moyennée verticalement et la valeur moyennée horizontalement de $|\text{Re}[G_O(f_i, f_j)]|$. Puis, calculer leurs logarithmes décimaux comme suit:

$$F_{\text{OHA}}(f_j) = \log_{10} \left\{ \varepsilon + \frac{1}{L} \sum_{p=-L/2}^{(L/2)-1} |\text{Re}[G_O(p, f_j)]| \right\}$$

$$F_{\text{OVA}}(f_i) = \log_{10} \left\{ \varepsilon + \frac{1}{L} \sum_{q=-L/2}^{(L/2)-1} |\text{Re}[G_O(f_i, q)]| \right\}$$

où

ε est fixé à 10^{-20} pour éviter d'avoir $\log_{10} 0$;

L est la dimension d'image.

- Calculer une courbe horizontale lissée $F_{\text{OH}}(f_j)$ à partir de $F_{\text{OHA}}(f_j)$ en appliquant les procédures de B.6.2, en utilisant cinq points dans l'intervalle $[-L/2, (L/2) - 1]$ de f_j .

Obtenir une courbe verticale lissée $F_{\text{OV}}(f_i)$ à partir de $F_{\text{OVA}}(f_i)$ d'une manière similaire.

- Prendre la partie réelle $\text{Re}[G_C(f_i, f_j; 2\sigma)]$ de $G_C(f_i, f_j; 2\sigma)$, et ensuite prendre la valeur absolue $|\text{Re}[G_C(f_i, f_j; 2\sigma)]|$ de la partie réelle $\text{Re}[G_C(f_i, f_j; 2\sigma)]$.
- Obtenir la valeur moyennée verticalement et la valeur moyennée horizontalement de $|\text{Re}[G_C(f_i, f_j; 2\sigma)]|$. Puis, calculer leurs logarithmes décimaux comme suit:

$$F_{\text{CHA}}(f_j; 2\sigma) = \log_{10} \left\{ \varepsilon + \frac{1}{L} \sum_{p=-L/2}^{(L/2)-1} |\text{Re}[G_C(p, f_j; 2\sigma)]| \right\}$$

$$F_{\text{CVA}}(f_i; 2\sigma) = \log_{10} \left\{ \varepsilon + \frac{1}{L} \sum_{q=-L/2}^{(L/2)-1} |\text{Re}[G_C(f_i, q; 2\sigma)]| \right\}$$

- Calculer une courbe horizontale lissée $F_{\text{CHB}}(f_j; 2\sigma)$ à partir de $F_{\text{CHA}}(f_j; 2\sigma)$ en appliquant les procédures de B.6.2, en utilisant cinq points dans l'intervalle $[-L/2, (L/2) - 1]$ de f_j .

Calculer une courbe verticale lissée $F_{\text{CVB}}(f_i; 2\sigma)$ à partir de $F_{\text{CVA}}(f_i; 2\sigma)$ d'une manière similaire.

B.4 Calcul de la netteté d'image temporaire R_{PXO}

Les procédures suivantes a) à f) sont effectuées une fois pour l'image MEB sélectionnée $I_O(i, j)$ lorsque le numéro de l'étape $N = 1$.

- a) Calculer la pente m_H et l'ordonnée à l'origine b_H par la méthode des moindres carrés décrite en B.6.3 pour obtenir une fonction linéaire qui approxime la courbe lissée $F_{OH}(f_j)$ dans l'intervalle $[-L/2, -(L/4) - 1]$ de f_j .

Calculer la pente m_V et l'ordonnée à l'origine b_V de la courbe lissée $F_{OV}(f_i)$ dans l'intervalle $[-L/2, -(L/4) - 1]$ de f_i d'une manière similaire.

- b) Déterminer les fonctions de bruit comme suit:

$$F_{NH}(f_j) = m_H \cdot f_j + b_H$$

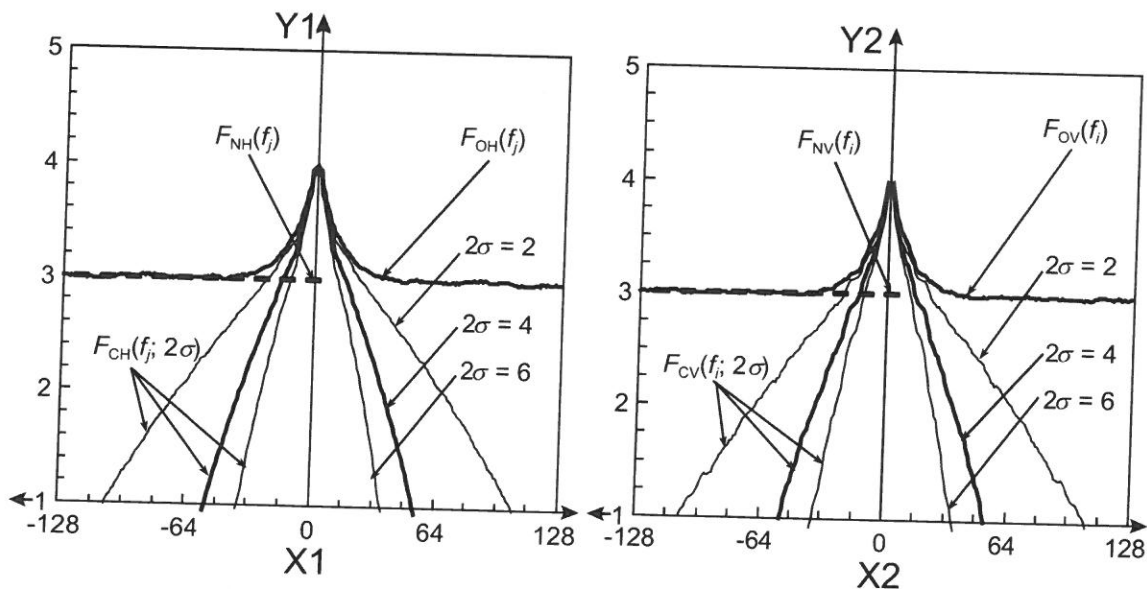
$$F_{NV}(f_i) = m_V \cdot f_i + b_V$$

- c) Calculer les courbes corrigées $F_{CH}(f_j; 2\sigma)$ et $F_{CV}(f_i; 2\sigma)$ en utilisant les intensités du signal et du bruit à l'origine de (f_i, f_j) comme suit:

$$F_{CH}(f_j; 2\sigma) = F_{CHB}(f_j; 2\sigma) - [F_{CHB}(0; 2\sigma) - \log_{10}(10^{F_{OH}(0)} - 10^{b_H})]$$

$$F_{CV}(f_i; 2\sigma) = F_{CVB}(f_i; 2\sigma) - [F_{CVB}(0; 2\sigma) - \log_{10}(10^{F_{OV}(0)} - 10^{b_V})]$$

Pour vérifier le calcul, il est recommandé de tracer les graphiques de $F_{OH}(f_j)$ et $F_{CH}(f_j; 2\sigma)$ pour la direction horizontale, et les graphiques de $F_{OV}(f_i)$ et $F_{CV}(f_i; 2\sigma)$ pour la direction verticale comme le montre la Figure B.5.



Légende

- X1 coordonnée horizontale f_j (pixels)
- Y1 intensité de la TF $F_{+H}(f_j)$
- X2 coordonnée verticale f_i (pixels)
- Y2 intensité de la TF $F_{+V}(f_i)$

* signifie C, N ou O.

Figure B.5 — Exemples de courbes moyennées et lissées pour les modèles de TF dans les directions horizontale et verticale

ISO/TS 24597:2011(F)

d) Obtenir la coordonnée horizontale $f_j = f_{jH}$ comme suit:

1) Fixer les paramètres A et B selon

$$A = F_{OH}(f_j) \text{ et } B = F_{NH}(f_j) + C_N$$

où C_N est le facteur de contribution déterminé à partir de l'image convoluée dans l'espace de Fourier, et est donné par

$$C_N = \log_{10}(1 + a_N + \Delta a_N)$$

où

$$a_N = 0,5;$$

$$\Delta a_N = -0,05 \text{ (valeur empirique).}$$

2) Fixer $f_j = -L/2$ comme valeur initiale, puis augmenter f_j jusqu'à ce que la condition $A < B$ soit modifiée en $A \geq B$. Fixer $f_j = f_{jC}$ pour cette modification.

3) Calculer la coordonnée horizontale f_{jH} comme suit:

$$f_{jH} = \frac{F_{NH}(f_{jC}) + C_N - [F_{OH}(f_{jC} - 1) + m_H]}{F_{OH}(f_{jC}) - [F_{OH}(f_{jC} - 1) + m_H]} + (f_{jC} - 1) \text{ pour } A - B > 10^{-4}$$

$$f_{jH} = f_{jC} \text{ pour } A - B \leq 10^{-4}$$

4) Déterminer à $f_j = f_{jH}$ les coordonnées du point P_{1H} sur la courbe $F_{OH}(f_j)$ pour l'image originale, du point P_{2H} sur la fonction linéaire $F_{NH}(f_j)$ pour le bruit, et du point P_{3H} sur la courbe $F_{CH}(f_j; 2\sigma_{OH})$ pour l'image convoluée, comme suit:

$$P_{1H}: (f_{jH}, F_{OH}(f_{jH}) + C_N)$$

$$P_{2H}: (f_{jH}, F_{NH}(f_{jH}))$$

$$P_{3H}: (f_{jH}, F_{NH}(f_{jH}) + \log_{10} a_N)$$

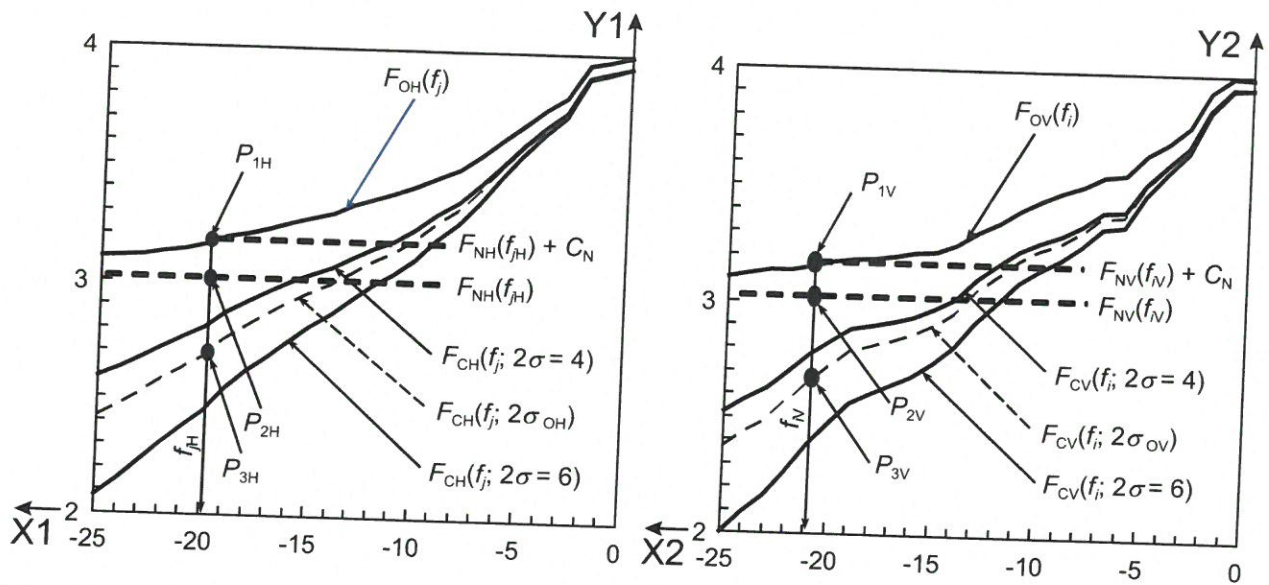
e) Obtenir la coordonnée verticale $f_i = f_{iV}$ en utilisant $f_i = f_{iC}$ d'une manière similaire.

Puis déterminer à $f_i = f_{iV}$ les coordonnées du point P_{1V} sur la courbe $F_{OV}(f_i)$ pour l'image originale, du point P_{2V} sur la fonction linéaire $F_{NV}(f_i)$ pour le bruit et du point P_{3V} sur la courbe $F_{CV}(f_i; 2\sigma_{OV})$ pour l'image convoluée (voir Figure B.6) comme suit:

$$P_{1V}: (f_{iV}, F_{NV}(f_{iV}) + C_N)$$

$$P_{2V}: (f_{iV}, F_{NV}(f_{iV}))$$

$$P_{3V}: (f_{iV}, F_{NV}(f_{iV}) + \log_{10} a_N)$$



Légende

- X1 coordonnée horizontale f_j (pixels)
- Y1 intensité de la TF $F_{*H}(f_j)$
- X2 coordonnée verticale f_i (pixels)
- Y2 intensité de la TF $F_{*V}(f_i)$
- * signifie C, N ou O.

Figure B.6 — Graphiques montrant les points P_{1H} , P_{2H} , P_{3H} , P_{1V} , P_{2V} et P_{3V}

- f) Calculer les valeurs de $F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma)$ et $F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma)$ à $f_j = f_{jH}$ et $f_i = f_{iV}$, respectivement, en utilisant une interpolation linéaire comme suit:

$$F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma) = [F_{CH}(f_{jC}; 2\sigma) - F_{CH}(f_{jC} - 1; 2\sigma)] \cdot [f_{jH} - (f_{jC} - 1)] + F_{CH}(f_{jC} - 1; 2\sigma)$$

$$F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma) = [F_{CV}(f_{iC}; 2\sigma) - F_{CV}(f_{iC} - 1; 2\sigma)] \cdot [f_{iV} - (f_{iC} - 1)] + F_{CV}(f_{iC} - 1; 2\sigma)$$

- g) Déterminer les numéros des étapes $N = N_{OH}$ et $N = N_{OV}$ pour les facteurs de netteté $2\sigma(N_{OH}) = 2\sigma_{HL}$, $2\sigma(N_{OH} - 1) = 2\sigma_{HU}$, $2\sigma(N_{OV}) = 2\sigma_{VL}$ et $2\sigma(N_{OV} - 1) = 2\sigma_{VU}$ comme suit:

- 1) Stopper l'évaluation si l'une des inégalités suivantes est satisfaite pour l'image convoluée initiale avec $2\sigma(N = 1) = 1$. Dans le cas contraire, passer à l'étape 2).

$$F_{CH}(f_{jH}; 1) \leq F_{NH}(f_{jH}) + \log_{10} a_N \text{ ou } F_{CV}(f_{iV}; 1) \leq F_{NV}(f_{iV}) + \log_{10} a_N$$

Il est recommandé qu'un message soit généré lorsque l'évaluation est terminée. La fin de l'évaluation est causée lorsque le facteur de netteté $2\sigma_{OH}$ ou $2\sigma_{OV}$ de l'image sélectionnée $I_O(i, j)$ est inférieur à 1 pixel ou lorsque l'image est irrégulière.

- 2) Déterminer les numéros des étapes $N = N_{OH}$ et $N = N_{OV}$ qui satisfont aux conditions suivantes en augmentant le numéro de l'étape N , puis répéter les procédures de B.2 f) 1) à la présente étape.

$$F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma_{HL}) \leq F_{NH}(f_{jH}) + \log_{10} a_N \leq F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma_{HU})$$

$$F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma_{VL}) \leq F_{NV}(f_{iV}) + \log_{10} a_N \leq F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma_{VU})$$

ISO/TS 24597:2011(F)

h) Calculer 2σ par interpolation linéaire, comme suit:

$$2\sigma_{OH} = \frac{[F_{NH}(f_{jH}) + \log_{10} a_N] - F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma_{HU})}{F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma_{HL}) - F_{CH}(f_{jH}; 2\sigma_{HU})} (2\sigma_{HL} - 2\sigma_{HU}) + 2\sigma_{HU}$$

$$2\sigma_{OV} = \frac{[F_{NV}(f_{iV}) + \log_{10} a_N] - F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma_{VU})}{F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma_{VL}) - F_{CV}(f_{iV}; 2\sigma_{VU})} (2\sigma_{VL} - 2\sigma_{VU}) + 2\sigma_{VU}$$

NOTE Les valeurs de $2\sigma_{OV}$ et $2\sigma_{OH}$ ont des amplitudes similaires pour une image présentant un léger astigmatisme.

i) Obtenir le facteur de netteté $2\sigma_O$ comme suit:

$$2\sigma_O = (2\sigma_{OH} + 2\sigma_{OV})/2$$

j) Obtenir la netteté d'image temporaire R_{PXO} avant étalonnage comme suit:

$$R_{PXO} = k \cdot 2\sigma_O$$

où k est $1/\sqrt{2}$.

B.5 Calcul de la netteté d'image R_{PX}

a) Calculer le coefficient C_F en utilisant les formules suivantes:

1) Si $2\sigma_O < 3$ ou $11 \leq 2\sigma_O$, alors $C_F = 1$.

2) Si $3 \leq 2\sigma_O < 4,1$, alors

$$C_F = b_0 + b_1/2\sigma_O$$

où $b_0 = 0,401\ 42$ et $b_1 = 1,795\ 74$.

3) Si $4,1 \leq 2\sigma_O < 11$, alors

$$C_F = c_3(2\sigma_O)^3 + c_2(2\sigma_O)^2 + c_1(2\sigma_O) + c_0$$

où $c_3 = 1,489\ 79 \times 10^{-4}$, $c_2 = -6,646\ 10 \times 10^{-3}$, $c_1 = 9,638\ 83 \times 10^{-2}$ et $c_0 = 5,456\ 65 \times 10^{-1}$.

b) Obtenir le facteur de netteté étalonné $2\sigma_C$ comme suit:

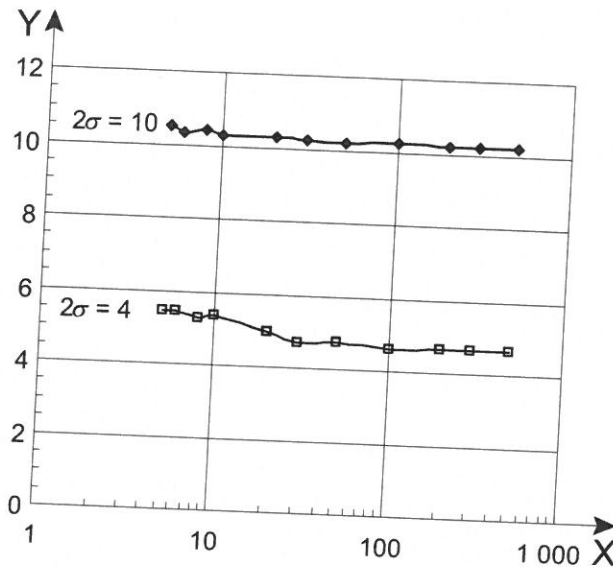
$$2\sigma_C = C_F \cdot 2\sigma_O$$

NOTE Le coefficient C_F est compris entre 0,839 4 et 1. Des exemples de facteur de netteté avant et après étalonnage sont montrés aux Figures B.7 et B.8 respectivement pour des images simulées telles que celles de la Figure 4 en utilisant un profil gaussien avec $2\sigma = 4$ et 10 pixels.

c) Obtenir la netteté d'image étalonnée R_{PX} comme suit:

$$R_{PX} = k \cdot 2\sigma_C$$

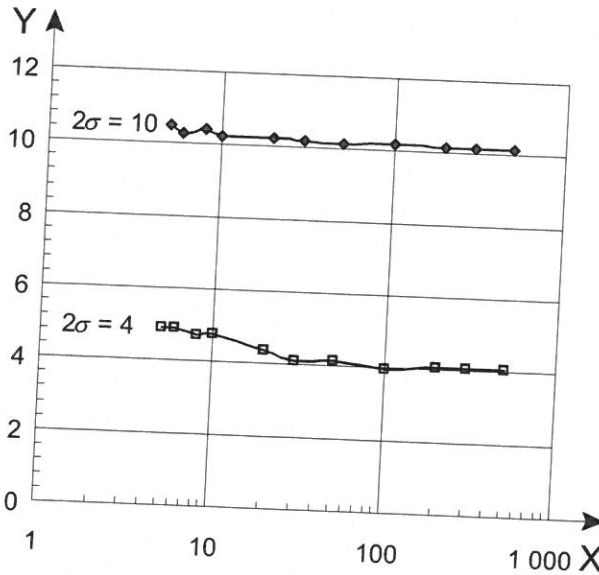
où k est $1/\sqrt{2}$.



Légende

- X rapport signal sur bruit pour les particules SNR_p
- Y facteur de netteté mesuré 2σ₀ (pixels)

Figure B.7 — Exemple de facteur de netteté mesuré 2σ₀ avant étalonnage



Légende

- X rapport signal sur bruit pour les particules SNR_p
- Y facteur de netteté étalonné 2σ_c

Figure B.8 — Exemple de facteur de netteté étalonné 2σ_c (étalonné en utilisant le coefficient C_F)

ISO/TS 24597:2011(F)

B.6 Sous-procédures de calcul

B.6.1 Filtre médian 3×3

Définir la fonction $M_{ED}(a_1, a_2, \dots, a_N)$ qui trie les valeurs a_n ($n = 1, 2, \dots, N$) par ordre croissant et déterminer la valeur médiane pour les nombres N impairs ainsi que la valeur moyenne des $(N/2)$ ième et $[(N/2) + 1]$ ième valeurs pour les nombres N pairs. Prendre $F_{IN}(i, j)$ comme donnée d'image d'entrée pour $0 \leq i, j \leq L - 1$. La donnée de sortie $F_{OUT}(i, j)$ traitée par le filtre médian 3×3 peut alors être dérivée comme suit:

$$F_{OUT}(i, j) = M_{ED} [F_{IN}(i-1, j-1), F_{IN}(i-1, j), F_{IN}(i-1, j+1), F_{IN}(i, j-1), F_{IN}(i, j), F_{IN}(i, j+1), \\ F_{IN}(i+1, j-1), F_{IN}(i+1, j), F_{IN}(i+1, j+1)]$$

NOTE Si $i-1 < 0$, $i+1 > L-1$, $j-1 < 0$, ou $j+1 > L-1$, éliminer le $F_{IN}(\dots, \dots)$ correspondant et effectuer $M_{ED}[\dots]$.

B.6.2 Moyenne mobile de largeur $2n + 1$

Prendre $F_{IN}(r)$ comme fonction d'entrée originale, r étant un nombre entier ($r = s, s + 1, s + 2, \dots, s + m$) dans l'intervalle $[s, s + m]$. La fonction d'entrée $F_{OUT}(r)$ traitée par la moyenne mobile de largeur $2n + 1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) est obtenue comme suit:

- 1) Si $s \leq r < s + n$, fixer $t = r - s$ ($= 1, 2, 3, \dots, n - 1$) et calculer $F_{OUT}(r)$ comme suit:

$$F_{OUT}(r) = \frac{1}{t+1+n} \sum_{k=-t}^n F_{IN}(r+k)$$

- 2) Si $s + n \leq r < s + m - n$, calculer $F_{OUT}(r)$ comme suit:

$$F_{OUT}(r) = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n F_{IN}(r+k)$$

- 3) Si $s + m - n < r \leq s + m$, fixer $t = (s + m) - r$ ($= 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$), et calculer $F_{OUT}(r)$ comme suit:

$$F_{OUT}(r) = \frac{1}{n+1+t} \sum_{k=-n}^t F_{IN}(r+k)$$

B.6.3 Approximation linéaire par la méthode des moindres carrés

Prendre $F_{IN}(r)$ comme fonction d'entrée originale, r étant un nombre entier ($r = s, s + 1, s + 2, \dots, s + m$) dans l'intervalle $[s, s + m]$. Le résultat de sortie est la pente m_{OUT} et l'ordonnée à l'origine b_{OUT} sur l'axe vertical. La méthode de calcul est comme suit:

- a) Calculer la moyenne de r

$$\bar{r} = \frac{1}{m+1} \sum_{r=s}^{s+m} r = \frac{1}{m+1} \left[\frac{1}{2} (s+m) \cdot (s+m+1) - \frac{1}{2} (s-1)s \right]$$

- b) Calculer la moyenne de $F_{IN}(r)$

$$\bar{F} = \frac{1}{m+1} \sum_{r=s}^{s+m} F_{IN}(r)$$

- c) Calculer la variance de r

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{m+1} \sum_{r=s}^{s+m} (r - \bar{r})^2$$

- d) Calculer la covariance de r et $F_{IN}(r)$

$$\sigma_{rF} = \frac{1}{m+1} \sum_{r=s}^{s+m} (r - \bar{r}) [F_{IN}(r) - \bar{F}]$$

- e) Obtenir la pente m_{OUT} et l'ordonnée à l'origine b_{OUT} sur l'axe vertical avec les équations suivantes:

$$m_{OUT} = \frac{\sigma_{rF}}{\sigma_r^2}$$

$$b_{OUT} = \bar{F} - m_{OUT} \cdot \bar{r}$$

NOTE L'équation linéaire approximée $F = F(r)$ traitée par la méthode des moindres carrés est donnée par

$$F - \bar{F} = m_{OUT} \cdot (r - \bar{r})$$

ISO/TS 24597:2011(F)

B.7 Diagrammes des procédures décrites en B.2 à B.5

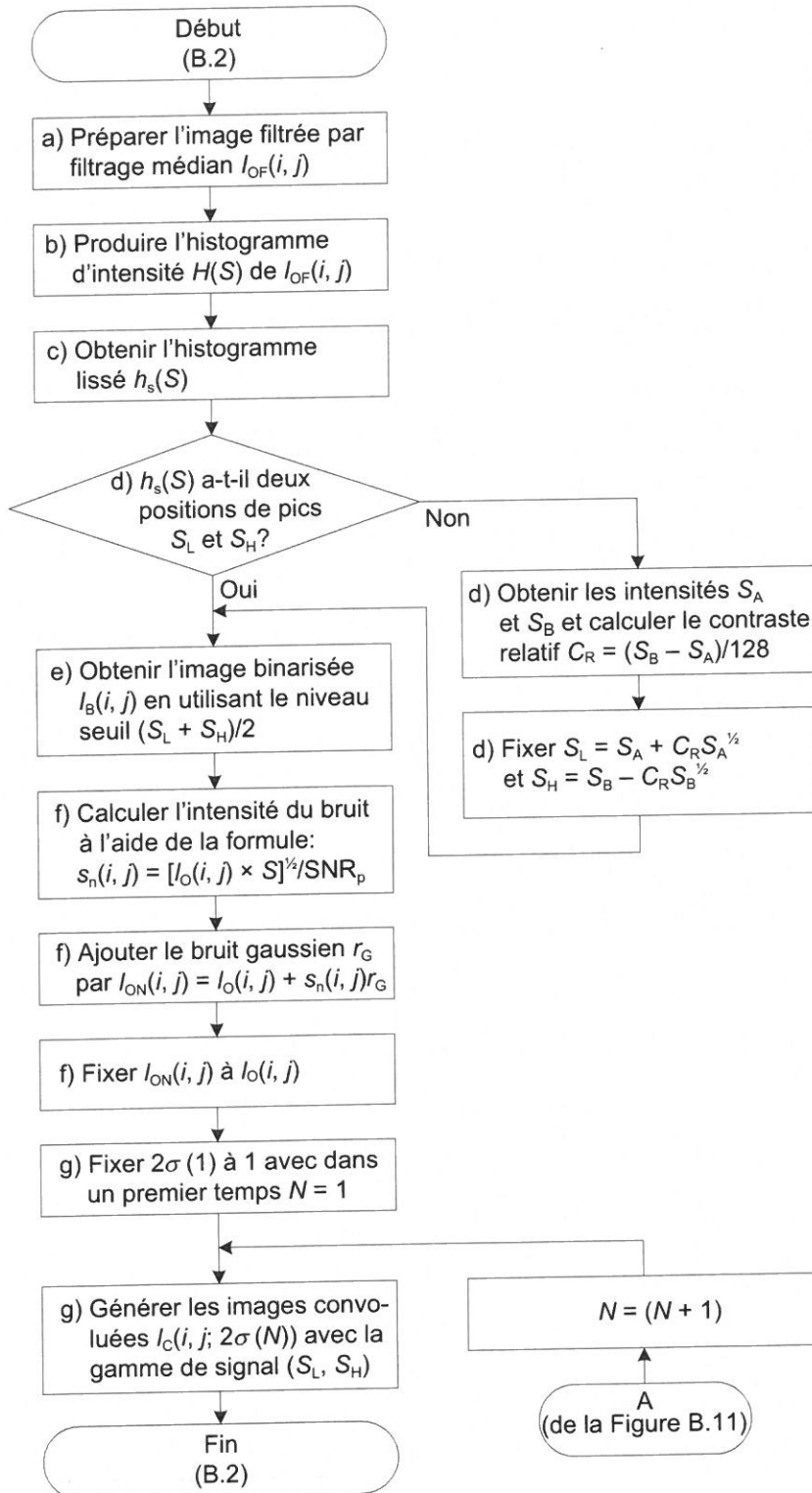


Figure B.9 — Diagramme de la procédure décrite en B.2

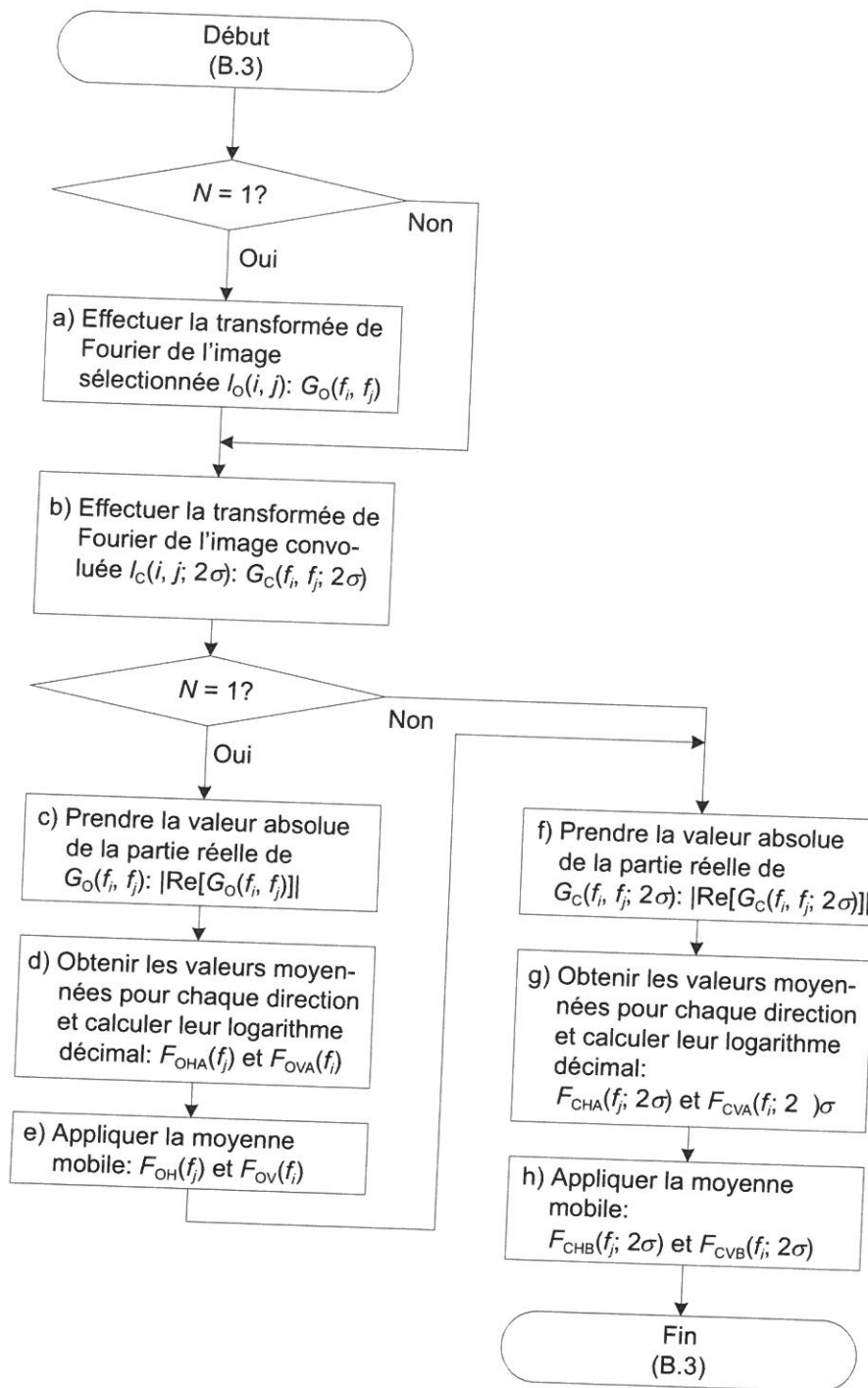


Figure B.10 — Diagramme de la procédure décrite en B.3

ISO/TS 24597:2011(F)

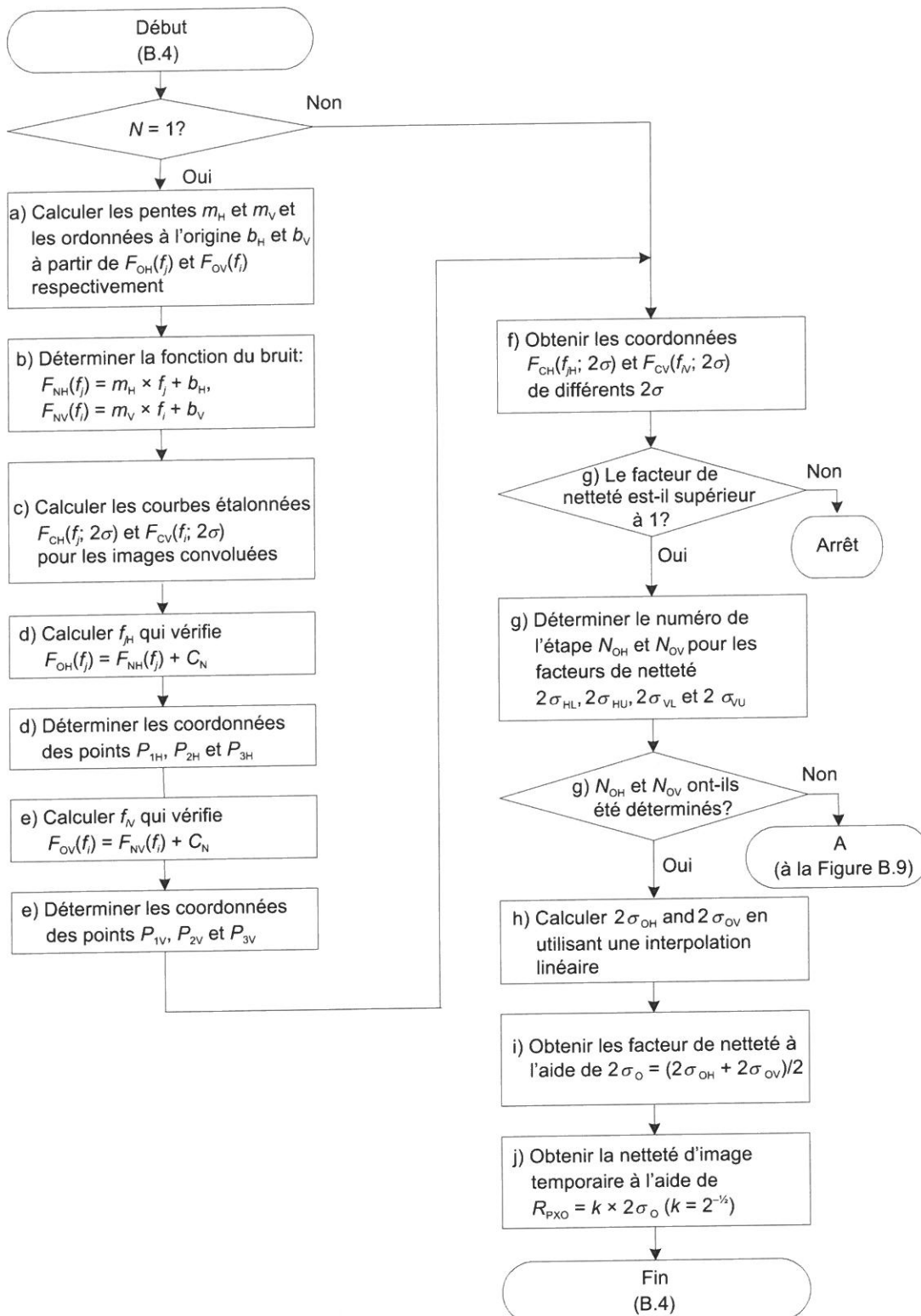


Figure B.11 — Diagramme de la procédure décrite en B.4

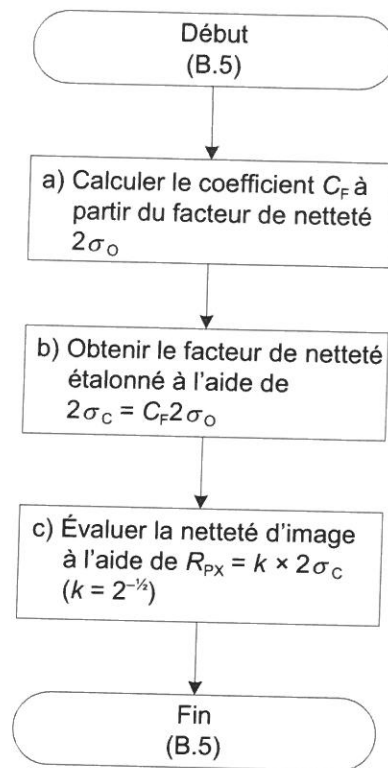


Figure B.12 — Diagramme de la procédure décrite en B.5

ISO/TS 24597:2011(F)

Annexe C
(normative)

Détails de la méthode contraste sur gradient (CG)

C.1 Généralités

La présente annexe fournit des détails sur la procédure utilisée pour la méthode contraste sur gradient (CG) décrite en 6.4 et à la Figure 12.

NOTE L'explication s'applique à une image avec $L = 512$ ou 256 et des niveaux de gris de 8 bits afin de faciliter la compréhension.

C.2 Calcul de la netteté d'image CG

C.2.1 Diagrammes

Un diagramme de la routine est donné à la Figure C.1. Cette routine est divisée en trois sous-routines: a) génération d'images réduites désignées par images de dimension $(1/r)$, b) calcul de la netteté directionnelle moyenne R_r , et c) calcul de la netteté d'image CG R_{CG} . Les diagrammes de la deuxième et de la troisième sous-routine sont donnés à la Figure C.2 et à la Figure C.3, respectivement.

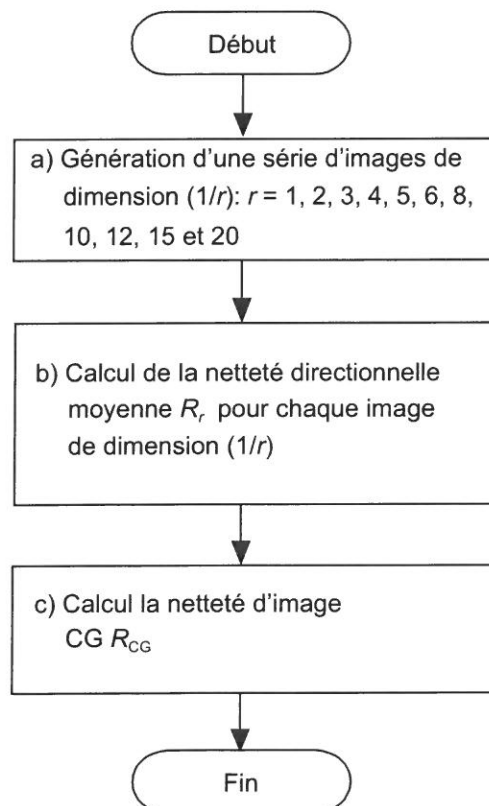


Figure C.1 — Diagramme du calcul de la netteté d'image CG

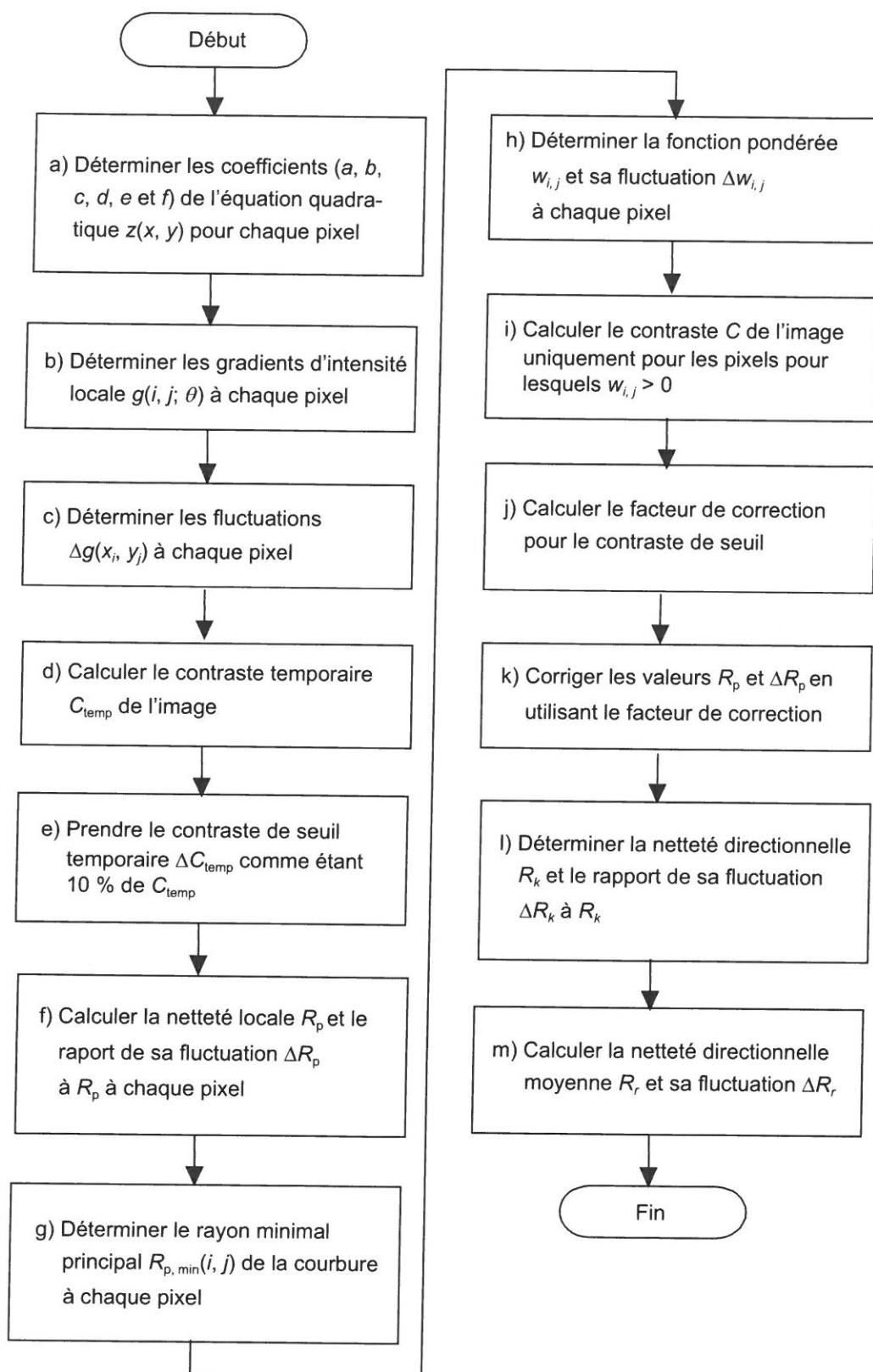


Figure C.2 — Diagramme de la sous-routine b) (calcul de la netteté directionnelle moyenne) à la Figure C.1

ISO/TS 24597:2011(F)

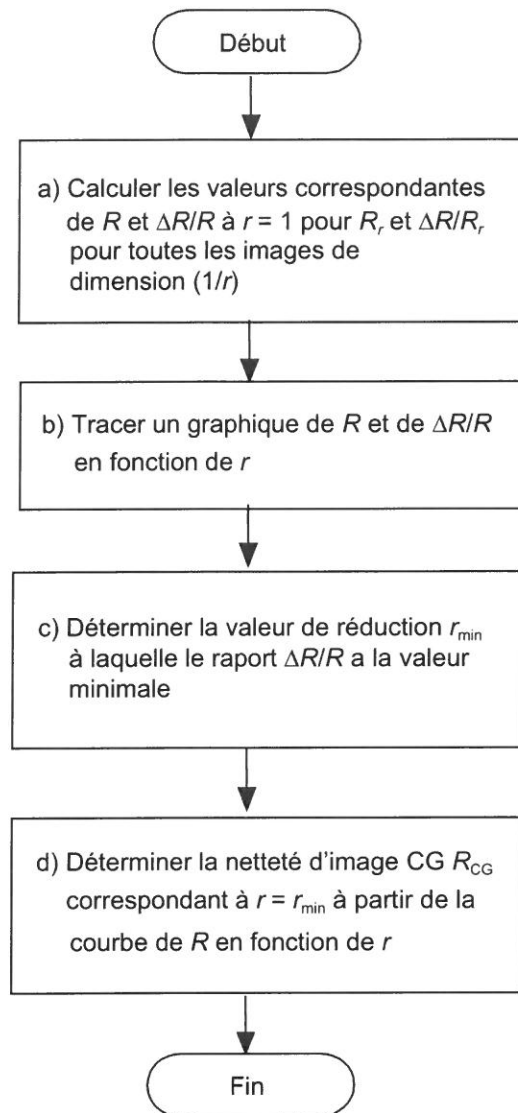


Figure C.3 — Diagramme de la sous-routine c) (calcul de la netteté d'image CG) à la Figure C.1

C.2.2 Génération des images de dimension (1/r)

La présente sous-routine génère une série d'images de dimension (1/r) à partir de l'image MEB originale, où $r = 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15,$ et 20 . Ci-après, l'image de dimension (1/r) pour $r = 1$ signifie l'image originale afin de simplifier la description (voir Figure C.4).

Générer les images de dimension (1/r), dont l'intensité de pixel $I_r(i, j)$ est obtenue par moyennage des intensités de pixel $I(p, q)$ dans l'image originale comme suit.

$$I_r(i, j) = \text{Round} \left\{ \left[\sum_{p=ir}^{ir+r} \sum_{q=jr}^{jr+r} I(p, q) \right] / (r \times r) \right\} \text{ pour } i \text{ (et } j) = 0, 1, \dots, i_{\max} \text{ (et } j_{\max}). \quad (\text{C.1})$$

NOTE 1 Tout pixel de l'image est exprimé par (x_p, y_p) , où i (et j) = $0, 1, 2, \dots, i_{\max}$ (et j_{\max}).

NOTE 2 i_{\max} et $j_{\max} = \text{Int}(512/r) - 1$ [ou $\text{Int}(256/r) - 1$] (en fonction de la dimension d'un pixel de l'image MEB originale, c'est-à-dire 512×512 ou 256×256). Ici, $\text{Int}(x)$ est une fonction entière de x , par exemple $\text{Int}(100,8) = 100$.

NOTE 3 $\text{Round}(x)$ est une fonction conduisant à la valeur arrondie de x , par exemple $\text{Round}(12,4) = 12$ et $\text{Round}(12,5) = 13$.

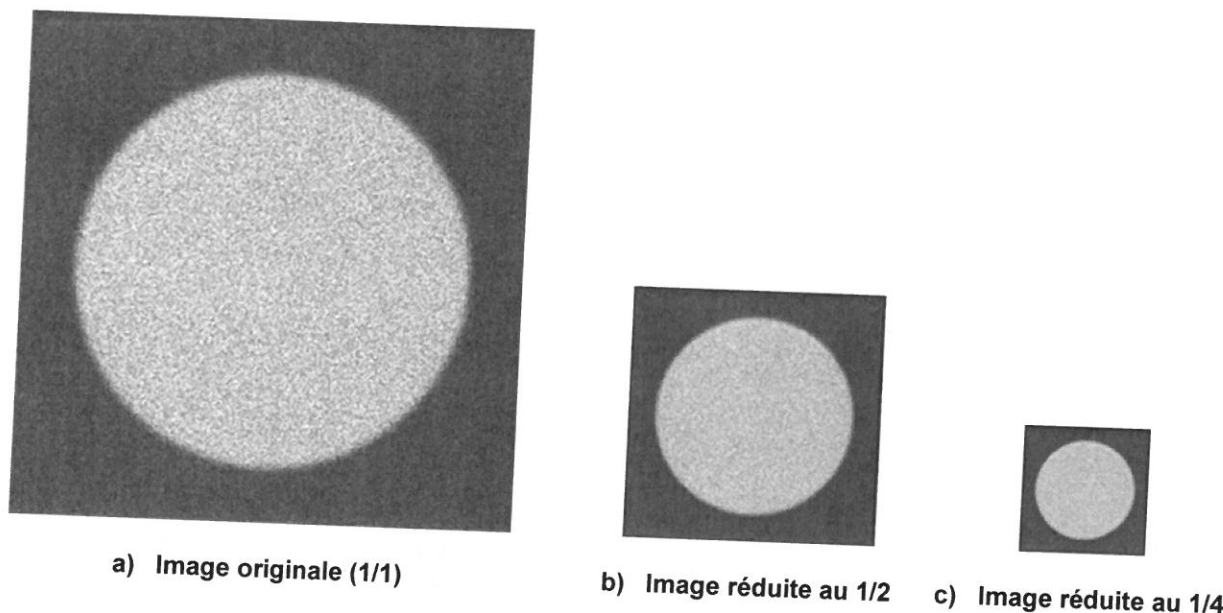


Figure C.4 — Image originale, image réduite au 1/2 et image réduite au 1/4

C.2.3 Calcul de la netteté directionnelle moyenne

La présente sous-routine calcule la netteté directionnelle moyenne R_r pour chaque image de dimension $(1/r)$ comme suit.

- a) Pour chaque pixel (i, j) , déterminer les coefficients $(a, b, c, d, e$ et $f)$ de l'équation quadratique $z(x, y)$, de sorte que l'erreur d'ajustement $S_{\text{erreur}}(i, j)$ dans une zone de pixel 3×3 soit minimisée.

$$z(x, y) = a(i, j)x^2 + b(i, j)y^2 + c(i, j)xy + d(i, j)x + e(i, j)y + f(i, j)$$

pour i (et j) = 1, 2, ..., $i_{\max} - 1$ (et $j_{\max} - 1$)

(C.2)

$$S_{\text{erreur}}(i, j) = \left\{ \sum_{p=-1}^{+1} \sum_{q=-1}^{+1} \left[I_r(i+p, j+q) - z(p, q) \right]^2 \right\} / (3 \times 3)$$

(C.3)

Les opérateurs 3×3 pour déterminer les coefficients a, b, c, d, e et f sont donnés par:

$$a: (1/6) \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad b: (1/6) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad c: (1/4) \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$d: (1/6) \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e: (1/6) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad f: (1/9) \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 2 & 5 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

(C.4)

ISO/TS 24597:2011(F)

- b) Pour chaque pixel, déterminer les gradients d'intensité locale $g(i, j; \theta)$ en calculant dans un premier temps les coefficients différentiels partiels $\partial z / \partial x$ et $\partial z / \partial y$.

$$g(i, j; \theta) = [g_x^2(i, j) + g_y^2(i, j)]^{1/2} \text{ pour } i \text{ (et } j) = 1, 2, \dots, i_{\max} - 1 \text{ (et } j_{\max} - 1) \quad (\text{C.5})$$

Les informations angulaires des gradients sont données par

$$\theta = \tan^{-1}(g_y/g_x), \quad g_x(i, j) = (\partial z / \partial x)_{x=0} = d(i, j) \quad \text{et} \quad g_y(i, j) = (\partial z / \partial y)_{x=0} = e(i, j) \quad (\text{C.6})$$

NOTE Les images des gradients d'intensité locale correspondant aux images de dimension $(1/r)$ pour $r = 1, 2$ et 4 , par exemple, sont représentées à la Figure C.5.

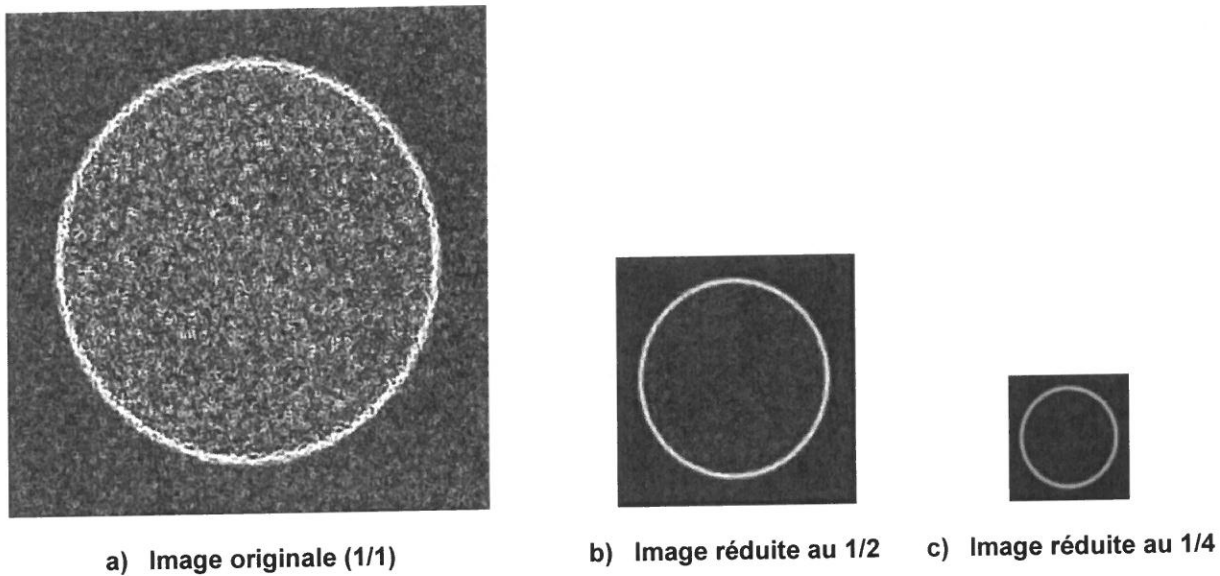


Figure C.5 — Distributions des gradients d'intensité locale

- c) Déterminer les fluctuations $\Delta g(i, j)$ dans $g(i, j; \theta)$ à chaque pixel comme suit:

$$\Delta g(i, j) = [S_{\text{erreur}}(i, j)/6]^{1/2} \text{ pour } i \text{ (et } j) = 1, 2, \dots, i_{\max} - 1 \text{ (et } j_{\max} - 1) \quad (\text{C.7})$$

- d) Déterminer le contraste temporaire C_{temp} de l'image calculée z , dans lequel les intensités de pixel sont des nombres entiers arrondis dans $z(0, 0)$, c'est-à-dire $f(i, j)$. Les procédures de calcul pour C_{temp} sont les mêmes que celles définies pour le contraste temporaire de l'image données aux étapes 1) à 6) de l'Annexe A, élément c), excepté que l'image calculée z est utilisée au lieu de l'image MEB filtrée par filtrage médian.

- e) Prendre le contraste de seuil temporaire ΔC_{temp} comme

$$\Delta C_{\text{temp}} = 0,1 \times C_{\text{temp}} \quad (\text{C.8})$$

- f) Calculer la netteté locale $R_p(i, j; \theta)$ et le rapport de sa fluctuation $\Delta R_p(i, j; \theta)$ à $R_p(i, j; \theta)$ à chaque pixel (i, j) à partir des équations suivantes:

$$R_p(i, j; \theta) = 2\Delta C_{\text{temp}}/g(i, j; \theta) \quad (\text{C.9})$$

$$\Delta R_p(i, j; \theta) = R_p(i, j; \theta) [\Delta g(i, j)/g(i, j; \theta)] \text{ pour } i \text{ (et } j) = 1, 2, \dots, i_{\max} - 1 \text{ (et } j_{\max} - 1) \quad (\text{C.10})$$

- g) Déterminer le rayon minimal principal $R_{p,\min}(i, j)$ de la courbure à chaque pixel (i, j) comme suit:

$$R_{p,\min}(i, j) = 1/K_{\max} \text{ pour } i \text{ (et } j) = 1, 2, \dots, i_{\max} - 1 \text{ (et } j_{\max} - 1) \quad (\text{C.11})$$

ISO/TS 24597:2011(F)

Ici, K_{\max} est la réciproque de la courbure maximale principale. Il est obtenu à partir de l'équation quadratique ci-dessous et est, en fait, la racine de la valeur absolue la plus grande de l'équation.

$$K^2 - 2 \times C_1 \times K + C_0 = 0 \quad (C.12)$$

où

$$C_1 = \frac{(1 + g_x^2)g_{yy} + (1 + g_y^2)g_{xx} - 2g_x g_y g_{xy}}{2(1 + g_x^2 + g_y^2)^{3/2}} \quad (C.13)$$

$$C_0 = \frac{g_{xx}g_{yy} - g_{xy}^2}{(1 + g_x^2 + g_y^2)^2} \quad (C.14)$$

$$g_x = (\partial z / \partial x)_{x=0} = d(i, j) \text{ et } g_y = (\partial z / \partial y)_{x=0} = e(i, j) \quad (C.15)$$

$$g_{xx} = (\partial^2 z / \partial x^2)_{x=0} = 2a(i, j), g_{yy} = (\partial^2 z / \partial y^2)_{x=0} = 2b(i, j) \text{ et } g_{xy} = (\partial^2 z / \partial x \partial y)_{x=0} = c(i, j) \quad (C.16)$$

- h) Déterminer la fonction pondérée $w_{i,j}$ et sa fluctuation $\Delta w_{i,j}$ à chaque pixel (i, j) par les équations suivantes:

$$w_{i,j} = g(i, j; \theta) \text{ et } \Delta w_{i,j} = \Delta g(i, j) \quad \text{pour } R_p(i, j; \theta) \leq 2R_{p,\min}(i, j) \quad (C.17a)$$

$$w_{i,j} = 0 \quad \text{et } \Delta w_{i,j} = 0 \quad \text{pour } R_p(i, j; \theta) > 2R_{p,\min}(i, j) \quad (C.17b)$$

- i) Calculer le contraste C de l'image en utilisant l'étape d), mais compter uniquement les pixels pour lesquels $w_{i,j} > 0$. La valeur q est fixée de façon similaire à 0,2 % du nombre total de pixels, mais uniquement ceux avec $w_{i,j} > 0$, pour l'image segmentée s .

- j) Calculer le facteur de correction pour le contraste de seuil comme suit:

$$f_{\text{corr}} = C/C_{\text{temp}} \quad (C.18)$$

- k) Corriger les valeurs de $R_p(i, j; \theta)$ et $\Delta R_p(i, j; \theta)$ à chaque pixel (i, j) en les multipliant par le facteur de correction f_{corr} , ce qui donne:

$$f_{\text{corr}} \times R_p(i, j; \theta) \text{ et } f_{\text{corr}} \times \Delta R_p(i, j; \theta) \text{ pour } i \text{ (et } j) = 1, 2, \dots, i_{\max} - 1 \text{ (et } j_{\max} - 1) \quad (C.19)$$

- l) Déterminer la netteté directionnelle R_k et le rapport de sa fluctuation ΔR_k à R_k à l'angle azimutal θ_k par les équations suivantes:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} \sum_{j=1}^{j_{\max}-1} w_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} \sum_{j=1}^{j_{\max}-1} [w_{i,j} / R_p(i, j; \theta_k)]} \quad (C.20)$$

et

$$\frac{\Delta R_k}{R_k} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} \sum_{j=1}^{j_{\max}-1} w_{i,j}} \sqrt{\sum_{i=1}^{i_{\max}-1} \sum_{j=1}^{j_{\max}-1} \left[1 - \frac{2R_k}{R_p(i, j; \theta_k)} \right]^2 (\Delta w_{i,j})^2} \quad (C.21)$$

où $(2k - 1)(\pi/k_{\max}) \leq \theta_k < (2k + 1)(\pi/k_{\max})$ et $k = 0, 1, \dots, k_{\max} - 1$ ($k_{\max} = 16$).

ISO/TS 24597:2011(F)

- m) Calculer la netteté directionnelle moyenne R_r et le rapport de sa fluctuation ΔR_r à R_r pour l'image de dimension $(1/r)$ par une moyenne quadratique de R_k :

$$R_r = [(R_0^2 + R_1^2 + \dots + R_{15}^2)/16]^{1/2} \tag{C.22}$$

$$\frac{\Delta R_r}{R_r} = \left(\frac{1}{k_{\max}} \right)^{1/2} \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\max}-1} \left(\frac{R_k}{R_r} \right)^4 \left(\frac{\Delta R_k}{R_k} \right)^2} \tag{C.23}$$

C.2.4 Calcul de la netteté d'image CG

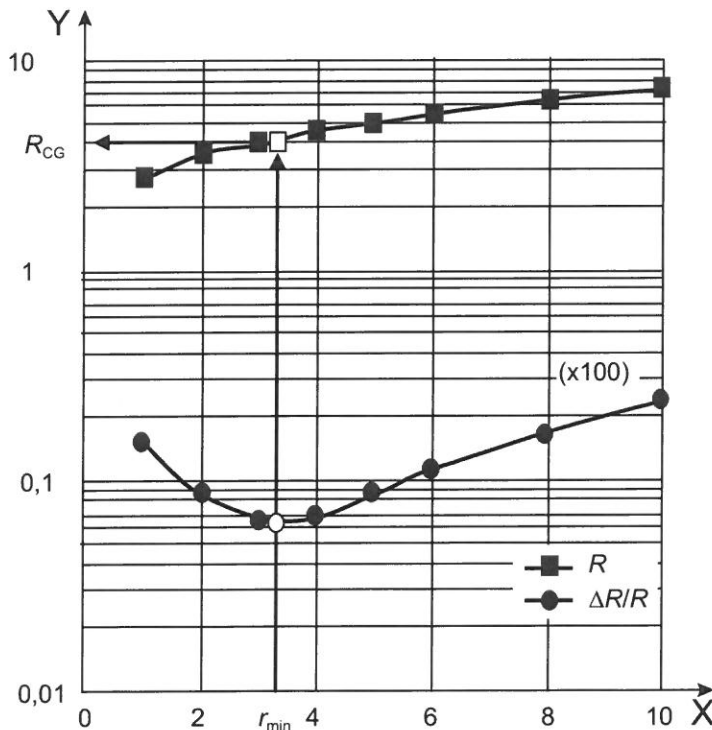
La présente sous-routine calcule la netteté d'image CG R_{CG} comme suit.

- a) Calculer les valeurs correspondantes de R et $\Delta R/R$ à $r = 1$ pour R_r et $\Delta R_r/R_r$ pour toutes les images de dimension $(1/r)$ par les équations suivantes:

$$R = r \times R_r \tag{C.24}$$

$$\Delta R/R = \Delta R_r/R_r \tag{C.25}$$

- b) Tracer un graphique de R et $\Delta R/R$ en fonction de r , comme le montre la Figure C.6.
 c) Déterminer la valeur de réduction r_{\min} pour laquelle le rapport $\Delta R/R$ a la valeur minimale par interpolation.
 Lorsqu'il n'y a pas de point minimum, prendre un point d'inflexion.
 d) Déterminer la netteté d'image CG R_{CG} correspondant à $r = r_{\min}$ à partir de la courbe de R en fonction de r . (voir Figure C.6).



Légende

- X facteur de réduction r
 Y R et $\Delta R/R$

Figure C.6 — Graphiques de R et $\Delta R/R$ en fonction de r

C.3 Génération des images de référence et calcul de leur netteté d'image CG R_{CG}

Un diagramme de la présente routine est donné à la Figure C.7. La sous-routine génère les images de référence et calcule leur netteté d'image CG comme suit.

- a) Créer l'image binaire avec les niveaux L_{low} et L_{high} sur l'image filtrée par filtrage médian en utilisant le seuil $z_{seuil,s-av}$, où

$$L_{low} = \text{Maximum}[50, \text{Int}(3,5\sigma_{n,max})] \quad (\text{C.26})$$

$$L_{high} = \text{Minimum}[200, 255 - \text{Int}(3,5\sigma_{n,max})] \quad (\text{C.27})$$

$$\sigma_{n,max} = 255/(2 \times 3,5 + \text{CNR}) \quad (\text{C.28})$$

et

$$z_{seuil,s-av} = [\text{Av}(z_{max,av,s}) + \text{Av}(z_{min,av,s})]/2 \quad (\text{C.29})$$

Les valeurs de $\text{Av}(z_{max,av,s})$ et $\text{Av}(z_{min,av,s})$ utilisées ici sont déterminées de la même manière que dans le procédé d'évaluation du CNR (voir Annexe A).

NOTE Un facteur de 3,5 diminue d'environ 0,2 % les fréquences de sursaturation et de sous-saturation de l'intensité de pixel ajoutée au bruit aléatoire dans les images de référence.

- b) Initialiser la i ème boucle de calcul décrite dans les étapes c) à h) ci-dessous, c'est-à-dire $i = 1$, et fixer le facteur de netteté $2\sigma_i$ à $i = 1$ selon $2\sigma_1 = \text{Int}(2\sigma_0)$, où $2\sigma_0 = A_{\text{default}}R_{CG} + B_{\text{default}}$, $A_{\text{default}} = 3,099\ 5$ et $B_{\text{default}} = -0,775\ 0$. La valeur R_{CG} utilisée ici est obtenue de la même manière qu'en C.2.
- c) Créer la i ème image de référence avec un facteur de netteté $2\sigma_i$ et comprenant le CNR, comme suit:
- 1) Créer une image convoluée de l'image binaire d'un profil gaussien d'écart-type σ_i .
 - 2) Ajouter le bruit aléatoire gaussien d'écart-type σ_n à l'image convoluée, où $\sigma_n = (L_{high} - L_{low})/\text{CNR}$.
- d) Calculer la valeur R_{CG} pour la i ème image de référence. Le procédé de calcul est identique à celui donné en C.2.
- e) Si $i \geq 2$, passer à l'étape f), sinon passer à l'étape g).
- f) Comparer la valeur R_{CG} avec les valeurs de $R_{CG,i-1}$ et $R_{CG,i}$. Terminer la routine lorsque l'une des inéquations suivantes est satisfaite. Sinon, procéder à l'étape g),

$$R_{CG,i-1} < R_{CG} \leq R_{CG,i} \quad \text{ou} \quad R_{CG,i-1} > R_{CG} \geq R_{CG,i} \quad (\text{C.30})$$

- g) Fixer l'incrément $\Delta\sigma$ comme suit:

$$\Delta\sigma = 0,5 \quad \text{lorsque} \quad \sigma_i < 4 \quad (\text{C.31a})$$

$$\Delta\sigma = 1 \quad \text{lorsque} \quad \sigma_i \geq 4 \quad (\text{C.31b})$$

- h) Procéder à la i ème étape, c'est-à-dire $i = i + 1$, et augmenter ou diminuer la valeur σ_i de $\Delta\sigma$ comme suit:

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta\sigma \quad \text{lorsque} \quad R_{CG,i} < R_{CG} \quad (\text{C.32a})$$

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} - \Delta\sigma \quad \text{lorsque} \quad R_{CG,i} \geq R_{CG} \quad (\text{C.32b})$$

Puis, revenir à l'étape c).

ISO/TS 24597:2011(F)

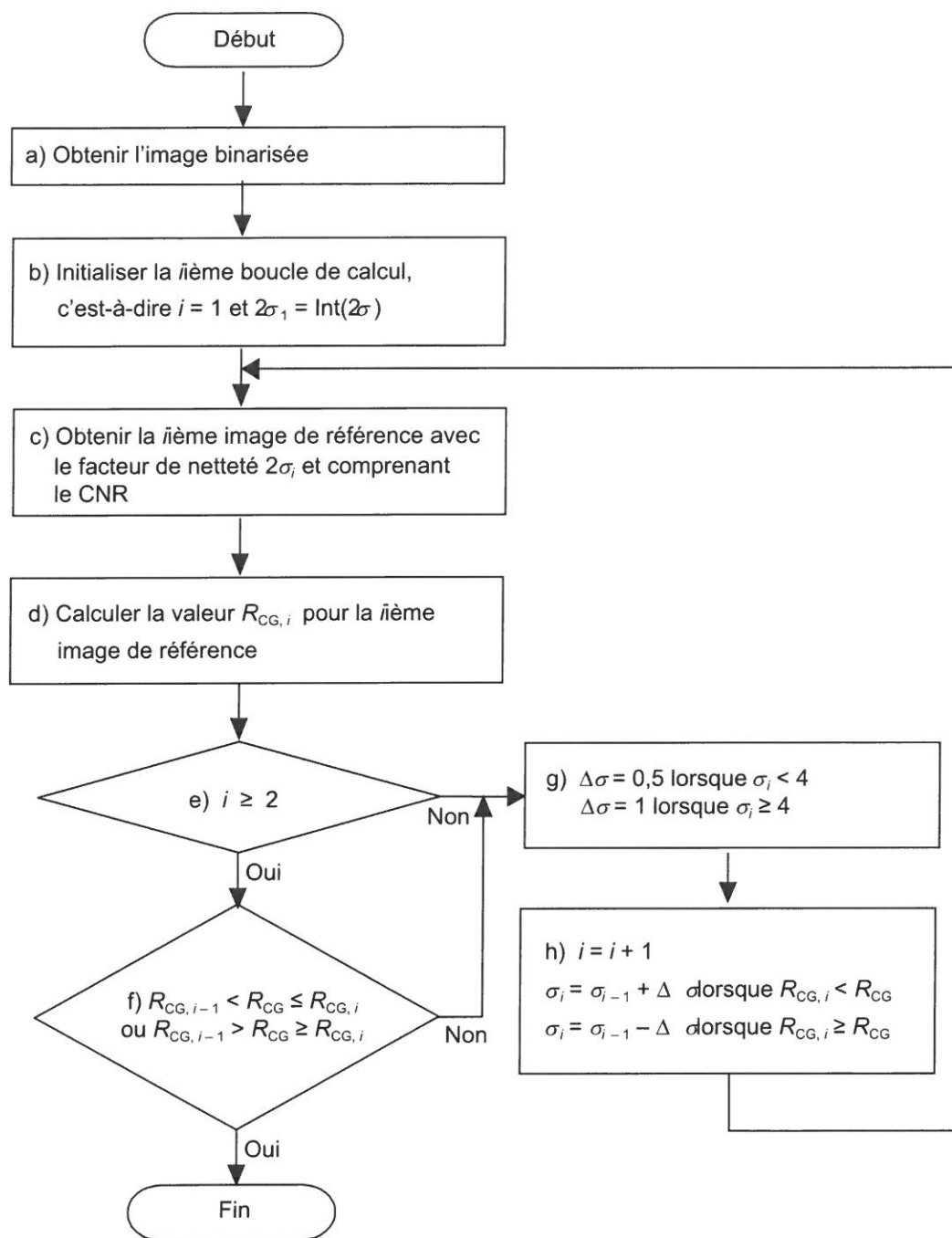


Figure C.7 — Diagramme de la génération des images de référence et calcul de leur netteté CG R_{CG}

C.4 Étalonnage des constantes de conversion A et B

La présente sous-routine étalonne les constantes de conversion A et B en résolvant les équations linéaires simultanées suivantes (qui sont représentées graphiquement à la Figure C.8), comme suit:

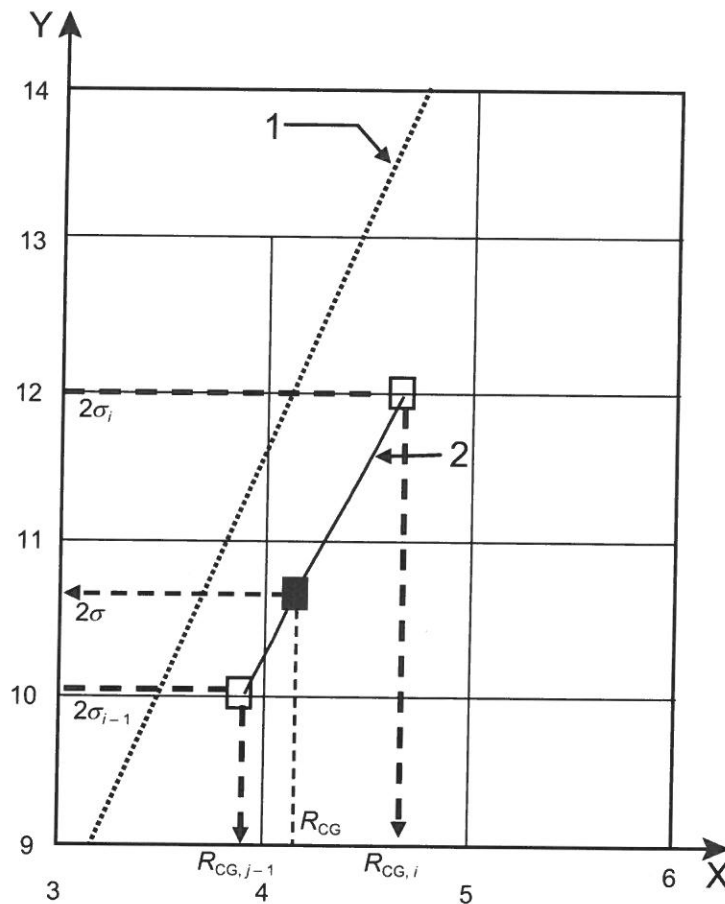
$$2\sigma_i = A_{\text{calib}} \times R_{\text{CG},i} + B_{\text{calib}} \quad (\text{C.33})$$

$$2\sigma_{i-1} = A_{\text{calib}} \times R_{\text{CG},i-1} + B_{\text{calib}} \quad (\text{C.34})$$

Puis, les constantes de conversion étalonnées sont obtenues,

$$A_{\text{calib}} = 2\Delta\sigma / (R_{\text{CG},i} - R_{\text{CG},i-1}) \quad (\text{C.35})$$

$$B_{\text{calib}} = 2\sigma_i - A_{\text{calib}} \times R_{\text{CG},i} \quad (\text{C.36})$$



Légende

X R_{CG} (pixels)

Y facteur de netteté 2σ (pixels)

1 droite par défaut $2\sigma = 3,099\ 5R_{\text{CG}} - 0,775\ 0$

2 droite calibrée $2\sigma = A_{\text{calib}} \times R_{\text{CG}} + B_{\text{calib}}$

Figure C.8 — Facteur de netteté 2σ tracé en fonction de R_{CG} pour l'étalonnage

ISO/TS 24597:2011(F)

C.5 Conversion de la valeur R_{CG} en netteté d'image R_{ES}

La présente sous-routine convertit la valeur R_{CG} en netteté d'image R_{ES} comme suit:

$$R_{ES} = k \times 2\sigma \quad (\text{C.37})$$

où

$$k = 1/\sqrt{2};$$

2σ est le facteur de netteté, donné par:

$$2\sigma = A_{\text{calib}} \times R_{CG} + B_{\text{calib}} \quad (\text{C.38})$$

A_{calib} et B_{calib} sont les constantes de conversion étalonnées. Les valeurs de R_{ES} évaluées montrent des légères fluctuations dues au bruit aléatoire de l'image utilisé dans la génération des images de référence [voir l'étape c) 2) en C.3]. Ici, la netteté d'image R_{ES} montre une faible dépendance au bruit et est évaluée en fonction du CNR.