

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

89/1



NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION D'ELECTRONS

E. VICARIO (x) B. ESCUDIE (xx) A. HELLION (xx)

(x) Département de Physique des Matériaux - Université Claude Bernard Lyon I VILLEURBANNE
(xx) Laboratoire de Traitement du Signal - I.C.P.I. LYON

RESUME

Dans un microscope électronique à balayage, le diamètre du faisceau d'électrons au niveau de l'échantillon est plus faible que la résolution spatiale, surtout lorsqu'on ne détecte que les électrons rétrodiffusés. Ceci est dû à la distribution spatiale de l'émission et se décrit par un produit de convolution entre cette distribution spatiale $G(t)$ et le signal attendu $S(t)$. $G(t)$ est une fonction de point de l'échantillon et on ne peut qu'en estimer une valeur moyenne.

Dans un microanalyseur, le faisceau d'électrons est plus large que la distribution de l'émission des électrons rétrodiffusés ; c'est donc la taille du faisceau au niveau de l'échantillon qui limite la résolution. Le signal obtenu s'exprime encore par :

$$G(t) \times S(t)$$

$G(t)$ est la répartition électronique dans le faisceau primaire, donc une fonction d'appareil.

Dans les deux cas, les images ont été traitées par filtrage inverse du signal à l'aide d'un convoluteur. Le signal est traité monodimensionnellement ligne par ligne. L'image intermédiaire est conservée sur un tube à mémoire. Explorant à 90° du balayage précédent, un nouveau traitement donne l'image finale.

SUMMARY

In a scanning electron microscope, the beam diameter is smaller than the practical resolution : mainly when image is obtained with the only backscattered electrons. This effect is due to the spatial distribution of the backscattered electrons, and is described by convolution between the spatial distribution $G(t)$ of the emission and the expected signal $S(t)$. $G(t)$ is in fact a sample function which must be assumed spatially invariable if the microscope is described as a linear invariant filter.

In a microanalyseur, the beam diameter is very large and limits the resolution : the signal is still $G(t) \times S(t)$, but $G(t)$ is the spatial distribution of the electrons inside the beam and therefore, an apparatus function.

In both cases, the images were processed by inverse filtering of the signal using a convolutor. The "space restoration" of the image is obtained by two filtering processors for two crossed scans, using a memory tube to store the intermediate processed image.



TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE
D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION
D'ELECTRONS

I - INTRODUCTION

Dans un microscope électronique à balayage, le faisceau primaire, convergent sur l'échantillon, balaye ligne par ligne une région carrée de celui-ci. A chaque instant des électrons secondaires sont détectés et le signal obtenu commande la brillance de l'écran d'observation qui est balayé en synchronisme avec l'échantillon. Le grandissement est évidemment le rapport entre la largeur de l'écran et celle de la zone balayée sur l'échantillon. Il est possible, en polarisant négativement une grille placée devant le détecteur, d'arrêter les électrons secondaires vrais, de faible énergie ; ainsi on ne détecte que les électrons rétrodiffusés. On constate alors que la résolution diminue, et parfois assez fortement, ainsi que le rapport signal/bruit. La perte de résolution est due à la distribution spatiale de la rétrodiffusion. La largeur de cette distribution est plus importante que celle de l'émission secondaire vraie, elle-même plus large que la taille du spot sur l'échantillon. Tous les électrons détectés sont affectés à un point de l'image : cet effet est décrit par une convolution entre la distribution spatiale $G(x)$ de l'émission et le signal attendu $S(x)$. Le balayage linéaire, $x = vt$, fournit $S(t)$ décrivant l'échantillon (si l'émission est supposée ponctuelle). Le signal vidéo global $X(t)$ est :

$$X(t) = [S(t) * G(t)] + B(t)$$

où $B(t)$ représente le bruit qui est supposé principalement additif et gaussien.

Nous avons d'abord cherché à obtenir la réponse percussive $G(t)$: c'est en fait une fonction d'échantillon que l'on doit supposer invariable spatialement, si le microscope est décrit comme un filtre linéaire. Etant donnés $X(t)$ et les propriétés statistiques (au premier et au second ordre) de $B(t)$, on en déduit une estimation optimale de $S(t)$. La restauration spatiale de l'image est obtenue par deux filtres du signal pour deux balayages croisés, en utilisant un tube à mémoire pour conserver l'image intermédiaire obtenue.

II - ESTIMATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT

II.1 - Par accumulation statistique

L'échantillon observé a été choisi pour justifier au mieux l'hypothèse que la surface peut être représentée par une fonction aléatoire stationnaire dont la densité spectrale de puissance (dsp) peut être considéré comme "blanche" dans la bande spectrale utile. Le signal vidéo $S(t)$, si la résolution était idéale, est alors une fonction aléatoire dont la dsp est uniforme sur le support spectral de la fonction de trans-

fert du microscope : $\gamma_S(\nu) = \gamma_0$.

L'analyse spectrale de $S(t)$ est liée à la fonction de transfert $g(\nu)$ par :

$$|g(\nu)| = \sqrt{\gamma_X(\nu)/\gamma_0}$$

où $\gamma_X(\nu)$ est la dsp de X

$g(\nu)$ est la transformée de Fourier (T.F) de $G(t)$.

$$G(t) \hat{=} g(\nu)$$

Plusieurs modèles ont été ajustés sur la courbe expérimentale de $|g(\nu)|$. Le meilleur ajustement (figure 1) a été obtenu avec une lorentzienne : $f(\nu) = \frac{1}{1 + \frac{4\pi^2\nu^2}{\mu^2}}$

dont la T.F inverse est $G(t) = \frac{\mu}{2} \exp(-\mu|t|)$. La constante μ apparaît donc comme le coefficient moyen d'adsorption des électrons rétrodiffusés.

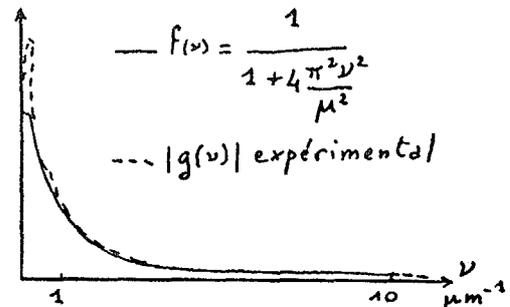


Figure 1 : détermination de la fonction de transfert

Pratiquement l'estimée de $|g(\nu)|$ est bien ajustée par $f(\nu)$ dans la bande $\nu_1 < |\nu| < \nu_2$ avec $\nu_1 \approx 1 \mu\text{m}^{-1}$ et $\nu_2 \approx 5 \text{ à } 10 \mu\text{m}^{-1}$. Nous ignorons donc le comportement de $G(t)$ et de $\frac{dG}{dt}$ au voisinage de $t = 0$; cependant, pour le problème qui nous préoccupe et qui consiste à réaliser un filtre inverse, on ne peut s'intéresser qu'à une bande spectrale limitée : le module carré du gain d'un tel filtre doit rester inférieur à la dsp du bruit d'entrée comme l'indique la figure 2. On sera donc amené à utiliser une fonction de pondération $W(\nu)$ autour de la fréquence ν_2 . Quant aux fréquences spatiales inférieures à ν_1 pour lesquelles la courbe $|g(\nu)|$ est moins bien ajustée, ceci n'est que de peu d'importance puisque la connaissance de $G(t)$ pour $t \gg \frac{1}{\mu}$ ne nous apportera que peu d'information ; le convoluteur utilisé ne nous permettrait pas d'en tenir compte car la durée d'affichage de la réponse du filtre inverse est trop limitée pour traduire des effets à "fréquence basse".

Nous avons comparé $|g(\nu)|$ avec la T.F de la gaussienne représentant la distribution des électrons dans le faisceau primaire (figure 3). La largeur à mi-hauteur de ce "spot" est généralement comprise entre 10 et 50 nm (le plus souvent 10 nm). Les courbes montrent que le faisceau peut être supposé ponctuel.

TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE
D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION
D'ELECTRONS

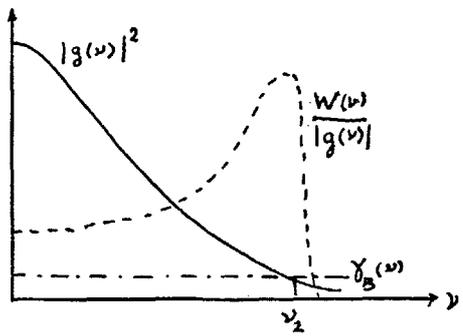


Figure 2 : Limitation de la bande passante pour le filtrage inverse

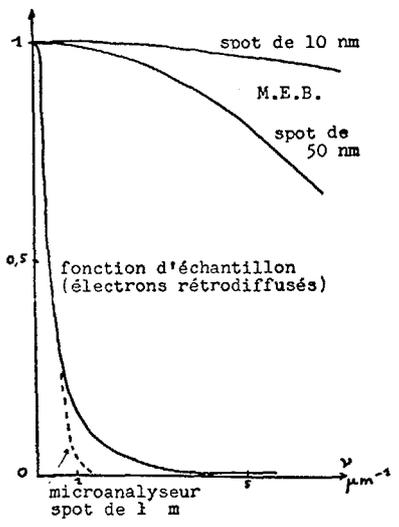


Figure 3 : Fonction de transfert pour la rétrodiffusion: la distribution des électrons dans le faisceau primaire est négligeable en microscopie à balayage, prépondérante sur un microanalyseur.

II.2 - Simulation par la méthode de Monte-Carlo

Cette méthode consiste à simuler un grand nombre de trajectoires électroniques en tirant au hasard, parmi des ensembles de valeurs équiprobables, des paramètres décrivant ces trajectoires. Le calcul divise chaque trajectoire en un certain nombre d'étapes et définit, pour chaque étape, l'énergie de l'électron ainsi que ses coordonnées déterminées en fonction des probabilités de diffusion. Nous avons modifié le programme écrit par J. HENOC et F. MAURICE (1) pour l'émission X, et obtenu ainsi la répartition spatiale de l'émission rétrodiffusée.

Dans le cas de l'argent, cette répartition spatiale peut être représentée par une fonction de la forme :

$$\exp(-\mu \sqrt{R^2 + x^2})$$

où R serait la "profondeur moyenne d'échappée" des rétrodiffusés. Si l'on détecte en émergence rasante

($R \ll x$) la fonction précédente est assez bien approximée par $\exp(-\mu|x|)$ trouvée par ailleurs.

II.3 - Cas des microanalyseurs (sonde de Castaing)

Dans le cas de forts courants de faisceau, tels que ceux utilisés sur les microanalyseurs à sonde électronique, la résolution est limitée essentiellement par la taille du faisceau primaire ainsi que le montre la courbe en pointillés de la figure 3. Pour mesurer la répartition électronique dans le faisceau, on balaye une lame de rasoir, à fort grandissement, perpendiculairement à son arête. Le signal vidéo est alors l'intégrale de la répartition cherchée que l'on a pu ajuster à une gaussienne avec une très bonne précision.

III - FILTRAGE INVERSE DU SIGNAL VIDEO

A partir de la fonction de transfert précédente, deux types de filtre inverse ont été mis en oeuvre.

III.1 - Un filtre inverse optimal - Solution principale de Bracewell

Si l'on néglige le bruit, $X(t) = S(t) * G(t)$ donne par transformation de Fourier :

$$s(v) = \frac{x(v)}{g(v)} = x(v) \cdot h(v)$$

ce qui définit le gain complexe du filtre inverse $h(v)$ dont la T.F inverse sera notée $H(t)$.

Affichant cette fonction $H(t)$ sur un convoluteur, nous obtenons en sortie l'estimée $\hat{S}(t)$ de $S(t)$. Une difficulté, déjà soulignée, surgit dans le calcul de $H(t)$ car $h(v)$ diverge aux fréquences élevées. Comme le bruit devient prépondérant pour $v > B_0$, nous pondérons $h(v)$ par une porte $\Pi_{2B}(v)$ de largeur de bande $2B \approx 2B_0$.

Pour diminuer les oscillations parasites dues à une telle porte, il nous faut chercher une fonction d'apodisation.

a) Cas du microscope à balayage

Après de nombreux essais nous avons retenu la fonction :

$$W_1(v) = \frac{1}{1 + (\frac{v}{B_1})^3}$$

avec $B_1 = B/1,2$. Ainsi, pour $v = B$, W_1 est inférieur à $1,5 \cdot 10^{-3}$. La courbe de la figure 4 montre le module de la fonction :

$$h(v) = (1 + 4\pi^2 v^2/\mu^2) \frac{\Pi_{2B}(v)}{1 + (\frac{v}{B_1})^3}$$

pour $B_1 = 2,75 \mu m^{-1}$ et $B = 1,2 B_1$.

Sa T.F inverse $H(t)$ est donnée par la courbe de la figure 5 : les points indiqués constituent l'affichage des 41 potentiomètres du convoluteur. On remarque que les points correspondant aux fortes valeurs absolues



TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE
D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION
D'ELECTRONS

de t sont deux fois plus espacés que pour les faibles valeurs absolues de t ; ceci permet d'afficher une courbe plus étalée dans le domaine temporel.

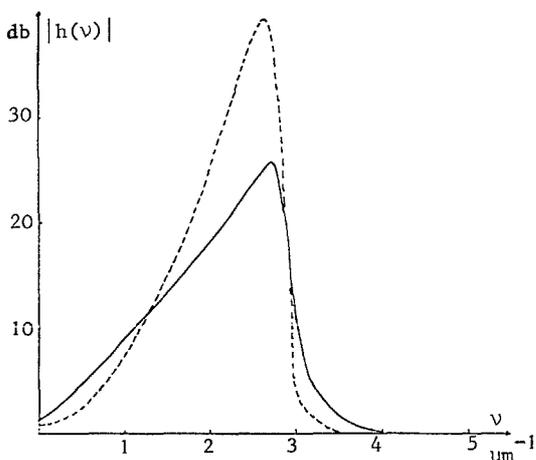


Figure 4 : Gain du convoluteur : ----- calculé
————— expérimental

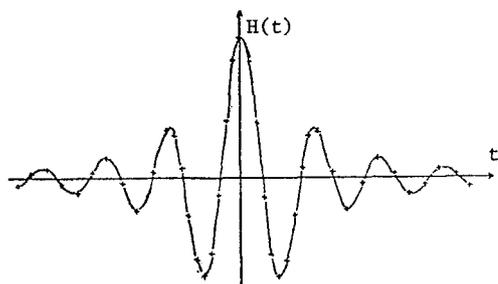


Figure 5 : Filtre inverse : ++++ points affichés sur le convoluteur

Malgré cela, dans le cas de ce filtre, on remarque que la fonction ne converge pas assez vite et que le filtre introduit de ce fait une porte temporelle. Ceci explique la perte importante de gain que l'on remarque sur la courbe expérimentale de la figure 4. En effet la limitation de la réponse $H(t)$ affichée sur le convoluteur s'écrit :

$$H(t) \cdot \Pi_T(t) \hat{=} h'(v) = h(n) * \bar{w}_T(n)$$

avec :

$$\bar{w}_T(n) = \frac{\sin \pi n t}{\pi n}$$

La figure 6 montre l'effet de convolution : la valeur $h'(v)$ est proportionnelle à l'aire hachurée. Si T n'est pas très grand par rapport à $1/B$ ($BT = 1$ à 10 par exemple), l'élargissement dû à l'effet de convolution est notable. Il disparaît pour des valeurs importantes de BT ($= 100$ à 200). Dans notre cas, le produit BT est de l'ordre de 10 à 20 , ce qui n'est pas suffisant pour représenter correctement $H(t)$. Toutes ces remarques se justifient compte tenu des travaux

classiques portant sur la "concentration" en temps et fréquence d'un signal (2).

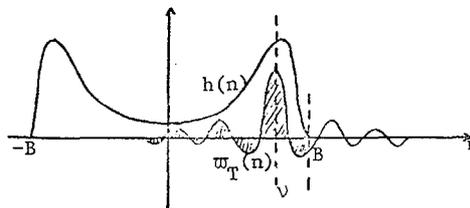


Figure 6 : Effet de convolution dû aux limites du convoluteur

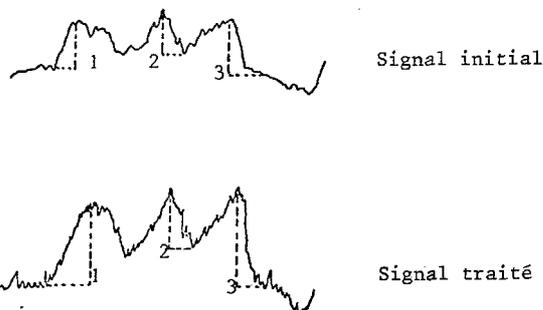


Figure 7 : Augmentation relative de pente : 1 - 58 %
2 - 42 %
3 - 36 %

La figure 7 montre l'amélioration apportée aux signaux avec un tel filtre : les temps de montée restent en général identiques, mais l'amplitude des signaux étant plus grande, il en résulte une augmentation de la pente comprise entre 36 et 58 %.

b) Cas du microanalyseur

La fonction de pondération précédente ne convenant pas, nous avons choisi (voir Figure 8) :

$$W_2(v) = \Pi_{2A}(v) + \Pi_{B-A}(v - v_C) \frac{B - v}{B - A} e^{-K(v-A)} + \Pi_{B-A}(v + v_C) \frac{v - B}{B - A} e^{-K(A-v)}$$

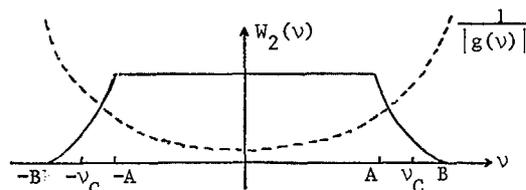


Figure 8 : Fonction de pondération utilisée dans le cas d'un microanalyseur

Les figures 9 et 10 représentent respectivement le gain complexe du filtre inverse obtenu après une telle pondération et la réponse impulsionnelle correspondante. La figure 11 montre un échantillon

TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE
D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION
D'ELECTRONS

d'argent observé au grossissement 800x. L'amélioration de la résolution est évidente. Cependant cette amélioration ne peut se faire que dans le sens du balayage ; c'est pourquoi la marche indiquée par la flèche n'apparaît pratiquement pas dans la photo précédente où le balayage est parallèle à ce détail.

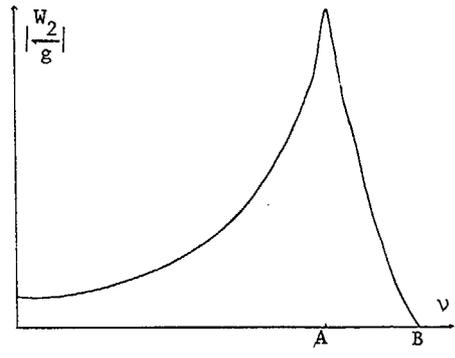


Figure 9 : Gain complexe du filtre inverse utilisé

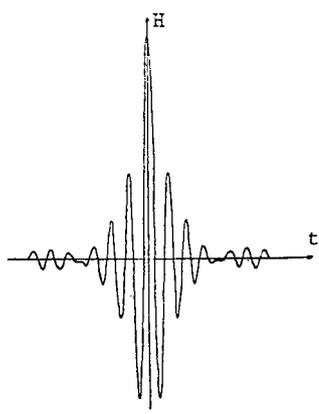
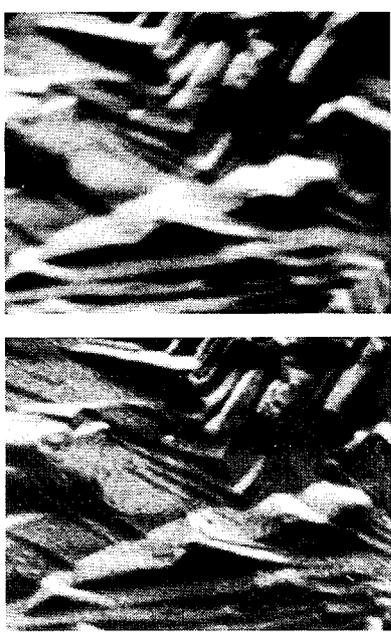


Figure 10 : Réponse impulsionnelle affichée



C

Figure 11 : Echantillon d'argent observé en émission d'électrons rétrodiffusés sur un microanalyseur (800 X), Haute tension : 30 kV)

- a) image non traitée,
- b) image traitée, balayage de gauche à droite,
- c) image traitée, balayage de haut en bas.

III.2 - Un filtre inverse solution de l'équation de Wiener-Kolmogoroff

Ce filtre inverse $H(t)$ rend minimale l'erreur quadratique moyenne entre la valeur désirée $S(t)$ et l'estimée $\hat{S}(t)$ à la sortie de $H(t)$ excité par $X(t)$. Sa T.F s'écrit :

$$h(\nu) = \frac{1}{g(\nu) + \frac{\gamma_B(\nu)}{\gamma_S(\nu)} \cdot \frac{1}{g(\nu)}}$$

La dsp du bruit $\gamma_B(\nu)$ a été obtenue en prenant la T.F de la fonction d'autocorrélation du signal en l'absence de balayage. On observe (Figure 12) :

- une densité spectrale sensiblement uniforme pour les plus hautes fréquences utilisées,
- un bruit en $1/\nu$ au-dessous de 400 Hz qui est vraisemblablement dû au scintillateur,
- une décroissance en $- 6$ db/oct. que l'on peut attribuer à des phénomènes de génération-recombinaison,
- une décroissance enfin en $- 12$ db/oct. due à l'appareillage, en particulier à l'enregistreur magnétique.

a

b

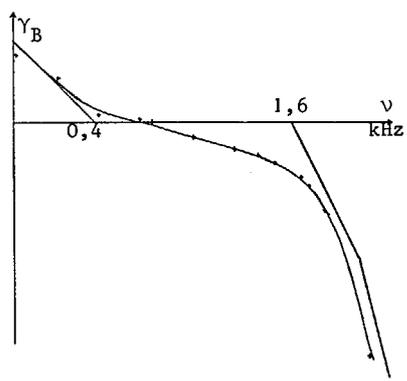


Figure 12 : Densité spectrale de bruit sur un microscope électronique à balayage.



TRAITEMENT PAR FILTRAGE INVERSE
D'IMAGES OBTENUES PAR RETRODIFFUSION
D'ELECTRONS

La courbe $H(t)$ affichée sur le convolveur (Figure 13) est maintenant plus rapidement décroissante en valeur absolue.

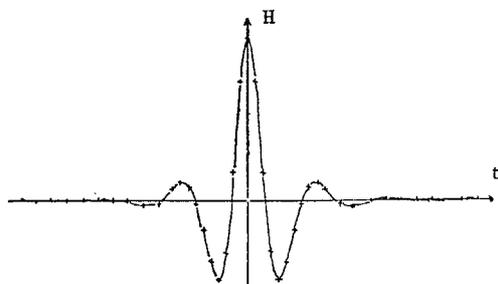


Figure 13 : Réponse impulsionnelle du filtre de Wiener

Le gain expérimental est alors assez voisin du gain désiré (Figure 14). Il est intéressant de comparer cette dernière courbe avec la courbe analogue (Figure 4) correspondant au premier filtre : le maximum du gain se situe à peu près à la même fréquence ; mais il est beaucoup plus faible et dépend du rapport signal/bruit (ici, pour un rapport signal/bruit de 28 db, le maximum se situe à 13 db au lieu de 40 et de 26 obtenus effectivement).

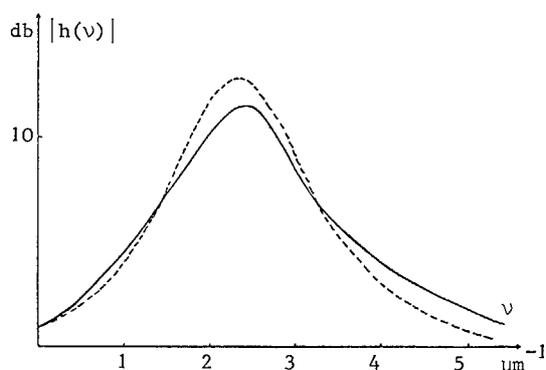


Figure 14 : Gain du filtre de Wiener : --- calculé
— expérimental

Les enregistrements de la figure 15 montrent une augmentation de pente de 54 à 64 % donc une légère amélioration par rapport au premier filtre, malgré l'importante différence de gain.

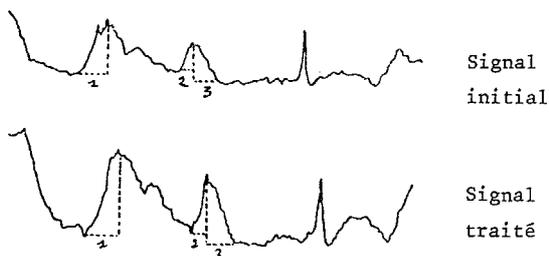
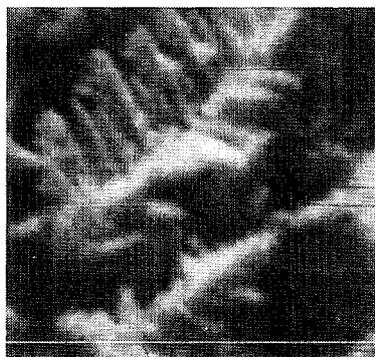


Figure 15 : Augmentation relative de pente : 1 - 54 %
2 - 59 %
3 - 64 %

La figure 16 montre un exemple d'image traitée par ce filtre.



a



b

Figure 16 : Filtrage de Wiener, $G = 10\ 500\ X$

a) électrons rétrodiffusés (original)
b) image obtenue après filtrage

C'est un échantillon test en argent au grandissement 10 500 X ; le traitement a surtout pour effet de rendre les contours de l'image beaucoup moins flous. On distingue maintenant quelques détails qui sont à peine visibles sur l'original.

IV - EMPLOI D'UN TUBE A MEMOIRE

Le traitement précédent, purement monodimensionnel, ne donne des résultats intéressants que sur des échantillons présentant des stries perpendiculaires au sens du balayage. Ne pouvant effectuer un véritable traitement bidimensionnel, nous avons tenté l'approximation qui consiste à effectuer deux filtrages dans deux directions perpendiculaires. A cet effet, le signal issu du microscope est enregistré horizontalement sur l'écran d'un tube à mémoire après un premier filtrage par le convolveur. Cette image intermédiaire est alors lue verticalement, le signal est à nouveau traité par le convolveur puis donne l'image finale. L'emploi d'un tel tube présente deux inconvénients : il cause une perte de résolution et il introduit du bruit.



T R A I T E M E N T P A R F I L T R A G E I N V E R S E
D ' I M A G E S O B T E N U E S P A R R E T R O D I F F U S I O N
D ' E L E C T R O N S

L'opération se solde cependant par un bénéfice comme le montre la figure 17 obtenue avec un filtre à maximum de vraisemblance. Il s'agit du même échantillon test et d'un grandissement de 12000 X. Une image obtenue avec les électrons secondaires, de faible énergie, montre que l'on n'a pas introduit de contraste aberrant.

Il permet cependant une amélioration de la résolution que l'on peut estimer être dans un rapport 2.

La recherche de la réponse impulsionnelle de l'échantillon peut fournir, de plus, des renseignements statistiques sur les phénomènes physiques à l'intérieur de celui-ci.



a

REFERENCES

- (1) J. HENOC and F. MAURICE (1972)
Proc. of the sixth International Conference on X-Ray optics and microanalysis, 113.
- (2) H. DYM and H.P. Mc KEAN (1972)
Fourier Series and Integrals - Academic Press.



b

*Ce travail a été effectué grâce à un contrat A.T.P.
CNRS : "Traitement des Images".*



c

Figure 17 : Filtre optimal $G = -12\ 000\ X$

- a) électrons rétrodiffusés (original)
- b) image obtenue après un double filtrage
- c) électrons secondaires.

V - CONCLUSION

Le filtrage inverse décrit ici présente par rapport aux méthodes numériques, l'avantage du travail en temps réel, mais n'en a pas la précision.