

Acquisition adaptative en imagerie électronique à balayage

Adaptive image acquisition in scanning electronic imagery



Jean-Luc FRANCESCHI

CEMES-LOE/CNRS, B.P. 4347,
31055 Toulouse Cedex
ENSEEIH, 2, rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex

Docteur ès Sciences, Maître de Conférences à l'Université Paul Sabatier.

Actuellement professeur à l'ENSEEIH de Toulouse.

Dirige l'équipe Contrôle Non Destructif et Imagerie au CEMES-LOE/CNRS.

A conçu le MEBIS, mini microscope électronique à balayage transportable et travaillant In Situ.

Ses travaux concernent la commande des faisceaux d'électrons. Développe une méthode d'imagerie acousto-électronique permettant l'observation d'images de la subsurface d'objets massifs.



Nabil BOUGHANMI

CEMES-LOE/CNRS, B.P. 4347,
31055 Toulouse Cedex
ENSEEIH, 2, rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex

A obtenu un diplôme d'ingénieur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Algérie) en 1986 ; puis un DEA d'Electronique à l'ENSEEIH de Toulouse en 1987. Prépare une thèse de Doctorat à Toulouse.

Ses travaux de recherche concernent l'acquisition et le prétraitement d'images.

RÉSUMÉ

La vision par ordinateur est largement utilisée. Elle tend à intégrer la saisie de l'image, sa digitalisation et ses traitements. Nous avons réalisé un système relativement simple basé sur l'utilisation d'un microordinateur hôte du type PCXT. Nous proposons d'adapter la vitesse de balayage du système d'acquisition du signal à la qualité des images souhaitable en utilisant une loi de commande à caractère adaptatif basée sur l'estimation du rapport signal sur bruit.

MOTS CLÉS

Image, vision par ordinateur, balayage, acquisition numérique, commande adaptative, signal, bruit.

SUMMARY

Computer vision is widely used. It integrates image capture, analog to digital conversion and enhancement. We have built a small imaging system with a PCXT microcomputer. We proposed to adapt the scanning system for better images, with an adaptive control based on signal to noise ratio estimation.

KEY WORDS

Image, computer vision, scanning, digital acquisition, adaptive control, signal, noise.

Introduction

Dans de nombreux systèmes d'imagerie, le principe général de fonctionnement consiste à recueillir une image point par point, après avoir balayé un objet avec un dispositif particulier. Cet actionneur peut être un faisceau lumineux, un faisceau électronique, acoustique, ...

L'utilisateur de l'appareil doit effectuer de nombreux réglages de façon que l'image soit exploitable. En microscopie électronique par exemple, l'un des réglages consiste à sélectionner manuellement le niveau du signal vidéo enregistré, en fonction de la vitesse de balayage utilisée, en contrôlant simultanément la qualité de l'image.

Nous nous proposons d'automatiser cette procédure en

réalisant un asservissement adaptatif de la vitesse de balayage au rapport signal sur bruit estimé après avoir enregistré le signal d'un ensemble de points, une ligne de l'image par exemple.

1. Montage expérimental

1.1. PRINCIPE DU CAPTEUR D'IMAGES : LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE A BALAYAGE

Pour réaliser un dispositif de contrôle non destructif à l'échelle submicronique nous avons réalisé un mini microscope électronique à balayage transportable baptisé MEBIS (Microscope Electronique à Balayage fonctionnant In Situ) [1], [2]. Celui-ci se pose directement sur les objets volumineux à examiner.

D'une façon très générale, le principe de fonctionnement de l'appareil (fig. 1) consiste à balayer la surface d'un objet à l'aide d'un faisceau d'électrons aussi fin que possible, et recueillir les électrons rétrodiffusés par la surface. Ces électrons une fois détectés, fournissent un signal qui convenablement amplifié et traité détermine le niveau de gris du « pixel » correspondant sur l'écran du moniteur d'observation. On réalise ainsi une application bijective du plan objet XY balayé au plan image enregistré sur le moniteur. L'image de la surface de l'objet est ainsi visualisée.

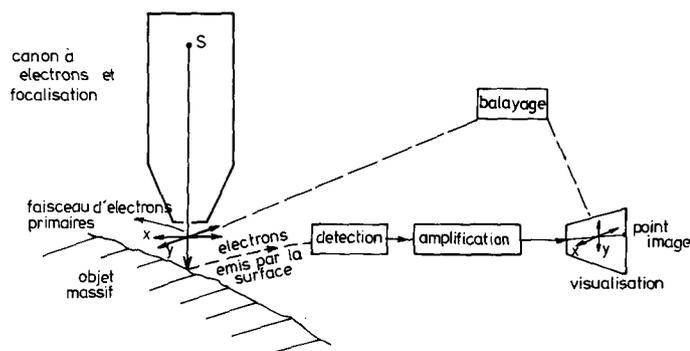


Fig. 1. — Principe du capteur d'images.

1.2. ÉLECTRONIQUE DE COMMANDE

L'électronique de commande de l'appareil a été réalisée sous forme modulaire (fig. 2). Elle autorise un fonctionnement manuel ou automatisé par l'intermédiaire d'un microordinateur. Afin d'augmenter la souplesse de fonctionnement de l'ensemble, un dispositif permettant d'obtenir une image digitalisée a été mis en œuvre. Outre le stockage aisé des images, ce dispositif autorise un grand nombre de traitements.

Une caractéristique du signal exploité est qu'il dépend fortement de la vitesse de balayage sur la surface examinée. Un rapport signal sur bruit convenable (≥ 5) [3] nécessite parfois d'utiliser des périodes image de l'ordre de

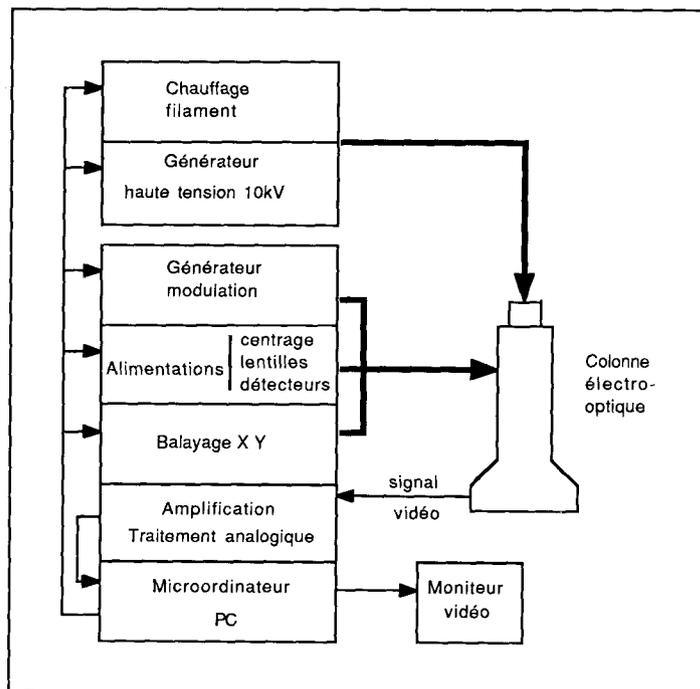


Fig. 2. — Schéma fonctionnel de l'électronique de commande.

quelques minutes [4]. Les dispositifs commercialisés actuellement travaillant en temps réel sont parfois mal adaptés aux caractéristiques de nos images. Après une première approche utilisant un microordinateur grand public [5] [6] nous avons développé une version plus performante intégrée dans le châssis d'un microordinateur.

1.3. NUMÉRISATION DES IMAGES

Le système additionnel de numérisation des images (fig. 3) comprend :

- un module de balayage XY commandé par le microordinateur ;
- une carte d'acquisition et de prétraitement du signal vidéo issu du microscope et qui numérise le signal ;
- une « carte image » commerciale [7] qui autorise également la visualisation en temps réel sur un écran vidéo.

1.3.1. Le module de balayage XY

Le balayage du faisceau électronique consiste à asservir la position du point d'impact du faisceau sur l'objet à deux rampes en tension. Une des principales difficultés que nous avons rencontrée dans la conception de ce circuit concernait l'amplitude des rampes (c'est-à-dire le grandissement de l'image) et également la fréquence de ces rampes (c'est-à-dire la vitesse de balayage).

Nous nous sommes tournés vers une génération numérique des rampes, qui associée à l'utilisation de circuits intégrés à logique TTL permet un interfacement adaptatif aisé avec le microcalculateur. L'avantage indéniable du balayage numérique réside en effet dans la maîtrise complète du

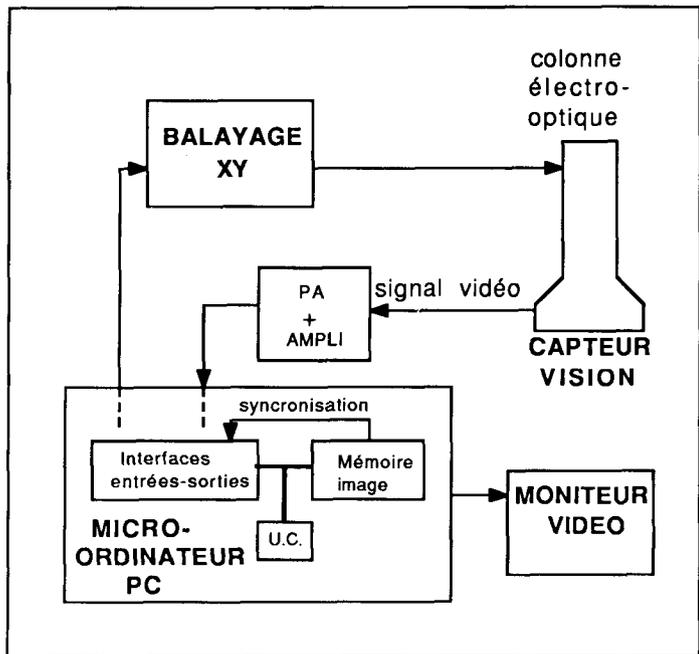


Fig. 3. — Schéma fonctionnel du système adaptatif d'acquisition des images.

balayage par quelques signaux de synchronisation ; il est possible de connaître à tout moment la position précise du point de l'image balayé, et de commander la vitesse d'analyse point par point ou ligne par ligne.

D'autre part, une déviation verticale « en escalier » comme celle qu'autorise le balayage numérique, correspond à l'analyse idéale de l'image puisque chaque ligne est perpendiculaire à la direction de déviation verticale. Cela n'est par contre pas le cas pour une rampe de déviation analogique qui continue à augmenter pendant le parcours de la ligne ; la ligne sera donc inclinée par rapport à la direction de déviation verticale. C'est pourquoi ce type de balayage commence à être adopté de plus en plus dans les microscopes électroniques.

Nous nous sommes fixés un nombre de lignes égal à 256, permettant d'exploiter les possibilités du MEBIS de façon satisfaisante sans nous pénaliser par un montage trop complexe. Ce module offre également une grande souplesse de commande avec un encombrement plus réduit (tiroir NIM simple) ; d'autre part il convient parfaitement à l'acquisition numérique d'une image de 256 lignes correspondantes à la définition des moniteurs vidéo standard.

Le principe retenu est de faire compter sur huit bits (de 0 à 255) deux compteurs binaires 4 bits, et de convertir la rampe numérique obtenue par un convertisseur numérique-analogique (CNA) (fig. 4).

En pratique, les compteurs « lignes » sont synchronisés sur un oscillateur (VCO) dont la fréquence est commandée par une tension issue du micro-calculateur ou du panneau avant, après passage dans un amplificateur de gain 4 qui permet d'utiliser la pleine échelle de commande de l'oscillateur (20 V) à partir du niveau de sortie d'un convertisseur numérique analogique (0-5 V). Les deux compteurs lignes (déviation horizontale) synchronisent les

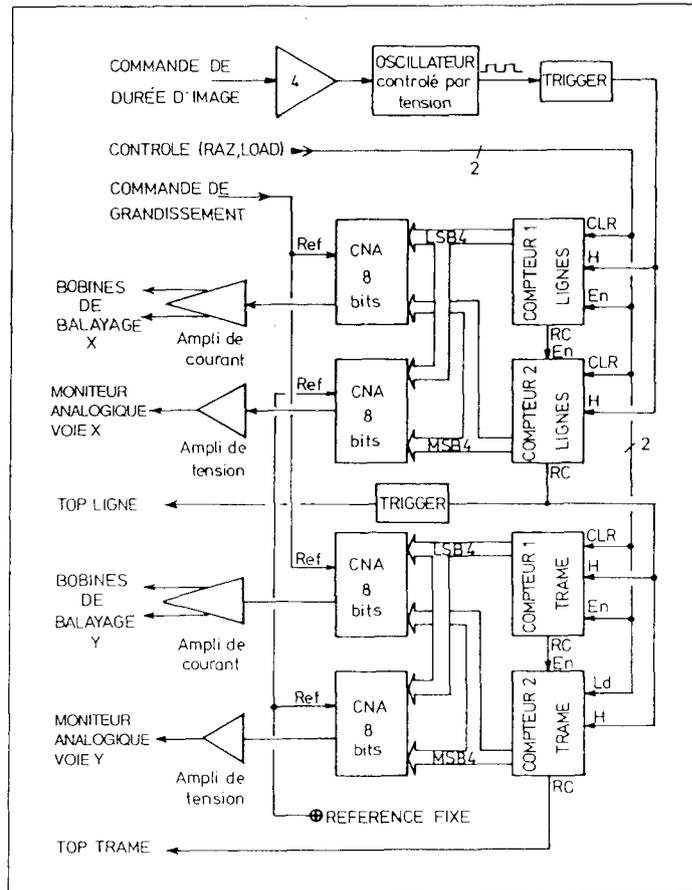


Fig. 4. — Schéma-bloc du module de balayage.

deux compteurs « image » (déviation verticale), en les incrémentant à la fin de chaque ligne.

Le nombre de lignes est ainsi fixé à 256, et la fréquence de l'oscillateur « ligne » va également imposer la durée de l'image. Un circuit déclencheur (« trigger monostable ») assure des transitions correctes entre l'oscillateur et l'entrée « horloge » des compteurs.

Un premier circuit à amplitude de sortie fixe, fournit deux rampes en tension. Les CNA correspondants sont connectés à une tension de référence fixe et, par l'intermédiaire d'un amplificateur opérationnel, servent à alimenter les entrées X et Y du moniteur vidéo analogique auxiliaire de contrôle après un filtrage passe-bas qui permet de lisser la rampe obtenue.

Le deuxième circuit comprend un réglage d'amplitude et fournit deux rampes de courant. Les CNA correspondants attaquent un amplificateur de courant qui amènera les rampes à un niveau suffisant pour les bobines de déflexion du microscope. La tension (commune) de référence de ces deux CNA est variable, toujours à partir du micro-calculateur ou du panneau avant ; c'est elle qui va fixer l'amplitude des rampes de sortie, donc le grandissement du microscope en fixant l'étendue de la plage balayée.

Un certain nombre de signaux de synchronisation (sorties fin de ligne, fin de trame, et entrées inhibition de

comptage ligne et trame) sont prévues pour la commande numérique et pour le dispositif d'alignement automatique du niveau noir inclus dans l'amplificateur vidéo. D'autre part, un commutateur couplé à un multiplexeur analogique permet de couper la liaison entre la sortie de l'oscillateur et l'entrée horloge des compteurs lignes, et de relier cette entrée à un signal d'horloge extérieur (position « horloge externe » du commutateur). Cette horloge externe sera celle de la carte de numérisation de l'image. C'est cette possibilité qui nous permettra de réaliser une commande adaptative des images.

1.3.2. Carte d'acquisition et de prétraitement du signal vidéo

Cette carte d'acquisition se compose essentiellement (fig. 5) d'un intégrateur analogique, d'un convertisseur analogique-numérique suivi d'une mémoire tampon qui sert à stocker provisoirement les données avant leur transfert vers la carte plan mémoire image via le bus de l'ordinateur à une cadence relativement lente.

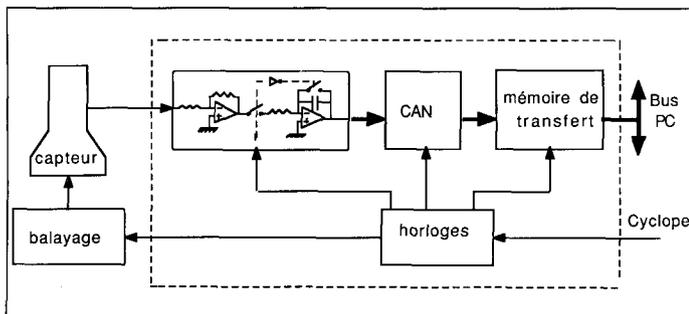


Fig. 5. — Carte interface d'acquisition du signal vidéo.

La numérisation s'effectue sur 8 bits (256 niveaux de gris pour l'image) et le temps de conversion minimum est de l'ordre de $10 \mu s$ par pixel (image en 3 secondes).

1.3.3. Carte plan mémoire numérique

Cette carte commerciale [7], (fig. 6) possède une mémoire de 256 Koctets ($512 \times 512 \times 8$ bits). Un étage de conversion numérique-analogique permet de « lire » ce plan en permanence à la fréquence télévision (25 images par seconde). L'image est observée sur un moniteur vidéo du

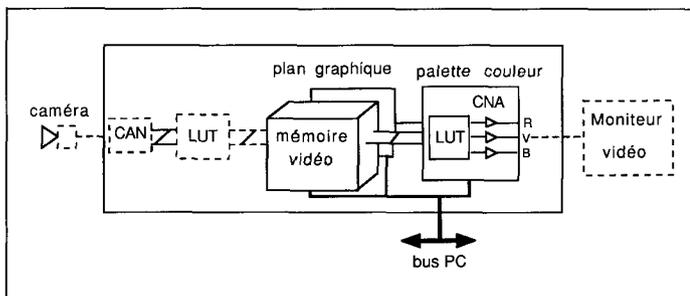


Fig. 6. — Schéma synoptique de la carte plan mémoire image cyclope.

type télévision. Cette carte fournit un signal de synchronisation à l'interface d'acquisition (CAN). Ce signal de suppression trame permet de charger la mémoire pendant la suppression trame.

L'utilisateur a ainsi à sa disposition un écran rémanent effaçable à volonté.

2. L'acquisition adaptative des images : une première approche

L'ensemble que nous avons réalisé, présente une très grande souplesse d'utilisation. En particulier un signal d'horloge suffit pour commander la fréquence de balayage. Nous nous proposons d'adapter la vitesse d'acquisition des images à la qualité nécessaire pour pouvoir faire un traitement des informations utiles (analyse de texture, détection de contours, fissures, caractérisation chimique, ...).

2.1. INDICE DE PERFORMANCE

Comme indiqué précédemment, il a été démontré qu'une image correcte nécessite un rapport signal sur bruit minimum égal à 5 environ [3]. Nous proposons d'utiliser le rapport signal sur bruit comme indice de performance. Nous chercherons à estimer ce rapport le plus simplement possible, pour mettre en œuvre une loi de commande du balayage à caractère adaptatif.

2.2. ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE DE BALAYAGE SUR LE RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT (S/B)

Pour un courant constant du faisceau sur l'objet, et pour un objet donné le signal détecté issu des électrons rétrodiffusés dépend de la vitesse de balayage, c'est-à-dire du temps durant lequel le faisceau d'électrons « stationne » sur chaque point. A la limite, si le balayage est trop rapide, le signal vidéo sera pratiquement noyé dans le bruit.

2.2.1. Etude théorique

La bande passante nécessaire pour l'obtention d'images peut être estimée approximativement compte tenu des caractéristiques de balayage [8].

On suppose qu'une image de N lignes et de N pixels est parcourue en un temps T ; pour obtenir la fréquence maximale du signal vidéo on suppose que deux points successifs de l'objet observé peuvent présenter un contraste maximal (fig. 7). Ainsi le signal sera constitué par une suite de niveaux hauts (contraste maximum pour un pixel) et de niveaux bas (contraste minimum). Il y a N pixels par ligne, donc $N/2$ niveaux hauts par ligne et $N^2/2$ par image, soit une fréquence $N^2/2 T$ pour le fondamental des signaux carrés obtenus.

En pratique, le diamètre de la sonde électronique est comparable à la dimension d'un point de l'image; comme la densité de courant dans la sonde n'est pas uniforme, les

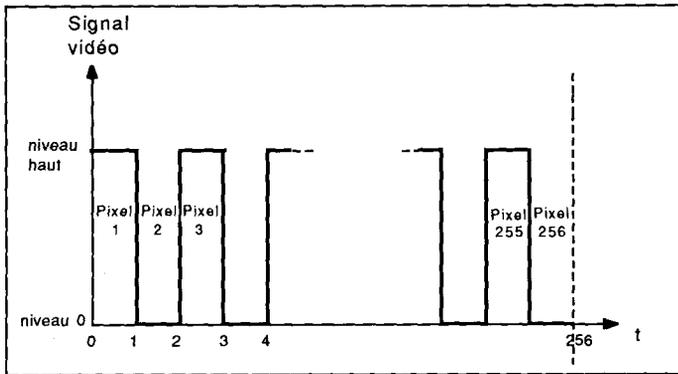


Fig. 7. — Représentation du signal vidéo en supposant un contraste maximal pour deux pixels voisins.

harmoniques qui correspondent aux fréquences supérieures à $N^2/2 T$ traduiront plus les propriétés de la sonde que celles de la surface de l'objet et il sera inutile de les conserver.

Cette approximation conduit à une limite supérieure de bande passante $N^2/2 T$ de 8 kHz environ pour une image en 5 s sur 256 lignes, la limite inférieure de la bande passante étant très proche du continu (cas d'une image très peu contrastée). La bande passante atteindrait par contre 1,6 MHz pour notre signal et pour un balayage à vitesse télévision.

2.2.2. Vérification expérimentale

Il s'agit d'estimer la valeur du rapport signal sur bruit à partir des mesures expérimentales du signal vidéo durant 1 ligne.

Nous réglons le grandissement du système pour que la taille du spot de focalisation soit égale à la taille d'un pixel. Soit T la durée d'une image $N \times N$ pixels. La durée d'une ligne est sensiblement égale à T/N . Nous effectuons nos mesures en fait en balayant toujours la même ligne sur l'objet.

La bande passante limitée des détecteurs d'électrons rétrodiffusés nous conduit à isoler par un filtrage passe-bas le signal utile légèrement bruité, et par un filtrage passe haut le bruit dans les mêmes conditions d'amplification, la fréquence de coupure étant la même, égale à $N^2/2 T$.

Soit V_1 la valeur efficace du signal à la sortie du filtre passe bas ($f_c = N^2/2 T$), et V_2 la valeur efficace du signal dans la bande $[f_c - 1 \text{ MHz}]$.

Soit P_B et P_S les puissances du bruit et du signal mesurés.

On suppose que $V_1^2 = K(P_B + P_S) = KP_{B_1} + KP_S$ et que $V_2^2 = KP_{B_2}$ car le signal utile, contrairement au bruit, est essentiellement limité dans la bande $[0 - f_c]$.

En effectuant un balayage relativement lent, on mesure V_{20}^2 à la fréquence la plus basse.

On peut supposer que $V_{20}^2 \approx KP_B$, car avec le balayage lent et en filtrant le signal à la fréquence $N^2/2 T$, la contribution du signal utile reste faible. V_{20}^2 représente alors le bruit total.

Il vient :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{\text{exp}} = \frac{P_S}{P_B} = \frac{KP_S}{KP_B} = \frac{KP_S}{KP_{B_1} + KP_{B_2}} = \frac{V_1^2 + V_2^2 - V_{20}^2}{V_{20}^2}$$

avec

P_{B_1} : puissance du bruit bande $0 - f_c$

P_{B_2} : puissance du bruit bande $f_c - 1 \text{ MHz}$.

Pour différentes valeurs de T nous avons représenté sur la figure 8 la valeur de ce rapport (S/B) expérimental, mesuré pour les deux images que nous présentons par ailleurs sur la planche I.

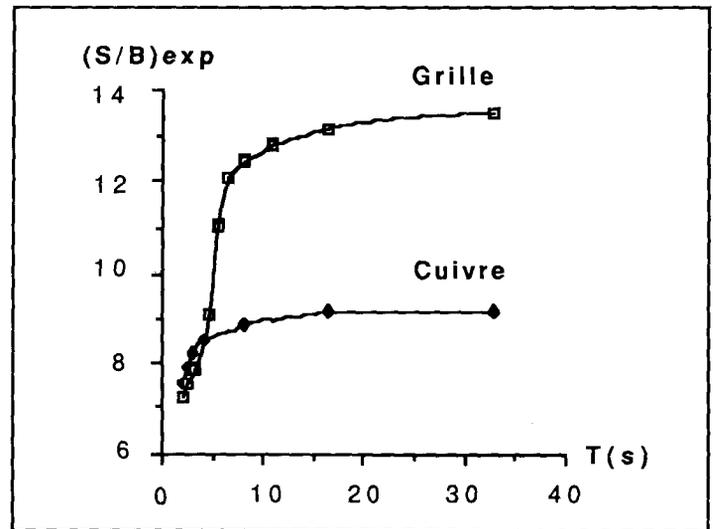


Fig. 8. — Estimation expérimentale du rapport signal sur bruit en fonction de la durée T d'une image.

On constate que ces résultats expérimentaux sont conformes aux précisions :

— $(S/B)_{\text{exp}}$ est une fonction croissante de la durée T d'une image,

— pour un objet très contrasté (grille) la variation du rapport $(S/B)_{\text{exp}}$ en fonction de T est plus grande, et plus forte également qu'avec un objet aux contrastes moins prononcés (cuivre).

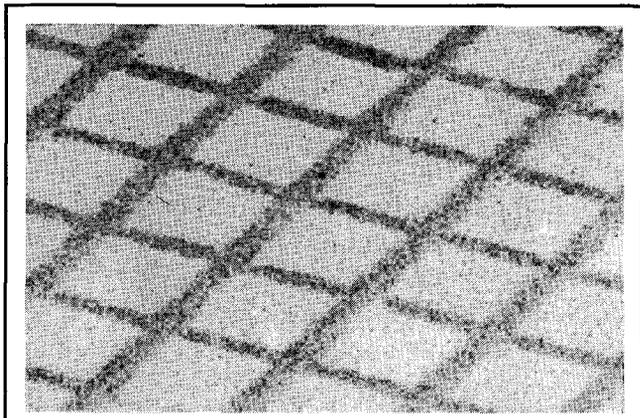
Le rapport $(S/B)_{\text{exp}}$ reste néanmoins relativement faible avec le type de détecteur utilisé pour les petites périodes images, et c'est pourquoi nous nous proposons de l'améliorer.

2.2.3. Amélioration du rapport S/B

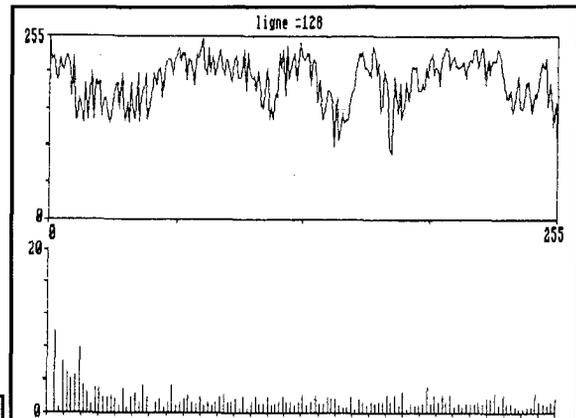
Pour éliminer au maximum le bruit nous intégrons le signal sur la durée correspondante de chaque pixel à l'aide d'un intégrateur électronique (fig. 5). Nous nous proposons d'estimer l'amélioration apportée ainsi.

Afin de simplifier les calculs, nous supposons que le signal est altéré uniquement par un bruit blanc dont la densité spectrale de puissance d'amplitude B est constante dans la bande de fréquence utilisée $[-f_M, f_M]$.

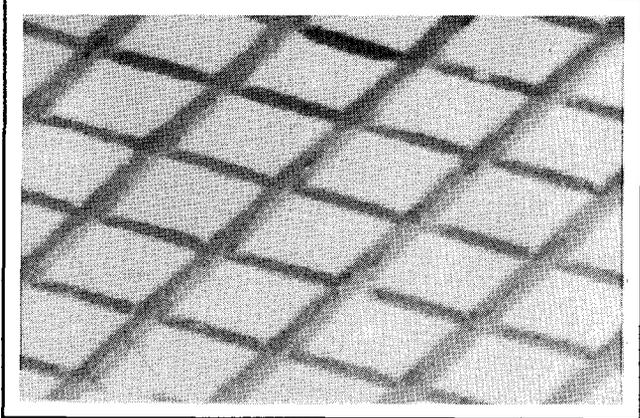
Cette hypothèse sera justifiée expérimentalement comme nous le verrons plus loin.



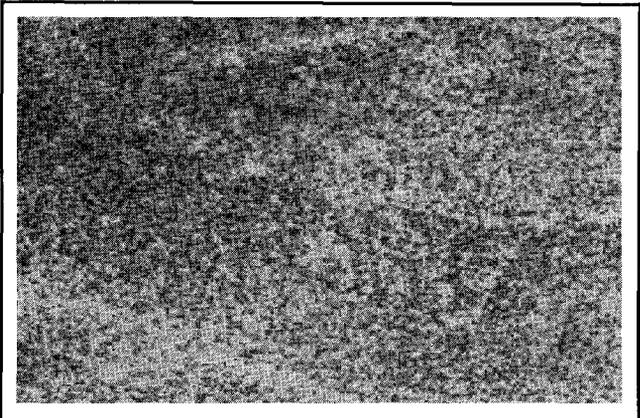
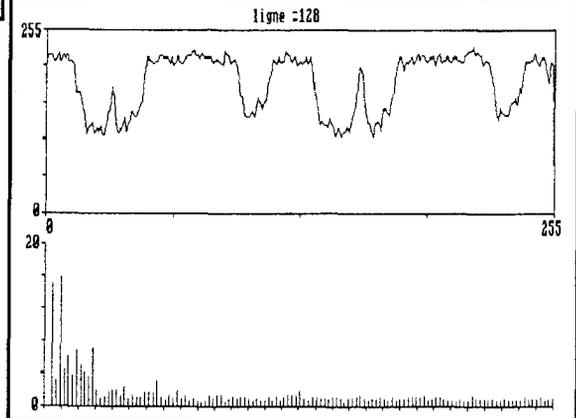
T=4s



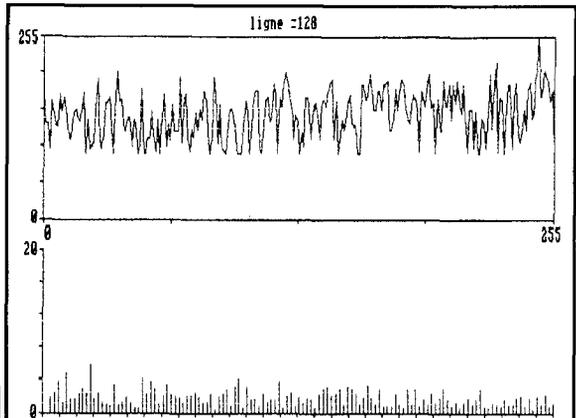
GRILLE



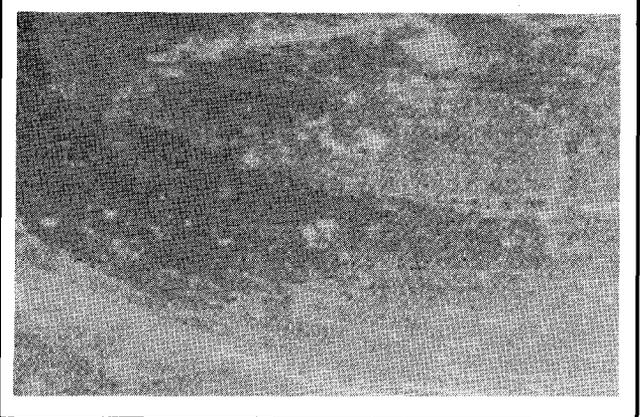
T=250s



T=4s



CUIVRE



T=250s

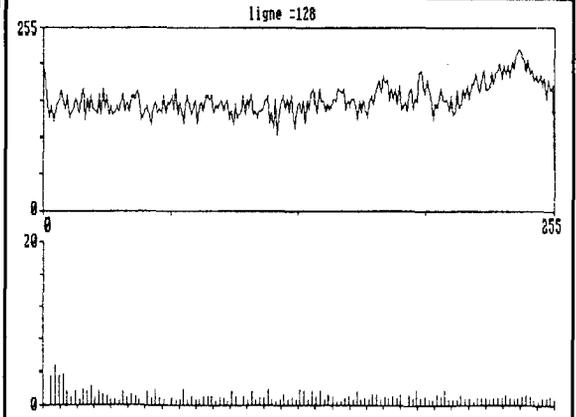


PLANCHE I

Soit : $P_{SE} = A^2/2$ la puissance du signal d'entrée (signal carré de hauteur A sur $0 - \frac{T}{2}$ et

$$P_{BE} = \int_{-f_M}^{+f_M} B \cdot df = 2 B f_M \text{ la puissance totale du bruit}$$

d'entrée en supposant une résistance d'entrée unité.

Pour une intégration du signal sur chaque pixel (période T_p) de constante de temps Rc , le module H de la fonction de transfert est tel que :

$$H^2 = \frac{1}{4 \pi^2 R^2 c^2 f^2}$$

où f désigne la fréquence du signal.

S/B à l'entrée sera noté $(S/B)_e$, il vient :

$$(S/B)_e = \frac{P_{SE}}{P_{BE}} = \frac{A^2}{4 B f_M}$$

Nous pouvons supposer également comme précédemment que le signal utile (fig. 7) est un signal carré de fréquence $f_c = N^2/2 T$ et que seul le terme fondamental d'amplitude $2 A/\pi$ est transmis.

La puissance du signal utile en sortie sera :

$$P_{SS} = 2 A^2/\pi^2 |H(f_c)|^2.$$

Supposons en sortie une puissance totale du bruit égale à P_{BS}

$$P_{BS} = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} B \frac{1}{4 \pi^2 R^2 c^2 f^2} df \right| \approx B \left| \int_{-f_M}^{f_M} \frac{1}{4 \pi^2 R^2 c^2 f^2} df \right| = \frac{B}{2 \pi^2 R^2 c^2 f_M}$$

On peut donc déduire le rapport $(S/B)_s$ en sortie tel que :

$$(S/B)_s = \frac{P_{SS}}{P_{BS}} = \frac{4 R^2 c^2 f_M A^2 H^2(f_c)}{B} = \frac{f_M A^2}{\pi^2 B f_c^2}$$

On peut définir ainsi un coefficient r d'amélioration du rapport S/B tel que :

$$r = \frac{(S/B)_s}{(S/B)_e} = \frac{4 f_M^2}{\pi^2 f_c^2} = f_M^2 \times \frac{16 T^2}{\pi^2 N^4} \text{ car } f_c = \frac{N^2}{2 T}$$

Dans notre cas f_M est une constante déterminée par l'ensemble du système de détection. Donc $r = [(S/B)_s/(S/B)_e] = Cte \times T^2$. On constate donc avec les hypothèses simplificatrices utilisées, que le rapport signal sur bruit après l'intégrateur est proportionnel au carré de la durée de l'image, d'où l'intérêt comme on pouvait intuitivement le supposer, de réaliser nos acquisitions à la vitesse la plus lente possible, compatible avec les durées d'analyse souhaitables.

2.3. ACQUISITION ADAPTATIVE

Pour illustrer notre méthode et nos hypothèses, nous présentons sur la planche I les images de deux objets

différents, ainsi que le spectre d'amplitude du signal vidéo correspondant à la ligne centrale.

Les résultats sont donnés pour les deux vitesses extrêmes de balayage utilisées [4]. L'amélioration des images est très sensible lorsque le temps d'acquisition est plus grand. Le signal correspondant de la ligne centrale et le spectre de puissance calculé qui lui correspond confirment également ce résultat. C'est pourquoi nous nous proposons ultérieurement de réaliser une acquisition adaptative programmée en choisissant une vitesse de balayage parmi 8, à partir de l'analyse numérique du signal à la fin de chaque ligne et de son traitement en temps réel à l'aide d'un processeur spécialisé. Le module électronique est en cours de réalisation.

Conclusion

La réalisation d'un dispositif de balayage numérique, facilement programmable, nous a permis de définir une nouvelle façon d'acquérir les images en tenant compte du rapport signal sur bruit. Pour l'instant nous avons réalisé une acquisition adaptative programmée qui fonctionne en boucle ouverte, avec des temps d'acquisitions des images variant de quelques secondes à plusieurs minutes suivant les méthodes d'imagerie que nous utilisons.

Nous nous proposons de réaliser une acquisition adaptative plus rapide, pouvant aller jusqu'à l'acquisition en temps réel, en incluant dans notre boucle de calcul un processeur spécialisé (DSP 16 Ariel) en série avec le module de conversion analogique-numérique. Le traitement du signal sera ainsi plus rigoureux, mais le principe de l'acquisition restera le même, c'est-à-dire que l'analyse du rapport signal sur bruit d'une ligne ou d'un groupe de pixels commande la vitesse de balayage de la ligne ou du groupe de pixels suivant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. L. FRANCESCHI, H. LE FLOCH, J. TRINQUIER, B. JOUFFREY, Réalisation d'un dispositif de contrôle submicronique des surfaces, *Mécanique Matériaux Electricité* 418, nov. déc. (1986).
- [2] J. L. FRANCESCHI, H. LE FLOCH, J. TRINQUIER, B. JOUFFREY, *Image acquisition in In Situ Scanning Electron Microscopy Proceedings*, 11th Int. Congress on Elect. Microscopy, Kyoto, Japan (1986).
- [3] E. VICARIO, dans « Microanalyse et Microscopie Electronique à Balayage » *Editions de Physique*. BP 112, 91402 Orsay, France.
- [4] J. L. FRANCESCHI, R. MURILLO, J. TRINQUIER, *Submicronic non destructive testing*. Proceedings of 12th world conference on Non Destructive Testing, Amsterdam (1989).
- [5] J. L. FRANCESCHI, H. LE FLOCH, *Command of a mini-scanning electron microscope by digital computer for use in industrial process*, Scanning Vol. 7, 3 (1985).
- [6] H. LE FLOCH, J. L. FRANCESCHI, T. GOURAUD, P. LAUNAY, *Digital image acquisition in scanning electron microscopy*, Scanning 1 (1987).
- [7] Notes Techniques, Digital Vision, 31771 Colomiers.
- [8] C. W. OATLEY, *The Scanning Electron Microscope*, 103-106, Cambridge University Press.

Manuscrit reçu le 22 janvier 1990.