

Amélioration d'images par égalisation de capteurs

Image enhancement using sensors equalization



L. FÉTY

THOMSON TRT DEFENSE,
rue Guynemer, BP 55,
78283 Guyancourt Cedex, France

Luc Féty est né à Château-Thierry en 1958. Il est diplômé de l'Université d'Orsay (82) et Docteur en sciences de Télécom Paris (88). Entré à TRT en 1984, ses thèmes de recherches concernent le traitement des signaux multidimensionnels (traitement d'antenne, égalisation, soustraction de bruit, ...). Il poursuit actuellement des activités de recherche en trajectographie au sein de l'équipe de traitement d'images de Thomson TRT Défense.



M. TERRÉ

THOMSON-CSF, Division RGS,
66, rue du Fossé blanc,
92231 Gennevilliers, France

Michel Terré est né à Neuilly sur Seine en 1964. Il est ingénieur de l'Institut National des Télécommunications (INT 1987). Entré à TRT en 1988, ses principales activités ont concerné le traitement d'images (amélioration d'images, traitement temps réel, réseaux de neurones). En 1991 il a rejoint le service de traitement de signal de la division RGS de Thomson CSF.

RÉSUMÉ

Un grand nombre d'imageurs sont construits à partir d'une barrette constituée de **plusieurs** capteurs. La dispersion des caractéristiques des capteurs, de l'optique, de la mécanique et de l'électronique qui leur sont associées, engendre une détérioration des images. Nous proposons dans cet article un algorithme d'amélioration d'images basé sur une modélisation simple mais efficace des défauts inhérents à ces imageurs.

MOTS CLÉS

Traitement d'image, restauration d'image, traitement de signal, soustraction de bruit.

ABSTRACT

*Most of the cameras are **multi-sensors**. The dispersion on these cells, on their optical, mechanical and electronical characteristics induces a particular deterioration of the frames. This article presents an image enhancement algorithm based on the simple modelisation of these cameras inherent defaults.*

KEY WORDS

Image processing, image enhancement, signal processing, noise cancellation.

1. Introduction

Un grand nombre d'imageurs, qu'il s'agisse de caméras ou d'appareils de photos, sont composés de capteurs qui balayent l'image d'un paysage dans le plan focal d'un système optique. Les capteurs, ainsi que l'optique, la mécanique et l'électronique qui leur sont associées présentent souvent des différences. Ces différences causent une

détérioration de l'image de scène. Celle-ci paraît généralement rayée horizontalement ou verticalement selon le sens de balayage choisi.

Notre étude s'est intéressée au cas des caméras qui sont construites autour d'une barrette constituée d'un nombre d réduit de détecteurs. L'image de scène est obtenue en balayant le paysage par bandeaux de d lignes. La détérioration de l'image de scène est alors appelée « lignage ».

A priori, ce lignage devrait apparaître comme un défaut continu périodique verticalement. Cependant, les phénomènes optiques modulent ce défaut de variations monotones horizontales. La figure 1 qui représente une portion d'image infrarouge illustre relativement bien ces phénomènes :

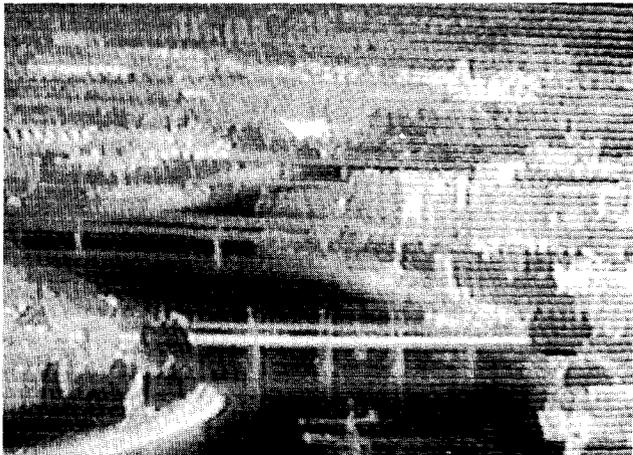


Fig. 1. — Image infrarouge lignée.

On remarque en particulier l'intensité variable du lignage. Ce lignage pose des problèmes, non seulement pour l'interprétation visuelle des images, mais aussi et surtout lorsqu'il s'agit d'utiliser des méthodes de traitement automatique. Un « délignage » préalable des images paraît donc indispensable. La plupart des méthodes proposent une amélioration d'image en s'appuyant sur un modèle de scène [3]. Or, l'expérience montre qu'étant donnée la diversité des scènes observées, une telle démarche est toujours délicate. En fait, il semble plus judicieux d'adopter un modèle pour le lignage qui présente des propriétés plus fiables (stationnarité, périodicité, ...). Dans cet article, nous proposons d'exploiter ces propriétés pour estimer le lignage, afin de le soustraire à l'image observée. Une telle démarche s'inspire des techniques du traitement du signal (modélisation, soustraction de bruit) [1], [2]. Elle s'appuie sur une hypothèse d'orthogonalité entre le lignage et la scène.

Dans un premier temps, nous considérerons le cas d'un lignage continu en ligne. Dans un second temps, nous généraliserons l'algorithme au cas d'un lignage plus complexe.

2. Lignage continu

Considérons le lignage comme un défaut continu horizontalement et périodique verticalement. L'image de lignage se réduit alors à une répétition d'un bandeau de d lignes à niveau de gris constant. Elle peut être modélisée comme suit :

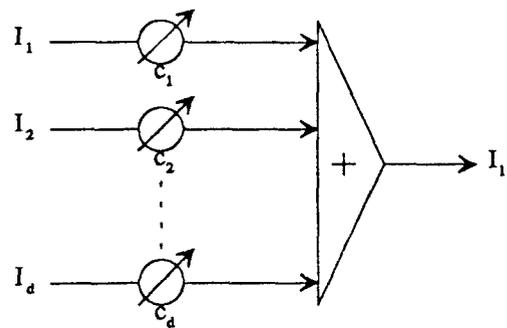


Fig. 2. — Modèle de lignage.

Les I_i sont des images particulières à niveau de gris constant (1 par exemple) sur toutes les lignes d'indice n tel que $n \text{ modulo } d = i$ et nul pour toutes les autres lignes. Les c_i sont quant à eux, des paramètres qui définissent entièrement l'image de lignage. Nous les appellerons « coefficients de lignage ».

L'image I_l peut s'exprimer comme le produit scalaire entre un vecteur d'images et un vecteur de coefficients :

$$I_l = C^T \cdot B$$

avec

$$B = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_d]^T$$

$$C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_d]^T$$

Pour cette raison, et du fait que le problème du délignage s'exprime de façon plus formelle sous forme vectorielle, on définit les outils nécessaires à cette écriture.

2.1. CONVENTIONS

Soit une image $B(b_{n,m})$, soit un scalaire α . Du produit de cette image par ce scalaire résulte une image $A(a_{n,m})$:

$$A(a_{n,m}) = \alpha \cdot B(b_{n,m}) \quad \text{avec} \quad a_{n,m} = \alpha \cdot b_{n,m}$$

Soit $U(u_k)$ un vecteur à composantes scalaires, soit $V(v_k)$ un vecteur d'images v_k . Du produit scalaire de ces deux vecteurs résulte une image W :

$$W = U^T \cdot V = \sum_{k=1}^K u_k \cdot v_k$$

Soit deux images A et B . Du « produit » de ces deux images résulte un scalaire α :

$$\alpha = A \cdot B$$

$$\alpha = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m}$$

2.2. L'ALGORITHME

Le délignage d'une image passe par l'estimation du vecteur des coefficients de lignage. Grâce à l'hypothèse

suivant laquelle l'image de scène évolue dans un autre espace que celui du lignage (orthogonalité) justifiée par l'absence de périodicité d dans l'image de scène, ce vecteur est estimé au sens du critère des moindres carrés de l'erreur de modélisation.

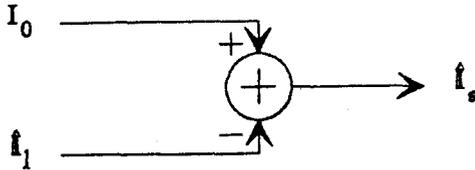


Fig. 3. — Délignage.

I_0 est l'image observée (scène + lignage), \hat{I}_l est l'image de lignage estimée, \hat{I}_s est l'erreur de prédiction. Étant donnée l'hypothèse d'orthogonalité, \hat{I}_s est aussi l'image de scène estimée. L'optimisation du critère revient donc à rechercher une image de scène à variance minimale.

$$\hat{I}_s \cdot \hat{I}_s = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \hat{i}_{s_{n,m}} \cdot \hat{i}_{s_{n,m}} = \min$$

N et M sont respectivement le nombre de lignes et de colonnes de l'image. n et m représentent les indices de lignes et de colonnes.

Cette expression peut encore s'écrire sous forme vectorielle :

$$\hat{I}_s \cdot \hat{I}_s = C^T \cdot B \cdot B^T \cdot C - 2 C^T \cdot B \cdot I_0 - I_0 \cdot I_0 = \min .$$

Le vecteur des coefficients doit donc vérifier la condition suivante :

$$R \cdot C - S = 0 \Rightarrow C = R^{-1} \cdot S$$

R est la matrice de covariance $B \cdot B^T$ de dimension $d \times d$ associée au vecteur d'image B . Chacune de ses composantes est définie par le produit scalaire :

$$r_{ij} = I_i \cdot I_j .$$

Il se trouve que les images composant le vecteur B sont décorréliées entre elles et de variance $M \cdot N/d$. Aussi, seuls les éléments diagonaux de R sont nuls et égaux à $M \cdot N/d$.

S est le vecteur d'images d'intercorrélations entre B et I_0 .

Étant donnée la structure particulière des images de B , il vient :

$$s_k = \sum_{n=1}^{N/d} \sum_{m=1}^M i_{0 \ nd+k, m} .$$

Le vecteur des coefficients de lignage s'obtient donc facilement :

$$c_k = \frac{\sum_{n=1}^{N/d} \sum_{m=1}^M i_{0 \ nd+k, m}}{\frac{N \cdot M}{d}} .$$

Une fois ces coefficients déterminés, il ne reste plus qu'à synthétiser l'image de lignage I_l

$$\hat{I}_l = \sum_{k=1}^d c_k \cdot I_k$$

puis à soustraire cette image à l'image observée pour obtenir l'image de scène estimée

$$\hat{I}_s = I_0 - \hat{I}_l .$$

Néanmoins, les images I_k à l'origine du modèle de lignage présentent un niveau de gris moyen non nul. Aussi, l'algorithme qui vient d'être présenté conduira à une image de scène estimée qui sera délignée mais dont le niveau de gris moyen sera nul. Deux solutions sont alors envisageables. La première consiste à fixer arbitrairement le niveau de gris moyen de l'image (par addition). La deuxième consiste à émettre une hypothèse supplémentaire sur le lignage, à savoir que celui-ci est de moyenne nulle. Pour cela, on peut bien sûr adopter une base d'images I_k centrée (qui sera de dimension $d-1$) mais la façon la plus simple consiste à poser une contrainte sur l'image de lignage :

$$I_l \cdot U = 0 \quad \text{avec} \quad U (u_{n,m} = 1)$$

qui lui impose une moyenne nulle.

En utilisant les multiplicateurs de Lagrange, il vient :

$$\tilde{C}^T \cdot R \cdot \tilde{C} - 2 \tilde{C}^T \cdot S - I_0 \cdot I_0 - 2 \lambda \tilde{C}^T \cdot B \cdot U = \min$$

d'où :

$$\tilde{C} = R^{-1} \cdot S - \lambda R^{-1} \cdot B \cdot U$$

pour satisfaire la contrainte :

$$\lambda = \frac{S^T \cdot R^{-1} \cdot B \cdot U}{U^T \cdot B^T \cdot R^{-1} \cdot B \cdot U}$$

et donc :

$$\tilde{C} = C - \frac{C^T \cdot B \cdot U}{U^T \cdot B^T \cdot R^{-1} \cdot B \cdot U} R^{-1} \cdot B \cdot U$$

$B \cdot U$ est un vecteur de dimension d , dont les éléments sont les niveaux de gris moyens des images constituant le vecteur B . Chacun de ces éléments vaut NM/d .

Rappelons que seuls les éléments diagonaux de R sont non nuls et égaux à NM/d .

$$\tilde{C} = C - \frac{1}{d} \sum_{k=1}^d c_k \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} .$$

Cette expression met en évidence que le vecteur \tilde{C} s'obtient facilement en « centrant » les composantes du vecteur C :

$$\tilde{c} = c_i - \frac{1}{d} \sum_{k=1}^d c_k.$$

L'algorithme qui vient d'être présenté est très simple. Une première étape consiste à estimer les moyennes des lignes balayées par les d détecteurs puis à leur retrancher la moyenne générale de l'image (moyenne des d moyennes). Le délignage de l'image consiste alors à soustraire les d moyennes ainsi obtenues, aux lignes balayées par les d détecteurs.

Cependant, cet algorithme ne permet de traiter que les défauts constants en ligne et parfaitement périodiques (défauts d'origine électronique). Il se trouve que ces défauts ne sont pas les seuls. Il existe en particulier des effets de dôme dus à l'optique de la caméra qui varient d'un détecteur à l'autre et qui provoquent un effet de lignage. Ce lignage n'est plus continu en ligne.

3. Lignage variable

L'optique de la caméra est telle que la surface utile d'un détecteur varie au cours du balayage de la scène mais dépend aussi de la position géographique du détecteur sur la barrette (position nécessairement différente pour chacun des détecteurs). Ces effets conjugués provoquent, au niveau de chaque ligne de l'image, une réponse spécifique en forme de dôme. Le différentiel de ces réponses fait apparaître un lignage qui varie de manière monotone en ligne.



Fig. 4. — Profil typique du lignage.

A partir de considérations sur les causes qui ont donné naissance au lignage, on peut se donner un ensemble de vecteurs d'images B_i (construits par exemple à partir d'une base polynomiale orthonormée) à même de mieux modéliser celui-ci. A ce niveau, il est intéressant d'adopter une démarche séquentielle :

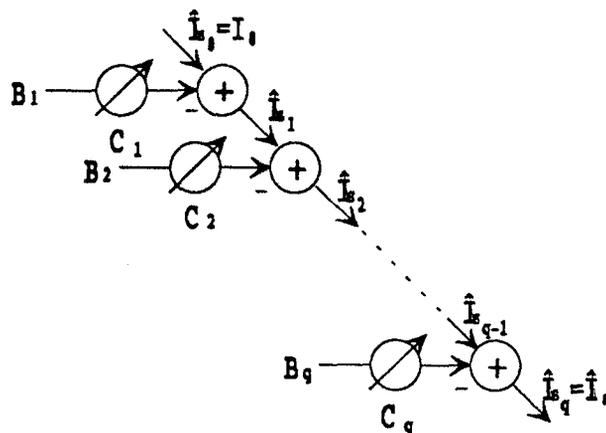


Fig. 5. — Déclignage progressif.

Pour que chaque étage puisse être adapté indépendamment et que le résultat reste optimal, il est nécessaire que tous les vecteurs d'images soient orthogonaux entre eux. Le choix des vecteurs d'images ainsi que leur orthonormalisation est traité en annexe de cet article.

L'optimisation de chaque étage peut alors être obtenue suivant la démarche exposée pour le lignage continu.

$$s_{qk} = \sum_{n=1}^{N/d} \sum_{m=1}^M g_q(m) \cdot i_{0_{nd+k,m}}$$

où $g_q(m)$ est la fonction à l'origine du vecteur d'images

$$B_q = [I_{1q} I_{2q} \dots I_{dq}]^T.$$

Les images I_{iq} sont des images dont les éléments des lignes n tel que $n \text{ modulo } d = i$ sont égaux non plus à 1 mais à $g_q(m)$, et dont les éléments des autres lignes sont nuls.

4. Mise en œuvre

L'algorithme présenté a été mis au point sur une station de travail puis porté sur une machine de traitement d'images temps réel (cartes DATACUBE sous un environnement SUN/UNIX). L'architecture est la suivante :

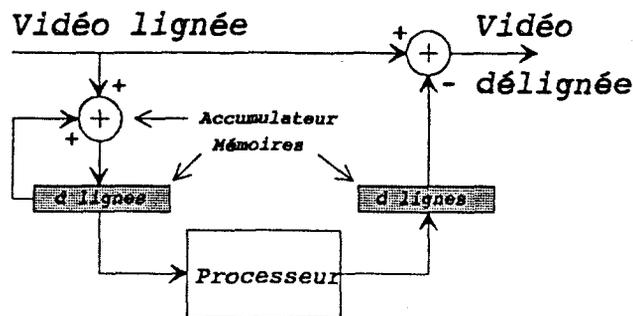


Fig. 6. — Synoptique de traitement.

La première étape consiste à accumuler la vidéo numérique dans un bandeau de d lignes (accumulation de l'ensemble des lignes vues par un même détecteur). Cette accumulation est effectuée pour chaque image.

Ce bandeau de d lignes est alors projeté sur la base de fonctions choisie pour modéliser le lignage. Cette deuxième étape est réalisée par un processeur de traitement de signal. Les fonctions sont tabulées et stockées dans une mémoire.

Cette projection fournit directement les coefficients de lignage qui sont alors utilisés pour synthétiser un bandeau de d lignes représentant les défauts des d détecteurs.

Enfin, la dernière étape consiste à soustraire ces d lignes de défauts aux lignes de l'image.

5. Résultats

La méthode a d'abord été testée à partir de bandes vidéo issues de diverses caméras thermiques. Les résultats se sont révélés remarquables sur la plupart des images. Ainsi, la correction de la vue aérienne de Paris conduit à l'image suivante :



Fig. 7. — Image infrarouge délignée.

L'image de lignage estimée étant la suivante :

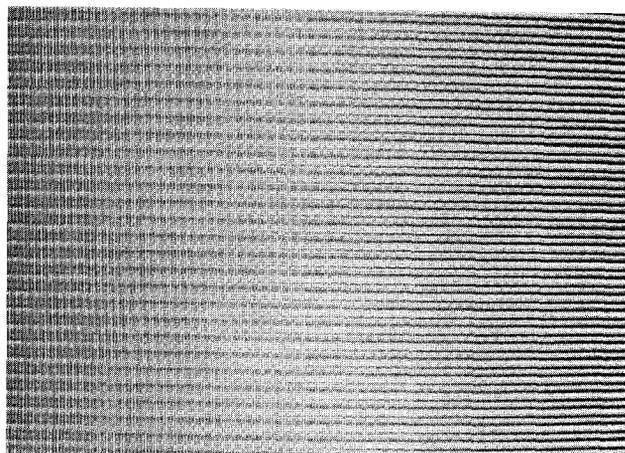


Fig. 8. — Image de lignage.

Cette correction a été obtenue à partir d'une base polynomiale de dimension huit. Le choix de cette base s'appuie sur une étude statistique de l'efficacité du délignage selon le nombre et le type de fonctions utilisées. Pour cela, il a fallu établir une mesure de performance traduisant l'inconfort visuel causé par le lignage, à savoir sa variation d'une ligne à une autre. L'énergie du gradient vertical de l'image paraissait alors bien adapté. A partir d'une base d'images non lignées (images visibles) et d'une base d'images de lignage (images thermiques de corps noirs), une base d'images lignées a été constituée par addition, puis soumise à l'algorithme de délignage. La mesure de performance qui a été retenue est le rapport de l'énergie du gradient de l'image non lignée sur celle de l'image de lignage résiduel (image non lignée soustraite à l'image délignée). Cette mesure est homogène à un rapport signal à bruit.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'efficacité des bases polynomiales.

Elle a permis également de déterminer la dimension optimale de la base. La courbe suivante présente l'évolution du rapport signal à bruit de délignage en fonction de la taille de la base :

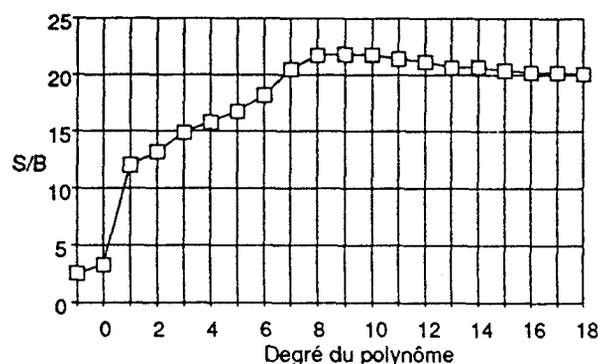


Fig. 9. — S/B en fonction du degré du polynôme.

L'optimum semble se situer autour de huit. Au-delà, le rapport signal à bruit décroît lentement, témoignant d'une dégradation de l'image par la méthode de délignage.

Sur certaines scènes saturées, le délignage s'est montré moins performant. Cette perte d'efficacité provient du fait que les zones saturées ne sont pas lignées. Le lignage ne varie plus de manière monotone entre les zones saturées et non saturées de l'image. La méthode tend alors à ligner légèrement les zones saturées sans pour autant déligner totalement les autres parties de l'image.

Ces observations ont conduit à des essais sur caméras. Les résultats se sont avérés spectaculaires sur les images à faible contraste, particulièrement avec les caméras à fort lignage. Pour les autres caméras, le lignage survient surtout lorsque le contraste est maximum. Du fait de la numérisation de l'image, cette situation s'accompagne malheureusement de saturations du signal vidéo, faisant apparaître les mêmes problèmes que ceux rencontrés avec les bandes vidéo. Ces problèmes de saturation doivent être résolus pour permettre un délignage efficace. Différentes méthodes sont envisageables. La plus évidente consiste à

numériser la vidéo sur un nombre de bits plus étendu (quitte à effectuer une compression après le délignage). On peut également envisager une soustraction analogique de l'image de lignage juste derrière la tête d'analyse de la caméra.

6. Conclusion

L'algorithme présenté dans cet article est à la fois simple (coût de calcul peu élevé) et efficace. Dans le cas d'un lignage évoluant du haut en bas de l'image et qui ne serait plus purement périodique verticalement, on peut envisager une « modulation » verticale de la correction. Cette « modulation » revient à introduire des fonctions verticales dans la base B. Cette extension de l'algorithme a été testée avec succès. N'introduisant qu'une surcharge de notations, elle n'a pas été exposée.

Enfin, si le délignage des images est important pour le confort visuel de l'utilisateur il constitue aussi, dans bien des cas, une étape importante de prétraitement de l'image. En effet, les performances de nombreux algorithmes de traitement d'image (détection de lignes droites, recalage d'image, reconnaissance de formes...) peuvent être réduites par le lignage ; le délignage est alors indispensable.

7. Remerciements

Nous tenons à remercier Monsieur Maurice Bellanger, directeur scientifique de T.R.T., pour l'aide qu'il nous a apporté au cours de la rédaction de cet article.

8. Annexe

Le choix de l'ensemble des vecteurs d'images est très important, car c'est de lui que dépend l'efficacité du délignage. Ces vecteurs d'images sont destinés à modéliser le lignage d'origine optique. A chaque ligne de l'image se superpose un dôme dont l'allure est la suivante :

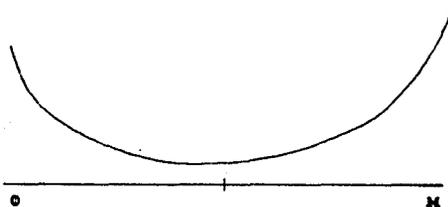


Fig. 10. — Profil typique de dôme.

La forme de ce dôme, son amplitude et sa position dépendent du détecteur à l'origine de la ligne. Les d détecteurs induisent d dômes dont les différentiels causent un lignage variable.

La modélisation de ces différentiels passe implicitement par la modélisation des dômes. En première approximation, ceux-ci apparaissent comme des courbes en x^2 décentrées. La façon la plus simple pour modéliser de telles courbes consiste à adopter la base polynomiale $1, x, x^2$.

Une modélisation plus fine des dômes peut être obtenue en adoptant une base plus générale : $1, x, x^2, \dots, x^n$. C'est cette base qui a été choisie pour déligner des images thermiques. D'autres bases peuvent, bien sûr, être envisagées.

Soit $F^T(x) = [f_1(x), \dots, f_n(x)]$ la base adoptée. Pour être utilisée dans l'algorithme que nous avons présenté, cette base doit subir un prétraitement linéaire pour obtenir une base $G^T(x) = [g_1(x), \dots, g_n(x)]$ orthonormée :

$$G(x) = A \cdot F(x)$$

(A est la matrice de passage de la base F à la base G).

Rappelons que chaque vecteur B_i est constitué de d images I_{iq} (q allant de 1 à d).

Les images I_{iq} sont des images dont les éléments des lignes n tel que $n \text{ modulo } d = i$ sont égaux non plus à 1 mais à $g_q(m)$, et dont les éléments des autres lignes sont nuls.

Une condition nécessaire et suffisante pour que les vecteurs B_i soient orthogonaux est :

$$\sum_{x=0}^M g_r(x) g_s(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } r \neq s \\ 1 & \text{pour } r = s \end{cases}$$

ou encore

$$\sum_{x=0}^M G(x) \cdot G^T(x) = I \text{ (matrice identité)}$$

et donc

$$\sum_{x=0}^M F(x) \cdot F^T(x) = A^{-1} \cdot A^{-T} = R.$$

La matrice A est donc l'inverse d'une racine carrée de la matrice R symétrique définie positive. Il existe plusieurs méthodes pour extraire la racine carrée d'une matrice. Une des plus efficace [2] est la décomposition de Cholewsky.

$$R = L \cdot L^T$$

L est une matrice triangulaire inférieure.

Cette racine carrée mène à une orthogonalisation récursive de la base F(x) :

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \frac{f_1(x)}{l_{11}} \\ g_2(x) &= \frac{f_2(x) - l_{21} \cdot g_1(x)}{l_{22}} \\ &\dots\dots \\ g_n(x) &= \frac{f_n(x) - \sum_{i=1}^n l_{ni} \cdot g_i(x)}{l_{nn}} \end{aligned}$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. G. BELLANGER, « Adaptive Digital Filters and Signal Analysis », 1987 Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-7784-0.
- [2] L. FÉTY, thèse de Docteur de l'E.N.S.T., juin 1988.
- [3] Y. YASUOKA, « Removal of Random Stripping Noise in Remotely Sensed Images », Proceedings of The 1984 International Symposium on Noise and Clutter Rejection in Radars and Imaging Sensors, IECE 1984.
- [4] B. WIDROW and S. D. STEARNS, « Adaptive Signal Processing », Prentice Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim, Series Editor, ISBN 0-13-004029-0.

Manuscrit reçu le 19 mars 1991.