

Optimisation d'une Chaîne Image de Télédétection : de la Compression Embarquée aux Post-Traitements Sol

Christophe PARISOT¹, Stéphane TRAMINI², Marc ANTONINI¹,
Michel BARLAUD¹, Christophe LATRY², Catherine LAMBERT-NEBOUT²

¹ Laboratoire I3S - UMR 6070, 2000 route des Lucioles Bât. Algorithmes/Euclide,
F-06410 Biot (FRANCE) - FAX: 04.92.94.28.96,

² Centre National d'Etudes Spatiales - CNES - 18, Avenue Edouard Belin,
F-31401, Toulouse - Cedex 4 (FRANCE)

(parisot,tramini,am,barlaud)i3s.unice.fr, (Christophe.Latry, Catherine.Lambert)cnes.fr.

Résumé – Les futurs systèmes de télédétection optique Haute Résolution génèrent des images floues et bruitées. Les images générées seront donc restaurées, c'est-à-dire déconvoluées et débruitées. Parallèlement, les taux de compression augmentent car les débits en sortie instrument croissent avec la résolution. L'impact de la compression ne peut s'évaluer que sur le produit final restauré et les modules de compression et de restauration doivent être optimisés de façon conjointe, ce qui n'est généralement pas le cas. Ce papier propose pour un compresseur basé sur une transformée en ondelettes de pondérer les sous-bandes selon la fonction de déconvolution et de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du bruit de compression lors de l'opération de restauration. Bien que cette étude ait été menée dans le cadre des contraintes spatiales, la modélisation de la chaîne décrite dans ce papier est applicable à d'autres contextes.

Abstract – The optical remote sensing systems usually degrade images introducing blur and noise. The images will thus be restored, i.e. denoised and deblurred. In parallel, the compression ratios increase because the bit rates increase with the spatial resolution. The impact of compression can be evaluated only on final restored products and the modules of compression and restoration must be optimized in a joint way, which is generally not the case. This paper proposes for a wavelet-based compressor to introduce a weight for each subband depending on the deconvolution function and to take account of the specific characteristics of compression noise during restoration. Although this study was undertaken within the framework of the space constraints, the modeling of the chain described in this paper is applicable to other contexts.

1 Introduction

Les systèmes satellitaires d'observation optique à haute résolution développés par le CNES sont caractérisés depuis SPOT5 par une chaîne image bord/sol complexe, incluant notamment une phase de compression à bord et une étape de restauration systématique au sol (cf. Fig. 1). De tels systèmes [1, 2, 3] entraînent l'apparition de flou (échantillonnage satisfaisant la condition de Shannon) et l'introduction d'un niveau de bruit élevé (diminution du signal associée à l'augmentation de résolution). L'étape de compression est indispensable au vu des contraintes de stockage à bord et de débit de télémesure qui ne suivent pas la progression des débits en sortie instrument associée à l'augmentation de la résolution des images et au maintien d'une fauchée significative : les taux de compression visés sont donc de plus en plus importants. L'étape de compression génère donc un bruit de quantification s'ajoutant aux dégradations déjà subies par l'image lors de l'acquisition. La restauration de l'image n'étant pas envisageable avant la compression à bord pour des raisons évidentes de coût calcul, cette opération est reportée au sol. De ce fait, la prise en compte par le compresseur-bord de l'étape de déconvolution-sol permet de préserver l'information dans les hautes fréquences. La phase de restauration permet

quant à elle de compenser l'affaiblissement des hautes fréquences spatiales par l'instrument tout en maintenant un niveau de bruit acceptable en sortie de traitement. Les artefacts introduits par le compresseur sont généralement "subis" et amplifiés par l'étape de post-traitement au sol. Une étape de restauration optimale doit pouvoir tenir compte non seulement du flou et du bruit instrumental mais aussi du bruit de compression. Nous proposons donc une optimisation conjointe des processus de compression et de restauration présentant de réelles potentialités et visant des taux de compression élevés.

2 Notations

L'image d'origine (notée f) est reliée à l'image observée \tilde{p} (cf. Fig. 1), par une transformation qui fait intervenir deux processus. Le premier module est relatif à l'acquisition de l'image. La transformation permettant de passer de l'image d'origine f à l'image dégradée f_b , est formalisée par un modèle linéaire de la forme

$$f_b = \mathcal{H}f + b \quad (1)$$

Le flou est modélisé par une convolution avec un filtre passe-bas $h : \mathcal{H}f = h * f$ ^{1}. Le bruit électronique et

¹ $\mathcal{H} : L^2(\Omega) \rightarrow L^2(\Omega) : f(x, y) \mapsto \mathcal{H}f(x, y)$

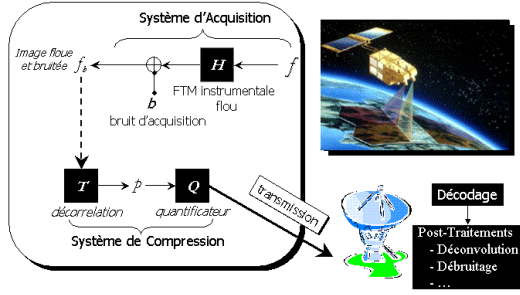


FIG. 1 – Représentation du système de télédétection

de numérisation est noté b . Nous supposons que b est borné, centré et non-stationnaire ; sa variance est donnée par $\sigma_b^2(x, y) = A + B\mathcal{H}f(x, y)$.

Le second module est relatif à l'opération de compression de données. Soit \tilde{p} l'image quantifiée dans le domaine transformé. En supposant le bruit de quantification additif, nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$\tilde{p} = Q^{-1}Q(\mathcal{T}f_b) = \mathcal{T}f_b + \eta \quad (2)$$

où Q ^{2} et \mathcal{T} ^{3} sont respectivement les opérateurs de quantification, de transformation et $\eta = \mathcal{T}b + \varepsilon(\mathcal{T}f_b)$ la somme des bruits d'acquisition et de compression.

3 Optimisation du codeur-bord

Le compresseur $EBWIC$ ^{4}, [4, 5] basé sur une transformée en ondelettes (TO) et une allocation de débits dynamique, est pressenti comme candidat pour les futures missions d'observation haute résolution du CNES, du fait de ses performances et de sa faible complexité. Pour faciliter l'opération de déconvolution qui aura lieu au sol, les sous-bandes de la TO peuvent être pondérées afin de conserver les détails haute fréquence (HF) de l'image (lesquels ont été atténués par le filtre passe-bas \mathcal{H} dans le processus d'acquisition). Le critère d'allocation de débits à minimiser est de la forme

$$\mathcal{J}(\{q_j\}) = \sum_j \Delta_j \sigma_{f_b, j}^2 \mathcal{D}_j + \lambda(\sum_j a_j R_j(q_j) - \mathcal{R}_c) \quad (3)$$

où $\sigma_{f_b, j}^2 \mathcal{D}_j$ et \mathcal{R}_j représentent la distorsion et le débit générés par le pas de quantification q_j pour la sous-bande j . Les pondérations a_j représentent l'importance relative de la sous-bande j dans le débit total, \mathcal{R}_c le débit cible du compresseur et $\{\Delta_j\}$ des coefficients de pondération permettant de modifier l'importance relative des sous-bandes dans le calcul de la distorsion quadratique moyenne. Pour calculer ces coefficients, nous supposons que le bruit d'acquisition est faible et qu'on peut alors écrire $f_b = \mathcal{H}f$. En notant $\sigma_{f, j}^2$ et $\sigma_{f_b, j}^2$ les variances des j -ièmes sous-bandes de f et f_b , les coefficients $\Delta_j = \sigma_{f, j}^2 / \sigma_{f_b, j}^2$ permettraient de tenir compte au mieux de l'énergie $\sigma_{f, j}^2$ de l'image originale dans le calcul de la distorsion. f étant inaccessible, les pondérations Δ_j sont évaluées à partir des effets de

² $Q : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z} : x \mapsto m$ pour $x \in [mq - \frac{q}{2}, mq + \frac{q}{2}[$ où q est le pas de quantification et $m \in \mathbb{Z}$

³ $\mathcal{T} : (L^2(\Omega) \rightarrow L^2(\Omega_\tau) : f(x, y) \mapsto \mathcal{T}f(\xi, \zeta)$, nous considérons ici une transformation en ondelette (TO).

⁴développé sous contrat CNES-I3S.

TAB. 1 – Influence de la pondération au codeur sur le PSNR après restauration de l'image Pléiades Nîmes par $ODTS$ (cf. section 4)

TC	$EBWIC + ODTS$	$EBWIC_p + ODTS$
2.5	40.91 dB	40.96 dB
3	40.62 dB	40.7 dB
3.5	40.21 dB	40.3 dB
4	39.92 dB	40.0 dB
4.5	39.51 dB	39.6 dB
5	39.1 dB	39.2 dB
5.5	38.69 dB	38.8 dB
6	38.3 dB	38.4 dB



(a) $EBWIC + ODTS$

(b) $EBWIC_p + ODTS$

FIG. 2 – Influence de la pondération après restauration de l'image Pléiades Nîmes par $ODTS$ - TC = 20 :1.

la fonction de déconvolution sur une image de bruit κ de spectre uniforme. Δ_j correspond donc au rapport de la variance de la j -ième sous-bande de l'image de bruit déconvoluée κ_d par la variance de la j -ième sous-bande de l'image de bruit κ . On a donc

$$\Delta_j = \sigma_{\kappa_d, j}^2 / \sigma_{\kappa, j}^2 \quad (4)$$

Ces coefficients de pondération augmentent l'importance des composantes Haute Fréquence dans le processus de compression et par conséquent améliorent la préservation des détails de l'image d'origine f afin de faciliter leur restitution dans l'étape de traitement au sol.

4 Optimisation au sol : $ODTS$ ^{5}

Nous considérons dans cette section le problème consistant à inverser les transformations subies par l'image lors de l'acquisition et du codage, autrement dit retrouver l'image de départ f à partir de la donnée \tilde{p} avec la connaissance de \mathcal{H} , \mathcal{T} et Q . Cependant, **accéder à l'image en entrée du système d'acquisition est impossible**. Au mieux seule l'information fréquentielle non filtrée par la FTM (transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle) est accessible [6]. On n'accède à l'information fréquentielle que si la FTM est non nulle. L'idée est d'utiliser une image cible de référence correspondant à l'image générée par un

⁵Optimisation du Décodage et du Traitement Sol

instrument parfait. La FTM cible, notée Π , est une porte régularisée dont le support est la zone fréquentielle où la FTM est non nulle [7]. La solution recherchée n'est plus f mais $f^0 = \Pi f$.

Le décodeur est conçu en prenant en compte la connaissance des systèmes d'acquisition et de compression et des a priori sur la solution. L'image estimée est obtenue en minimisant la fonctionnelle suivante :

$$\min_{f \in L^2(\Omega)} \mathcal{C}(f) = \sum_{i=1}^3 \mathcal{C}_i(f) \quad (5)$$

Le terme d'attache aux données $\mathcal{C}_1(f)$ exprime la connaissance du modèle de formation des données. Nous introduisons les pondérations $\frac{1}{2}\sigma_{\varepsilon_j}^{-2}$ et π_j qui permettent respectivement la prise en compte de la non-stationnarité du bruit (ainsi que ses caractéristiques dans les différentes sous-bandes j), et la minimisation de l'erreur quadratique moyenne dans le cas de filtres biorthogonaux [8].

$$\mathcal{C}_1(f) = \sum_j \int_{\Omega_{\mathcal{T},j}} \frac{1}{2}\sigma_{\varepsilon_j}^{-2} \pi_j (\mathcal{T}\mathcal{H}f - \mathcal{T}\Pi\mathcal{T}^{-1}\tilde{p}_j)^2 d\xi d\zeta \quad (6)$$

Le terme de régularisation $\mathcal{C}_2(f)$ est défini par :

$$\mathcal{C}_2(f) = \lambda^2 \int_{\Omega} \sqrt{(\nu_{\sigma_b} \star G)(\|\nabla f\|) + \|\nabla f\|^2} dx dy \quad (7)$$

Cette contrainte permet le lissage des zones homogènes et la préservation des contours et des détails HF (lissage isotropique) [9, 10]. La fonction, non différentiable

$$\nu_{\sigma_b}(u) = \begin{cases} \searrow 0 & \text{si } u \leq \sigma_b, \\ \nearrow 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

est régularisée par une fonction gaussienne $G \in C_c^k(\mathbb{R})$ telle que $(G \star \nu_{\sigma_b})' = G' \star \nu_{\sigma_b}$. Elle influe sur la force du lissage et donc sur la préservation des détails HF en fonction du niveau de bruit présent. Elle permet de seuiller différemment les gradients représentatifs de l'information et les gradients représentatifs du bruit. Lorsque $|\nabla f|$ est inférieur à l'écart type du bruit d'acquisition σ_b , cela correspond à la présence de bruit. La fonction de potentiel $\phi(t) = \sqrt{(\nu_{\sigma_b} \star G)(\|t\|) + \|t\|^2}$ a un comportement de type variation totale. On observe donc un fort lissage dans la zone traitée. Dans le cas contraire, nous avons à faire à des zones de détails haute fréquence, $\phi(t)$ se conduit donc comme une fonction de potentiel convexe et préserve mieux les détails.

Le dernier terme $\mathcal{C}_3(f)$ ^{6} permet la suppression du bruit par un seuillage doux sur les coefficients d'ondelettes $\mathcal{T}f_j$ non significatifs [10] et est défini par :

$$\mathcal{C}_3(f) = \sum_j \beta_j^2 \int_{\Omega_{\mathcal{T},j}} \sqrt{(\nu_{\sigma_{\mathcal{T}b,\varepsilon}} \star G)(|\mathcal{T}f|) + |\mathcal{T}f|^2} d\xi d\zeta \quad (9)$$

Or, nous savons que l'**erreur de quantification est bornée**. \tilde{p}_j , donnée en sortie du codeur *EBWIC*, appartient à l'intervalle de quantification défini pour chaque sous-bande j par $[mq_j - \frac{1}{2}q_j, mq_j + \frac{1}{2}q_j]$ ^{7}. Ainsi, connaissant le coefficient \tilde{p}_j , le pas de quantification q_j et en calculant $\omega_{\mathcal{T}b,j}$ (borne du signal $\mathcal{T}b$ dans le domaine transformé

⁶De même que pour le terme de régularisation $\mathcal{C}_3(f)$, nous adoptons cette fonction au niveau de bruit présent en introduisant une relation avec $\sigma_{\mathcal{T}b}$ et σ_{ε} , afin d'affiner le seuillage.

⁷où $m = \lfloor (\tilde{p}_j + \frac{1}{2}q_j) / q_j \rfloor$

$\Omega_{\mathcal{T}}$ ^{8}), nous pouvons déterminer pour chaque coefficient solution $\mathcal{T}\mathcal{H}f_j$ une borne $\theta_j = \frac{1}{2}q_j + \omega_{\mathcal{T}b,j}$. **Nous minimisons donc la fonctionnelle $\mathcal{C}(f)$ sous la contrainte de bruit borné**. Nous introduisons un terme $\mathcal{C}_4(f, \mu)$ qui contraint tout coefficient $\mathcal{T}\mathcal{H}f_j$ à appartenir à l'intervalle $I_j = [mq_j - \theta_j, mq_j + \theta_j]$ [et s'écrit sous la forme :

$$\mathcal{C}_4(f, \mu) = \sum_j \sum_{\substack{i=-1 \\ i \neq 0}}^1 \int_{\Omega_{\mathcal{T},j}} \mu_{i,j} (i(\mathcal{T}\mathcal{H}f - mq) - \theta)_j d\xi d\zeta \quad (10)$$

La minimisation du critère $\mathcal{C}(f)$ sous la contrainte $\{\mathcal{T}\mathcal{H}f_j \in I_j\}$ est réalisée par la résolution du problème dual [11] :

$$\max_{\mu \in L^2(\Omega_{\mathcal{T}})} \min_{f \in L^2(\Omega)} \mathcal{C}(f) + \mathcal{C}_4(f, \mu) \quad (11)$$

Cela consiste à résoudre les équations d'Euler-Lagrange en f au décodeur⁹, pour la reconstruction de l'image :

$$\begin{aligned} \mathcal{H}^* \mathcal{T}^* \left(\frac{\pi}{2} \sigma_{\varepsilon}^{-2} (\mathcal{T}\mathcal{H}\hat{f} - \tilde{p}_{\Pi}) + \hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_{-1} \right) - \\ \lambda^2 \nabla \cdot \left(\frac{\Psi'_{\sigma_b}(\|\nabla \hat{f}\|)}{\|\nabla \hat{f}\|} \nabla \hat{f} \right) + \mathcal{T}^* \beta^2 \frac{\Phi'_{\sigma_{\mathcal{T}b,\varepsilon}}(|\mathcal{T}\hat{f}|)}{|\mathcal{T}\hat{f}|} \mathcal{T}\hat{f} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

5 Résultats

Nous présentons des résultats sur l'image "Nîmes" de taille 512x512 pixels, codée sur 10 bits/pixel (bpp) (cf. Fig. 3), fournie par le CNES et dont les caractéristiques de simulation en termes de FTM et de bruit sont représentatives des images du futur instrument sub-métrique Pléiades-Haute Résolution. Les coefficients de pondérations Δ_j permettent une préservation des détails HF (cf. Fig. 2), et un gain significatif en terme de PSNR à fort taux de compression (de l'ordre de 0,4 dB pour un taux de compression de 20 :1). Il est à noter que le gain n'est que de 0.05 - 0.1 dB pour les taux ciblés en imagerie satellitaire (cf. Tab. 1). Les résultats sont confrontés à la méthode de restauration CNES des images SPOT5 (à savoir *FCNR* [6]) ainsi qu'à une version de la méthode *ODTS* ne prenant pas en compte la compression (*TSO* [7]). Ces premiers résultats illustrent la qualité de la structure codage/décodage proposée et l'importance de prendre en compte le processus de compression au niveau de la restauration. La structure *EBWIC_P/ODTS* permet la préservation des détails HF, la suppression du bruit de compression/acquisition et un gain de 0.6 à 1 dB en PSNR (cf. Fig. 4, 5 et Tab. 2).

6 Conclusion

Les chaînes images des capteurs satellitaires optique à haute résolution comportent systématiquement une phase de compression à des taux de plus en plus importants et une étape de restauration au sol permettant de compenser le flou instrumental et le faible rapport signal sur bruit. Ces deux modules sont usuellement développés indépendamment l'un de l'autre. La méthode présentée dans ce

⁸Nous supposons le bruit d'acquisition borné, et nous pouvons déduire les bornes du signal b ainsi que celles du signal $\mathcal{T}b$ [7].

⁹Les variables duales μ_i sont données par processus itératif (confère [11])

TAB. 2 – PSNR sur l'image Pléiades Nîmes.

TC	$EBWIC_p$	$EBWIC_p + FCNR$ [6]	$EBWIC_p + TSO$ [7]	$EBWIC_p + ODTs$
2.5	32.49 dB	39.9 dB	40.1 dB	40.96 dB
3	32.47 dB	39.7 dB	39.87 dB	40.7 dB
3.5	32.44 dB	39.4 dB	39.56 dB	40.3 dB
4	32.40 dB	39.05 dB	39.25 dB	40.0 dB
4.5	32.36 dB	38.67 dB	38.96 dB	39.6 dB
5	32.33 dB	38.3 dB	38.6 dB	39.2 dB
5.5	32.30 dB	38.01 dB	38.3 dB	38.8 dB
6	32.20 dB	37.7 dB	37.9 dB	38.4 dB



FIG. 3 – Extrait de l'image Pléiades Nîmes - référence.



FIG. 4 – Extrait de l'image Pléiades Nîmes - $EBWIC_p + FCNR$ - TC = 6 :1.



FIG. 5 – Extrait de l'image Pléiades Nîmes - $EBWIC_p + ODTs$ - TC = 6 :1.

papier propose d'une part la prise en compte de la déconvolution lors de la compression via une quantification plus fine des composantes haute fréquence et d'autre part l'intégration du bruit de compression lors de la restauration au sol. Le traitement du bruit de compression lors de la restauration est facilité par l'adoption d'une méthode variationnelle sous la forme d'une contrainte de bruit borné : la compression est en effet une quantification dans un espace transformé. Ce type d'optimisation conjointe améliore la qualité du produit final restauré, et ce d'autant plus que le taux de compression est élevé. L'étude a été menée dans le cadre de l'imagerie optique spatiale mais la méthode est potentiellement intéressante pour toute application exigeant des forts taux de compression, telle que la photographie numérique ou les transferts d'images par internet.

Références

- [1] C. Lamy et B. Rougé, "SPOT 5 THR Mode", *SPIE conference on Earth Observing Systems III*, vol. 3439, San Diego, USA, 1998.
- [2] C. Lamy et B. Rougé, "Optimized Sampling for CCD Instruments : the Supermode Scheme", *IGARSS conference*, Hawaii, USA, 2000.
- [3] C. Lambert-Nebout, C. Lamy, G. Moury, C. Parisot, M. Antonini et M. Barlaud, "On Board Optical Image Compression for Future High Resolution Remote Sensing Systems", *SPIE conference*, San Diego, USA, 2000.
- [4] C. Parisot, M. Antonini et M. Barlaud, "EBWIC : A Low Complexity and Efficient Rate Constrained Wavelet Image Coder", *ICIP*, Vancouver, Canada, 2000.
- [5] C. Parisot, M. Antonini, M. Barlaud, C. Lambert-Nebout, C. Lamy et G. Moury, "On Board Strip-based Wavelet Image Coding for Future Space Remote Sensing Missions", *IGARSS conference*, Hawaii, USA, 2000.
- [6] C. Lamy, B. Rougé et S. Baillarin, "La chaîne image SPOT5 THR : un exemple d'optimisation globale", *GRETSI*, FRANCE, 2001.
- [7] S. Tramini, M. Antonini, M. Barlaud, G. Aubert, B. Rougé et C. Lamy, "Spatio-frequency noise distribution a priori for satellite image joint denoising/deblurring", *ICIP*, Vancouver, Canada, 2000.
- [8] B. Usevitch, "Optimal Bit allocation for Biorthogonal Wavelet Coding", in Proc. Data Compression Conference (Snowbird, Utah), pp. 387-395, Mars 1996.
- [9] P. Charbonnier, L. Blanc-Féraud, G. Aubert et M. Barlaud, "Deterministic Edge-Preserving Regularization in Computed Imaging", *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 5, n° 12, 1997.
- [10] S. Tramini, M. Antonini et M. Barlaud, "Intraframe Image Decoding based on a Nonlinear Variational Approach", *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol. 9, pp. 369-380, 1998.
- [11] S. Tramini, M. Antonini, M. Barlaud et G. Aubert, "Quantization Noise Removal for Optimal Transform Decoding", *ICIP*, vol. 3, Chicago, Illinois, USA, Oct. 1998.