

Méthodes de démosaïquage multispectral pour l'imagerie spatiale

Arthur RENAudeau^{1,2} Jean-Yves TOURNERET^{1,2} Jean-Denis DUROU²
Nicolas THÉRET³ Sylvain LUCAS³ Quentin DOUAGLIN⁴

¹Laboratoire de recherche TéSA, 7 boulevard de la Gare, 31500 Toulouse, France

²Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, UMR CNRS 5505, 2 rue Camichel, 31071 Toulouse Cedex 71, France

³Centre National d'Études Spatiales, 18 avenue Édouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 9, France

⁴Thales Services Numériques, 3 avenue de l'Europe, 31400 Toulouse, France

Résumé – Les missions spatiales nécessitent des capteurs alliant hautes résolutions spatiale et spectrale. Pour ce faire, de nouveaux instruments permettent d'obtenir plusieurs bandes spectrales en une seule acquisition. Cela entraîne cependant un sous-échantillonnage, nécessitant un démosaïquage pour reconstruire les images complètes. Cet article présente un état de l'art condensé des méthodes de démosaïquage pouvant être appliquées à un motif de 25 bandes spectrales et évalue leurs performances sur une image réelle du cratère Humboldt situé sur la Lune. Cette analyse montre que les approches itératives et par démixage offrent les meilleures performances en termes de fidélité spectrale et spatiale.

Abstract – Space missions require sensors that combine high spatial and spectral resolution. To achieve this, new instruments can obtain several spectral bands in a single acquisition. However, this leads to undersampling, requiring demosaicking to reconstruct complete images. This paper presents a condensed state-of-the-art of demosaicking methods that can be applied to a 25 spectral band pattern and evaluates their performance on a real image of the Humboldt crater on the Moon. This analysis shows that iterative and unmixing approaches offer the best performance in terms of spectral and spatial fidelity.

1 Introduction

Les missions d'exploration spatiales se heurtent à une difficulté constituée de deux besoins opposés dans la conception des instruments optiques : la recherche d'une haute résolution spectrale, qui permet d'identifier la nature des roches observées, associée à une haute résolution spatiale, pour rendre compte des structures géologiques. Cependant, le retour d'expérience avec le rover Perseverance sur Mars montre qu'un nombre « raisonnable » de bandes spectrales permet de faire une analyse géologique efficace, comme dans [1] avec 11 bandes spectrales. Ces instruments permettant l'accès à plusieurs bandes spectrales tout en conservant une haute résolution spatiale sont basés habituellement sur des systèmes de roues à filtre : on acquiert plusieurs images en changeant le filtre coloré positionné devant la caméra. Cela présente cependant deux inconvénients : d'une part, l'instrument est moins intégré, plus volumineux et plus lourd, et d'autre part, il nécessite des mécanismes, que l'on souhaite éviter pour ce type de mission parce qu'ils en diminuent la fiabilité (risque de panne ou de blocage).

Une nouvelle génération d'instruments a donc été développée, en généralisant le principe de l'acquisition couleur des filtres de Bayer [2]. On a ainsi en une seule image à la fois la haute résolution spatiale et plusieurs bandes spectrales, selon la définition du filtre. En particulier, la société IMEC a développé un filtre avec un motif 5×5 comprenant 25 bandes spectrales étroites réparties entre 662 nm et 953 nm. Ce filtre est embarqué à bord de la mission européenne HERA [3] et sera intégré dans une caméra du Centre National d'Études Spatiales (CNES) fournie au Mohamed Bin Rashid Space Center (MBRSC) pour être embarquée sur le rover lunaire Rashid-3 (voir FIGURE 1).

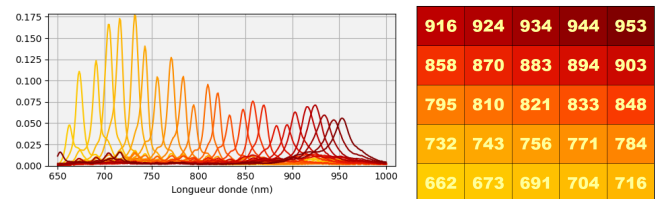


FIGURE 1 : Réponse spectrale des 25 filtres du capteur IMEC et répartition des filtres dans la mosaïque (en nm).

L'inconvénient de ces nouveaux instruments est que la donnée spectrale est fortement sous-échantillonnée, puisque la résolution spatiale est répartie sur les différentes bandes spectrales. De la même façon que pour le filtre de Bayer, une méthode permettant d'optimiser le démosaïquage de l'image, c'est-à-dire la reconstruction des bandes spectrales en pleine résolution, est donc nécessaire. À la différence des approches les plus récentes reposant sur l'apprentissage, les solutions de démosaïquage présentées dans cet article n'utilisent pas d'hypothèse sur le contenu de la scène observée : cela semble pertinent pour l'exploration spatiale, où il est supposé par principe que le paysage observé est nouveau et donc inconnu.

Cet article résume et illustre plusieurs algorithmes de démosaïquage adaptés au capteur à 25 bandes, i.e., qui s'appliquent à un motif de taille 5×5 . Il est organisé en quatre parties : les méthodes par interpolation (Section 2), les méthodes nécessitant la création d'une image pseudo-panchromatique (Section 3), les méthodes avec démixage (Section 4) et des exemples de résultats obtenus avec les différentes méthodes pour comparer les qualités de reconstruction des images du cratère Humboldt [4] situé sur la surface de la Lune (Section 5).

2 Méthodes par interpolation

Interpolation spatiale (IS) Le plus simple pour reconstruire les différentes bandes spectrales à partir de l'image mosaïquée M est d'effectuer une interpolation spatiale à partir des pixels de M associés à chacune des B bandes. Parmi les différentes interpolations possibles, le meilleur résultat est obtenu dans [5] avec une interpolation bilinéaire pondérée. En définissant l'image M_b^{pa} comme étant l'image M parcimonieuse où seules les valeurs de la bande b aux positions $\mathbf{p}_b$ sont non nulles, cette interpolation est définie par une opération de convolution :

$$D_b^{\text{IS}} = M_b^{\text{pa}} * h_F, \quad (1)$$

où IS indique l'interpolation spatiale bilinéaire pondérée et où le filtre bidimensionnel h_F est de réponse impulsionnelle :

$$h_F = \frac{1}{B} \left[1, \dots, (\sqrt{B} - 1), \sqrt{B}, (\sqrt{B} - 1), \dots, 1 \right]^\top \times \left[1, \dots, (\sqrt{B} - 1), \sqrt{B}, (\sqrt{B} - 1), \dots, 1 \right]. \quad (2)$$

Cette reconstruction reste tout de même limitée car seule la corrélation spatiale est utilisée et non la corrélation spectrale.

Différence spectrale (DS et ItDS) Pour prendre en compte la corrélation spectrale, on peut utiliser les différences entre plusieurs bandes spectrales [5]. À partir de M_b^{pa} qui ne contient des valeurs non nulles qu'aux positions $\mathbf{p}_b$, on cherche à remplir les positions $\mathbf{p}_s$ avec $s \neq b$ dans l'image M_b^{pa} . En commençant par appliquer une interpolation bilinéaire pondérée à M_s^{pa} pour obtenir une image interpolée D_s^{IS} de la bande s , on calcule les différences spectrales $\Delta_{b,s}(\mathbf{p}_b)$ entre les vraies valeurs $M_b^{\text{pa}}(\mathbf{p}_b)$ et les valeurs interpolées $D_s^{\text{IS}}(\mathbf{p}_b)$:

$$\Delta_{b,s}(\mathbf{p}_b) = M_b^{\text{pa}}(\mathbf{p}_b) - D_s^{\text{IS}}(\mathbf{p}_b). \quad (3)$$

Cette image de différence est à son tour interpolée pour fournir une image notée $\Delta_{b,s}^{\text{IS}}$ qui permet d'avoir des valeurs de différences en chaque pixel, et en particulier pour les pixels en position $\mathbf{p}_s$. Les valeurs $D_b^{\text{DS}}(\mathbf{p}_s)$ sont alors obtenues en additionnant les vraies valeurs de la bande s avec les valeurs des différences interpolées aux positions $\mathbf{p}_s$:

$$D_b^{\text{DS}}(\mathbf{p}_s) = M_s^{\text{pa}}(\mathbf{p}_s) + \Delta_{b,s}^{\text{IS}}(\mathbf{p}_s). \quad (4)$$

Pour chaque bande b , il faut donc effectuer $B - 1$ différences avec les autres bandes. Si les résultats sont meilleurs que l'approche spatiale, il reste cependant un manque de régularité spatiale car chaque sous-bande est remplie séparément. Il est possible de créer une version itérative (ItDS) de la méthode par différence spectrale. Une fois le premier démosaïquage effectué, on peut remplacer la version interpolée des sous-bandes D_s^{IS} par le résultat d'un premier démosaïquage (par exemple D_s^{DI} , expliqué dans la Section 3), comme cela est décrit dans [6]. Le calcul du nombre d'itérations dépend de l'écart entre la longueur d'onde de la bande b à remplir et celle de la bande s qui sert au remplissage :

$$N_{bs} = \left\lceil \exp \left(- \frac{|\lambda_b - \lambda_s| - \lambda_{\text{lim}}}{20 \sigma} \right) \right\rceil, \quad (5)$$

où $\lceil \cdot \rceil$ est la partie entière supérieure et ($\lambda_{\text{lim}} = 100, \sigma = 1.74$) afin que le nombre N_{bs} d'itérations entre deux bandes soit égal à 10 si l'écart entre ces dernières est de 20 nm, et qu'il soit égal à 1 si l'écart entre les bandes est supérieur à 100 nm.

3 Méthodes utilisant une image PAN

Création de l'image pseudo-panchromatique (PAN) Une première version de cette image peut être obtenue en filtrant l'image mosaïquée M avec un filtre moyennneur h_μ :

$$P^\mu = M * h_\mu, \quad (6)$$

mais qui ne préserve pas les contours. Les auteurs de [7] ont utilisé un équivalent de gradients de patchs sur un 8-voisinage appelé information directionnelle locale (IDL). Pour récupérer les contours, une différence est calculée entre l'image mosaïquée M et une moyenne pondérée de ses 8 plus proches voisins dans la même bande spectrale :

$$\Delta M(\mathbf{p}) = M(\mathbf{p}) - \frac{\sum_{\mathbf{q}} \gamma_{\mathbf{q}} M(\mathbf{q})}{\sum_{\mathbf{q}} \gamma_{\mathbf{q}}}, \quad (7)$$

où les coefficients $\gamma_{\mathbf{q}}$ sont calculés à partir d'une différence absolue entre patchs centrés respectivement en $\mathbf{p}$ et en $\mathbf{q}$, pondérée par une matrice $\kappa_{\mathbf{q}}$:

$$\gamma_{\mathbf{q}} = (1 + \kappa_{\mathbf{q}} |M(\text{patch}(\mathbf{p})) - M(\text{patch}(\mathbf{q}))|)^{-1}. \quad (8)$$

En supposant que la différence locale est invariante par rapport à n'importe quelle image pseudo-panchromatique, cette dernière est la même pour l'image pseudo-panchromatique filtrée, et donc $\Delta M = \Delta P^\mu$. En développant cette égalité avec (7), on obtient alors une nouvelle image pseudo-panchromatique :

$$P^\gamma(\mathbf{p}) = M(\mathbf{p}) + \frac{\sum_{\mathbf{q}} \gamma_{\mathbf{q}} [P^\mu(\mathbf{q}) - M(\mathbf{q})]}{\sum_{\mathbf{q}} \gamma_{\mathbf{q}}}. \quad (9)$$

Cette méthode donne de très bons résultats visuels, où les contours sont préservés.

Transformation en ondelettes (TO) La décomposition en ondelettes a été utilisée dans [8] car la corrélation entre les bandes est plus importante dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences. Le point de départ consiste à effectuer une interpolation spatiale afin d'obtenir une image de haute résolution D^{IS} . Ensuite, $D_b^{\text{IS}}(\mathbf{p}_s)$, version sous-échantillonnée de D_b^{IS} pour une bande b donnée ne contenant que les pixels de la sous-bande s , subit une transformation en ondelettes discrètes 2D pour obtenir quatre sous-images :

$$(W_b^{\text{A}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{H}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{V}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{D}}(\mathbf{p}_s)) = \text{TO2D}(D_b^{\text{IS}}(\mathbf{p}_s)), \quad (10)$$

où $W_b^{\text{A}}(\mathbf{p}_s)$ est la version approchée (basses fréquences), alors que les hautes fréquences sont contenues dans $W_b^{\text{H}}(\mathbf{p}_s)$ (horizontales), $W_b^{\text{V}}(\mathbf{p}_s)$ (verticales) et $W_b^{\text{D}}(\mathbf{p}_s)$ (diagonales). Cette méthode repose sur le fait d'avoir une bande b de meilleure résolution spatiale qui sera ici l'image pseudo-panchromatique obtenue via IDL [7]. Pour les bandes de moins bonne résolution, les sous-images de hautes fréquences sont remplacées par celles de la meilleure résolution spatiale, puis les sous-bandes sont reconstruites par transformation inverse :

$$D_b^{\text{TO}}(\mathbf{p}_s) = \text{TO2DI}(W_b^{\text{A}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{H}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{V}}(\mathbf{p}_s), W_b^{\text{D}}(\mathbf{p}_s)), \quad (11)$$

où $W_b^{\text{H}}(\mathbf{p}_s)$, $W_b^{\text{V}}(\mathbf{p}_s)$ et $W_b^{\text{D}}(\mathbf{p}_s)$ sont obtenues à partir de l'image pseudo-panchromatique P^γ .

Différence d'intensités (DI et ItDI) Après avoir construit l'image pseudo-panchromatique P^γ à l'aide de la méthode par IDL dans [7], la différence d'intensités reprend à peu près le même schéma que celui de la différence spectrale (DS). Le changement vient du remplacement des interpolations bilinéaires pondérées D^{IS} pour chaque bande par l'image pseudo-panchromatique P^γ pour faire les différences aux emplacements $\mathbf{p}_b$:

$$\Delta_b(\mathbf{p}_b) = M_b^{\text{pa}}(\mathbf{p}_b) - P^\gamma(\mathbf{p}_b). \quad (12)$$

Cette image de différence est à son tour interpolée pour fournir une image notée Δ_b^{IS} qui permet d'avoir des valeurs en chaque pixel de l'image. La bande b est alors remplie au niveau des emplacements $\mathbf{p}_b$ (emplacements $\mathbf{p}_s$ pour $s \neq b$) en additionnant les valeurs de l'image pseudo-panchromatique P^γ avec les valeurs des différences interpolées :

$$D_b^{\text{DI}}(\mathbf{p}_b) = P^\gamma(\mathbf{p}_b) + \Delta_b^{\text{IS}}(\mathbf{p}_b). \quad (13)$$

Le démosaïquage obtenu a une meilleure cohérence spatiale avec l'image pseudo-panchromatique et il n'est plus nécessaire de parcourir toutes les bandes spectrales pour en remplir une. Il est possible de prolonger l'algorithme de démosaïquage de manière itérative (ItDI) en remplaçant la bande pseudo-panchromatique par la moyenne des bandes de D^{DI} issues du premier démosaïquage [9]. Le nombre d'itérations a été estimé empiriquement sur un ensemble de données, en remarquant qu'en fonction du nombre de bandes dans le motif, le PSNR maximal ne se situe pas à la même itération. De notre côté, il a été décidé de nous orienter vers un seuil de convergence par rapport à la variation des bandes démosaïquées entre deux itérations :

$$\bar{\Delta D}^{\text{ItDI}(k+1)} = \frac{1}{NB} \sum_b \sum_{\mathbf{p}} \left| \frac{D_b^{\text{ItDI}(k+1)}(\mathbf{p}) - D_b^{\text{ItDI}(k)}(\mathbf{p})}{D_b^{\text{ItDI}(k)}(\mathbf{p}) + \varepsilon} \right|, \quad (14)$$

où NB désigne le nombre de pixels de toutes les bandes afin de calculer une variation relative moyenne par pixel, et ε sert à empêcher la division par 0, avec un seuil d'arrêt à $8 \cdot 10^{-4}$.

4 Méthodes avec démelange

En répartissant l'image mosaïquée M dans une matrice creuse $\mathcal{M}$ contenant N lignes (nombre de pixels) et B colonnes (nombre de bandes), on peut écrire cette matrice comme étant la matrice démosaïquée $\mathcal{D}$ à laquelle on applique un opérateur $\mathcal{W}$ de masquage pour ne garder que les valeurs déjà connues :

$$\mathcal{M} = \mathcal{W} \circ \mathcal{D}, \quad (15)$$

où $\circ$ désigne le produit de Hadamard. Le démosaïquage consiste à estimer $\mathcal{D}$ à partir des données observées dans $\mathcal{M}$, ce qui peut être réalisé en supposant que $\mathcal{D}$ est de rang faible [10], et qu'elle peut être exprimée comme le produit entre une matrice des abondances G et une matrice des *endmembers* F pour former un modèle de démelange multispectral :

$$\mathcal{D} \approx G \times F. \quad (16)$$

Les matrices G et F sont estimées de manière itérative à partir d'une itération précédente de démosaïquage à l'aide d'algorithmes de factorisation de matrices non négatives (ItFMN),

puis la matrice de démosaïquage est mise à jour à partir du produit GF , $\mathcal{M}$ et $\overline{\mathcal{W}}$ le complémentaire de $\mathcal{W}$ [11] :

$$\mathcal{D}^{(k+1)} = \mathcal{M} + \overline{\mathcal{W}} \circ \left(G^{(k)} F^{(k)} \right). \quad (17)$$

Le critère d'arrêt choisi est le même que pour (14) avec un seuil de 1.10^{-4} . D'autre part, en partant du principe que certains patches $\mathcal{M}_i$ de la mosaïque peuvent être vus comme des « super-pixels » qui sont dominés par un seul *endmember* [11], l'équation (15) devient :

$$\mathcal{M}_i = \mathcal{W}_i \circ \mathcal{D}_i = \mathcal{W}_i \circ (g_i f_i), \quad (18)$$

où g_i et f_i sont respectivement des vecteurs colonne et ligne. En ne conservant que les *endmembers* qui vérifient l'approximation de rang 1, i.e., $\|\mathcal{M}_i - \mathcal{W}_i \circ (g_i f_i)\|_F^2 \approx 0$, ces derniers sont réunis en classes à l'aide de l'algorithme des K-moyennes pour obtenir la matrice $F^{(k+1)}$. La matrice des abondances $G^{(k+1)}$ est ensuite estimée par moindres carrés non négatifs à partir de $\mathcal{D}^{(k)}$ et $F^{(k+1)}$ pour former l'algorithme ItFMNP.

5 Étude comparative

Pour comparer les différentes méthodes, les données de vérité terrain proviennent de mesures du Moon Mineralogy Mapper sur le cratère Humboldt [4] dont on a extrait les images correspondant à la valeur la plus proche du pic de chaque gabarit spectral pour chaque bande. Les résultats des différents démosaïquages sont montrés sur la FIGURE 2 en termes de PSNR et de SAM pour les 25 bandes, permettant de constater l'amélioration significative obtenue avec la différence d'intensités (DI en vert) puis les méthodes itératives (DI+It en bleu et violet).

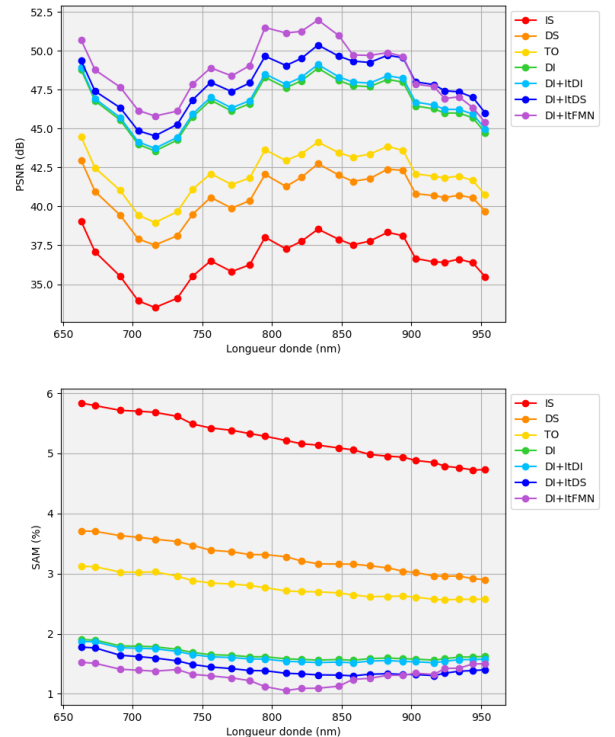


FIGURE 2 : PSNR et SAM de chacune des 25 bandes après démosaïquage avec les différentes méthodes.

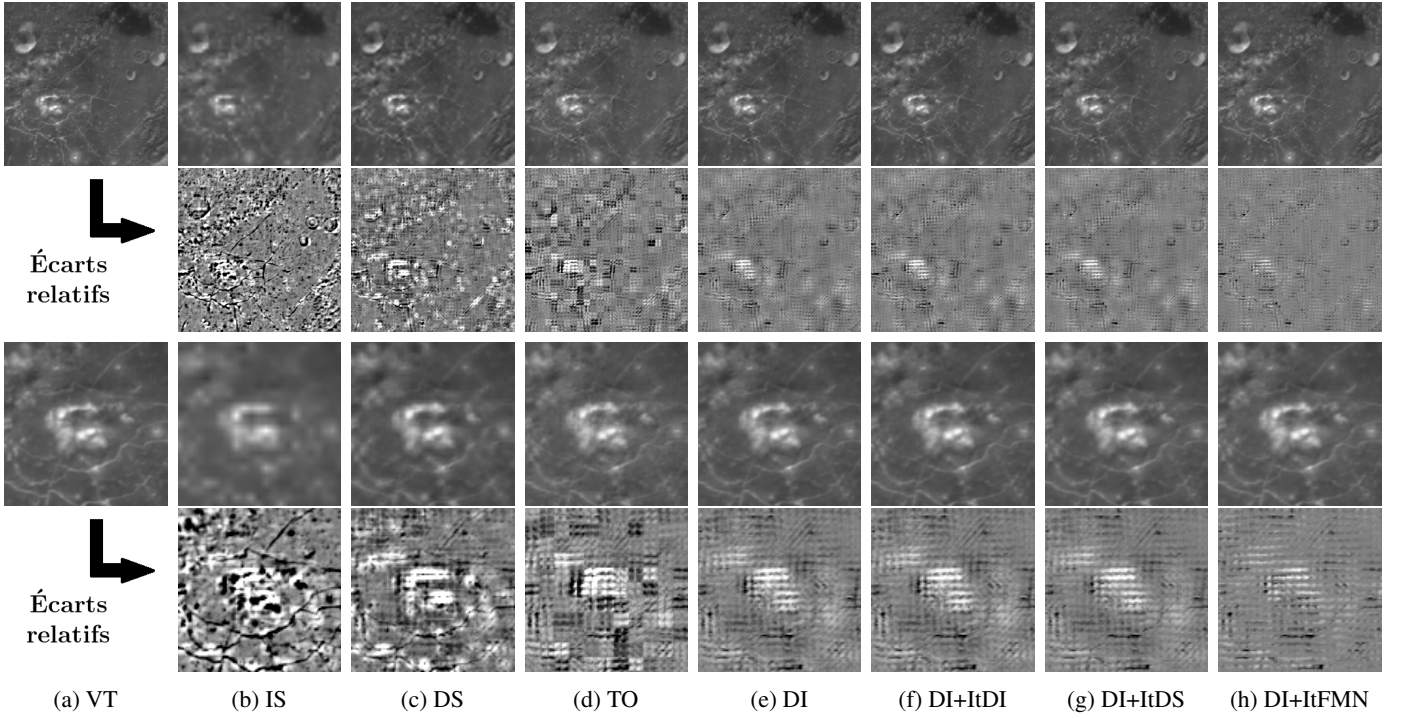


FIGURE 3 : Comparaison des méthodes de démosaïquage et écarts relatifs à la vérité terrain pour la bande à 716 nm (zoom en bas).

La reconstruction de la bande à 716 nm est illustrée sur la FIGURE 3, associée à une image des écarts relatifs entre l'image démosaïquée D et la vérité terrain D^{VT} (notés ER) afin de mieux visualiser l'apport de chaque méthode :

$$ER(D, D^{VT}) = \frac{D - D^{VT}}{\max_p(D^{VT}(p)) - \min_p(D^{VT}(p))}, \quad (19)$$

où chaque zone avec un écart faible est grisée, alors que les zones de forts écarts sont plutôt claires ou foncées. Alors que l'interpolation spatiale (IS), et dans une moindre mesure la différence spectrale (DS), font ressortir les contours dans les écarts, les méthodes itératives (DI+It) permettent d'obtenir de très bons résultats visuels, avec en particulier la méthode par démélange (DI+ItFMN) qui réduit davantage les écarts.

6 Conclusion et perspectives

Cet article a tout d'abord résumé les principales méthodes de démosaïquage multispectral applicables à un motif constitué de 25 bandes (hors méthodes basées sur des arbres binaires). Ces dernières peuvent s'organiser en différentes classes utilisant l'interpolation, une image pseudo-panchromatique ou le démélange. L'application de ces méthodes à une image réelle du cratère Humboldt nous a permis de montrer la supériorité des méthodes itératives, et en particulier par démélange.

Les perspectives de ce travail concernent la généralisation de cette hiérarchie à d'autres données, ainsi que la prise en compte d'autres méthodes de démosaïquage non étudiées dans cet article (voir par exemple [11] pour plus de détails). Ces approches pourraient apporter une meilleure restitution du spectre d'émission en tout point et une meilleure qualité de reconstruction d'un point de vue spatial. La recherche d'un motif optimal en éloignant les bandes proches spectralement est également une piste de recherche intéressante.

Références

- [1] J. Núñez *et al.*, "Spectral Diversity along the Delta Front in Jezero Crater, Mars as seen with Mastcam-Z on the Mars 2020 Perseverance Rover," in *Proc. 54th Lunar and Planetary Science Conf.*, 2023.
- [2] B. Bayer, "Color Imaging Array," 1976. Google Patent US3971065A.
- [3] P. Michel *et al.*, "The ESA Hera Mission : Detailed Characterization of the DART Impact Outcome and of the Binary Asteroid (65803) Didymos," *The Planetary Science Journal*, 2022.
- [4] M. Martinot *et al.*, "Mineralogical Diversity and Geology of Humboldt Crater Derived using Moon Mineralogy Mapper Data," *Journal of Geophysical Research : Planets*, vol. 123, no. 2, pp. 612–629, 2018.
- [5] J. Brauers and T. Aach, "A Color Filter Array Based Multispectral Camera," in *Proc. Workshop Farb Bildverarbeitung*, (Ilmenau, Germany), 2006.
- [6] J. Mizutani *et al.*, "Multispectral Demosaicking Algorithm Based on Inter-Channel Correlation," in *Proc. IEEE Visual Commun. Image Process. Conf.*, (Valetta, Malta), 2014.
- [7] S. Mihoubi *et al.*, "Multispectral Demosaicing using Pseudo-Panchromatic Image," *IEEE Trans. Comput. Imaging*, vol. 3, no. 4, pp. 982–995, 2017.
- [8] L. Chen *et al.*, "Subband Synthesis for Color Filter Array Demosaicking," *IEEE Trans. Systems Man Cybernetics*, vol. 38, no. 2, pp. 485–492, 2008.
- [9] S. Mihoubi *et al.*, "Multispectral Demosaicing using Intensity-Based Spectral Correlation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. Theory, Tools and Applications (IPTA)*, 2015.
- [10] G. Tsagkatakis *et al.*, "Graph and Rank Regularized Matrix Recovery for Snapshot Spectral Image Demosaicing," *IEEE Trans. Comput. Imaging*, vol. 5, no. 2, pp. 301–316, 2018.
- [11] K. Abbas *et al.*, "Locally-Rank-One-Based Joint Unmixing and Demosaicing Methods for Snapshot Spectral Images. Part I : a Matrix-Completion Framework," *IEEE Trans. Comput. Imaging*, vol. 5, pp. 848–862, 2024.