

Etude des mélanges non-linéaires en imagerie hyperspectrale – Une première approche en laboratoire

PIERRE HUARD¹, RODOLPHE MARION¹

¹ CEA, DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France

¹Pierre.Huard@cea.fr, Rodolphe.Marion@cea.fr

Résumé - Le mélange spectral non-linéaire se produit en raison de réflexions multiples entre différents matériaux à l'intérieur d'un même pixel. L'étude de tels effets à partir d'images satellites ou aéroportées ne permet pas de contrôler les paramètres intervenant dans le mélange tels que la variabilité de la réflectance des matériaux, les angles d'observation et d'illumination, les BRDF, les effets d'environnement et topographiques. Aussi, dans ce papier, nous discutons la possibilité d'étudier les mélanges non-linéaires en laboratoire en construisant une maquette imagée par une caméra hyperspectrale. Nous étudions d'abord le cas d'une scène miniature plane ; cette expérimentation permet de retrouver les résultats du mélange linéaire avec une erreur relative d'environ 5-6%. Ensuite, nous reproduisons les effets topographiques responsables de la non-linéarité du mélange en ajoutant des reliefs dans la scène. Nous pouvons alors noter que la réflectance du pixel n'est plus égale à la moyenne pondérée des réflectances des matériaux de telle sorte que les effets non-linéaires dus aux reliefs sont mis en avant. Nous appliquons finalement l'algorithme bilinéaire pour améliorer les résultats du démixage.

Abstract - Non-linear spectral mixing occurs due to multiple reflections between different materials inside a single pixel. Studying such effects from satellite-borne or airborne images does not enable to control the parameters intervening in the mixing such as the variability of materials reflectance, viewing and illumination angles, BRDF, adjacency and topographic effects. Therefore, in this paper, we discuss the possibility to study non-linear mixing in the laboratory by the construction of a model imaged by a hyperspectral camera. We first study the case of a flat miniature scene; this experimental set-up enables to retrieve linear mixing results with a relative error of about 5-6%. Then, we reproduce the topographic effects responsible for the non-linearity of the mixing by adding some reliefs in the scene. We can then notice that the reflectance of the pixel is no more equal to the weighted average of the materials reflectance so that the non-linear effects due to reliefs are outlined. We finally apply the bilinear unmixing algorithm to improve unmixing results.

1 Problématique

Un objectif de l'imagerie hyperspectrale est d'identifier dans une image les matériaux purs (endmembers) présents et leurs proportions dans chacun des pixels. La résolution spatiale de ce type d'image est généralement grossière (décamétrique) et plusieurs matériaux différents peuvent contribuer au spectre mesuré pour un unique pixel. Ce phénomène, nommé mélange spectral, est soit linéaire soit non-linéaire [1]. Dans le cas linéaire, la réflectance du pixel est égale à la moyenne des endmembers pondérée par leurs proportions. Le mélange spectral linéaire se produit lorsque l'éclairement incident est uniforme sur la surface du pixel, celle-ci étant plane (nous ne considérons pas les mélanges intimes dans ce papier). Aussi, le rayonnement incident est directement réfléchi par chaque matériau vers le capteur, proportionnellement à sa surface dans le pixel. Dans le cas non-linéaire (voir Fig. 1), la lumière subit des interactions multiples entre les différents matériaux en raison de la structure géométrique de la scène. Ces réflexions engendrent un mélange spectral et le spectre mesuré pour un pixel est alors une combinaison non-linéaire des réflectances des matériaux présents dans le pixel.

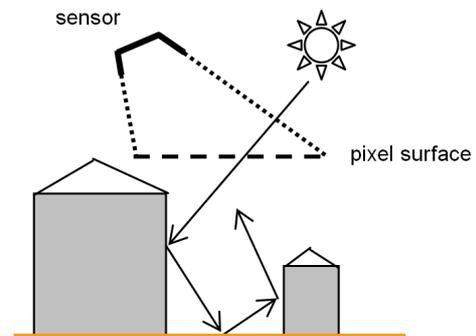


Figure 1 : exemple de mélange non-linéaire dû à des reliefs dans un pixel. Des réflexions multiples se produisent entre le sol et les murs des buildings.

Les mélanges non-linéaires sont difficiles à étudier en raison des nombreux paramètres qu'il convient de considérer comme la variabilité des réflectances des matériaux, les angles d'observation et d'illumination, les effets de BRDF, d'adjacence et de topographie. L'utilisation d'une maquette pour simuler ces effets non-linéaires en laboratoire constitue une approche intéressante dans la mesure où elle permet de faire varier ces paramètres (et donc de les contrôler) et d'analyser leur influence sur le signal mesuré, ce qui n'est pas possible lors de l'utilisation d'images satellites ou aéroportées. Etant donné que peu de résultats

concernant la modélisation physique des effets non-linéaires de mélange sont disponibles, une telle approche peut constituer une aide pour concevoir des algorithmes efficaces de démixage spectral pour diverses applications thématiques.

Par conséquent, le but de ce papier est de présenter une première approche de la simulation des effets non-linéaires de mélange en laboratoire, en particulier pour des scènes miniatures représentatives des environnements urbains (d'un point de vue géométrique). Nous décrivons tout d'abord le matériel utilisé et nous discutons les erreurs de mesures liées aux conditions expérimentales. Ensuite, nous vérifions les résultats du mélange linéaire. Nous mettons finalement en évidence les effets non-linéaires et nous utilisons l'algorithme bilinéaire pour les corriger.

2 Matériel de laboratoire et conditions expérimentales

2.1 Matériel de laboratoire

Pour acquérir les images en laboratoire, nous avons utilisé une caméra hyperspectrale Specim QE V10E [2] fonctionnant dans la gamme VNIR [0,4-1,0 μ m] (voir Fig. 2). Pour mesurer la réflectance des matériaux constituant les diverses maquettes utilisées dans cette étude, nous avons utilisé un spectromètre ASD Fieldspec 3 High Resolution [3] fonctionnant dans la gamme VNIR-SWIR [0,4-2,5 μ m] (voir Fig. 2). Les spectres mesurés avec le spectromètre ont été ré-échantillonnés pour correspondre aux pixels de la caméra pour une comparaison directe.



Figure 2 : caméra hyperspectrale Specim QE V10E (à gauche) et spectromètre ASD Fieldspec 3 High Resolution (à droite).

Afin d'isoler la maquette et la caméra de possibles réflexions sur les murs du laboratoire, nous avons construit un tunnel noir à partir d'une armature recouverte par du papier Kraft noir. La source utilisée pour illuminer la maquette est une simple lampe à incandescence, dont le spectre permet de réaliser des mesures entre 0,5 et 1,0 μ m. Les différentes maquettes sont construites avec des matériaux choisis les moins brillants possibles pour limiter les effets directionnels. Nous avons utilisé des cibles en carton, en papier et en bois, certaines étant peintes. Nous sommes conscients que ces matériaux ne sont pas représentatifs de scénarios réels ; cependant, cela semble suffisant pour appréhender l'origine géométrique du mélange non-linéaire.

2.2 Acquisition des données

La maquette est constituée d'un support plat sur lequel sont placées des cibles planes pour le cas linéaire de mélange ou des reliefs pour le cas non-linéaire. Elle

est fixée verticalement sur un mur à l'intérieur du tunnel noir. La caméra est quant à elle placée à environ 1,50m du mur. Les positions de la source lumineuse et de la caméra peuvent changer afin d'obtenir des images avec différents angles d'illumination et d'observation pour accentuer les effets de réflexions multiples et pour simuler des ombres (voir Fig. 3).

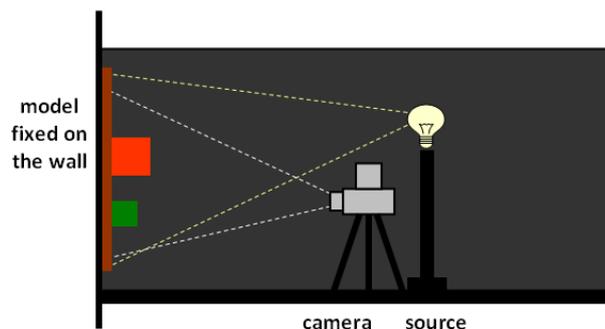


Figure 3 : principe d'acquisition des données.

Pour étudier les mélanges spectraux, nous avons besoin de disposer d'images de la maquette en réflectance et de connaître la réflectance des matériaux utilisés pour la construire. Les images en réflectance sont obtenues à partir des images brutes fournies par la caméra. Pour calculer la réflectance d'un pixel de l'image trois spectres doivent être mesurés. Une image de la maquette permet d'obtenir le rayonnement réfléchi par le pixel s_1 . Un spectralon est utilisé pour mesurer l'éclairement incident s_2 (une image du spectralon est acquise dans exactement les mêmes conditions). Finalement, le bruit de la caméra est pris en compte et son spectre s_3 est déterminé en enregistrant une image noire. La réflectance est alors donnée par $\rho = (s_1 - s_3) / (s_2 - s_3)$.

La résolution spatiale de l'image en réflectance obtenue est ensuite dégradée en moyennant plusieurs pixels voisins (voir Fig. 4). Ainsi, un pixel de l'image résultante peut contenir plusieurs matériaux distincts linéairement ou non-linéairement mélangés, en fonction de la structure géométrique de la maquette considérée. Le calcul de l'image de réflectance doit être réalisé avant de dégrader la résolution afin de limiter l'impact sur le spectre mesuré de la non-uniformité de l'éclairement au sein d'un même pixel. Notons qu'il serait intéressant d'utiliser une fonction de transfert en lieu et place de la simple moyenne pour dégrader la résolution spatiale ; ceci permettrait de mieux prendre en compte les phénomènes liés au capteur.

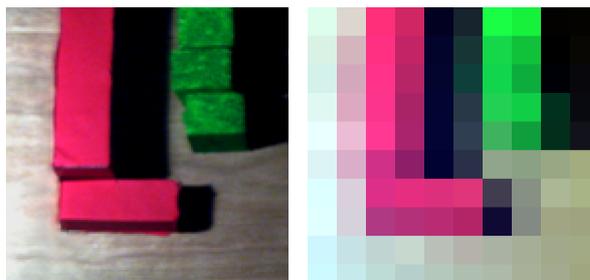


Figure 4 : image brute d'une maquette avec reliefs (à gauche) et image corrigée en réflectance et dégradée spatialement d'un facteur 20 (à droite).

2.3 Erreurs de mesure

Plusieurs effets peuvent introduire des erreurs de mesures, principalement les effets de BRDF des matériaux (les effets d'environnement dus au tunnel en papier Kraft peuvent être parfaitement contrôlés). Les effets directionnels entraînent des variations de la réflectance de l'ordre de 5-6% (voir Fig. 5) et introduisent ainsi une erreur du même ordre sur l'estimation des réflectances par le modèle linéaire (voir section 3). Il convient évidemment de maîtriser les paramètres expérimentaux lors de la mesure pour obtenir des images permettant d'isoler les effets de mélanges linéaires ou non-linéaires, objets de l'étude (voir [4] pour plus de détails).

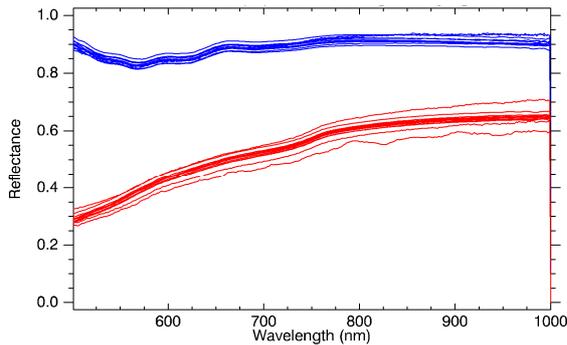


Figure 5 : réflectance du carton (rouge) et du papier (bleu) pour des angles d'observation variant entre 0° et 35°.

3 Cas d'une maquette plane : mélange linéaire

Dans cette section, nous considérons une scène plane afin de retrouver les résultats du mélange linéaire. Elle se compose de quatre carrés identiques de matériaux différents (papier rouge, papier noir, papier blanc et carton). Une image de la scène est acquise et une réflectance moyenne est calculée en moyennant tous les pixels. La moyenne des réflectances de référence des quatre endmembers est également calculée séparément (moyenne pondérée, proportions 1/4). Nous notons une erreur relative entre les deux réflectances égale à 6% (voir Fig. 6). En effet, même si les réflectances de référence sont mesurées à partir de petites zones sélectionnées sur l'image, les erreurs dues aux effets directionnels ne sont pas complètement supprimées. Les résultats du mélange linéaire sont cependant retrouvés avec un bon accord. Notons que pour de faibles angles d'observation et pour des matériaux dont les spectres sont plutôt plats, l'erreur due aux effets directionnels peut être comparée à un décalage et la forme du spectre reste la même.

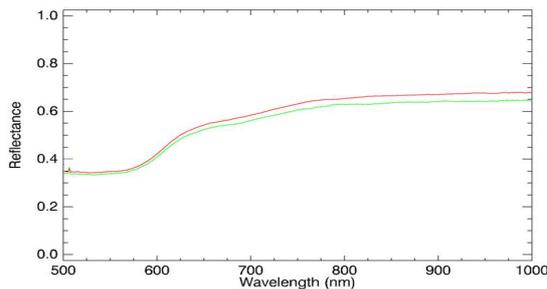


Figure 6 : moyenne pondérée (proportions 1/4) des endmembers (en vert) et réflectance moyenne du pixel (en rouge).

4 Cas d'une maquette avec reliefs : mélange non-linéaire

Nous montrons dans cette section qu'il est possible de mettre en évidence le mélange spectral non-linéaire à partir d'une image de maquette. La scène est composée ici de reliefs recouverts de papier rouge et de peinture verte, placés sur une plaque en bois. L'image de réflectance de la maquette est calculée et sa résolution spatiale est dégradée (voir Fig. 4). Les résultats obtenus avec un algorithme adapté de l'algorithme bilinéaire [5] et avec l'algorithme de démixage linéaire sont ensuite comparés. L'algorithme bilinéaire est adapté aux environnements urbains visés dans cette étude ; une justification physique est fournie dans [6]. D'autres modèles non-linéaires pourraient être utilisés, voir [7] pour plus de détails.

4.1 Mise en évidence des effets non-linéaires de mélange

Comme dans le cas d'une scène plane, la réflectance moyenne de la maquette et la moyenne pondérée (relativement à la surface occupée) des réflectances (mesurées directement sur l'image) des endmembers (pour cette maquette : papier rouge, peinture verte et bois) sont calculées séparément. L'erreur relative entre les deux réflectances est égale à 29% (voir Fig. 7). Cet écart important entre les deux réflectances s'explique par les effets directionnels (comme pour la scène plane), mais surtout par les ombres des reliefs et les réflexions multiples entre les trois endmembers. Notons que les effets d'ombrage seront plus limités dans le cas d'images satellites ou aéroportées. L'erreur mesurée est beaucoup plus grande que dans le cas d'une maquette plane (voir section 3), et les effets non-linéaires de mélange sont ainsi aisément mis en évidence.

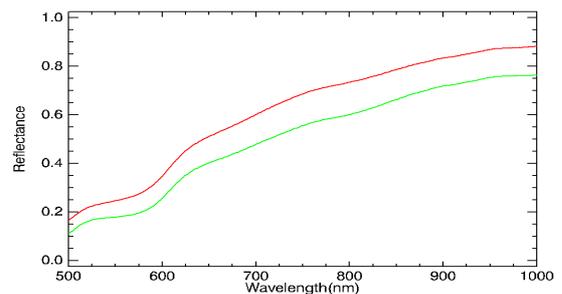


Figure 7 : moyenne pondérée (relativement à la surface occupée) des endmembers (en vert) et réflectance moyenne du pixel (en rouge).

4.2 Démixage non-linéaire en utilisant un algorithme adapté de l'algorithme bilinéaire

D'une part, les proportions sont calculées en supposant que le mélange est linéaire. La réflectance d'un pixel mélangé ρ est supposée être une combinaison linéaire des réflectances de ses endmembers ρ_1 (matériau rouge), ρ_2 (matériau vert) et ρ_3 (bois), et les proportions a_i se somment à 1 :

$$\rho = \sum_{i=1}^3 a_i \rho_i \text{ et } \sum_{i=1}^3 a_i = 1. \quad (1)$$

D'autre part, les proportions sont calculées avec un algorithme adapté de l'algorithme bilinéaire de démixage [5]. La réflectance d'un pixel mélangé est supposée être ici une combinaison linéaire de ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 et des produits croisés. Les proportions a_i se somment toujours à 1 :

$$\rho = \sum_{i=1}^3 c_i \rho_i + c_4 \rho_1 \rho_2 + c_5 \rho_1 \rho_3 + c_6 \rho_2 \rho_3 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^6 c_i = M, \quad a_1 = \frac{c_1}{M}, \quad a_2 = \frac{c_2}{M} \text{ et } a_3 = \sum_{i=3}^6 \frac{c_i}{M}. \quad (3)$$

Les produits croisés des réflectances des endmembers correspondent aux réflectances d'endmembers fictifs qui modélisent les réflexions multiples entre les endmembers. Les proportions des reliefs a_1 et a_2 sont calculées en normalisant les coefficients c_1 et c_2 (3). La proportion du matériau au sol a_3 est calculée différemment (3). Elle est obtenue en sommant les coefficients normalisés de la réflectance du bois et des réflectances des endmembers fictifs de l'équation (2), parce que l'éclairement créé par les réflexions multiples entre les endmembers est nécessairement réfléchi par le sol vers le capteur.

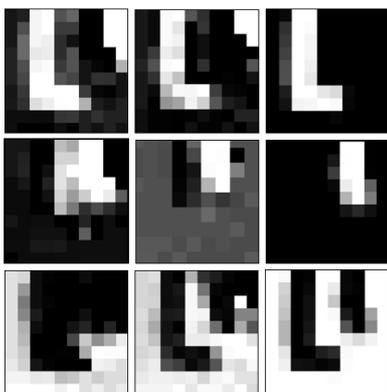


Figure 8 : cartes de proportions (voir Fig. 4) : en colonnes de gauche à droite, cartes de proportions calculées avec l'algorithme non-linéaire, cartes de proportions calculées avec l'algorithme linéaire et carte des proportions réelles. En lignes de haut en bas, cartes de proportions du matériau rouge, du matériau vert et du bois.

L'erreur moyenne entre les proportions réelles et estimées est respectivement pour le bois, le matériau rouge et le matériau vert de 29%, 25% et 15% en utilisant le démixage non-linéaire, et 47%, 31% et 25% en utilisant le démixage linéaire (voir Fig. 8). L'utilisation d'un algorithme non-linéaire permet de calculer les proportions avec une erreur 8% plus faible que dans le cas linéaire. Ceci montre qu'il est possible

de tester l'efficacité d'algorithmes de démixage spectral à partir d'une image de maquette. Les erreurs sont importantes, mais les cartes de proportions permettent de retrouver la forme des reliefs en utilisant un seuil approprié.

5 Conclusion et perspectives

La simulation avec une maquette en laboratoire apparaît être une approche efficace pour étudier les mélanges non-linéaires. En dépit d'erreurs de mesures importantes dues aux conditions expérimentales, les effets non-linéaires peuvent aisément être mis en évidence.

Nous démontrons qu'il est possible de retrouver les proportions d'un matériau composant une scène en appliquant des algorithmes de démixage à une image de maquette, avec une différence de précision entre le démixage linéaire et non-linéaire égale à 8%. Cependant, dans cette première tentative, l'estimation précise des différents termes de l'équation du transfert radiatif demeure délicate.

Cette étude s'est focalisée sur l'origine géométrique des effets non-linéaires de mélange avec pour objectif final d'appliquer les résultats à l'environnement urbain. Pour d'autres applications d'intérêt (e.g. scènes de végétation), l'approche devrait être combinée avec des alternatives telles que des mesures de pixels mélangés *in situ* avec des spectromètres ou l'utilisation de modèles de transfert radiatif 3D.

La prochaine étape de ce travail inclura l'étude des problèmes liés au changement d'échelle, c'est-à-dire au passage d'une maquette de laboratoire à des scénarios réels d'imagerie satellite ou aéroportée.

6 Références

- [1] N. Keshava and J.F. Mustard, "Spectral Unmixing", *IEEE Signal Processing Magazine*, January 2002.
- [2] <http://www.specim.fi>
- [3] <http://www.asdi.com>
- [4] P. Huard and R. Marion, "Study of non-linear mixing in hyperspectral imagery – A first attempt in the laboratory", *IEEE WHISPERS 2011*, June 2011.
- [5] B. Somers *et al.*, "Nonlinear Hyperspectral Mixture Analysis for tree cover estimates in orchards", *Remote Sensing of Environ.*, vol. 113, pp. 1183-1193, 2009.
- [6] I. Meganem *et al.*, "Physical modelling and non-linear unmixing method for urban hyperspectral images", *IEEE WHISPERS 2011*, June 2011.
- [7] A. Halimi *et al.*, "Nonlinear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, to appear.