

# Estimation de réflectances à partir d'une caméra trichromatique pour l'impression couleur

Aboubacar HAROUNA S., Benjamin BRINGIER, Majdi KHOUDEIR

Laboratoire XLIM-SIC UMR 7252 CNRS, Université de Poitiers  
BP 30179, 86962 Futuroscope-Chasseneuil Cedex, France

aboubacar.harouna.seybou@univ-poitiers.fr, benjamin.bringier@univ-poitiers.fr  
majdi.khoudeir@univ-poitiers.fr

**Résumé** – Dans le cadre du contrôle qualité pour l'imprimerie, il est important de pouvoir estimer les variations chromatiques de réflectances. Cette étape doit être effectuée directement lors de la production pour corriger rapidement les paramètres du système d'impression. Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode pour estimer les courbes de réflectance spectrale d'une feuille imprimée à partir d'un simple système d'acquisition photographique. Nous proposons une description complète de la chaîne de traitement, de l'encrier de l'imprimante à la réponse spectrale du système d'acquisition. Pour limiter les mesures lors de l'étape de calibration, nous décrivons une procédure basée sur la simulation d'un système réel. Les résultats montrent la précision et la robustesse de notre méthode par rapport à des mesures classiques qui sont généralement coûteuses à mettre en œuvre.

**Abstract** – As part of quality control for printing, it is important to estimate the chromatic variations of colors. This step must be performed directly in the production process to quickly correct the parameters of the printing system. In this paper, we propose a new method to estimate the spectral reflectance curves of a printed sheet from a single photographic acquisition system. We provide a complete description of the processing chain. To reduce the measures during the calibration step, we describe a procedure based on the simulation of a real system. The results show the accuracy and robustness of our method compared to conventional measures that are generally expensive to implement.

## 1 Introduction

La constance des couleurs est un enjeu important dans un processus d'impression. Elle consiste à assurer que les échantillons imprimés sont conformes à une référence. Cette tâche est habituellement assumée par un opérateur qualifié qui extrait périodiquement un échantillon imprimé pour une comparaison visuelle. La subjectivité et le temps nécessaire pour réaliser cette opération sont malheureusement des facteurs très limitant. Pour obtenir des résultats plus robustes, il est possible d'utiliser un spectrophotomètre pour mesurer les courbes de réflectance spectrale des couleurs imprimées. Mais cette méthode est limitée spatialement en raison de la faible zone mesurée par ces instruments, de l'ordre du millimètre carré. Ces dernières années, la croissance des systèmes d'acquisition d'images multi-spectrales a permis d'intégrer ces systèmes dans la chaîne d'impression pour effectuer une inspection en ligne des échantillons imprimés [1]. Ils permettent d'estimer en temps réel la courbe de réflectance spectrale de chaque pixel car utilisent une ou plusieurs caméras associées à des filtres chromatiques. Toutefois, ces systèmes sont complexes à concevoir et à calibrer. De plus, ils sont généralement très coûteux. A partir d'une simple caméra trichromatique, de nombreuses méthodes ont été

proposées pour estimer les courbes de réflectance spectrale à partir des réponses de la caméra [2]. La plupart de ces algorithmes comprennent une étape d'apprentissage qui nécessite une base de données de réflectances [3]. Dans cet article, un algorithme de calibration spectrale précis de la chaîne complète (Fig. 1) est proposé. Une seule caméra trichromatique est utilisée pour estimer les courbes de réflectance spectrale. Nous exploitons le modèle spectral de l'imprimante afin d'éviter un grand nombre de mesures dans l'étape d'apprentissage. Les résultats prouvent la qualité d'estimation des courbes de réflectance spectrale des couleurs imprimées.

## 2 Théorie spectrale

Pour assurer une reproduction spectrale précise des couleurs en cours d'impression, les propriétés spectrales de chaque élément de la chaîne doivent être connues.

### 2.1 Modèle spectral de l'imprimante

Selon le modèle spectral de Yules et Nielsen[4] (modèle YNSN) d'une imprimante multi-colorant, la réflectance spectrale d'une couleur imprimée peut être estimée par

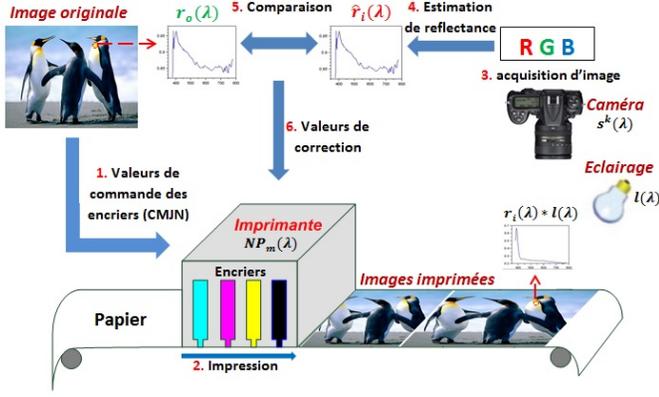


FIG. 1: Chaîne de reproduction couleur composée d'une imprimante, d'une caméra et d'un éclairage.

une somme pondérée des courbes de réflectance spectrale des primaires de Neugebauer (NPs):

$$\hat{r}^{1/n}(\lambda) = \sum_{i=1}^{2^m} w_i r_{i,max}^{1/n}(\lambda), \quad (1)$$

où  $m$  est le nombre de colorants,  $w_i$  et  $r_{i,max}(\lambda)$  sont respectivement le poids et la réflectance spectrale du  $i^{\text{ème}}$  NP et  $n$  un facteur relatif à l'interaction entre la lumière et le papier. Les NPs incluent toutes les combinaisons possibles entre les encres primaires et le papier. Les poids  $w_i$  sont obtenus grâce au modèle statistique de Demichel:

$$w_i = \prod_{j=1}^m \begin{cases} c_j & \text{si le colorant } j \text{ participe au } i^{\text{ème}} \text{ NP} \\ 1 - c_j & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

où  $c_j = 0$  pour 0% d'encre déposé et  $c_j = 1$  pour 100%. Cette valeur  $c_j$  correspond à la valeur effective de couverture du colorant sur le papier qui peut être différente de la valeur théorique envoyée à l'imprimante. Cette différence appelée effet de gain mécanique est propre à chaque imprimante. Par conséquent, il est nécessaire d'établir une relation entre les valeurs théoriques envoyées et les valeurs effectives de couverture pour chacun des colorants disponibles. Une table de correspondance (LUT) est alors déterminée pour chaque colorant [4].

## 2.2 Caractérisation spectrale de la caméra

Selon le modèle linéaire de la caméra [5], la valeur d'un pixel peut être obtenue par:

$$y^k = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} r(\lambda) l(\lambda) s^k(\lambda) d\lambda + \eta^k, \quad (3)$$

où  $y^k$  est la réponse du canal  $k$  du capteur pour un pixel,  $r(\lambda)$  est la réflectance spectrale,  $l(\lambda)$  est la radiance de l'illuminant,  $s^k(\lambda)$  est la sensibilité spectrale du canal  $k$ ,  $\eta^k$  représente le bruit du canal  $k$ . La caractérisation spectrale consiste à déterminer les courbes de sensibilité spectrale du capteur  $s^k(\lambda)$ , où  $k = 1, 2, 3$  pour une caméra

trichromatique. Elles peuvent être mesurées à partir d'une lumière monochromatique ou des filtres à bande étroite [5]. Mais cette méthode nécessite du matériel très coûteux. Par conséquent, de nombreuses méthodes ont été proposées à partir d'un ensemble de patches colorés dont les courbes de réflectance sont connues. En échantillonnant l'intervalle  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$  en  $N$  sous-intervalles centrés par  $\{\lambda_i\}_{i=1..N}$  et avec une mire composée de  $P$  réflectances spectrales connues  $\{r_p\}_{p=1..P}$ , l'équation (3) peut être écrite sous forme vectorielle:

$$Y^k = R^T L S^k, \quad (4)$$

où  $T$  est l'opérateur de transposée.  $Y^k$  est le vecteur de réponses du canal  $k$ ,  $R$  est une matrice dont les colonnes contiennent les courbes de réflectances spectrales,  $L$  est une matrice diagonale représentant la courbe de radiance de l'illuminant et  $S^k$  est la courbe de sensibilité spectrale du canal  $k$ . Le bruit de mesure est ici négligé mais doit être pris en compte dans les expérimentations [5]. Si la courbe de radiance de l'illuminant est connue, la matrice  $R_L = R^T L$  est bien déterminée. Dans ce cas, la méthode directe pour estimer  $S^k$  est d'inverser la matrice  $R_L$  en utilisant la méthode de pseudo-inverse de Moore-Penrose. Plusieurs auteurs [6] ont proposé de calculer la pseudo-inverse de  $R_L$  en utilisant la méthode de décomposition en valeurs singulières (SVD) afin de réduire la sensibilité au bruit (méthode PE). En outre, Sharma et Trussell [7] ont défini des contraintes pour les courbes de sensibilité et ont utilisé la méthode de projection sur des ensembles convexes (POCS) pour résoudre le problème. Certains auteurs ont réécrit les contraintes de Sharma et Trussell pour simplifier son implémentation [8]. Afin de réduire la dimension du problème, la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée [9].

## 3 Méthodes proposées

La méthode d'estimation de réflectance spectrale que nous proposons se base sur une méthode polynomiale[2]. Les courbes de réflectance spectrale sont directement estimées à partir d'une relation linéaire avec les polynômes d'ordre  $p$  des vecteurs de réponses de la caméra:

$$R = M_r C_p, \quad (5)$$

où  $R$  est la matrice dont les colonnes représentent les courbes de réflectance,  $M_r$  est une matrice à déterminer et  $C_p$  est la matrice dont les colonnes représentent les fonctions polynomiales d'ordre  $p$  des réponses de la caméra. Dans notre cas nous avons utilisé le polynôme d'ordre 2 suivant:  $C_2 = [R, G, B, RG, RB, GB, R^2, G^2, B^2, 1]^T$ . La matrice  $M_r$  est déterminée à partir des couleurs de la base d'apprentissage:

$$M_r = R_{app} C_{p(app)}^T \left( C_{p(app)} C_{p(app)}^T \right)^{-1}, \quad (6)$$

où  $R_{app}$  et  $C_{p(app)}$  sont respectivement la matrice des courbes de réflectance et des fonctions polynomiales des réponses issues des données d'apprentissage. Pour une estimation précise, la base d'apprentissage doit être suffisamment représentative des couleurs imprimées. Pour éviter un grand nombre de mesures, nous proposons d'exploiter le modèle spectral de l'imprimante (Eq. (1)) pour simuler une charte de couleurs. Une variante est possible où nous remplaçons la matrice  $R$  par une nouvelle matrice  $W$  dont les colonnes contiennent les poids des NPs correspondant aux courbes de réflectance dans le modèle YNSN:

$$W = M_w C_p, \quad (7)$$

où la matrice  $M_w$  est déterminée de la même façon que la matrice  $M_r$ :

$$M_w = W_{app} C_{p(app)}^T \left( C_{p(app)} C_{p(app)}^T \right)^{-1}, \quad (8)$$

Cette variante permet non seulement de reconstruire les courbes de réflectance, mais aussi de facilement retrouver les valeurs de couverture des encres à travers l'inversion du modèle statistique de Demichelle (Eq. (2)). En cas de dérive couleur, des valeurs de correction sont rapidement déterminées et envoyées à l'imprimante.

Nous utilisons l'équation (4) et les courbes de sensibilité spectrale de la caméra pour estimer les valeurs RGB des couleurs de la charte simulée. Par conséquent, la caméra doit être calibrée avec une grande précision. Sur la base de la méthode PE [6], nous proposons une méthode itérative pour choisir les couleurs importantes qui permettent de minimiser l'erreur entre les réponses mesurées et les réponses estimées (Eq. (4)):

1. la matrice  $R_L$  est inversée par SVD et la courbe  $S^k$  est estimée,
2. des contraintes sont appliquées à  $S^k$ :

*Contrainte de lissage:*

$$|s_{i-1} - 2s_i + s_{i+1}| \leq \mu \quad \forall \quad 1 \leq i \leq N, \quad (9)$$

où  $\mu$  est un réel positif qui fixe le degré de lissage.

*Contrainte de positivité:*

$$s_i \geq 0 \quad \forall \quad 1 \leq i \leq N, \quad (10)$$

*Contrainte d'unimodalité:*

$$\begin{cases} s_{i-1} \leq s_i & \forall \quad i \leq i_{max} \\ s_i \leq s_{i-1} & \forall \quad i > i_{max} \end{cases} \quad (11)$$

où  $i_{max}$  est la position du maximum global de la courbe de sensibilité  $S^k$ .

3. La couleur ayant l'erreur d'estimation maximale est supprimée de la matrice  $R_L$ . En effet, les couleurs dont l'erreur d'estimation est importante sont généralement en dehors du gamut de la caméra et conduisent à des réponses erronées. Le processus est répété tant que l'erreur moyenne d'estimation reste au dessus d'un seuil fixé et si le nombre de couleurs utilisées est raisonnable.

## 4 Expérience et résultats

Le système d'acquisition est composé d'un Appareil Photo Numérique (APN) NIKON D300. Pour sa calibration, nous utilisons la charte de couleurs *GretagMacbeth ColorChecker DC* mesurée par un spectrophotomètre *Photo Research PR-650*. Pour déterminer le modèle de notre imprimante quadrichrome CMJN et tester nos méthodes d'estimation, nous imprimons les chartes de couleurs *i1 Easy CMYK 1.2* (figure 2.a) et *i1 CMYK Target 1.1* (figure 2.b). Nous mesurons les courbes de réflectance des 2 chartes avec le spectrophotomètre *X-Rite i1Pro*. La figure 2.c présente la mesure des NPs de notre imprimante. La charte *i1 Easy CMYK 1.2* est utilisée pour caractériser l'imprimante et la charte *i1 CMYK Target 1.1* pour tester les méthodes d'estimation. Pour la phase d'apprentissage,

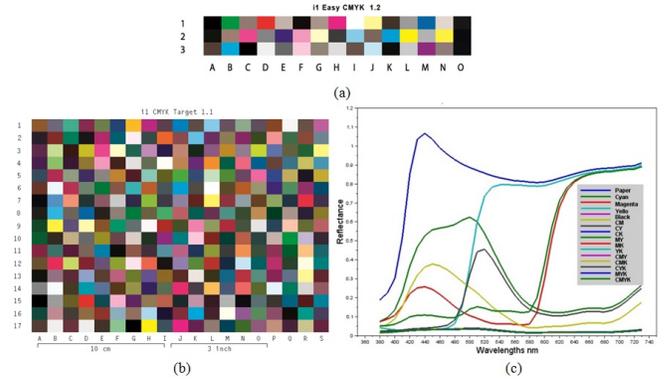


FIG. 2: (a) i1 Easy CMYK 1.2, (b) i1 CMYK Target 1.1 et (c) NPs de l'imprimante CMJN.

nous simulons une charte de couleurs à partir du modèle spectral YNSN de notre imprimante CMJN. Pour cela, nous définissons 10 niveaux de couverture de 0% à 90% avec un pas de 10% pour chaque encres primaire, ce qui correspond à  $10^4$  couleurs. Puis, nous utilisons l'équation 2 pour déterminer les poids des NPs. Enfin, nous simulons les courbes de réflectance à partir de l'équation 1 avec un facteur  $n = 1.1$  déterminé dans la phase de caractérisation de l'imprimante par un algorithme d'optimisation.

Notre méthode itérative est utilisée pour estimer les courbes de sensibilité spectrale du NIKON D300. Pour évaluer la qualité de l'estimation, nous calculons l'erreur entre les réponses fournies par l'APN et les réponses prédites à partir du modèle de la caméra (Eq. 4) en utilisant les courbes de sensibilité estimées. Le tableau 1 montre les erreurs moyennes et maximales obtenues pour la composante verte (G). Les résultats sont similaires pour les autres composantes. La méthode proposée permet d'estimer les courbes de sensibilité spectrale de la caméra avec une grande précision. Elles sont utilisées pour estimer les réponses RGB des couleurs de la charte simulée. Puis, nous utilisons les 2 méthodes polynômiales proposées pour déterminer les courbes de réflectance des couleurs de la

TAB. 1: Erreurs moyennes et maximales entre les réponses mesurées et simulées du canal vert du NIKON D300.

$Nbr_{iter}$	$Nbr_{patchs}$	$Err_{moy}(\%)$	$Err_{max}(\%)$
<b>0</b>	216	1.987	14.862
<b>36</b>	180	1.206	3.215
<b>66</b>	150	<b>0.973</b>	<b>2.255</b>

charte *i1 CMYK Target 1.1*. Afin d'évaluer la précision de cette méthode, nous utilisons une distance colorimétrique  $\Delta E_{00}$  (illuminant D50 et l'observateur CIE 2°) et 2 métriques spectrales (RMS et GFC). Nous comparons nos deux méthodes à la méthode polynomiale classique en utilisant une partie de la charte de couleurs *i1 CMYK Target 1.1* comme données d'apprentissage. Nous testons les différentes méthodes sur la seconde partie de la charte pour ne pas favoriser la méthode classique. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. Ces résultats montrent la pos-

TAB. 2: Valeurs moyennes des métriques d'évaluation obtenues avec la méthode classique à partir de données mesurées pour l'apprentissage ( $PN_{réel}$ ), à partir de données simulées pour l'apprentissage ( $PN_{simR}$ ) et les poids des NPs ( $PN_{simW}$ ).

Méthode (tests sur 123 paths)	$\Delta \bar{E}_{00}$ (D50, 2°)	$R\bar{M}S$	$G\bar{F}C$
$PN_{réel}$	1.4113	<b>0.0120</b>	0.9975
$PN_{simR}$	<b>1.3994</b>	0.0167	<b>0.9983</b>
$PN_{simW}$	1.5171	0.0181	0.9980

sibilité d'utiliser une caméra trichromatique RGB pour estimer les courbes de réflectance spectrale des couleurs imprimées. Notre méthode polynomiale basée sur une charte simulée pour l'apprentissage permet d'obtenir des résultats meilleurs qu'une méthode classique qui utilise 200 patchs mesurés de la charte *i1 CMYK Target 1.1* pour l'apprentissage. Ainsi, l'exploitation du modèle spectrale de l'imprimante permet d'éviter un nombre important de mesures pour construire la base d'apprentissage. Enfin, la méthode d'estimation des poids des NPs n'améliore pas les résultats mais permet de retrouver facilement les valeurs effectives de couverture des encres primaires pour corriger les dérives couleurs de l'imprimante.

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode d'estimation des courbes de réflectance spectrale de couleurs imprimées à partir d'une caméra trichromatique conventionnelle et l'exploitation du modèle spectral de l'imprimante. Nous proposons une méthode itérative pour es-

timer avec précision la sensibilité spectrale de la caméra. Puis, nous utilisons ces courbes pour estimer les valeurs RGB d'une charte de couleurs simulée à partir du modèle spectral de l'imprimante. Cette charte simulée nous a servi de données d'apprentissage pour établir une relation entre les courbes de réflectance des couleurs imprimées et les réponses de la caméra. Les résultats prouvent qu'il est possible d'utiliser une seule caméra trichromatique RGB pour estimer avec une bonne précision la dérive spectrale d'une couleur imprimée.

## Remerciements

Nous tenons à remercier la société CAIRE INDUSTRIE ([www.caire.fr](http://www.caire.fr)) qui finance ces travaux de recherche.

## References

- [1] C Godau, M Klammer, T Eckhard, M Schnitzlein, D Nowack, B Frei, and P Urban, "Evaluation of a multi-spectral camera system for inline color measurement," in *Annual meeting of the German Colour Group*, 2013.
- [2] Raju Shrestha, Jon Yngve Hardeberg, and Alamin Mansouri, "One-shot multispectral color imaging with a stereo camera," in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [3] Timo Eckhard, Eva M Valero, Javier Hernández-Andrés, and Markus Schnitzlein, "Adaptive global training set selection for spectral estimation of printed inks using reflectance modeling," *Applied optics*, vol. 53, no. 4, pp. 709–719, 2014.
- [4] J Gerhardt, *Spectral Color Reproduction: Model based and vector error diffusion approaches*, Ph.D. thesis, Telecom ParisTech, 2007.
- [5] Poorvi L Vora, Joyce E Farrell, Jerome D Tietz, and David H Brainard, *Digital Color Cameras: Spectral Response*, Citeseer, 1997.
- [6] Jon Hardeberg, *Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches*, Universal-Publishers, 2001.
- [7] Gaurav Sharma and H Joel Trussell, "Set theoretic estimation in color scanner characterization," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 5, no. 4, pp. 479–489, 1996.
- [8] Kobus Barnard and Brian Funt, "Camera characterization for color research," *Color Research & Application*, vol. 27, no. 3, pp. 152–163, 2002.
- [9] Jun Jiang, Dengyu Liu, Jinwei Gu, and Sabine Susstrunk, "What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?," in *Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, 2013, pp. 168–179.