

Calibration Radiométrique de Caméra

Jean-Philippe Tarel

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Tarel. Calibration Radiométrique de Caméra. [Rapport de recherche] RR-2509, INRIA. 1995, pp.20. <inria-00074169>

HAL Id: inria-00074169

<https://hal.inria.fr/inria-00074169>

Submitted on 24 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Calibration Radiométrique de Caméra

Jean-Philippe Tarel

N° 2509

Mars 1995

PROGRAMME 4


*Rapport
de recherche*

Calibration Radiométrique de Caméra

Jean-Philippe Tarel *

Programme 4 — Robotique, image et vision
Projet Syntim

Rapport de recherche n° 2509 — Mars 1995 — 20 pages

Résumé : La correction des défauts de la radiométrie de la caméra est importante pour vérifier l'hypothèse de similarité des cellules CCD faite dans de nombreuses méthodes d'analyse d'images comme le shape-from-shading, la reconstruction par corrélation et l'extraction de contours. Nous décrivons la modélisation de ces défauts radiométriques à partir de la physique du senseur. Les paramètres de ce modèle peuvent être estimés par différentes expérimentations que nous avons réalisées sur notre objectif, ce qui a permis de partiellement valider le modèle et d'en proposer un autre simplifié, qui reste valide expérimentalement pour un objectif à focale variable. Enfin, les avantages de la correction radiométrique sont illustrés sur différents processus d'analyse d'image.

Mots-clé : calibration de caméra, radiométrie, bruit, reconstruction par corrélation, shape-from-shading.

(Abstract: pto)

*. E-mail : Jean-Philippe.Tarel@inria.fr

Radiometric Camera Calibration

Abstract: In Computer Vision methods such as shape-from-shading, 3D reconstruction by correlation and edge detection, all the pixels of the CCD matrix are assumed equivalent. A radiometric camera calibration step is necessary to verify this hypothesis, which is the subject of this paper. First, the modeling of the sensor, based on its physical properties, is described. A method to estimate the parameters of this model is given and the results of experimentations are described. These experiments valid the complete model only partially, and simplifications of this model are subsequently proposed which remain experimentally correct with focal length variations. Finally, improvements of the image analysis process after performing radiometric calibration are demonstrated.

Key-words: camera calibration, radiometry, noise, reconstruction by correlation, shape-from-shading.

1 Introduction

Dans un système de vision, il est utile pour faciliter l'analyse des images de connaître la physique du capteur qui les fournit. En particulier, il est important d'avoir les caractéristiques géométriques et radiométriques de la caméra. La modélisation géométrique du capteur et les méthodes d'estimation de ses paramètres ont fait l'objet d'une étude précédemment [TG95, Tar94]. La calibration géométrique de la caméra est un sujet bien exploré [Tsa86, Tos87, Bey92] et l'on dispose de nombreux modèles d'une caméra à focale fixe [Bey92, WCH90]. Par contre, la calibration radiométrique n'a été encore que rarement étudiée en vision par ordinateur [HK94]. Elle permet pourtant de supposer que, après correction, chaque pixel a un comportement identique du point de vue photométrique. Or, de nombreuses méthodes d'analyse des images, comme les détecteurs de contours, les méthodes de reconstruction par corrélation et le shape-from-shading reposent sur l'hypothèse que chaque pixel a la même réponse.

Nous nous intéressons ici uniquement à la partie radiométrique de la calibration. Il y a de nombreuses sources de perturbations radiométriques, comme les divers défauts de construction qui peuvent affecter la matrice CCD. Par exemple, une cellule CCD a une remarquable linéarité mais, suivant le pixel, sa réponse peut avoir une pente différente, d'où des écarts de sensibilité. L'objectif de la caméra perturbe lui aussi la radiométrie à cause du phénomène de "vignettage" en particulier qui produit un assombrissement sur les bords de l'image.

Ces perturbations sont décrites succinctement dans la partie 2. Comme nous avons pu le constater expérimentalement (partie 4), les variations réelles de radiométrie d'un pixel à un autre sont difficiles à modéliser complètement. La correction passe donc par la prise d'images de référence permettant de calibrer indépendamment chacun des pixels (partie 3). Dans la partie 4, nous présentons des résultats sur l'estimation des corrections à apporter sur la caméra à focale variable du laboratoire, et les difficultés pratiques rencontrées au cours de nos expérimentations sont discutées. Enfin dans la dernière partie, l'intérêt de la calibration radiométrique est illustrée sur quelques exemples.

2 Défauts radiométriques

Les pixels sur une image peuvent avoir un comportement radiométrique différent à cause de deux types de défauts : ceux de construction de la matrice CCD [Bui89] et les écarts d'éclairement dus à l'optique de l'objectif [And71]. Il est aussi nécessaire de modéliser le bruit du capteur pour avoir un modèle complet du processus de formation des images [HK94].

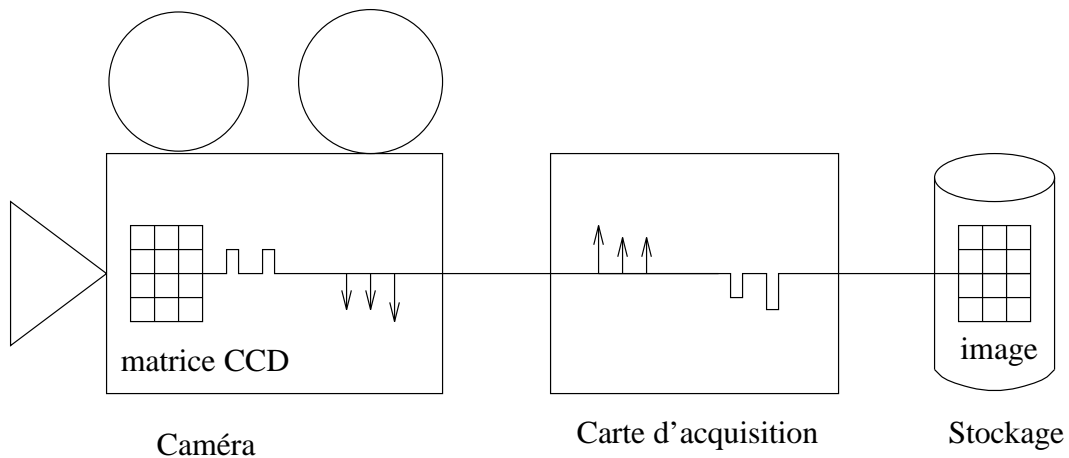


FIG. 1 - *Système d'acquisition d'images.*

2.1 Écarts de sensibilité de la matrice CCD

Une cellule CCD, par effet photo-électrique, produit un nombre d'électrons proportionnel au nombre de photons incidents durant le temps d'intégration. Le rendement quantique est très bon. Comme les défauts de linéarité sont inférieurs à $10^{-3}\%$ sur une large plage de fonctionnement, la réponse d'une cellule CCD est donc proportionnelle à l'éclairement reçu par sa surface. Le gain de la réponse dépend de l'épaisseur de la couche de silicium de la cellule, dont la régularité sur toute la surface de la rétine est difficile à maîtriser parfaitement lors du processus de fabrication. Les variations de sensibilité peuvent facilement atteindre 1% sur

l'ensemble de la rétine car le rendement quantique d'une cellule est très sensible à son épaisseur. De plus, différents défauts, dits cosmétiques, affectent localement la qualité de la surface sensible. Par exemple, il est fréquent de trouver des pixels insensibles dans une matrice CCD.

Les écarts de sensibilité entre pixels, de part la linéarité du capteur, peuvent donc être modélisés par un biais multiplicatif $g_{sensibilité}^i$ propre à chaque pixel i (voir équation 1).

2.2 Courant d'obscurité

Généralement, la matrice CCD fonctionne à température ambiante. En conséquence, un signal thermique s'ajoute à la réponse de chaque élément. C'est le courant d'obscurité. D'un pixel à l'autre, le courant d'obscurité peut varier de 10%. Nous avons observé une valeur de cet ordre avec notre caméra (partie 4.2). Le courant d'obscurité est bien sûr proportionnel au temps d'intégration. Par la même, il reste faible pour des temps d'intégration très courts tels ceux que l'on rencontre habituellement en vidéo. Si un temps d'intégration long est utilisé comme dans les applications astronomiques, il est alors nécessaire de refroidir le capteur pour diminuer le bruit thermique [Bui89]. Ce biais est additif. Il peut donc être modélisé par une variable aléatoire $I_{obscurité}^i$. À ce dernier, s'ajoute le bruit $I_{transmission}^i$ dû à la transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. $I_{transmission}^i$ peut être supposé centré et indépendant d'un pixel à l'autre. Avec notre système, ce bruit est assez important à cause du passage numérique/analogique en sortie de caméra puis analogique/numérique en entrée de la carte d'acquisition des images (figure 1).

2.3 Variations d'éclairement dues à l'objectif

Un objectif ne produit pas un éclairage uniforme de la rétine. En particulier, une simple lentille mince éclaire la rétine avec une décroissance circulaire, fonction de la distance à son centre [Hor86]. Dans ce cas, l'éclairage maximum $I(0)$ s'observe donc au centre et l'assombrissement au bord est donné par :

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \cos^4(\theta)$$

où θ est l'angle selon lequel le pixel voit l'objet réel (figure 2). Cette formule est valide pour un objectif à une seule lentille, mais la décroissance est encore plus forte pour un objectif réel à cause du phénomène dit de "vignettage" des objectifs.

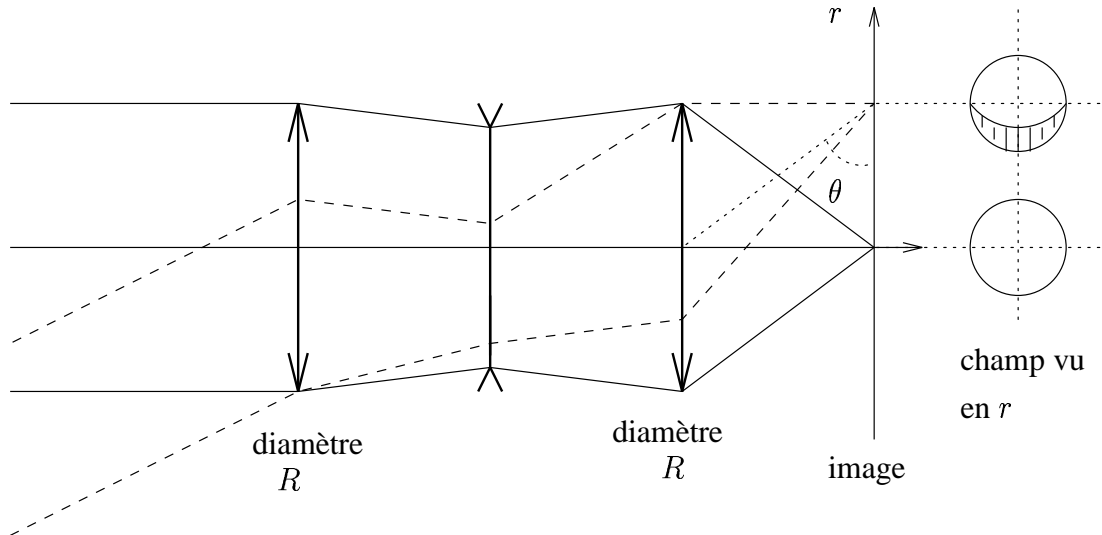


FIG. 2 - *Phénomène de vignettage d'un objectif. Suivant sa position, un point r de l'image ne voit pas la même portion du champ de vue.*

En effet, l'épaisseur de l'objectif constitué d'une série de lentilles ne permet pas à tous les pixels de recevoir le même flux lumineux (figure 2). Le vignettage est d'autant plus important que l'objectif est ouvert [And71]. La non-uniformité d'éclairage peut aisément atteindre 10% entre le centre et le bord du champ. Nous avons observé une variation maximum de 4% avec notre objectif (voir partie 4.4). Comme pour l'écart de sensibilité des cellules CCD, la variation d'éclairement est modélisable par un biais multiplicatif $g_{objectif}^i$.

La modélisation de la variation $g_{objectif}^i$ due au vignettage, en fonction de la position du pixel, est possible si l'optique de l'objectif est connue. Malheureusement, ces informations ne sont que très rarement données par le constructeur. Normalement, de par la conception des objectifs, la variation d'éclairement doit présenter une symétrie circulaire autour du centre de la caméra.

Dans le cas où l'objectif peut être réduit à deux diaphragmes de diamètre R comme dans la figure 2, la fonction d'assombrissement s'obtient par autocorrélation de deux disques [Bru59]:

$$g_{\text{objectif}}(r) = \frac{R^2}{2} \left[\arccos \left(\frac{r}{R} \right) - \frac{r}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2} \right]$$

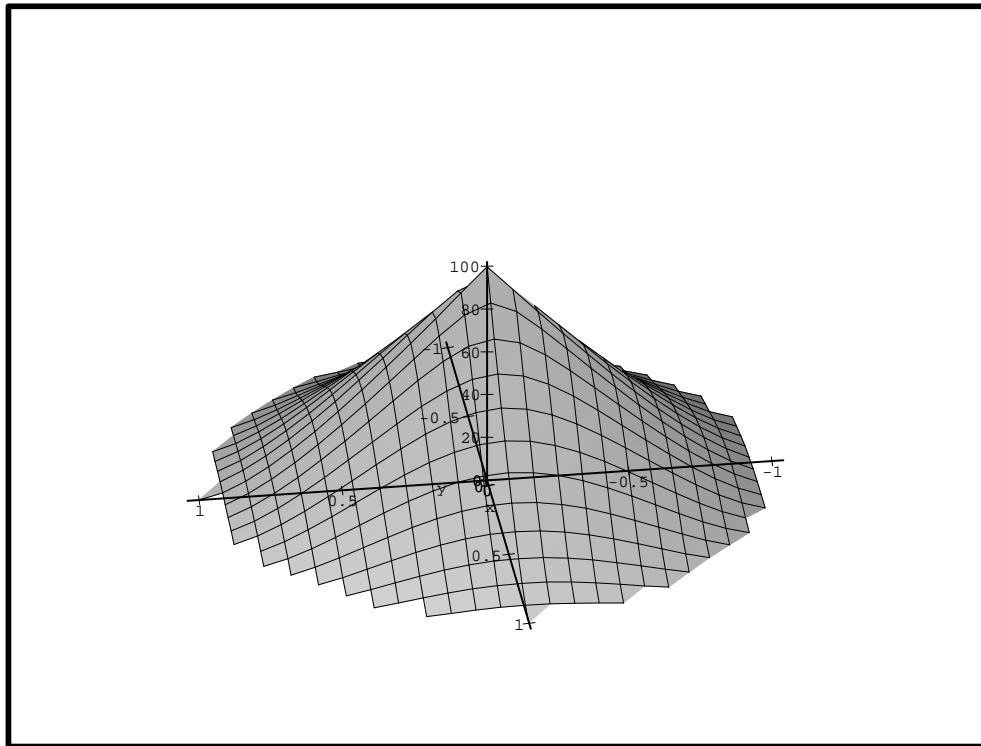


FIG. 3 - *Fonction d'assombrissement en pourcentage sur la rétine dû au vignettage.*

Dans la figure 3, la forme de l'assombrissement $g_{\text{objectif}}(r(x, y))$ qui en résulte est tracée.

3 Correction radiométrique

D'après la description précédente, le modèle radiométrique de la caméra est pour chaque pixel i de position (x, y) :

$$I_{lue}^i = g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i I_{exacte}^i + I_{obscurité}^i + I_{transmission}^i \quad (1)$$

où I_{exacte}^i est l'intensité qui serait lue si la caméra était parfaite. La variation d'illumination de la rétine produite par l'objectif s'avère être le phénomène le plus important avec les écarts de sensibilité. Mais tandis que l'on peut modéliser les variations d'illumination par un polynôme à symétrie circulaire, d'après nos expérimentations effectuées sur la caméra couleur du laboratoire, il se révèle impossible d'avoir le modèle de la répartition des écarts de sensibilité des cellules CCD. Il est donc nécessaire de calibrer radiométriquement sans modèle a priori, pixel par pixel.

Pour chacun des pixels, on cherche à retrouver son intensité exacte I_{exacte}^i à partir de l'intensité observée I_{lue}^i . Il faut donc obtenir le produit $g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$ et $I_{obscurité}^i$ pour chaque pixel. L'image des offsets $I_{obscurité}^i$ est obtenue par la prise d'une image avec l'objectif fermé, à la température de travail. D'autre part, $g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$ s'obtient à un facteur près, en prenant l'image d'une surface de pigment uniforme éclairée uniformément. Cette image se nomme Plage de Lumière Uniforme (PLU) ou "flat-field" en astronomie. La procédure de correction radiométrique est très simple au niveau calcul, puisqu'il suffit de soustraire l'image d'offsets à celle qui doit être calibrée, puis de diviser le résultat par la PLU normalisée. Par contre, l'obtention pratique d'images de référence de bonne qualité est plus difficile.

4 Résultats

Pour obtenir des images d'offsets et PLU de bonne qualité, il est important d'éliminer préalablement le bruit temporel de transmission. Nous avons donc réalisé des expérimentations pour étudier ce bruit avant de nous intéresser à l'estimation du courant d'obscurité et des écarts de sensibilité. Le système d'acquisition utilisé pour ces mesures est constitué d'une caméra CCD Sony couleur XC-007 avec un objectif Canon J15x9.5B 1:1.8 à focale variable et d'une carte d'acquisition S2200 de Datacell.

4.1 Bruit temporel

Le bruit temporel contenu dans les images est produit essentiellement par la transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. Ce bruit est assez important. Il est supposé gaussien centré, comme en témoigne l'histogramme du bruit observé de la figure 4. Celui-ci a été obtenu par différence d'images prises à des instants différents.

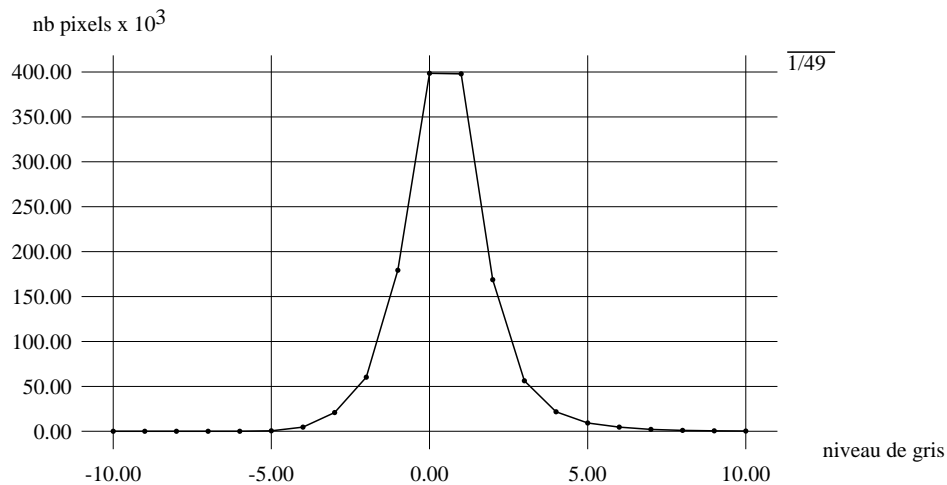


FIG. 4 - *Histogramme du bruit de transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. L'allure est gaussienne avec un écart type de 1.5 niveau de gris.*

Il est assez simple d'éliminer ce bruit temporel par la moyenne d'une série d'images de la même scène prise à des instants t différents. La figure 5 montre la variation de la variance du bruit en fonction du nombre d'images moyennées par rapport à la même image de référence. La décroissance de la courbe est fonction de la racine de l'inverse du nombre d'images. La courbe théorique de la variance v est facile à obtenir à partir de l'équation (1) :

$$\begin{aligned}
v(I_{lue} - I_{lue}^{ref}) &= v(I_{obscurité} - I_{obscurité}^{ref} + \frac{1}{n} \sum_t I_{transmission}^t - \frac{1}{n_{ref}} \sum_t I_{transmission}^{t, ref}) \\
&= \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ref}}\right)v(I_{transmission}) + 2v(I_{obscurité})
\end{aligned}$$

où n est le nombre d'images moyennées et n_{ref} le nombre d'images moyennées dans l'image de référence. $v(I_{transmission})$ est alors la variance du bruit temporel de transmission entre la caméra et la carte, tandis que $v(I_{obscurité})$ est la variance du bruit thermique des pixels de la rétine.

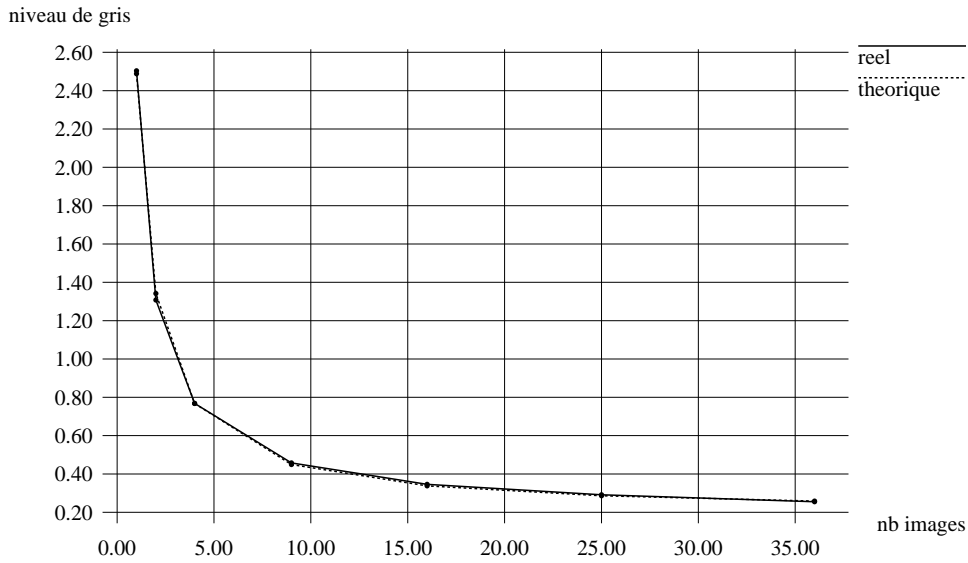


FIG. 5 - Variation théorique et réelle de la variance du bruit en fonction du nombre d'images moyennées.

Par régression linéaire avec la courbe $\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ref}}$, nous avons obtenu 1.515 niveau de gris comme estimation de l'écart type de $I_{transmission}$, et 0.272 niveau de gris

comme estimation de l'écart type de $I_{obscurité}$. Dans la figure 5 sont tracées la courbe, observée et théorique. Elles se superposent très bien, ce qui valide partiellement le modèle radiométrique utilisé.

En conséquence $I_{transmission}$ est, avec notre dispositif, une variable aléatoire gaussienne centrée de variance 1.5 niveau de gris.

4.2 Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité engendre un fond constant sur toute l'image. Nous avons mesuré que ce fond a une valeur $\overline{I_{obscurité}}$ entre 10 et 11 niveaux de gris sur la plage de température ambiante. L'écart type du courant d'obscurité qui a été obtenu dans la partie précédente permet de déduire que d'un pixel à un autre, le courant d'obscurité varie de 3% en moyenne. Néanmoins, la valeur 0.272 de l'écart type du courant d'obscurité est assez faible pour être négligée.

En conséquence, l'image d'offsets $I_{obscurité}$ peut donc être supposée constante sur toute la surface sensible sans trop d'erreurs.

4.3 Écart de sensibilité

En retirant l'objectif et en le remplaçant par un papier diffusant, la surface sensible est alors éclairée uniformément et l'image obtenue donne à un facteur près le $g_{sensibilité}^i$ de chaque pixel. Avec notre caméra, nous avons observé par comparaison des intensités des pixels de ce type d'image, une variance importante de 1.8 à 5.5 niveaux de gris suivant le canal de couleur (figure 6).

Même après soustraction de la variance du bruit de transmission, on obtient des écarts type de $g_{sensibilité}^i$ importants. Les écarts de sensibilité doivent donc être systématiquement corrigés. L'écart de sensibilité, estimé à 4% dans notre cas, peut produire jusqu'à une erreur d'une dizaine de niveaux de gris, à l'intensité maximum.

La figure 7 montre en fausses couleurs l'image obtenue avec l'objectif Canon J15x9.5B, après soustraction de l'offset $\overline{I_{obscurité}}$. D'après cette figure, les écarts de sensibilité présentent donc plutôt une symétrie rectangulaire.

Ainsi, dans la figure 8, coupe de l'image de la figure 7 après lissage, le profil des écarts de sensibilité est en forme de trapèze. Néanmoins, la forme de la répartition sur la matrice CCD de ces écarts reste difficile à modéliser.

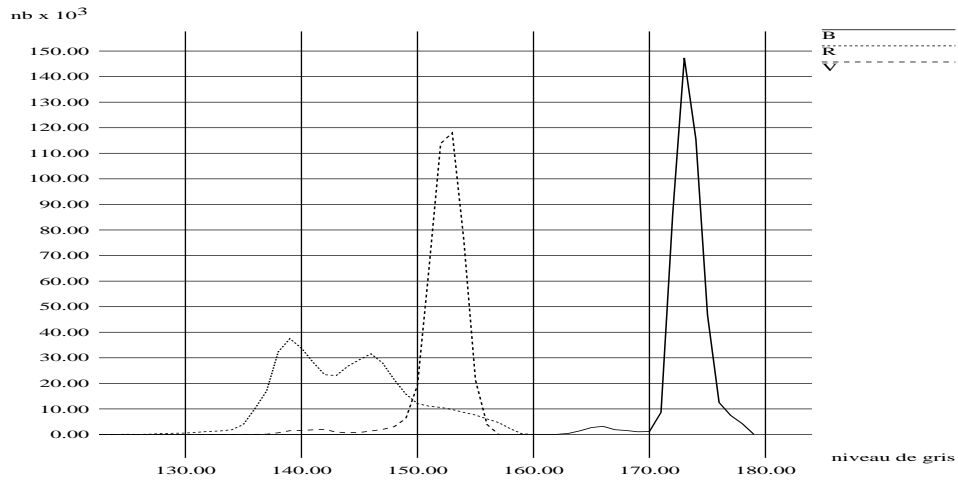


FIG. 6 - Histogramme pour les canaux R,V et B de l'écart de sensibilité de notre caméra CCD.

Les variations des écarts de sensibilité sont très liées à la technique de construction de la matrice CCD. Les résultats précédents ne peuvent donc pas être utilisés pour une autre caméra.

4.4 Variation d'éclairement

Pour obtenir les variations d'éclairement $g_{objectif}^i$, il est nécessaire de photographier une surface radiométriquement constante, sous un éclairage uniforme comme le soleil. La figure 9 montre en fausses couleurs l'image obtenue avec l'objectif Canon, après soustraction de l'offset $\overline{I_{obscurité}}$ et correction des écarts de sensibilité $g_{sensibilité}^i$. Les variations d'éclairement présentent une symétrie circulaire. Cet effet s'explique par la construction à symétrie radiale de l'objectif.

Dans nos tests, les variations maximum de $g_{objectif}^i$ sont de 4%, ce qui correspond à une erreur d'une dizaine de niveaux de gris pour l'intensité maximum enregistrable. L'objectif produit donc un des défauts radiométriques prépondérants du même ordre de grandeur que les écarts de sensibilité $g_{sensibilité}^i$.

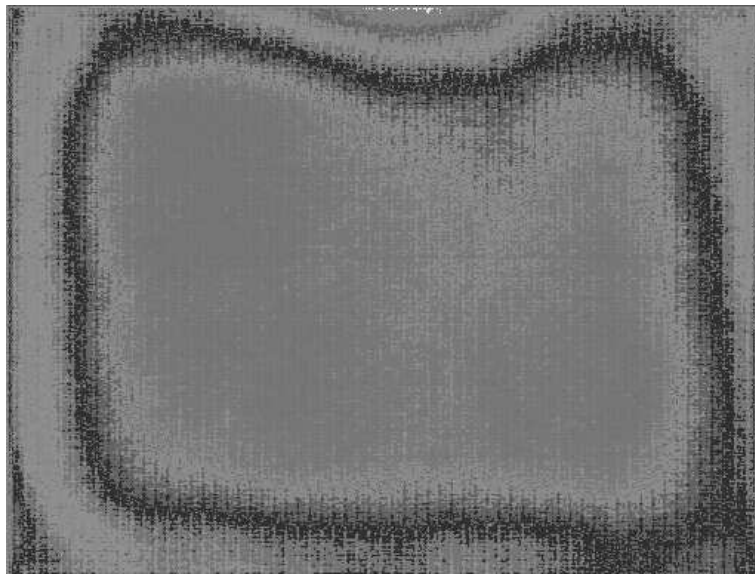


FIG. 7 - *Image en fausse couleur des écarts de sensibilité de la matrice CCD de notre caméra.*

Nous avons réalisé le même type d'expérimentations avec un autre objectif, un 80mm 1:2.8 Tessar de Zeiss-Opton qui nous a fourni des résultats analogues.

4.5 Stabilité de la variation d'éclairement

En outre, nous avons étudié la variation d'éclairement lors de la modification des caractéristiques de l'objectif, du zoom, de la mise au point et du diaphragme. Nous avons constaté avec une certaine surprise que le changement de ces paramètres ne produit qu'une variation relativement faible de l'éclairement (figure 10). Lors de nos expérimentations, nous avons observé un biais moyen de 1.5 niveaux de gris, malgré la présence de poussières sur le parcours lumineux. En effet, celles-ci produisent des variations locales de l'éclairement visibles à courte focale.

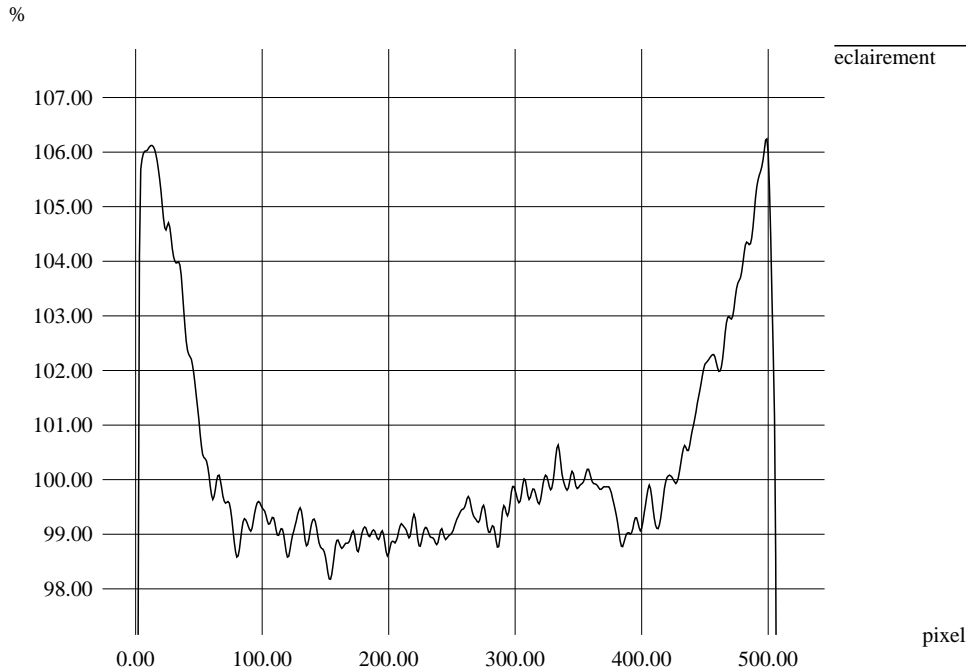


FIG. 8 - Coupe de l'image de la figure 7 après lissage.

Ces expérimentations sont a priori difficiles à réaliser car il faut pouvoir acquérir à différentes focales (de 9.5 mm à 143 mm) l'image d'un fond uniforme. Néanmoins, ces tests s'effectuent aisément par temps de fort brouillard.

En conséquence, nous avons constaté expérimentalement que le profil radiométrique de la caméra ne change approximativement qu'à un facteur d'échelle près avec le zoom, la mise au point et le diaphragme.

4.6 Modèle expérimental simplifié

Suite à nos expérimentations, dans le cadre de notre application, il est possible de poser le modèle radiométrique simplifié suivant :

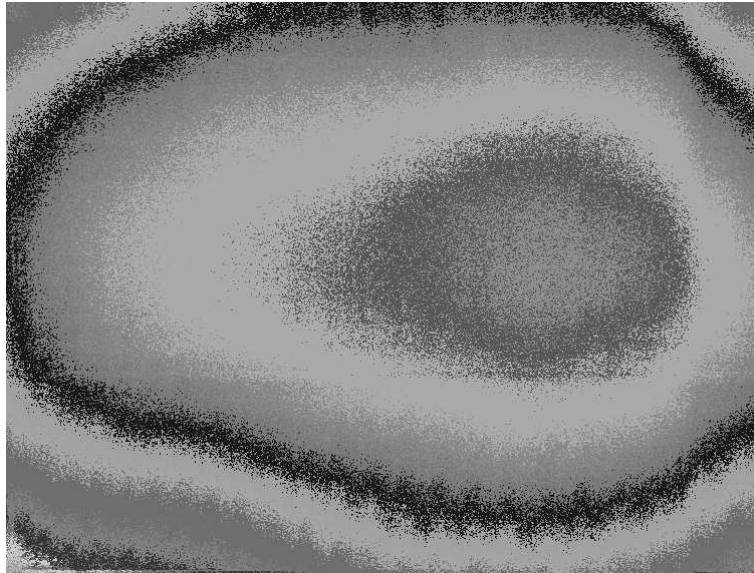


FIG. 9 - *Image en fausse couleur des variations d'éclairement produit par notre objectif.*

$$I_{lue}^i = g^i I_{exacte}^i + \overline{I_{obscurité}^i} + I_{transmission}^i \quad (2)$$

où $g_i = g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$. Ce modèle reste approximativement valide avec une caméra équipée d'un objectif à focale variable.

La méthode de calibration simplifiée consiste donc à soustraire à l'image la valeur $\overline{I_{obscurité}}$ puis à la diviser par l'image PLU de référence g_i .

5 Exemples de corrections radiométrique

Nous avons fait des essais de correction sur des images du ciel qui présentent l'avantage d'avoir un gradient lumineux reconnaissable. Par exemple, sur la figure en fausses couleurs 11, la forme du gradient avant correction (a) paraît torturée. Par contre après correction radiométrique (b), la structure réelle du gradient apparaît. Cette image est prise avec un grand champ dans une direction proche du zénith.

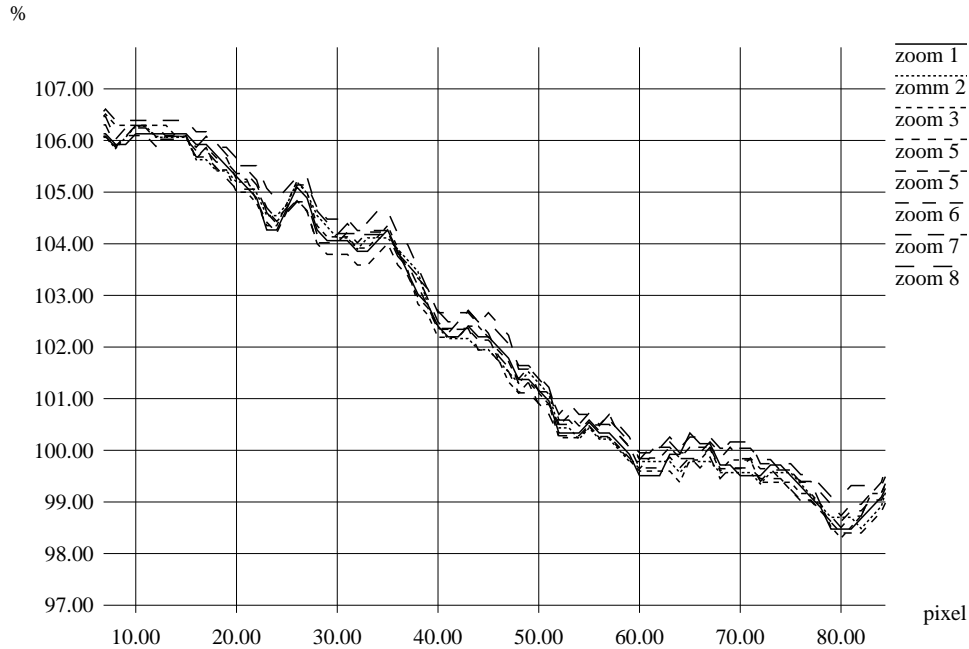


FIG. 10 - *Variation de l'éclairément avec la focale.*

En rétrécissant le champ, le gradient du ciel apparaît comme linéaire avec une bonne approximation. Ainsi, on observe sur les coupes de la figure 12 que la correction radiométrique rétablit la variation linéaire normale de l'intensité du ciel.

En rétablissant les gradients réels, la calibration radiométrique permet d'améliorer la segmentation par région des images. Par exemple, sur un toit de matériau uniforme et lambertien, on retrouve grâce à la calibration radiométrique une distribution constante de l'intensité sur cette région (figure 13).

On peut observer la même amélioration pour la détection des contours. L'image de la figure 13 (a) est traitée avec un algorithme d'extraction des contours [Der87] avant et après correction. Les paramètres du filtre sont identiques. Néanmoins, des contours sur le toit (figure 14 (a)) de l'image avant correction sont absents sur la figure 14 (b) qui est corrigée.

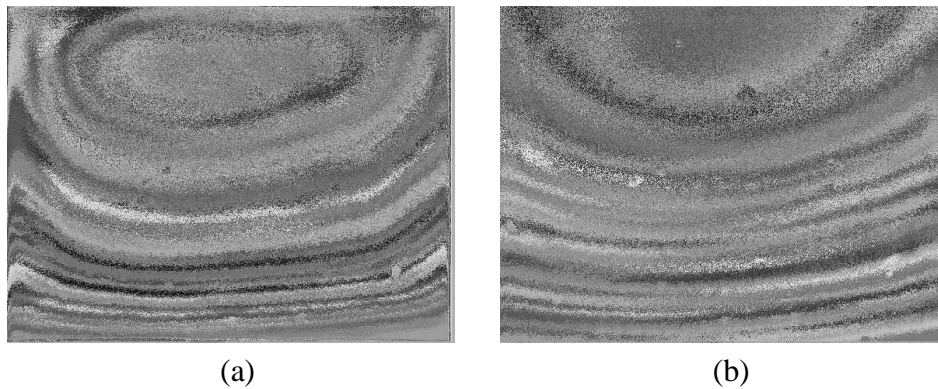


FIG. 11 - Vue avant (a) et après (b) correction radiométrique des gradients présents dans un ciel bleu près du zénith.

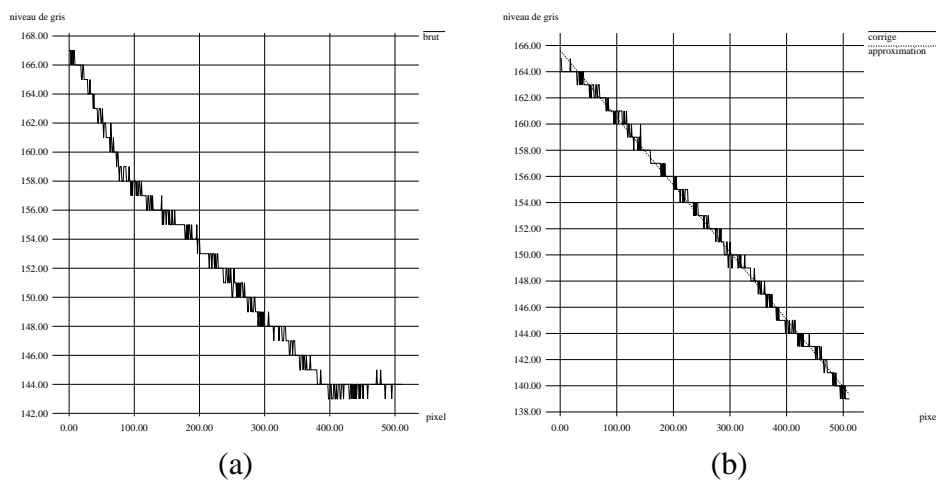


FIG. 12 - Coupe d'une image du ciel avant (a) et après (b) correction radiométrique.

6 Conclusion

Des expérimentations avec un objectif à focale variable Canon J15x9.5B et Tessar 80mm ont permis d'observer que :

- la distribution des écarts de sensibilité radiométrique des cellules de la matrice CCD est difficile à modéliser de par sa forme,

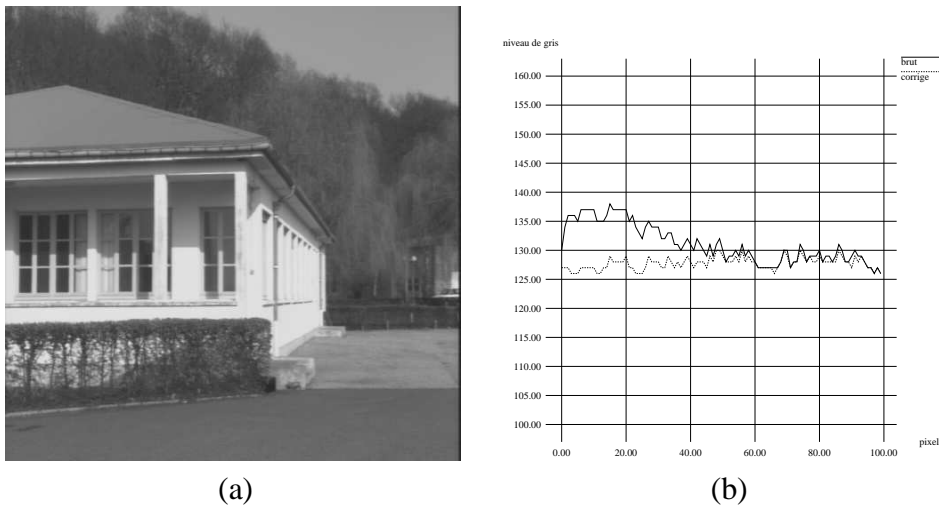


FIG. 13 - Image d'un bâtiment (a) et coupe du toit de ce bâtiment avant et après correction radiométrique (b).

- un changement de zoom, de mise au point et de diaphragme produit des variations faibles de la forme de la répartition de l'affaiblissement d'illumination sur la rétine.

Ces expériences témoignent de la difficulté d'une modélisation théorique des corrections à apporter pour avoir une image bien calibrée photométriquement. Il est donc nécessaire de réaliser une calibration radiométrique à partir d'au moins une image de référence. Nous estimons que cette méthode permet de réduire l'écart de radiométrie entre les pixels de la rétine de 10% à environ 2% d'erreur. Les pixels les plus erronés dans l'image se trouvent sur le bord, dans une bande de 70 pixels pour le format vidéo 768x576.

Suite à nos expérimentations, dans le cadre de notre application, il est possible de poser le modèle radiométrique de la caméra simplifié donné par l'équation 2. Ce modèle reste approximativement valide lors d'une variation de la focale.

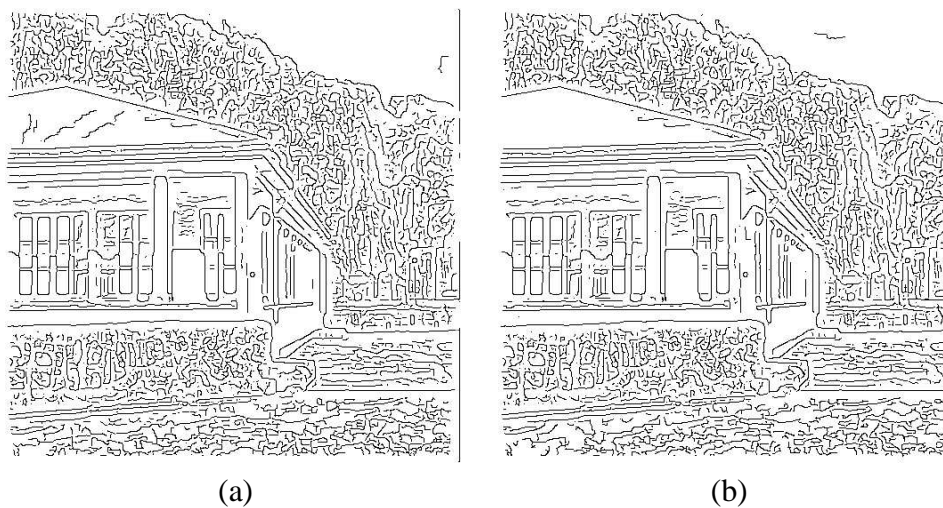


FIG. 14 - *Image des contours avant (a) et après correction radiométrique (b).*

Références

- [And71] R. Andréani. *L'objectif photographique*. Photo-Revue, 1971.
- [Bey92] H.A. Beyer. Accurate calibration of ccd-cameras. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 96–101, Champaign, June 1992.
- [Bru59] G. Bruhat. *Optique*. Masson 5ème édition, 1959.
- [Bui89] C. Buil. *Construction et utilisation des caméras CCD en astronomie amateur*. Société d'Astronomie Populaire, 1989.
- [Der87] R. Deriche. Using canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented. *International Journal of Computer Vision*, 1(2), 1987.
- [HK94] G. Healey and R. Kondepudy. Radiometric ccd camera calibration and noise estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(3):267–276, 1994.
- [Hor86] B.K.P. Horn. *Robot Vision*. The MIT Press. Mc GRAW-HILL BOOK COMPANY, 1986.

- [Tar94] J.P. Tarel. Calibration de caméra fondée sur les ellipses. Rapport de recherche 2200, INRIA, 1994.
- [TG95] J.P. Tarel and A. Gagalowicz. Calibration de caméra à base d'ellipses. *Traitement du Signal*, 12(2), 1995.
- [Tos87] G. Toscani. *Systèmes de calibration et perception du mouvement en Vision Artificielle*. PhD thesis, Université Paris-Sud, 1987.
- [Tsa86] R.Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 364–374, Miami Beach, USA, June 1986.
- [WCH90] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou. Calibration of stereo cameras using a non linear distortion model. In *Proceedings, Tenth International Conference on Pattern Recognition*, pages 246–253, Atlantic City, USA, June 1990.



Unité de recherche INRIA Lorraine, Technopôle de Nancy-Brabois, Campus scientifique,
615 rue du Jardin Botanique, BP 101, 54600 VILLERS LÈS NANCY
Unité de recherche INRIA Rennes, Irisa, Campus universitaire de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex
Unité de recherche INRIA Rhône-Alpes, 46 avenue Félix Viallet, 38031 GRENOBLE Cedex 1
Unité de recherche INRIA Rocquencourt, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex
Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, 2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex

Éditeur

INRIA, Domaine de Voluceau, Rocquencourt, BP 105, 78153 LE CHESNAY Cedex (France)

ISSN 0249-6399