

Chapitre 6

Calibrage photométrique

Nous avons présenté dans les chapitres précédents deux nouvelles méthodes qui permettent, à partir de données simples, de ré-éclairer et de remodeliser *interactivement* des scènes réelles. Les données utilisées par ces systèmes sont des photographies numériques d'environnements intérieurs. Ces photographies sont utilisées pour retrouver un modèle géométrique de la scène réelle, ainsi que les propriétés radiométriques décrivant l'éclairage réel (perceptible sur ces photographies). Malgré la simplicité des données, les méthodes de ré-éclairage produisent des résultats réalistes et convaincants. La précision de l'estimation est suffisante pour que les résultats soient convaincants, dans le cadre d'une visualisation d'effets d'éclairages (sans mesures précises). La qualité des résultats peut cependant être améliorée avec un meilleur calibrage des données. Les valeurs de réflectance obtenues dans les deux chapitres précédents ne sont pas comparables directement avec des valeurs mesurées dans la réalité. Dans certains cas cependant, une meilleure estimation de la réflectance pourraient améliorer la qualité des résultats comme par exemple pour éviter des discontinuités lors de l'enlèvement d'un objet (voir l'exemple de l'enlèvement de la porte sur la figure 5.24(d)).

Dans ce chapitre, nous allons présenter plusieurs améliorations sur la qualité des données fournies par les appareils photographiques. L'application de ces nouvelles données à nos méthodes de ré-éclairage permet d'obtenir des résultats de meilleure qualité.

Nous proposons une nouvelle méthode de création des images de luminance à partir de photographies prises avec notre appareil semi-automatique (Kodak DC260). Cet appareil ne permet pas un contrôle manuel du temps d'exposition. Les images de luminance ainsi obtenues sont fiables à un facteur près. Pour corriger les valeurs de luminance, nous avons développé un algorithme de recalage des images, en nous basant sur les équations de la radiativité.

Nous utilisons ces images de luminance dans les méthodes de ré-éclairage présentées précédemment, ce qui nous permet d'obtenir des résultats de meilleure qualité car le contrôle de la couleur des pixels est plus fin.

Nous mesurons également les propriétés de la lampe utilisée pour la méthode présentée dans le chapitre 5. Ceci nous permet en particulier une meilleure estimation de la réflectance.

Grâce aux données calibrées, nous avons amélioré le processus d'estimation de la réflectance dans la méthode du chapitre 5 en utilisant un algorithme basé sur une mise à jour

itérative de l'éclairage indirect et des valeurs de réflectance. À la fin du processus, la réflectance diffuse obtenue est plus homogène et plus fiable.

6.1 Calibrage photométrique

La réalité contient des effets très complexes, et très différents les uns des autres. Lorsqu'on essaie de la capturer en la photographiant, on ne peut restituer tous les effets existants. Cette limitation est accentuée par le matériel utilisé. Les appareils photographiques transforment énormément les données qu'ils captent. Ceci provient d'une part de leur mécanisme, et d'autre part des fonctions qui y sont intégrées. Nous décrivons dans les sections suivantes les différentes propriétés observées pour l'appareil semi-automatique que nous avons choisi pour nos recherches.

6.1.1 Propriétés contrôlables et non contrôlables de notre appareil photographique

L'appareil photographique Kodak DC260 permet un contrôle limité de la capture. En particulier, nous ne pouvons pas contrôler le temps d'exposition, en dessous d'une demie seconde. En utilisant des scripts (voir Annexe B), nous pouvons contrôler un paramètre *EV*, prenant neuf valeurs possibles, entre -2 et 2. La valeur $EV = 0$ correspond aux paramètres choisis *automatiquement* par l'appareil, dont le temps d'exposition.

6.1.2 Glaire et vignettage

La réflexion de la lumière sur les lentilles ne suit pas forcément un chemin direct jusqu'au capteur. Un effet visuel facilement identifiable est l'effet de glaire, comme lorsqu'un rayon de soleil frappe une caméra et s'effiloche en gouttes de lumière. Un autre effet est ce qu'on appelle le vignettage. Les bords de la photographie sont plus sombres que le centre. Le phénomène est le plus visible lorsque l'ouverture du diaphragme est grande. Pour éviter ce phénomène, nous choisissons de travailler avec une ouverture de diaphragme petite.

6.2 Méthode pour créer des images de luminance à partir de photographies

Lors de la capture, nous nous sommes aperçus que les photographies numériques ne répondaient pas toujours à nos attentes. Le premier problème est la limitation de la gamme des couleurs, de valeurs de 0 à 255 pour chacune des composantes rouge, verte et bleue. Un deuxième problème bien plus gênant est la saturation des couleurs. Les zones sombres ou trop claires de l'image ne comportent pas des valeurs fiables pour les exploiter dans nos systèmes de ré-éclairage. Toutes les valeurs au-dessus de 255 sont fixées arbitrairement à 255, et au-dessous de 0.5 à 0.

Pour éviter la saturation des couleurs, il faut prendre des photographies à des temps d'exposition plus longs pour les régions sombres, et plus courts pour les régions claires. Une méthode [DM97], décrite ci-dessous, existe pour combiner plusieurs images d'un même

point de vue, prises à des temps d'exposition différents. La combinaison produit une image codée par des flottants variant de 0 à la valeur maximale des flottants. L'étendue est donc bien supérieure à l'intervalle utilisé pour les images RGB. Les couleurs sont bien représentées qu'elles soient sombres ou claires. Cependant, la mise en oeuvre de cette méthode exige l'utilisation d'un appareil « haut de gamme » avec des temps d'exposition contrôlables.

6.2.1 Méthodes existantes

Debevec et Malik [DM97] ont développé un algorithme pour convertir des données photographiques en *images de luminance*. Ces images sont codées en flottants. Plusieurs photographies sont prises depuis un même point de vue, mais à des temps d'exposition différents. La capture est réalisée par un appareil complètement manuel, qui permet de contrôler et de connaître l'ouverture du diaphragme et le temps d'exposition. Les images sont combinées en fonction du temps d'exposition qui leur est associé. L'image ainsi créée est appelée une *image de luminance*. Lors du traitement, l'algorithme déduit aussi la fonction de transformation de la caméra qui avait été appliquée sur ces images. En effet, pour obtenir une meilleure présentation visuelle des couleurs, la caméra transforme les couleurs qu'elle reçoit sur ces capteurs. Cette fonction est fixe pour une distance focale donnée. Les couleurs obtenues après l'application de la fonction inverse de la caméra, correspondent à l'éclairage réel. C'est pourquoi, en utilisant cette méthode, les valeurs des pixels sont assimilées à des luminances.

L'algorithme de Debevec et Malik [DM97] est basé sur le concept photographique de la réciprocité : l'exposition X est définie par le produit de l'irradiance E par le temps d'exposition Δt^* . Pour l'image numérisée, les couleurs obtenues ont été transformées par la fonction de la caméra, et représentées par des pixels. Pour une couleur Z d'un pixel, variant de Z_{min} à Z_{max} , l'exposition X est égale à $f^{-1}(Z)$. En combinant ces deux équations, pour un index i dans l'image et un temps d'exposition indexé en j , on obtient :

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j. \quad (6.1)$$

En appliquant une transformation logarithmique, on obtient :

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j, \text{ avec } g = \ln f^{-1}. \quad (6.2)$$

Les deux inconnues de cette équation sont g et E_i , si le temps d'exposition Δt_j est donné lors de la capture. La couleur Z_{ij} est récupérable directement sur les images numérisées. Pour déterminer ces deux inconnues, les auteurs utilisent une résolution aux moindres carrés. En particulier, le système d'équations linéaires est résolu avec une décomposition en valeurs singulières. Cette méthode de résolution est robuste, mais coûteuse en temps de calcul. Par conséquent, la résolution n'est faite que sur quelques pixels choisis par l'utilisateur. Les pixels choisis sont bien répartis dans l'image, et représentatifs d'une grande variété des couleurs. Pour obtenir la résolution du système, il faut choisir N pixels, tels que

*Nous conservons dans cette section les nomenclatures utilisées dans l'article de Debevec et Malik [DM97]

$N(P - 1) > (Z_{max} - Z_{min})$, où P est le nombre de photographies. Par exemple, si $Z_{max} = 255$, $Z_{min} = 0$, $P = 11$, N doit être supérieur à 25.

Les solutions obtenues pour g et E sont à un facteur d'échelle près. Pour simplifier la résolution et fixer le facteur, une contrainte est ajoutée au système, telle que $g(Z_{mid}) = 0$, où Z_{mid} est la valeur au milieu de l'intervalle $[Z_{min}, Z_{max}]$. De plus, on considère que les valeurs proches des bornes ne seront pas très fiables pour évaluer la fonction g . Une fonction de pondération w est donc introduite dans le système :

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{pour } z \leq \frac{1}{2}Z_{min} + Z_{max} \\ Z_{max} - z & \text{pour } z > \frac{1}{2}Z_{min} + Z_{max} \end{cases} \quad (6.3)$$

L'équation résolue aux moindres carrés par décomposition en valeurs singulières est :

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P (w(Z_{ij}) [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j])^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z)g''(z)]^2 \quad (6.4)$$

où λ est un terme permettant de contrôler le lissage de la fonction g .

Une fois que la fonction g est retrouvée, on applique pour chacun des pixels i , l'équation suivante :

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (6.5)$$

pour retrouver l'irradiance E_i en chaque pixel.

Les valeurs de g et E ainsi déterminées peuvent servir de base pour recalculer une nouvelle solution. Le logarithme de la fonction inverse d'une caméra utilisée par les auteurs de l'article original, est montrée pour chacune des composantes rouge, verte et bleue dans la figure 6.1.

6.2.2 Adaptation de la méthode précédente au cas d'un appareil photographique semi-automatique

Nous voulons utiliser les images de luminance ainsi construites pour remplacer les images RGB que nous utilisons dans les deux méthodes présentées aux chapitres 4 et 5. Cependant, avec les propriétés de notre appareil photographique (Kodak DC260), nous ne pouvons pas utiliser cet algorithme tel quel car nous ne pouvons pas contrôler directement le temps d'exposition.

Nous avons résolu le problème en utilisant la fonction EV de notre appareil. Nous avons déduit un temps d'exposition relatif à un temps donné t pour $EV = 0$. Ces temps d'exposition sont pour chaque valeur de EV :

EV	-2	-1.5	-1	-0.5	0	+0.5	+1	+1.5	+2
Δt	$t/4$	$t/2\sqrt{2}$	$t/2$	$t/\sqrt{2}$	t	$\sqrt{2}t$	$2t$	$2\sqrt{2}t$	$4t$

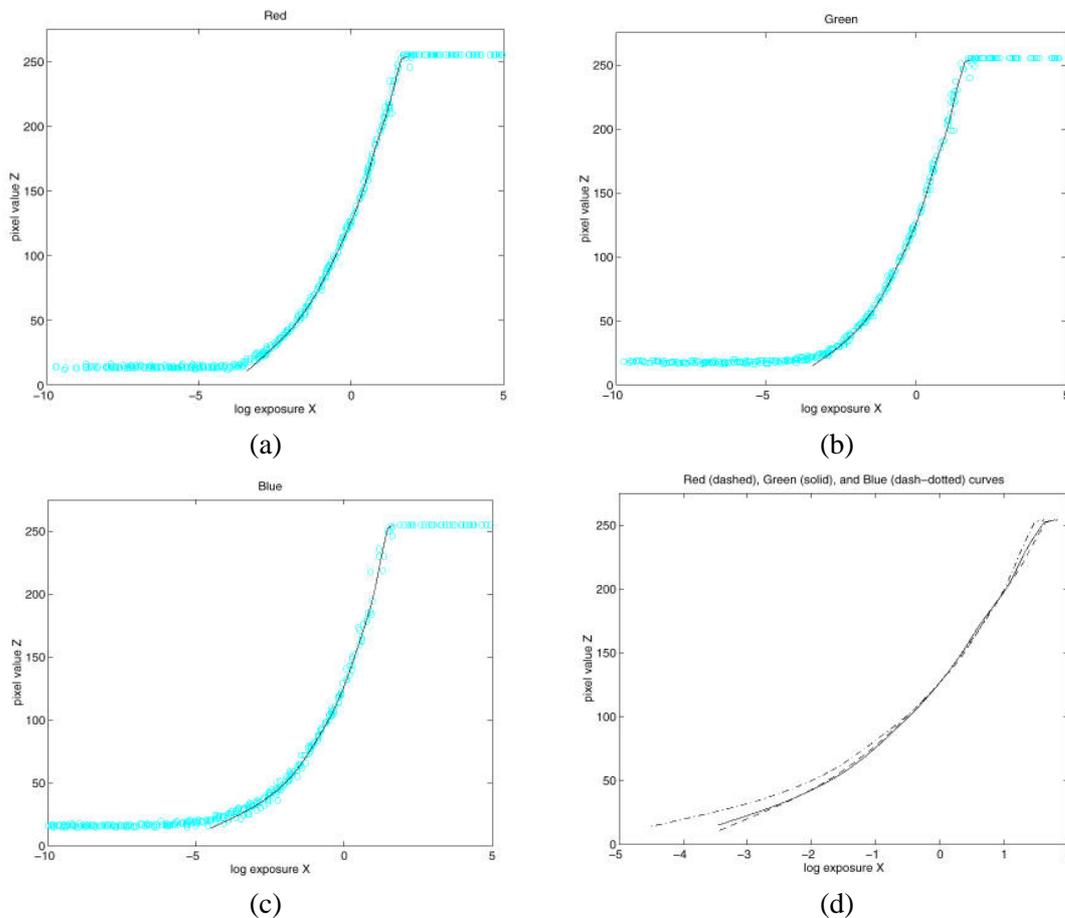


FIG. 6.1: Fonction retrouvée de la caméra de Debevec et Malik [DM97]. Le logarithme de la fonction inverse de la caméra est donné en abscisse et les couleurs des pixels (de 0 à 255) en ordonnée. (a), (b), (c) Fonctions de caméra pour chacune des couleurs rouge, verte et bleue. (d) Superposition des trois courbes.

Pour obtenir ces temps relatifs, nous nous sommes basés sur les principes photographiques en utilisant un facteur 2^{EV} , entre chaque pas de temps d'exposition.

Pour obtenir les images pour chacune des expositions EV , nous avons écrit un script pour l'appareil donné en annexe B. Grâce à ce script, les photographies sont prises automatiquement. L'approche est la suivante. L'appareil est posé sur un trépied pour éviter tout mouvement entre chaque photographie. Nous fixons le zoom en angle maximal, et nous choisissons une ouverture de diaphragme. Le flash et l'équilibrage des couleurs sont désactivés. Ensuite, l'appareil prend automatiquement une photographie, en EV par défaut à zéro. Nous récupérons la valeur de la distance focale utilisée, et nous la fixons pour que l'appareil n'utilise pas une distance focale différente pour la série de photographies. Chacune des neuf photographies est prise avec un EV différent. L'appareil peut cependant par le mouvement des lentilles produire des images qui sont un peu décalées les unes des autres

(pas plus d'un pixel en général). Nous les alignons par une translation manuelle simple des pixels en prenant une photographie comme référence.

En utilisant les données adaptées comme nous les avons décrites ci-dessus, nous avons implanté la méthode de Debevec et Malik [DM97]. Les temps donnés en entrée du programme sont définis relativement à cette table de conversion où t prend une valeur arbitraire. Nous avons typiquement utilisé $t = 10$. Pour calculer une fonction de la caméra, et tester notre algorithme, nous avons utilisé une série de photographies contenant beaucoup de contraste d'éclairage, présentée sur la figure 6.2.

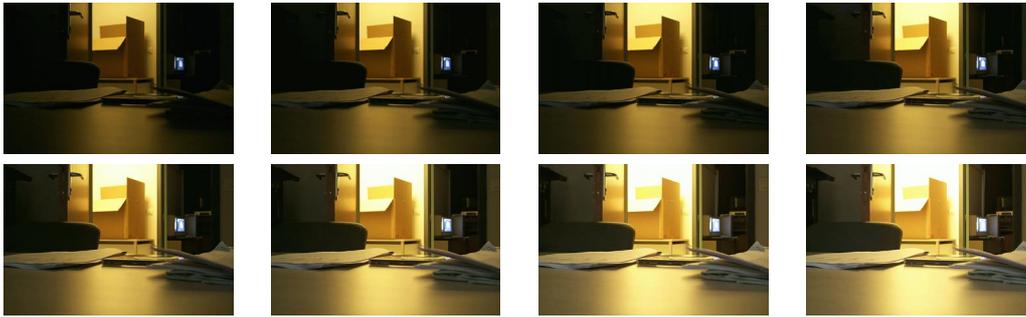


FIG. 6.2: Photographies qui nous ont servi à calculer la fonction de la caméra. Chacune correspond à un EV différent, de -2 à 1.5. Nous avons choisi ces photographies car elles contiennent beaucoup de contraste de lumière.

La fonction retrouvée de la caméra est pour chaque composante rouge, verte et bleue, comme nous le montrons sur la figure 6.3.

Cette adaptation souffre cependant de quelques limitations. La première provient du manque de contrôle. Nous n'avons pas la garantie que la plage de capture soit suffisamment étendue pour éviter les saturations, bien qu'elle soit meilleure que pour une seule image prise en $EV = 0$ (par défaut).

Une deuxième limitation est que les valeurs d'irradiance E ne sont pas cohérentes d'une image à une autre, lorsque les conditions d'éclairage changent. En effet, l'appareil photographique choisit le temps d'exposition en $EV = 0$ pour chaque nouvelle photographie. Comme nous l'expliquons dans la section 6.3.2, nous avons développé une méthode pour recaler les images entre elles. Cette amélioration est nécessaire pour la méthode de ré-éclairage présentée dans le chapitre 5, où les conditions d'éclairage changent. Nous avons ainsi adapté l'algorithme de création d'images de luminance à notre appareil photographique numérique, dont le contrôle est restreint. Les résultats obtenus sont suffisamment bons pour être utilisables dans nos systèmes. L'utilisation ainsi que l'adaptation adéquate pour chacune des méthodes de ré-éclairage sont présentées dans les sections suivantes.

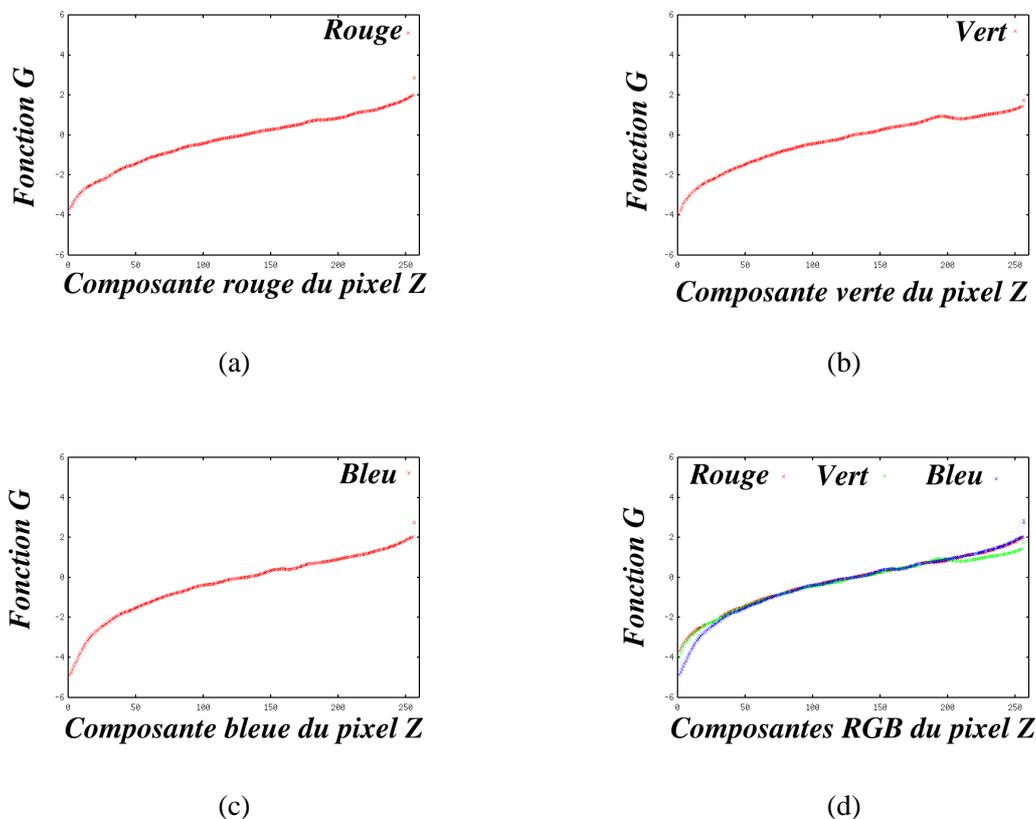


FIG. 6.3: Fonction de la caméra que nous avons retrouvée. Les couleurs des pixels sont données en abscisse, le logarithme de la fonction inverse de la caméra est en ordonnée. (a), (b), (c) Courbes de la fonction de la caméra respectivement pour les couleurs rouge, verte et bleue. (d) Superposition des trois courbes.

6.3 Utilisation d'images de luminance pour les méthodes de ré-éclairage développées

Nous avons utilisé les images de luminance dans les méthodes de ré-éclairage que nous avons présentées précédemment. Pour les deux méthodes, l'utilisation de ces images ont impliqué certaines modifications que nous expliquons dans la suite. Nous comparons ensuite les nouveaux résultats obtenus avec ces images de luminance, à ceux obtenus avec les images RGB.

6.3.1 Application à la méthode basée sur la connaissance d'un seul éclairage

Nous avons utilisé des images de luminance pour la première méthode présentée (voir le chapitre 4). Notons que dans ce cas, nous n'avons pas besoin de recalage des images

car les conditions d'éclairage ne changent pas. Dans la méthode initiale, nous utilisons un modèle texturé de la scène réelle, dont les textures sont extraites d'une photographie RGB. Ensuite, en utilisant les équations de radiosité, nous transformons les textures pour qu'elles représentent un éclairage calculé sans occlusion.

Dans l'approche modifi e, nous avons utilisé une image de luminance plutôt qu'une image RGB pour extraire les textures. Pour cela, nous avons modifié l'implantation de l'outil de reconstruction géométrique à base d'images *Rekon* (voir la section 3.2.2). Les textures extraites sont elles aussi des images de luminance.

Comme précedemment, le système est initialisé en utilisant la couleur contenue dans les textures. Les textures sont repr sent es par des flottants. Nous transformons ces textures pour qu'elles ne tiennent plus compte des occlusions (voir la section 4.3). Les textures modifi es sont montr es sur la figure 6.4 (b). En (a), ce sont les textures RGB modifi es. L'amélioration est globalement légère. Cependant, en regardant sur des endroits plus précis (en (c) et (d)), il y a beaucoup moins d'artefacts sur les textures de luminance modifi es que sur les RGB.

Nous avons comparé les résultats de ré-éclairage et de remodelisation. Nous avons appliqué un gamma correctif sur les résultats obtenus par les images RGB et par les images de luminance. Ils sont montrés sur la figure 6.5. Sur la colonne de gauche, ce sont les photographies originales. Sur la colonne de droite, ce sont les résultats obtenus avec les images RGB. Sur la colonne du droite, ce sont les résultats obtenus avec les images de luminance.

Pour montrer les différences entre les images simul es avec des textures RGB et celles simul es avec des textures de luminance, nous avons fait un zoom sur des images pr sent es sur la figure 6.5. Les images (a) et (b) de la figure 6.6 correspondent à un éclairage simulé avec une seule lampe allum e à droite. Les images (c) et (d) correspondent à un éclairage simulé avec une seule lampe allum e à gauche. Comme le montrent ces images, le ré-éclairage est de bonne qualité pour les deux utilisations de textures. Les ombres dues aux lampes réelles sur la photographie originale ont disparu. Cependant, le ré-éclairage simulé avec des textures de luminance contient un peu moins d'artefacts.

6.3.2 Application à la méthode basée sur la connaissance de plusieurs éclairages

Nous avons également amélioré la méthode de ré-éclairage bas e sur plusieurs éclairages connus, pr sent e au chapitre 5. Cette méthode utilise en entrée une série d'images qui sont des photographies prises depuis le même point de vue, mais sous des éclairages différents. Nous avons réalisé plusieurs modifications lors de l'adaptation de cette méthode aux images de luminance.

Nous avons d'abord mesuré l'intensité de la lampe utilis e grâce aux images de luminance. Cette intensité est donn e en entrée au système lors du calcul de la réflectance. Ensuite, nous avons pris de nouvelles photographies pour obtenir une série d'images de luminance qui servent de nouvelles données au système. Comme noté précedemment, les images peuvent être incohérentes entre elles, car l'appareil s'adapte automatiquement à chaque nouvel éclairage. Nous avons développé une nouvelle méthode pour recalibrer les images entre elles. Enfin, nous améliorons les valeurs de réflectance en itérant sur l'estimation de la réflectance, en utilisant un éclairage indirect calculé à partir d'une solution

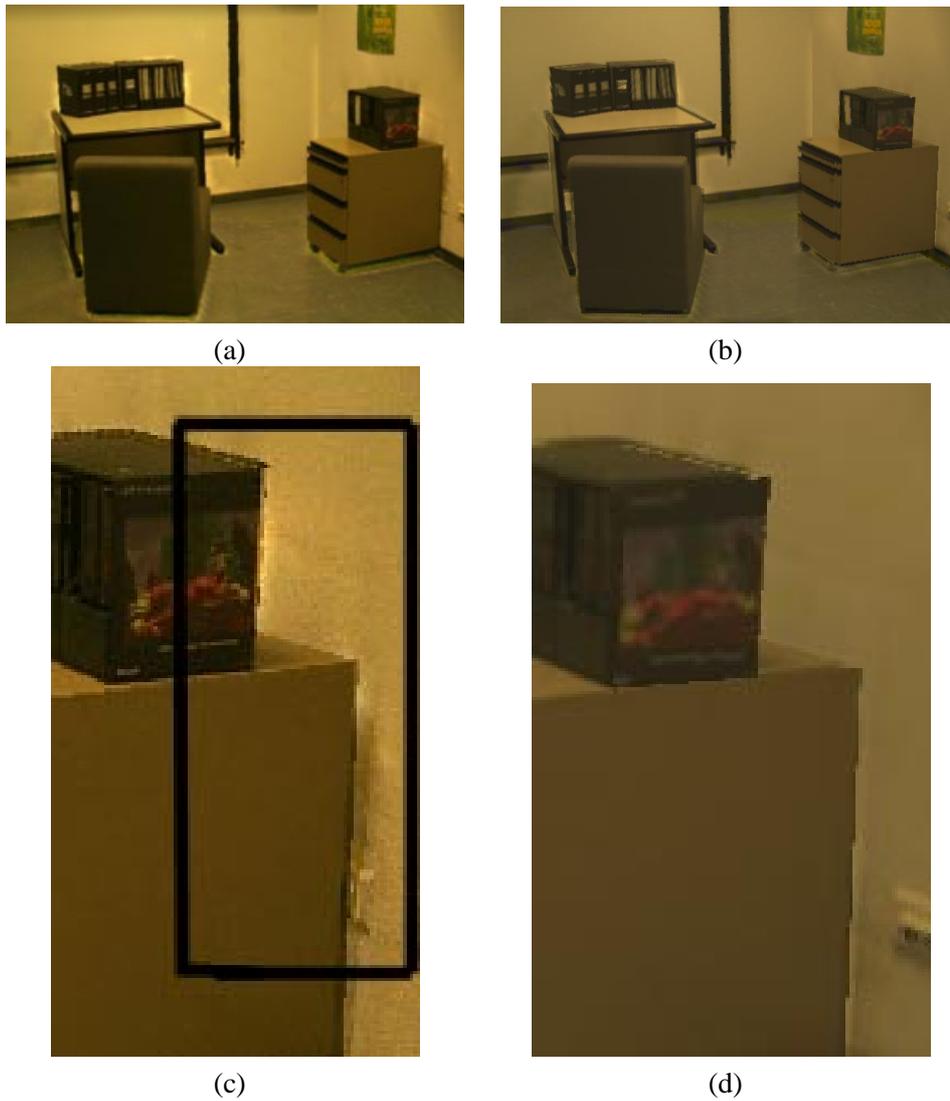


FIG. 6.4: Nouvelles textures corrigées à partir d'images de luminance. (a) Texture RGB corrigée représentant un éclairage sans occlusion. (b) Texture de luminance représentant un éclairage sans occlusion. (c) et (d) Zoom sur les images (a) et (b). La correction sur l'image de luminance en (d) contient moins d'artefacts qu'en (c).



FIG. 6.5: Résultats de ré-éclairage en utilisant des images de luminance. Dans la première colonne à gauche, ce sont les photographies de la scène réelle. Dans la colonne du milieu, ce sont les résultats de modifications d'éclairage simulées à partir de textures RGB. Dans la colonne de droite, ce sont les résultats de modifications d'éclairage simulées à partir de textures de luminance.

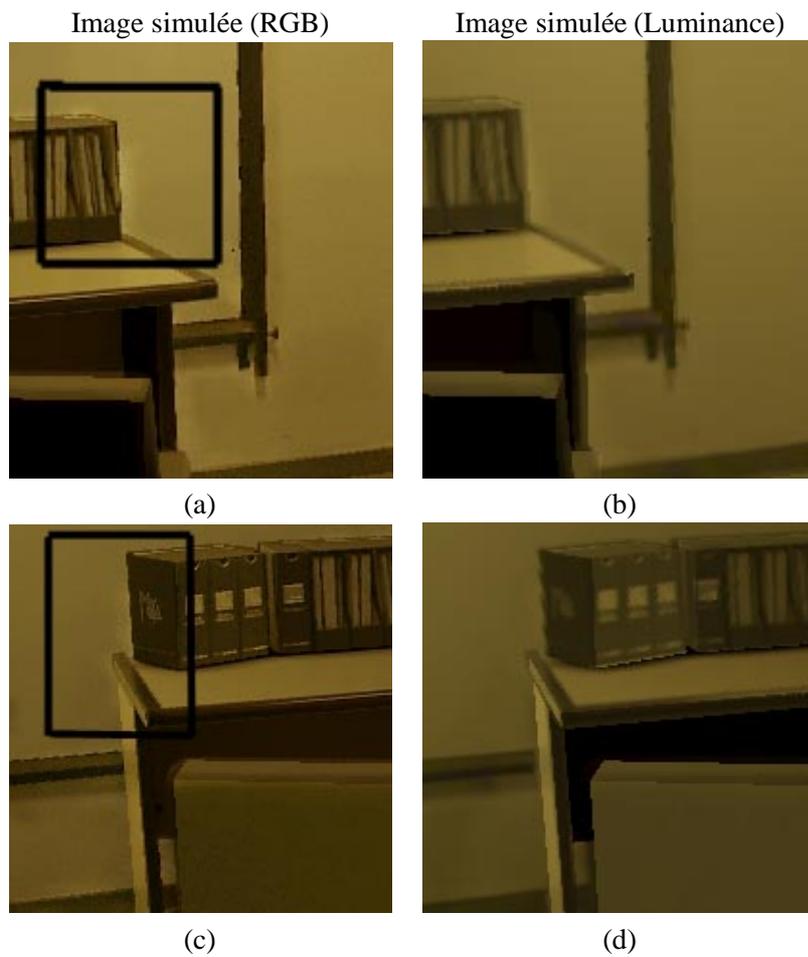


FIG. 6.6: Résultats de ré-éclairage en utilisant des images de luminance. Nous avons fait un zoom sur deux des éclairages modifiés présentés sur la figure 6.5 pour montrer les différences de résultats. (a) et (b) La scène est éclairée par une seule lampe à droite. (c) et (d) La scène est éclairée par une seule lampe à gauche.

de radiosité.

Nous décrivons dans les sections suivantes ces trois améliorations.

Mesure des propriétés de la lampe utilisée

Nous avons utilisé des images de luminance pour mesurer l'intensité lumineuse de la lampe que nous utilisons pour la capture d'images, comme précédemment. Nous montrons une des neuf photographies sur la figure 6.7.

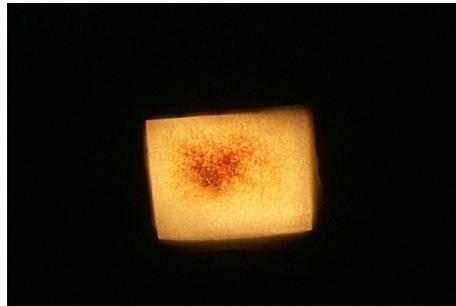


FIG. 6.7: Photographie de la lampe allumée ayant servi à la capture. Nous calculons à partir de cette photographie la distribution spectrale en RGB de son intensité.

À partir de l'image de luminance, nous calculons une moyenne des pixels correspondant à la zone couverte par la lampe ($17.5 \times 14 \text{ cm}^2$). C'est une lampe halogène de 500 Watts. L'excitance retrouvée pour la lampe en question est (37.4584, 13.774, 3.40891). La composition du spectre de la lampe a donc une prédominance de rouge.

Nous avons également vérifié son aspect diffus. Pour cela, nous plaçons la lampe face à un mur blanc, sur lequel nous disposons des repères. Nous repérons notamment la projection du centre de lampe sur le mur. La photographie du mur est montrée sur la figure 6.8 (a). La capture d'images a été réalisée comme nous l'avons décrit dans la section 6.2.2, pour créer une image de luminance de cette photographie. La géométrie du mur a été reconstruite, et la position de la lampe mesurée. Nous utilisons cette géométrie pour enlever l'effet du facteur de forme sur l'image, en divisant la couleur de chaque pixel par le facteur de forme entre ce pixel et la source de lumière. L'effet que nous attendons est une texture de mur uniforme ne contenant plus les dégradés de couleur dus aux facteurs de forme. Ce n'est pas exactement le résultat que nous obtenons par simulation (voir figure 6.8 (b)), bien que l'image semble plus homogène et l'effet des facteurs de forme atténué. Nous avons pris pour chaque image la ligne du milieu de l'image pour comparer les résultats. En (c), la courbe des pixels met en évidence l'effet de l'éclairage, et en particulier celui des facteurs de forme. En (d), les pixels correspondent à l'image corrigée. L'effet des facteurs de forme est enlevé, et les pixels sont plus alignés. Les quelques points s'éloignant de la courbure sont dues aux punaises posées sur le mur pour nous servir de repère. Ces différences de valeurs ne nous permettent pas de conclure que la lampe soit directionnelle. Nous estimons donc à partir de ces résultats que notre hypothèse sur le caractère diffus de la lampe est raisonnable.

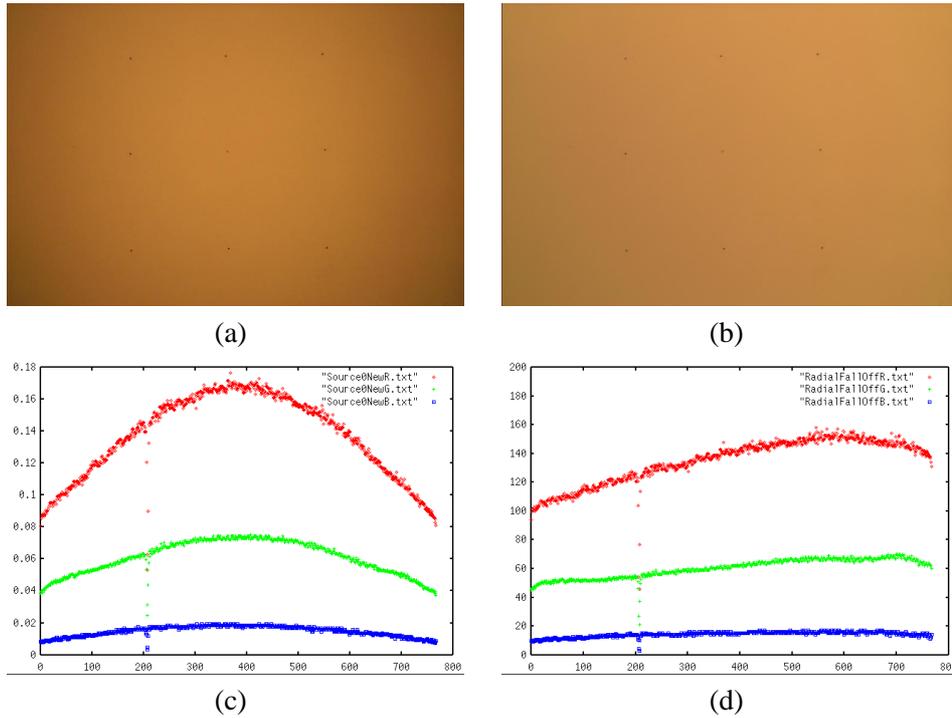


FIG. 6.8: Mesure de la propriété de diffusion de la lampe servant à la capture. (a) Photographie du mur éclairé de face par la lampe. (b) Nous avons enlevé les effets de facteurs de forme. L'image est plus homogène. (c) et (d) Variation des couleurs des pixels pour la ligne du milieu des images (a) et (b) respectivement.

Recalage des images

Nous avons expliqué précédemment que les images de luminance ne sont pas cohérentes entre elles dans leur façon de représenter la luminance lorsque l'éclairage change, à cause des réglages automatiques de l'appareil (notamment la sélection automatique des réglages *EV*). Nous avons développé une nouvelle méthode qui permet de recalibrer les images entre elles, en appliquant un facteur de correction sur chacune des images de luminance. Pour calculer ce facteur de correction, nous utilisons les équations de la radiosité. L'algorithme général est décrit par la figure 6.9.

Nous partons du principe que pour une image de référence choisie, une réflectance estim e servira de référence pour les autres images. Pour chaque image I_j , la luminance L_{ij} du pixel i peut être définie par les équations de radiosité, et en particulier :

$$L_{ij} = \rho_{ij} F_{is_j} E_{s_j} + B_j \quad (6.6)$$

où ρ_{ij} est la réflectance associ e au pixel i sur l'image I_j , F_{is_j} est le facteur de forme entre la source s_j et le point 3D correspondant au pixel i , E_{s_j} est l'exitance de la source de lumière s_j , et B_j est la radiosité indirecte. Comme les images sont prises sous le même point de vue, la réflectance ρ_{ij} associ e au pixel i doit être la même pour toutes les images. De plus, la

Algorithme de recalage

Sélection d'une image de référence I_1

Pour toutes les images $I_j, j = 1..n$

Affectation des pixels visibles comme valides

Pour l'image de référence I_1

Calcul d'une réflectance de référence ρ^{ref}

Pour toutes les autres images $I_j, j = 2..n$

Pour tous les pixels valides i

nouvelle couleur de pixel L_{ij}^{ref}

Pour toutes les autres images $I_j, j = 2..n$

Calcul du facteur a_j de minimisation entre L_j^{ref} et L_j

Pour toutes les autres images $I_j, j = 2..n$

Application du facteur de correction sur tous les pixels

$L_{ij}^{new} = a_j L_{ij}$

Création de nouvelles images $I_j, j = 2..n$

FIG. 6.9: Algorithme de recalage.

source de lumière est la même dans toutes les images, mais elle est placée à des positions différentes. L'exitance E_{s_j} est la même, quelque soit j .

La radiosité indirecte B_j est calculée pour chacune des images. Nous partons du principe que les pixels dans les ombres ne sont éclairés que par de l'irradiance indirecte. La couleur observée dans les ombres est l'irradiance indirecte multipliée par la réflectance des objets. Nous allons donc plutôt considérer comme radiosité indirecte la moyenne des couleurs des pixels dans l'ombre. Pour chaque image I_j , la radiosité indirecte B_j est mise à jour par cette moyenne. Ceci nous permet par rapport au terme ambiant employé dans la méthode de ré-éclairage du chapitre 5, d'avoir une pseudo-radiosité indirecte. Cette approximation de l'éclairage indirect est plus significative maintenant que nous travaillons avec des images de luminance.

En nous inspirant de l'équation 6.6, nous allons d'abord calculer une réflectance de référence, qui nous permettra de calculer une couleur de pixel de référence. La réflectance de référence est calculée sur une image qui servira de référence tout au long du recalage. Notons cette image I_1 . Pour le calcul de recalage, nous préférons ne pas considérer les pixels dans les ombres, pour lesquels la précision de l'éclairage indirect est très importante pour la justesse des calculs. Nous pouvons sélectionner les pixels directement éclairés par les sources de lumière grâce à notre connaissance de la géométrie de la scène. Nous considérons les pixels ainsi sélectionnés comme *valides*. Ils sont montrés dans la figure 6.10 (a). Nous faisons de même pour les autres images en écartant également les pixels invalides sur la première image. Sur les images montrées en (b), (c), (d), (e), (f), (g) et (h), les pixels retenus sont les pixels qui ne sont pas noirs.

En utilisant l'équation 6.6, nous calculons une réflectance de référence pour chacun

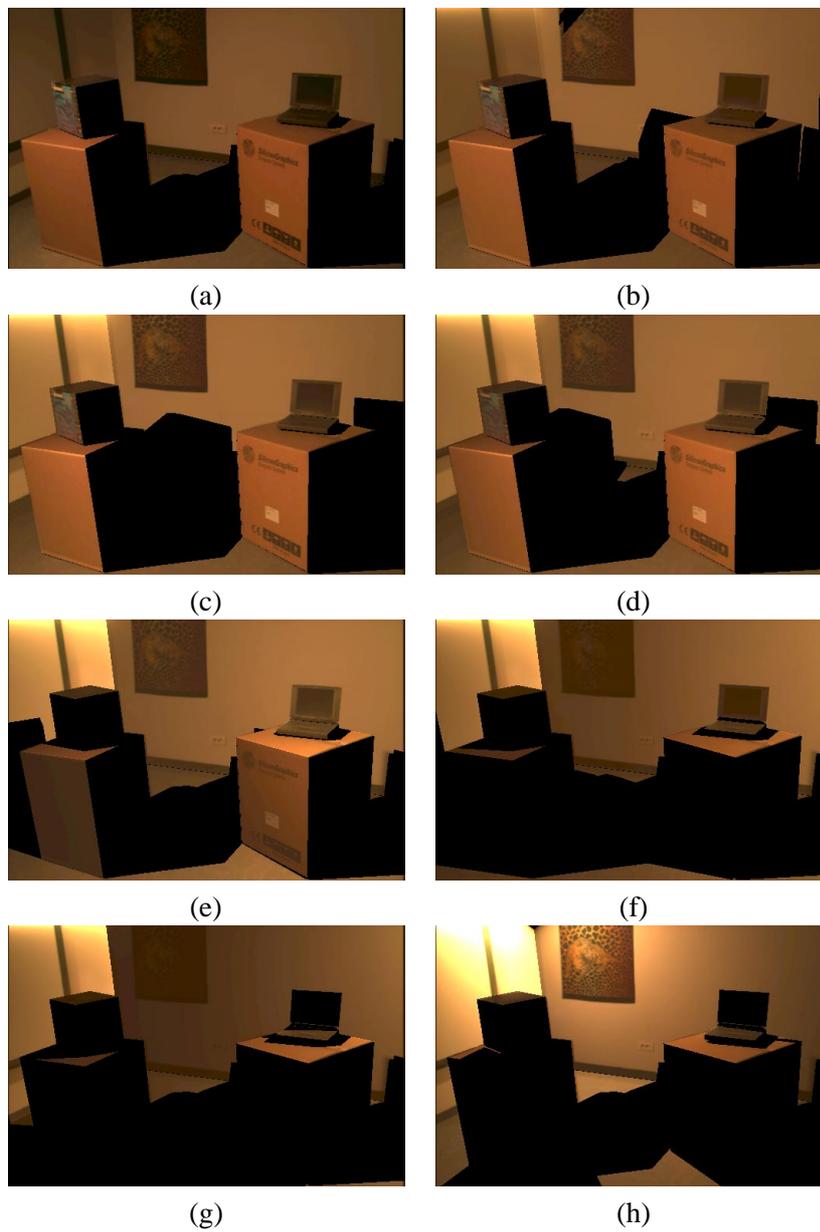


FIG. 6.10: Images obtenues après la première étape du recalage. Sur ces images les pixels considérés non valides sont montrés en noir. (a) Image de référence. (b), (c), (d), (e), (f), (g) et (h) Images correspondant à la couleur désirée pour les pixels valides.

des pixels i sélectionnés sur l'image de référence I_1 :

$$\rho_i^{ref} = \frac{L_{i1} - B_1}{F_{is_1} E_{s_1}}. \quad (6.7)$$

La réflectance ainsi calculée pour les pixels valides est montrée sur la figure 6.11.



FIG. 6.11: Réflectance de référence calculée à partir de l'image de référence.

Nous utilisons cette réflectance pour calculer une nouvelle valeur de couleur du pixel pour chacune des images de luminance, autre que l'image de référence. Pour chaque pixel i , et pour chaque image I_j ($2 \leq j \leq n$), nous utilisons l'équation suivante pour calculer une nouvelle couleur L_{ij}^{ref} de pixel :

$$L_{ij}^{ref} = \rho_i^{ref} F_{is_j} E_{s_j} + B_j. \quad (6.8)$$

La couleur du pixel idéal est montrée pour chacune des images sur la figure 6.10.

À partir de cette nouvelle couleur de pixel, nous calculons la correction a_j à appliquer pour que les images soient cohérentes entre elles. Cette correction est calculée en utilisant une résolution aux moindres carrés de :

$$\varepsilon = \sum_i \|a_j L_{ij} - L_{ij}^{ref}\|^2. \quad (6.9)$$

La correction a_j est égale à :

$$a_j = \frac{\sum_i L_{ij} L_{ij}^{ref}}{\sum_i L_{ij}^2}. \quad (6.10)$$

Le facteur a_j est ainsi calculé en utilisant les pixels considérés comme valides sur chacune des images I_j . Une fois ces facteurs obtenus, nous transformons les images de luminance en appliquant à chacun des pixels (valides et non valides) l'opération $a_j L_{ij}$. Les images obtenues sont recalées entre elles. Elles sont montrées sur la figure 6.12, avant et après le recalage. Nous ne montrons que cinq images des huit utilisées.

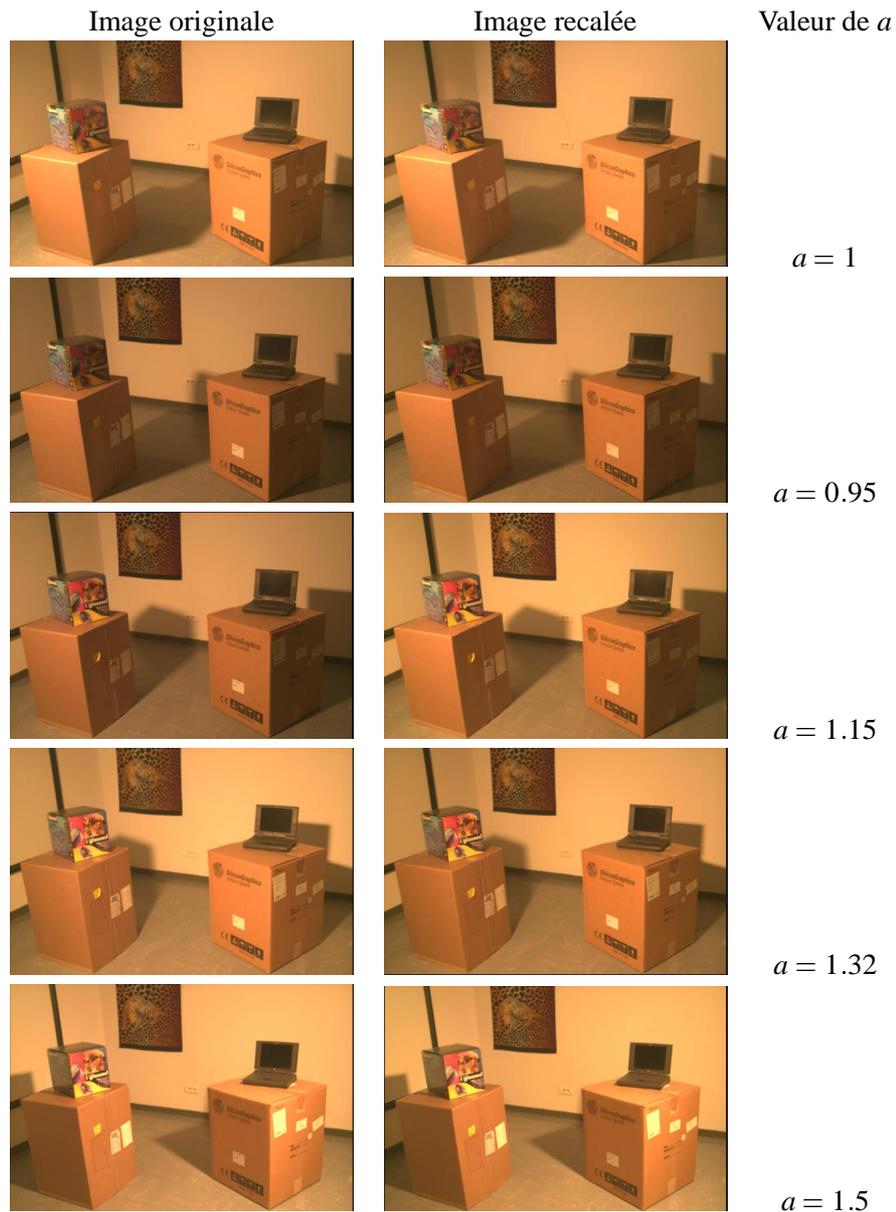


FIG. 6.12: Images originales et images recalées.

Amélioration de l'estimation de la réflectance en affinant la solution par itérations

En utilisant les images de luminance recalées, nous recalculons une nouvelle image de réflectance, avec le processus décrit dans le chapitre 5. Comme nous l'avons fait pour le recalage des images, nous utilisons un nouveau terme ambiant représentant l'éclairage indirect, différent pour chacune des images, et calculé à partir des pixels dans les régions d'ombre. L'image de réflectance obtenue après ce processus est montrée sur la figure 6.13 (b). Nous la comparons avec une image de réflectance en (a) obtenue avec des images RGB. En comparant une ligne de pixel sur la figure 6.13 (c) et (d), nous ne pouvons pas conclure que l'image de réflectance obtenue avec des images calibrées soit plus homogène que celle obtenue avec des images RGB. Cependant, on peut remarquer que le bruit a diminué. La ligne de pixels correspond au mur du fond. Les trois courbes sur chaque image correspondent aux composantes rouge, verte et bleue.

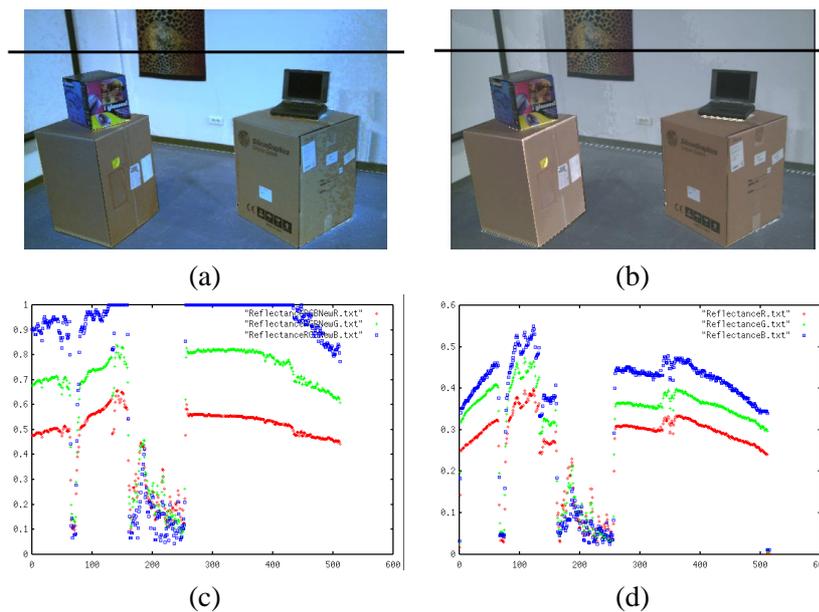


FIG. 6.13: (a) Réflectance estimée avec des images RGB. (b) Réflectance estimée avec des photographies calibrées. (c) et (d) Affichage des valeurs des pixels d'une même ligne (marquée d'un trait noir) sur les images (a) et (b). Les valeurs alignées en (c) correspondent à une saturation des valeurs (au-dessus de 255). Dans ces diagrammes, les indices des pixels sont en abscisse et les valeurs des couleurs en ordonnée.

Nous avons également comparé les variations pour chaque composante rouge, verte et bleue, d'une même ligne de pixels d'images de réflectance obtenues avec des images de luminance non calibrées et avec des images de luminance calibrées. Les deux variations de pixels sur l'image sont présentées sur la figure 6.14. Elles ne sont pas très différentes l'une de l'autre.

L'influence de l'éclairage indirect dans l'éclairage global est très importante. Cette importance se perçoit notamment dans les zones d'ombres qui sont également bien éclairées. Une meilleure précision de l'éclairage indirect est donc indispensable pour obtenir des

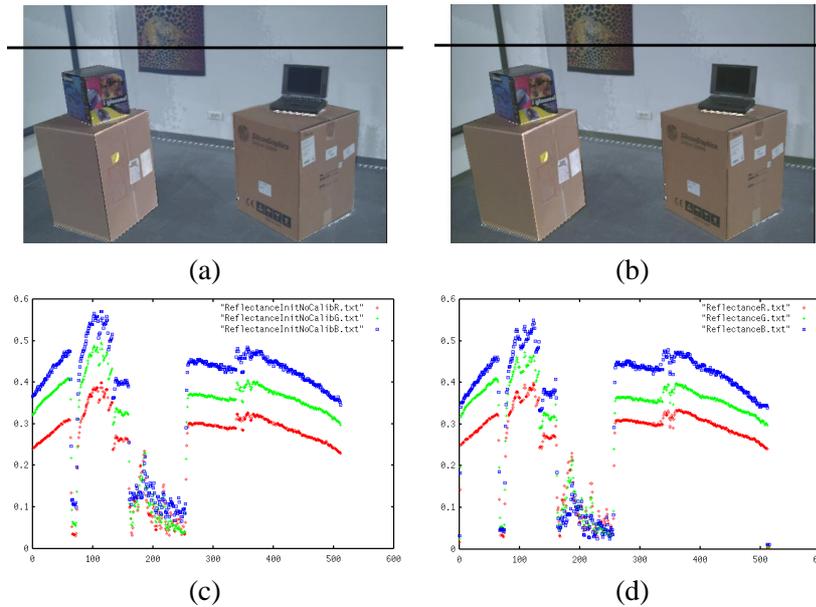


FIG. 6.14: (a) Réflectance estimée avec des images de luminance non calibrées. (b) Réflectance estimée avec des images de luminance calibrées. (c) et (d) Affichage des valeurs des pixels d'une même ligne (marquée d'un trait noir) sur les images (a) et (b). Dans ces diagrammes, les indices des pixels sont en abscisse, et les valeurs des couleurs en ordonnées.

meilleurs résultats dans l'estimation de la réflectance. Pour améliorer la solution, nous réalisons des itérations en mettant à jour successivement l'irradiance et la réflectance, comme nous le décrivons dans l'algorithme présenté sur la figure 6.15. Ceci nous permet d'affiner à la fois l'éclairage global et les valeurs de réflectance.

Algorithme d'estimation des réflectances
 Estimation des réflectances avec un terme ambiant
 Itérer
 Pour $j = 0..NbImages$
 Calculer l'éclairage indirect
 Mise à jour des réflectances pour l'image j
 Combinaison des réflectances individuelles
 Mise à jour des réflectances dans le système de radiosité
 Calcul d'un éclairage indirect pour la position $j = 0$ de lampe.

FIG. 6.15: Nouvel algorithme d'estimation des réflectances.

Le terme ambiant est remplacé par une valeur d'éclairage indirect différente pour chaque pixel, calculée par une solution de radiosité hiérarchique. Après quelques itérations, nous obtenons une nouvelle image de réflectance. Cette nouvelle réflectance sert à initialiser une dernière fois le système de radiosité. Un nouvel éclairage indirect est ensuite simulé pour la position de la lampe correspondant à la première photographie originale.

L'éclairage est ensuite affiché, et le processus interactif présenté au chapitre 5 peut être utilisé.

Les réflectances obtenues par ce processus itératif sont moins bruitées et ont des valeurs plus homogènes (moins de variations). La réflectance obtenue après dix itérations est montrée sur la figure 6.16 (b), en comparaison à celle obtenue avant les itérations en (a). Nous comparons les valeurs de réflectance en (c) et (d), pour une même ligne de pixels sur les images (a) et (b) respectivement. La réflectance obtenue après itération est visuellement plus homogène, ce qui est mis en évidence par la courbe de pixels en (d).

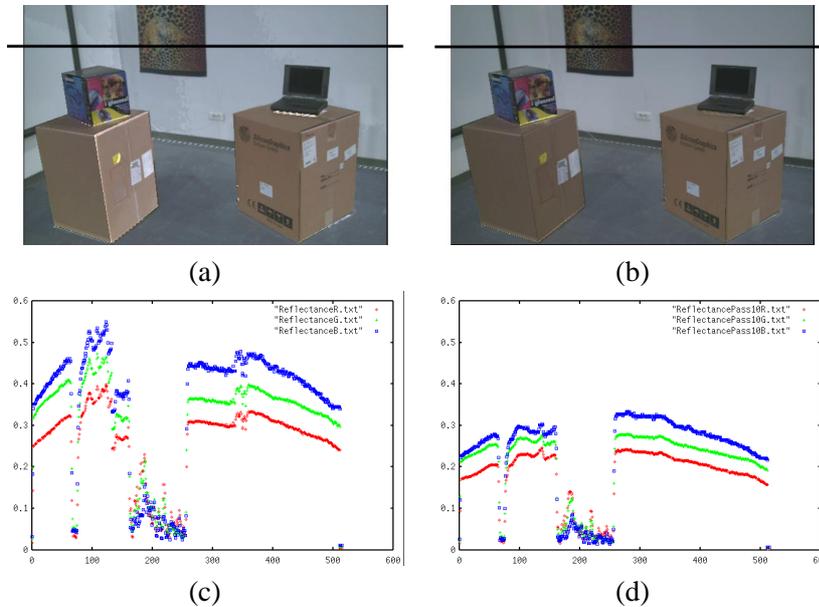


FIG. 6.16: (a) Réflectance estimée avec des images de luminance calibrées avant les itérations. (b) Réflectance estimée avec des images de luminance calibrées après dix itérations. (c) et (d) Affichage des valeurs des pixels d'une même ligne (marquée d'un trait noir) sur les images (a) et (b). Dans ces diagrammes, les indices des pixels sont en abscisse, et les valeurs des couleurs en ordonnée.

De plus, l'estimation de la réflectance est convergente. Dès la première itération, les valeurs de réflectance sont très proches des valeurs stabilisées dès la quatrième itérations. Nous montrons l'évolution des réflectances au cours des itérations sur la figure 6.17, pour la composante rouge. En (a), la courbe correspond à la réflectance avant les itérations. En (b), elle correspond à la première itération et en (c) à la dixième. En (d), nous avons superposé les courbes après chaque itération. La courbe la plus haute correspond à la réflectance avant les itérations ; la courbe la plus basse correspond à la première itération ; la courbe juste au-dessus correspond à la deuxième itération ; et la courbe encore juste au-dessus correspond à la dixième. Les trois dernières courbes sont très proches l'une de l'autre.

Enfin, nous montrons la reprojection de l'éclairage avec la réflectance obtenue après itérations sur la figure 6.18 (b). Elle est de meilleure qualité que la reprojection avec une réflectance obtenue avec des images RGB montrée en (a), car l'image de réflectance ini-

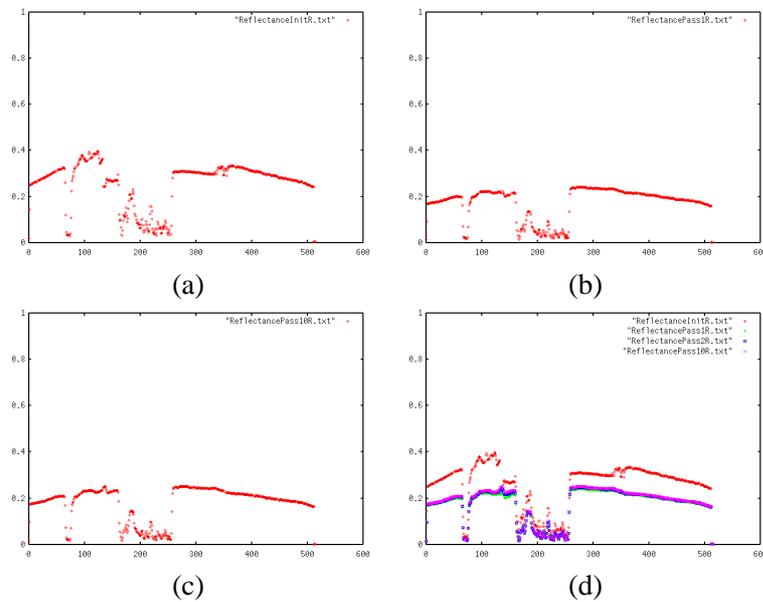


FIG. 6.17: Courbes d'évolution des valeurs de réflectance pour une même ligne de pixels au cours des itérations (voir le texte). Les indices des pixels sont en abscisse, et les valeurs des couleurs en ordonnées. Seule la composante rouge est montrée sur cette figure. (a) Première estimation de la réflectance. (b) Première itération pour l'estimation de la réflectance. (c) Dixième itération pour l'estimation de la réflectance. (d) Superposition des courbes. Les courbes convergent rapidement vers celle correspondant à la dixième itération.

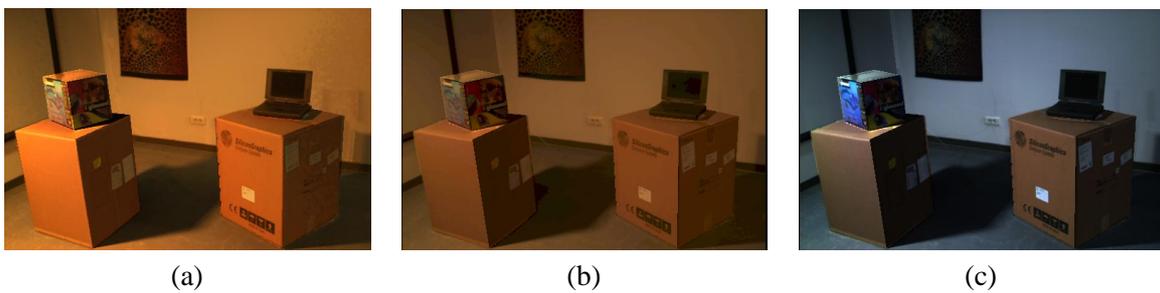


FIG. 6.18: (a) Re-projection des ombres avec la réflectance calculée avec des images RGB. (b) Re-projection des ombres avec la nouvelle réflectance. (c) Modification interactive de l'intensité de la source de lumière originale.

tiale contient moins d'artefacts. En (c), nous avons modifié les composantes de l'intensité de la lampe, modifiant ainsi interactivement l'éclairage.

Résultats sur une deuxième scène

Nous avons appliqué l'algorithme de calibrage et le processus d'itérations sur des photographies montrées dans un exemple sur la figure 5.24 du chapitre 5. Ces photographies n'ont pas été prises à des temps d'exposition différents. Pour chaque position de la lampe, nous avons une seule photographie correspondant à un *EV* de zéro (choix automatique du temps d'exposition adéquat par l'appareil photographique). Pour chaque photographie, nous avons cependant créé une image de luminance. Même si nous n'obtenons pas une meilleure connaissance des couleurs, ces images de luminance ne contiennent plus la fonction de la caméra. Nous avons ensuite recalé les images avec l'algorithme de recalage présenté à la page 147. Enfin, nous avons estimé une première réflectance à partir de ces images de luminance calibrées. Cette réflectance est montrée sur la figure 6.19 (b). Après six itérations pour améliorer l'estimation de l'éclairage indirect, nous obtenons une nouvelle image de réflectance montrée en (c). L'image de réflectance estimée à partir d'images RGB non calibrées est montrée en (a). Nous montrons pour une même ligne de pixel l'évolution de l'estimation par des courbes montrées en (d), (e) et (f).

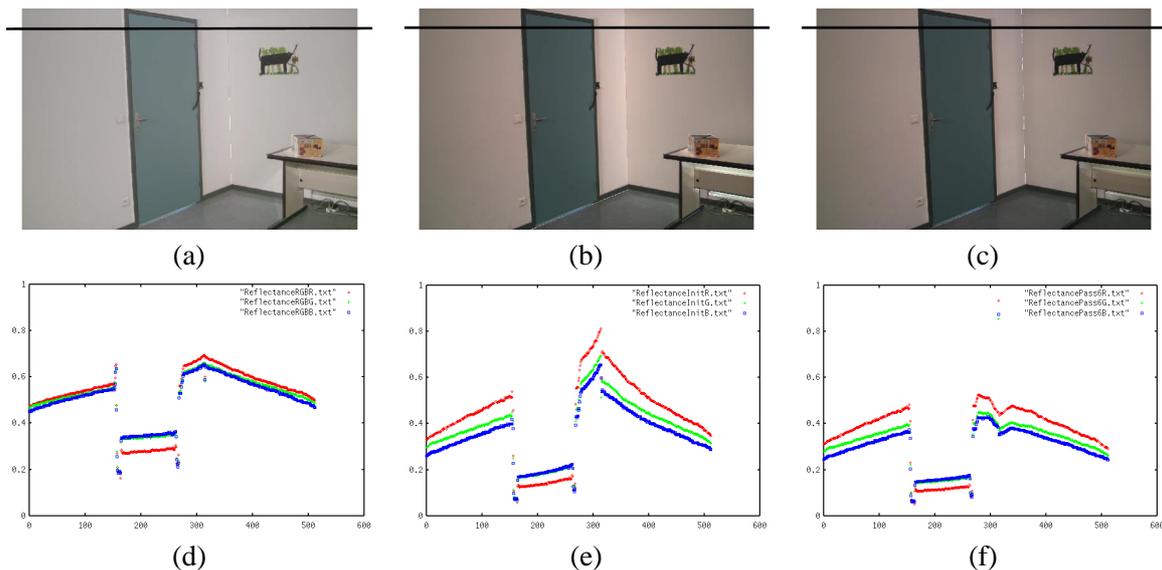


FIG. 6.19: (a) Estimation de la réflectance avec des photographies RGB. (b) Estimation de la réflectance avec des images de luminance recalées et sans itérations sur l'éclairage indirect. (c) Estimation de la réflectance avec des images de luminance recalées et avec itérations sur l'éclairage indirect. (d), (e) et (f) Courbe d'une même ligne de pixels (marquée en noir) respectivement pour les images (a), (b), et (c). Dans ces diagrammes, les indices des pixels sont en abscisse, et les valeurs des couleurs en ordonnée. Pour chaque image, nous montrons les trois composantes rouge, verte et bleue.

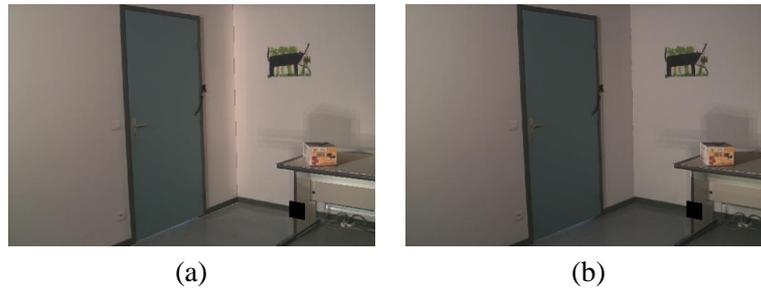


FIG. 6.20: Ajout d'une lampe virtuelle (en noir) pour éclairer le dessous du bureau. (a) Ré-éclairage en utilisant la réflectance estimée sans itérations (voir figure 6.19 (b)) (b) Ré-éclairage en utilisant la réflectance estimée sans itérations (voir figure 6.19 (c))

La réflectance estimée après le processus d'itérations en (c) est de bien meilleure qualité que celle estimée avant. Ceci se voit notamment dans les zones non directement éclairées lors de la capture des photographies. Par exemple, nous n'avons pas de connaissance de l'éclairage indirect sous le bureau. La réflectance est de moins bonne qualité à cet endroit sur les images (a) et (b).

Nous montrons l'importance d'une bonne estimation de la réflectance à cet endroit sur la figure 6.20. Dans cette figure, nous avons placé une petite lampe sous la table. Cette lampe est représentée par un polygone noir (car elle est vue de derrière). La zone éclairée est une zone où l'estimation de la réflectance est difficile. L'image 6.20 (a) correspond à un ré-éclairage en utilisant la réflectance montrée sur la figure 6.19 (b); on voit que l'utilisation d'un terme ambiant pour l'estimation de la réflectance est insuffisant. L'image (b) correspond à un ré-éclairage à partir de la réflectance montrée sur la figure 6.19 (c). Le ré-éclairage sur l'image (b) est plus réaliste. Les artefacts d'estimation de la réflectance en dessous du bureau sont diminués. Cependant, ils restent perceptible. Nous n'avions pas au départ une connaissance suffisante des couleurs à cet endroit de la scène. Nous n'avions en effet pas pris de photographies à des temps d'exposition différents. Le dessous du bureau est sombre sur toutes les images d'entrée, et les couleurs sont très bruitées et nulles pour certains pixels. Sur la figure 6.21, nous montrons trois zoom sur ces images pour montrer la différence d'estimation. Nous montrons à gauche les images correspondant à une estimation de réflectance avant les itérations, et à gauche, les images correspondant à une réflectance estimée après le processus d'itérations. Sur les deux premières images (a) et (a'), on voit l'arrête du mur. La réflectance estimée pour l'image (a) était trop élevée ce qui provoque un éclaircissement non réaliste à cet endroit de l'image. Sur les images (b) et (b'), nous montrons l'estimation sur le dessous du bureau. Bien que le résultat soit meilleur en (b'), il reste des artefacts en-dessous de la table. Par contre, le mur perçu en-dessous du support du bureau est mieux estimé.

6.3.3 Rendu photographique

Le rendu obtenu à partir des images de luminance semble sans contraste. Pour rendre de façon plus contrastée, il faudrait que nous appliquions des méthodes d'affichage plus

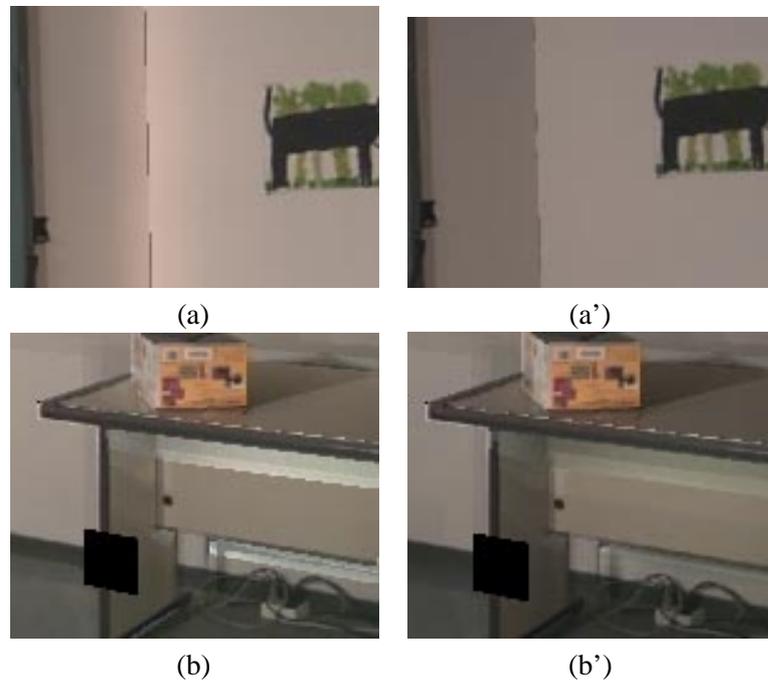


FIG. 6.21: (a) et (a') Zoom sur le coin du mur. La réflectance à cet endroit a été surestimée pour l'image (a). La réflectance est de meilleure qualité après la processus d'itérations sur l'éclairage indirect. (b) et (b') Zoom sur le dessous du bureau. L'estimation radiométrique en (b') est de meilleure qualité sous le bureau, malgré quelques artefacts restant (voir le texte). On peut noter que l'éclairage simulé est de meilleure qualité en (b') pour la région de transition entre le mur et le support du bureau.

adéquates. La solution la plus simple serait s'appliquer la fonction de la caméra pour rendre l'image tel que l'aurait fait l'appareil photographique [DM97]. Des méthodes de rendu perceptuel pourraient également être appliquées, comme un « tone mapping » [TR93, Sch94, LRP97, TT99], une correction gamma [War94a].

6.4 Discussion

Nous avons présenté dans ce chapitre une nouvelle méthode de calibrage de photographies fournies par un appareil dont le contrôle manuel est limité (notamment au niveau du temps d'exposition). Nous avons pour cela appliqué à nos données photographiques un algorithme de création d'images de luminance [DM97]. Nous avons ainsi montré que créer des images de luminance avec des appareils photographiques de « bas de gamme » est possible. Ces nouvelles données améliorent la qualité des résultats des deux méthodes de ré-éclairage présentées dans cette thèse.

Pour compenser les imprécisions dû à une mauvaise connaissance du temps d'exposition, nous avons développé un algorithme de recalage d'images nécessaire pour calibrer plusieurs photographies de différents éclairages utilisées dans la deuxième méthode de ré-éclairage (voir le chapitre 5). L'estimation des réflectance a également été améliorée grâce à une meilleure précision de l'éclairage indirect obtenue par un processus itératif. La qualité de l'estimation des réflectances après ce processus est améliorée. Nous pourrions évaluer cette qualité en comparant les enlèvement d'objets réels pour l'estimation des réflectance par images calibrées et non calibrées.

Nous avons montré dans les chapitres précédents 4 et 5 que des données simples non transformées permettaient d'obtenir de résultats dont la qualité était suffisante pour certaines utilisation. Cependant, l'utilisation d'images de luminance a permis pour les deux méthodes de ré-éclairage d'obtenir des résultats dont la qualité visuelle peut être meilleure, et dont l'estimation de la réflectance est plus précise.

