

## Estimation de la réflectance d'une surface connaissant sa géométrie et sa couleur

---

### *Estimation of the Reflectance Function of a Surface From 3D and Colour Data*

par Feryel SOUAMI, Francis SCHMITT

*Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, 46, rue Barrault - 75013 PARIS  
Tél : (1) 45 81 76 57 - Fax : (1) 45 81 37 94, Email : Francis.Schmitt@enst.fr*

#### Résumé

Nous présentons dans cet article une méthode d'estimation de la fonction de réflectance d'une surface à partir de données tridimensionnelles (3D) et de données couleur. Les données tridimensionnelles peuvent être, par exemple, celles fournies par un dispositif d'acquisition laser par triangulation active ("laser range finder"). Les données couleur correspondent typiquement aux composantes trichromatiques d'une caméra couleur. Nous utilisons le modèle d'éclairage de Torrance et Sparrow pour l'interprétation physique des données 3D et couleur mesurées. Ce modèle décrit la réflexion diffuse et la réflexion spéculaire par un ensemble de paramètres : réflectance diffuse, rugosité de la surface et fonction de Fresnel. Nous présentons une méthode pour l'estimation de ces paramètres. Une évaluation de cette approche est effectuée sur un ensemble de données simulées.

**Mots clés :** Réflectance, modèle d'éclairage, vision artificielle, coopération 3D-couleur.

#### Abstract

*We propose a method for the estimation of the reflectance function of a surface from a set of three-dimensional (3D) data and colour data. The 3D data correspond typically to the XYZ coordinates of a set of points sampled on the surface by a laser range finder. The colour data correspond to the RGB colour components of a video camera when imaging the same set of points. We use the Torrance and Sparrow illumination model to interpret the measured 3D and colour data. This model describes the Lambertian and the specular reflexions of the light on a surface with a reduced set of parameters characterising the surface : Lambertian reflection, surface roughness, Fresnel function. We present a method for the estimation of these parameters and we evaluate this approach with various simulated data.*

**Key words :** Reflectance, illumination model, machine vision, coopération 3D-color.

#### Introduction

Afin de décrire de la manière la plus complète possible un objet (archivage synthèse d'image réaliste, etc.), il faut donner une représentation fidèle de sa forme (données 3D) et préciser les propriétés intrinsèques qui décrivent l'aspect de sa surface (teinte, rugosité, texture, etc.). Sa teinte, en particulier, représente un paramètre invariant pour l'homme. En effet, on associera à un ballon rouge la couleur rouge quelle que soit son exposition à la lumière, sa position dans l'espace, et les éléments l'environnant. La teinte est un attribut psychosensoriel qui dépend essentiellement du comportement spectral de la surface de l'objet, dont une représentation physique est la **fonction de réflectance spectrale**.

Il existe, en vision par ordinateur, des algorithmes d'estimation de la fonction de réflectance spectrale d'une surface. Ces algorithmes utilisent des images multispectrales pour analyser les deux facteurs physiques donnant la perception de la couleur de l'objet : la réflectance de la surface et la fonction de distribution spectrale

de puissance de la source. L'idée directrice de ces algorithmes est de considérer ces deux informations comme séparables et d'approximer chacune d'entre elles par une combinaison linéaire sur deux bases de fonctions. Les fonctions des bases choisies peuvent être orthogonales <GERS-87>, comme les polynômes de Legendre <HEAL-87>, ou contruites en tenant compte du degré de corrélation le long du spectre visible des mesures physiques <WAND-87>.

L'évolution actuelle de la technologie permet à présent de disposer de divers systèmes procurant une information spatiale dense (données 3D) associée à une information colorimétrique (les composantes RVB d'une caméra). On peut citer parmi eux les systèmes d'acquisition stéréophotographique couleur <JORD-88>, ou les systèmes à triangulation active avec caméra couleur <CYBE, RIOU-93, SCHM-93>. En faisant coopérer ces informations spatiales et colorimétriques, il est possible d'améliorer encore la représentation des objets numérisés en associant à la représentation tridimensionnelle de l'objet ses propriétés réfléchissantes décrites par sa fonction de réflectance. Ainsi Ikeushi et Sato

<IKEU-91> ont utilisé une image de profondeur ("range image") associée à une image d'intensité pour déterminer les propriétés de réflectance de la surface, qui sont dans leur cas des termes constants ne dépendant pas du spectre. Plus récemment, Baribeau, Rioux et Godin <BARI-92> ont utilisé une image de profondeur associée à une image de couleur pour estimer les paramètres intrinsèques de la surface de l'objet numérisé en faisant coopérer les données 3D et couleur acquises. Nous proposons dans cet article une méthode plus générale pour l'estimation de la fonction de réflectance à partir de ces mêmes informations, 3D et couleur. Cette méthode ne pose aucune contrainte géométrique quant à la distance de l'observateur et de la source à l'objet, contrairement à la méthode d'Ikeuchi & al. Elle permet aussi de reconstruire les caractéristiques spéculaires en fonction de la géométrie, à la différence de la méthode proposée par Baribeau & al. qui sont contraints par les caractéristiques spécifiques de leur système d'acquisition.

La coopération entre les informations spatiales (données 3D) et colorimétriques (RVB) est déduite de la **dépendance** entre l'information colorimétrique et la géométrie de l'objet. Cette dépendance se traduit par un modèle d'éclairage qui exprime l'énergie lumineuse réfléchiée par une surface en fonction de l'énergie émise par une source ponctuelle, de la géométrie source / objet / capteur, et d'un ensemble de paramètres décrivant le comportement intrinsèque de la surface (rugosité, pigmentation, caractéristiques spectrales). Cette relation peut être simple ou complexe selon le modèle considéré (nombre et complexité de ses paramètres). Ce sont donc ces paramètres que nous cherchons à estimer par une analyse de la réflectance de la surface.

On rencontre dans la littérature divers modèles d'éclairage que l'on peut classer globalement en deux catégories : modèles diffus et modèles spéculaires. Le modèle Lambertien décrit de manière correcte la réflexion diffuse. De plus, sa forme simple en a fait le modèle d'éclairage le plus couramment utilisé dans la recherche en vision <WOOD-78, HORN-86>. En revanche, le modèle spéculaire est plus complexe et ne peut être modélisé que par un traitement formel de l'optique.

Il existe deux manières d'aborder les problèmes d'optique : l'approche de l'optique physique, ou l'approche de l'optique géométrique. L'optique physique utilise la théorie électromagnétique pour analyser la réflexion de la lumière. L'optique géométrique simplifie l'analyse de la réflexion lumineuse, en supposant la longueur d'onde de la lumière incidente plus petite que les dimensions des irrégularités de la surface réfléchissante. Cette dernière hypothèse n'est plus vérifiée dans le cas de surfaces lisses où les irrégularités sont comparables à la longueur d'onde de la lumière incidente. Dans ce cas, seul le modèle physique est applicable. Les modèles de réflexion issus de l'approche géométrique sont donc des approximations de ceux de l'approche physique.

Les deux modèles les plus connus, issus respectivement de l'optique physique et géométrique, sont ceux de Beckmann et Spizzino <BECK-63> et de Torrance et Sparrow <TORR-67>. Le second, de par son expression mathématique plus simple (cf. section 1), est plus couramment utilisé, particulièrement en vision

robotique <SHAF-85, HEAL-87, EBEL-89, BAJC-90, KLIN-90, LEE-92, BARI-92, WOLF-91> et en synthèse d'image <COOK-82, SILL-89, TELL-89, RUSH-90>. Nous considérons le modèle de Torrance et Sparrow <TORR-67> qui, malgré ses limitations, nous a semblé suffisant pour notre étude et moins complexe à traiter que les récents modèles qui en dérivent <NAYA-91, SILL-91> ou le modèle de Beckmann et Spizzino <BECK-63>.

L'étude de la réflectance d'une surface, bien qu'apportant des éléments très enrichissants pour l'analyse de scène <LEE-92>, est encore fort peu répandue en vision. Nous proposons, en seconde section, une méthode d'analyse de la réflectance d'une surface fondée sur la modélisation du processus physique de formation d'une image et sur les connaissances a priori que l'on peut extraire de l'étude d'un modèle d'éclairage. Cette analyse nous permet de distinguer les composantes diffuse et spéculaire de la réflexion, et de proposer, en troisième section, une méthode d'estimation des paramètres intrinsèques de la surface (c.-à-d. les paramètres qui caractérisent un modèle d'éclairage). Les résultats de l'estimation, avec des données simulées, sont présentés dans la quatrième section.

## 1. Modèle d'éclairage

Un modèle d'éclairage traduit les interactions de la lumière émise par une source avec le matériau composant la surface de l'objet observé. Ces interactions sont doubles et ont lieu respectivement :

- à l'interface entre l'air et le matériau quand l'onde lumineuse, émise par la source, rencontre un changement d'indice de réfraction,
- dans la substance même du matériau, quand la lumière est sélectivement dispersée et absorbée par les composants du matériau.

Il en résulte deux modes de réflexion, dans le corps et en surface du matériau, différents de par leur propriétés géométriques et spectrales. L'étude et la description des deux modes de réflexion

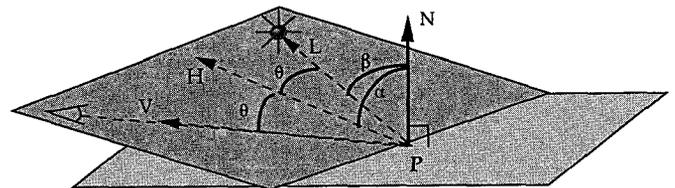


Figure 1. - Géométrie de réflexion.

$\vec{L}$  : direction d'illumination,  $\vec{V}$  : direction d'observation,  $\vec{N}$  : normale à la surface, et  $\vec{H}$  : direction spéculaire vérifiant :

$$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{\|\vec{L} + \vec{V}\|}$$

mettent en évidence ces différences, que l'on peut exploiter en vision par ordinateur comme une connaissance a priori sur la surface.

## 1.1. MODE DE RÉFLEXION D'UNE SURFACE

Nous décrivons la réflexion d'une onde lumineuse en un point d'une surface en considérant la géométrie de réflexion indiquée en figure 1. La luminance spectrale  $L(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$ , réfléchi et mesurée par un capteur dans la direction  $\vec{V}$ , dépend de l'éclairement  $E(\lambda, \vec{L}, \vec{N})$  de la surface et de la réflectance bidirectionnelle  $Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  :

$$L(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})E(\lambda, \vec{L}, \vec{N}) \quad (1)$$

où l'éclairement reçu  $E()$  s'exprime, dans le cas d'une source d'intensité  $I_s(\lambda, \vec{L})$  de la source située dans la direction  $\vec{L}$  à la distance  $l$  de la surface, et de la normale  $\vec{N}$  à la surface au point considéré :

$$E(\lambda, \vec{L}, \vec{N}) = I_s(\lambda, \vec{L}) \frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})}{l^2}. \quad (2)$$

Nous ne considérons pas dans notre étude les surfaces métalliques, mais seulement les matériaux diélectriques qui sont généralement composés d'un substrat mélangé à des pigments colorant ces matériaux. L'étude de la réflexion lumineuse d'une surface permet d'établir un modèle d'éclairement en décrivant la réflectance bidirectionnelle  $Rbd()$  à l'aide d'un ensemble de paramètres caractéristiques du matériau composant cette surface.

### 1.1.1. Réflexion en surface (modèle de Torrance et Sparrow).

Quand la lumière vient frapper la surface du matériau diélectrique, elle doit passer à travers l'interface séparant ce matériau et le milieu environnant (air). Comme les indices de réfraction des deux milieux sont différents, un certain pourcentage de la lumière est réfléchi à la surface du matériau (cf. fig. 2). Ce processus est appelé réflexion en surface propriétés de la réflexion en surface dépendent de la géométrie (forme, rugosité) et des qualités optiques (indice de réfraction) de la surface.

Pour analyser la réflexion spéculaire, Torrance et Sparrow <TORR- 67> modélisent la forme microscopique de la surface par une collection de micro-facettes planes, aléatoirement distribuées, orientées selon une fonction de distribution  $D(\vec{H}, \vec{N}, m)$ , où  $m$  est un paramètre de rugosité. Chaque facette correspond au côté d'une cavité en V symétrique et est considérée comme parfaitement lisses (miroirs), ce qui simplifie le calcul du coefficient  $G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  d'ombrage-masquage des facettes entre elles. Ils supposent, de plus, que la taille des facettes planes est plus grande que la longueur d'onde, et utilisent alors l'optique

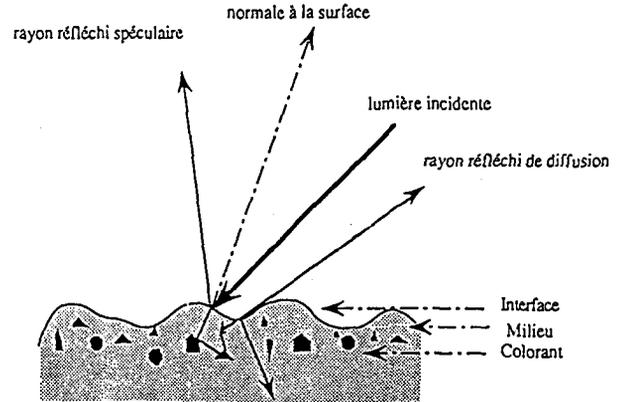


Figure 2. – Réflexion lumineuse.

géométrique pour décrire la réflexion spéculaire. Ils aboutissent à l'expression suivante de la réflectance bidirectionnelle spéculaire :

$$R_s(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = \frac{F(\lambda, \vec{L}, \vec{V})}{\pi} \frac{D(\vec{H}, \vec{N}, m)}{(\vec{N} \cdot \vec{L})} \frac{G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{(\vec{N} \cdot \vec{V})} \quad (3)$$

\*\* où  $F(\lambda, \vec{L}, \vec{V})$  est la fonction de Fresnel représentant la fraction d'énergie réfléchi par la surface. Son expression est :

$$F(\lambda, \vec{L}, \vec{V}) = F(nc(\lambda), \theta) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin(\theta - \tau)^2}{\sin(\tau + \theta)^2} + \frac{\tan(\theta - \tau)^2}{\tan(\tau + \theta)^2} \right] \quad (4)$$

avec :  $\sin(\tau) = \frac{\sin(\theta)}{nc(\lambda)}$ , où  $nc(\lambda)$  est l'indice de réfraction complexe <FRAN-70> et  $\theta$  l'angle entre les directions  $\vec{L}$  et  $\vec{V}$ .

\*\*  $D(\vec{H}, \vec{N}, m)$  est la fonction de distribution des microfacettes. Torrance et Sparrow modélisent cette fonction par une Gaussienne :

$$D(\vec{H}, \vec{N}, m) = D(\alpha, m) = \exp^{-m(\alpha^2)} \quad (5)$$

où  $m$  est le coefficient de rugosité de la surface et  $\alpha$  l'angle entre les directions  $\vec{L}$  et  $\vec{N}$ .

\*\*  $G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  est le facteur d'atténuation géométrique traduisant les phénomènes d'ombrage et de masquage d'une facette par une autre. Son expression, développée et simplifiée par Blinn <BLIN-77>, est :

$$G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = \min\left(1, 2 \frac{(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{V})}{(\vec{H} \cdot \vec{V})}, 2 \frac{(\vec{N} \cdot \vec{H})(\vec{N} \cdot \vec{L})}{(\vec{H} \cdot \vec{L})}\right). \quad (6)$$

### 1.1.2. Réflexion interne

Une partie de la lumière incidente pénètre dans le matériau et vient heurter un pigment qui la réfléchit vers d'autres pigments, et ainsi de suite. Une partie de la lumière ainsi réfractée va finalement revenir à la surface et la retraverser, ce qui constitue la lumière réfléchi par le matériau de l'objet (cf. fig. 2). Ce processus est

désigné par **réflexion interne** du matériau, ou encore **réflexion diffuse**.

Les propriétés spectrales des pigments déterminent la répartition spectrale de la lumière réfléchie, et la distribution spatiale des pigments détermine les directions des rayons réfléchis. En général, on considère une distribution spatiale aléatoire des pigments. La lumière quitte alors le matériau dans des directions aléatoires. Quand la lumière émise par le matériau est uniformément distribuée, la réflexion diffuse est alors décrite par la loi de Lambert. De cette loi, il découle que la réflectance bidirectionnelle diffuse  $Rd(\lambda)$  est indépendante des paramètres géométriques :

$$Rd(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{\pi}$$

où  $R(\lambda)$  est la réflectance spectrale de la surface définie comme le rapport du flux lumineux réfléchi par la surface au flux lumineux incident sur la surface <WYCZ-82>.

### 1.1.3. Interaction entre spectres de réflexion

Les pigments sont complètement mêlés à l'intérieur du matériau, et n'apparaissent pas à sa surface. Par conséquent, le spectre de la lumière diffuse, déterminé par les propriétés spectrales des pigments, est différent du spectre de la lumière réfléchie en surface, déterminé par les propriétés spectrales du substrat, et n'interagit pas avec lui. **Le spectre de réflexion spéculaire  $R_s()$  est donc différent du spectre de réflexion diffus  $Rd()$ .** Cela se traduit par une différence de couleur entre les régions diffuses et les régions spéculaires de la surface (très caractéristique par exemple sur les plastiques).

### 1.1.4. Réflexion mixte

Les surfaces mixtes présentent les deux modes de réflexion. Les flux lumineux s'additionnant, la réflectance bidirectionnelle devient donc la somme des réflectances bidirectionnelles diffuse et spéculaire :

$$Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = Rd(\lambda) + R_s(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}). \quad (7)$$

## 2. Réflectance et système de vision en couleur

En vision, nous nous intéressons à la luminance réfléchie par le matériau et mesurée par une caméra couleur. Celle-ci nous fournit les composantes trichromatiques RVB que nous noterons, par souci de clarté,  $(S_1, S_2, S_3) = \vec{S}$  :

$$S_k = \int_{\lambda} L(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) f_k(\lambda) d\lambda, k = 1, 2, 3$$

où  $f_k(\lambda)$  est la réponse spectrale du capteur  $k$  de la caméra, et  $L(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  la luminance réfléchie. Le triplet couleur s'exprime donc en fonction de la réflectance bidirectionnelle du matériau  $Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  :

$$S_k = \int_{\lambda} Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) I_s(\lambda, \vec{L}) \frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})}{l^2} f_k(\lambda) d\lambda.$$

### 2.1. RÉFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE INTÉGRALE

Les seules informations radiométriques disponibles étant les trois mesures RVB, nous ne faisons l'acquisition que de trois termes intégraux de la fonction de réflectance bidirectionnelle spectrale :

$$Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = \frac{\int_{\lambda} Rbd(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) I_s(\lambda, \vec{L}) f_k(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_s(\lambda, \vec{L}) f_k(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

que l'on peut faire apparaître, en utilisant le théorème de la moyenne, dans l'expression intégrale du triplet couleur :

$$S_k = Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) \int_{\lambda} I_s(\lambda, \vec{L}) \frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})}{l^2} f_k(\lambda) d\lambda.$$

En posant  $I f_k = \int_{\lambda} I_s(\lambda, \vec{L}) f_k(\lambda) d\lambda$ , l'expression du triplet couleur devient alors :

$$S_k = Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) \frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})}{l^2} I f_k. \quad (9)$$

On en déduit par conséquent chaque terme de la réflectance bidirectionnelle intégrale en fonction des informations de géométrie et de couleur connues :

$$Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = \frac{S_k}{\frac{(\vec{N} \cdot \vec{L})}{l^2} I f_k}. \quad (10)$$

Le terme  $I f_k$ , décrivant les caractéristiques de la source et de la caméra, est déterminé, soit par calcul dans le cas d'une simulation, soit par calibration dans le cas d'une expérimentation.

La fonction de réflectance bidirectionnelle étant la sommation des fonctions de réflectance spectrale bidirectionnelle diffuse  $Rd()$  et spéculaire  $R_s()$ , la réflectance bidirectionnelle intégrale  $Rbd_k()$  (équ. (7)) est donc la sommation de la réflectance bidirectionnelle intégrale diffuse  $Rd_k$  et de la réflectance bidirectionnelle intégrale spéculaire  $R_{s_k}$ . Les expressions de  $Rd_k$  et de  $R_{s_k}$  sont équivalentes à celle de  $Rbd_k()$  dans l'équation (8) :

$$Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = Rd_k + R_{s_k}(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}). \quad (11)$$

Dans la composante spéculaire, seule la fonction de Fresnel  $F(\lambda, \vec{L}, \vec{V})$  dépend de la longueur d'onde. Par conséquent, la réflectance bidirectionnelle intégrale spéculaire  $R_{s_k}()$  s'exprime comme le produit d'une fonction de la géométrie  $(l, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$  et de la fonction de Fresnel intégrale  $F_k(\vec{L}, \vec{V})$ . En posant

$F_{s_k}(\vec{L}, \vec{V}) = \frac{F_k(\vec{L}, \vec{V})}{\pi}$ , l'expression (11) de la réflectance bidirectionnelle intégrale devient :

$$Rbd_k(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = Rd_k + \frac{D(\vec{H}, \vec{N}, m)}{(\vec{N} \cdot \vec{L})} \frac{G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{(\vec{N} \cdot \vec{V})} F_{s_k}(\vec{L}, \vec{V}) \quad (12)$$

ou encore, sous forme vectorielle :

$$\vec{Rbd} = \vec{Rd} + \frac{D(\vec{H}, \vec{N}, m)}{(\vec{N} \cdot \vec{L})} \frac{G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{(\vec{N} \cdot \vec{V})} \vec{F}_s(\vec{L}, \vec{V}) \quad (13)$$

où  $\vec{Rd} = (Rd_1, Rd_2, Rd_3)$  et  $\vec{F}_s = (F_{s1}, F_{s2}, F_{s3})$ .

Lorsque la source et l'observateur sont éloignés de l'objet, les termes intégraux  $F_{s_k}()$  de la fonction de Fresnel sont **constants** car les directions  $\vec{L}$  et  $\vec{V}$  sont constantes (projections orthographiques) :  $F_{s_k}(\vec{L}, \vec{V}) = F_{s_k}$ . L'expression de la réflectance bidirectionnelle intégrale devient alors :

$$\vec{Rbd} = \vec{Rd} + \frac{D(\vec{H}, \vec{N}, m)}{(\vec{N} \cdot \vec{L})} \frac{G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{(\vec{N} \cdot \vec{V})} \vec{F}_s$$

Dans ce cas particuliers (source et observateur éloignés), la réflectance bidirectionnelle intégrale  $\vec{Rbd}$  est donc **une combinaison linéaire** des deux vecteurs constants  $\vec{F}_s$  et  $\vec{Rd}$ . Par conséquent, la couleur  $\vec{S}$  (cf. équ. (9)) est aussi une combinaison linéaire des vecteurs  $\vec{F}_s$  et  $\vec{Rd}$ , et est décrite par le modèle dichromatique développé par Klinker et Shaffer <KLIN-90>.

Le modèle dichromatique donne une description du nuage formé par les triplets couleur  $\vec{S}$  dans l'espace tridimensionnel couleur RVB. Klinker et Shaffer génèrent et exploitent des hypothèses géométriques sur la forme du nuage pour le décomposer en composantes diffuse et spéculaire, en faisant l'hypothèse que la fonction de Fresnel est équirépartie le long du spectre (spéculaire de même couleur que la source). Une étude similaire a été présentée par Lee et Bajcsy <LEE-92> : la forme et la composition des nuages de couleur sont analysés dans un espace de couleur pour des sources lumineuses étendues et des surfaces très rugueuses. La forme du nuage n'est plus alors, comme Shafer l'a décrite <SHAF-90>, un "T" penché composé des deux directions diffuse  $\vec{Rd}$  et spéculaire  $\vec{F}_s$ , mais un "P" penché. En effet, les triplets couleur spéculaire variant en fonction de la géométrie, ils forment dans l'espace couleur un **plan** et non plus une direction spéculaire  $\vec{F}_s$ .

Nous proposons, dans la section suivante, une approche similaire pour décrire le nuage que forme **les triplets de réflectance bidirectionnelle intégrale dans l'espace tridimensionnel des réflectances**. Disposant de la géométrie  $(l, \vec{L}, \vec{V}, \vec{N})$ , nous ne posons aucune contrainte quand à la position de la source et de l'observateur (éloignés ou proches de la surface) contrairement à l'approche de Klinker et Shaffer. De plus, notre analyse portant sur la réflectance de la surface et non sur sa couleur, nous ne faisons pas l'hypothèse que la fonction de Fresnel est équirépartie le long du spectre contrairement à l'approche de Lee et Bajcsy.

## 2.2. ANALYSE DE LA RÉFLECTANCE

Les triplets de réflectance  $Rbd_k$  déduits des données 3D et couleur (cf. équ. (10)) forment une nuée de points dans l'espace tridimensionnel des réflectances. L'analyse en composantes principales permet de décrire le nuage de réflectance par un ellipsoïde dont l'étendue et l'orientation sont déterminées par les valeurs propres et vecteurs propres de la matrice de covariances des réflectances  $Rbd_k$ . Dans les sous-sections suivantes nous faisons l'étude de la composition du nuage de réflectance, connaissant les propriétés physiques de la scène, ce qui nous permet de distinguer les deux modes de réflexion diffus et spéculaire.

### 2.2.1. Représentation des données de réflectance

Pour une surface ne présentant que de la **réflexion diffuse** (cf fig. 3), sa réflectance est constante quelle que soit la géométrie d'illumination (loi de Lambert). Dans l'espace tridimensionnel des réflectances, les triplets de réflectance  $Rbd_k$  d'un tel objet forment un nuage tridimensionnel compact (cf. fig. 4), théoriquement réduit à un point (terme constant). L'analyse en composantes principales montre que ce nuage présente des valeurs propres faibles, centre la valeur théorique, et de rayon l'écart type, dans l'espace des réflectances, du bruit de la caméra.

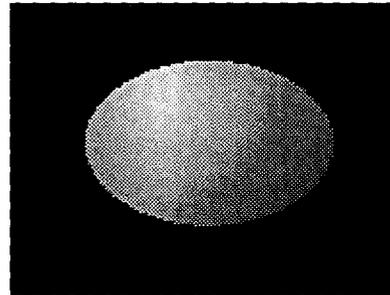


Figure 3. – Image d'une surface lambertienne.

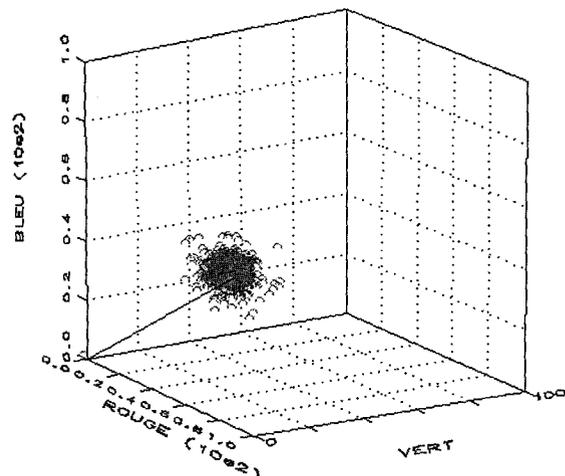


Figure 4. – Nuage de réflectance diffuse.

Pour une surface ne présentant que la **réflexion spéculaire** (cf. fig. 5), la réflectance bidirectionnelle dépend de la géométrie, et tend à augmenter quand la normale  $\vec{N}$  s'approche de la direction spéculaire  $\vec{H}$ . Dans l'espace tridimensionnel des réflectances, les triplets de réflectance forment, pour un angle  $\theta$  entre les directions  $\vec{L}$  et  $\vec{V}$  constant, un nuage concentré autour de la direction spéculaire  $\vec{F}_s$  (cf. fig. 6). Dans le cas de données théoriques, donc non bruitées, les triplets de réflectance forment un segment de droite. L'analyse en composantes principales du nuage de réflectance ne présente qu'une valeur propre dominante. Le premier vecteur propre décrit l'orientation du nuage. Le long de cette direction, la variation de la réflectance traduit les variations géométriques de la surface. Le long des directions perpendiculaires au premier vecteur propre, les variations des triplets de réflectance sont dues au bruit. assimilera le nuage spéculaire à un cylindre le premier vecteur propre, et de rayon l'écart type du bruit de la caméra.

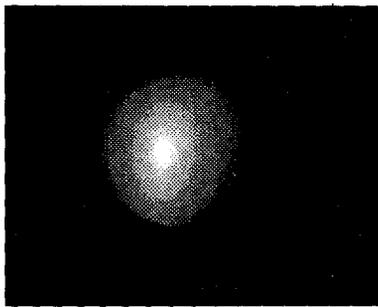


Figure 5. – Image d'une surface uniquement spéculaire.

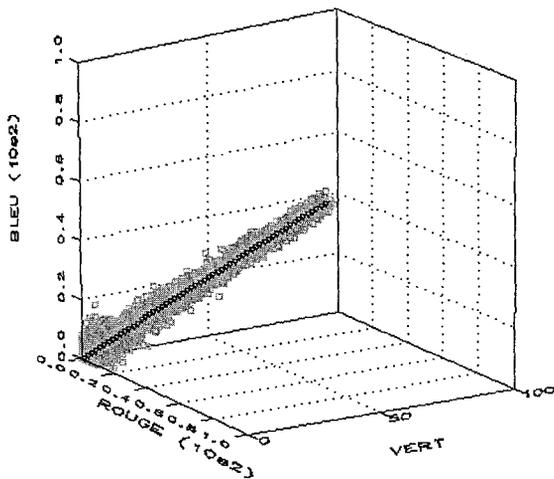


Figure 6. – Nuage de réflectance spéculaire.

Dans le cas général d'une **surface mixte** (cf. fig. 7), le nuage de réflectance est constitué des deux réflexions, diffuse et spéculaire (cf. fig. 8). La composante diffuse étant constante, la dispersion du nuage est due uniquement à la composante de réflexion spéculaire. L'analyse en composantes principales montre que, pour un angle  $\theta$  constant, le nuage ne présente qu'une valeur propre dominante. Les mêmes remarques que pour la réflexion spéculaire seule

peuvent encore être faites. **On assimilera le nuage à un cylindre**, de direction le premier vecteur propre, de rayon l'écart type du bruit de la caméra, et ayant pour base les triplets de réflectance diffuse qui forment une sphère diffuse. La connaissance a priori de la composition du nuage de réflectance nous permet alors de séparer les deux composantes, diffuse et spéculaire.

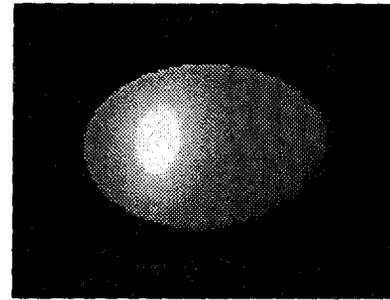


Figure 7. – Image d'une surface mixte.

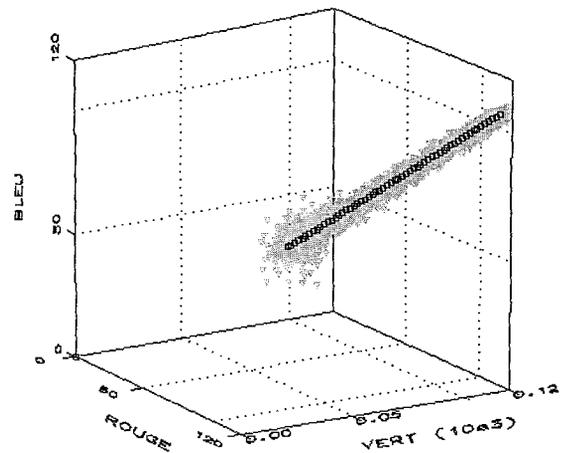


Figure 8. – Nuage de réflectance mixte.

### 2.2.2. Séparation des composantes diffuse et spéculaire

L'extraction de la réflectance diffuse revient à séparer, du nuage de réflectance, la sphère diffuse de centre la base du cylindre et de rayon l'écart type du bruit de la caméra. A l'intérieur même de cette sphère, la réflectance reste une combinaison de la réflectance interne, du bruit de la caméra et de la réflectance spéculaire. On ne peut se soustraire au bruit de la caméra, mais on peut minimiser la composante spéculaire. Les points de la surface pour lesquels la composante spéculaire est très faible vérifient tous une condition géométrique : la valeur de l'angle  $\alpha$  entre  $\vec{N}$  et  $\vec{H}$  est grande. A l'intérieur de la sphère diffuse, on utilisera cette contrainte pour séparer les triplets de réflectance diffuse des triplets de réflectance spéculaire.

Les triplets de réflectance spéculaire se déduisent alors très simplement en soustrayant les triplets de réflectance diffuse du nuage de réflectance. Cela revient à translater le nuage de

réflectance de telle sorte que sa base (correspondant aux valeurs minimum de la réflectance) soit en l'origine de l'espace des réflectances.

L'analyse de la composition du nuage de réflectance bidirectionnelle intégrale dans l'espace des réflectances permettant de séparer les deux composantes diffuse et spéculaire, nous développons, dans la section suivante, une méthode d'estimation des paramètres diffus et spéculaires.

### 3. Estimation des paramètres du modèle

La détermination des paramètres caractéristiques de la surface dans le modèle d'éclairage de Torrance et Sparrow s'opère en deux étapes : l'estimation de la réflectance diffuse, puis l'estimation des paramètres de la réflexion spéculaire. Nous étudions d'abord le cas d'une surface diffuse puis d'une surface mixte, en section 3-1 et 3-2. Le cas de l'estimation complète des paramètres du modèle de Torrance et Sparrow est présenté en section 3-3.

#### 3.1. MODÈLE DE LAMBERT

Dans le cas d'une surface lambertienne, la réflectance bidirectionnelle se résume à un terme constant indépendant de la géométrie d'illumination. Une première estimation de la réflectance est déterminée par la valeur moyenne du nuage. On affine l'estimation en éliminant les triplets de réflectance situés en dehors de la sphère centrée en ce point et de rayon l'écart type du bruit de la caméra. Pour traiter des mesures réelles, il faut évaluer au préalable les caractéristiques du bruit du dispositif d'acquisition.

#### 3.2. MODÈLE DE TORRANCE ET SPARROW

Le modèle de Torrance et Sparrow décrit les surfaces mixtes et donne une expression de la réflectance bidirectionnelle intégrale (cf. équ. (12)), dans laquelle les paramètres connus sont les éléments de la géométrie. Par conséquent, l'atténuation géométrique  $G()$  est entièrement déterminée puisque son expression ne dépend que de la géométrie (cf. équ. (6)). Nous regroupons les termes géométriques en posant :

$$B(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N}) = \frac{G(\vec{L}, \vec{V}, \vec{N})}{(\vec{N} \cdot \vec{V})(\vec{N} \cdot \vec{L})}$$

En tenant compte des relations de trigonométrie sphérique, les relations dépendant des directions  $\vec{N}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{L}$  et  $\vec{V}$  peuvent s'exprimer en fonction des angles  $\alpha, \beta, \theta$  formés respectivement par les directions  $\vec{N}$  et  $\vec{H}$ ,  $\vec{N}$  et  $\vec{L}$ ,  $\vec{L}$  et  $\vec{H}$  (cf. fig. 1). En désignant

par la suite la géométrie à l'aide des angles  $(\alpha, \beta, \theta)$ , l'équation (12) à résoudre devient alors :

$$Rbd_k(\alpha, \beta, \theta) = Rd_k + B(\alpha, \theta, \beta)D(\alpha, m)F_{s_k}(\theta). \quad (14)$$

où les caractéristiques intrinsèques de la surface à estimer sont la réflectance diffuse  $Rd_k$ , la Fonction de Fresnel  $F_{s_k}()$  et le coefficient de rugosité de la surface  $m$ . La fonction de Fresnel dépend de la géométrie (angle  $\theta$ ) et le coefficient de rugosité est un paramètre de la fonction de distribution des facettes  $D()$  que l'on modélise ici par une Gaussienne, comme le propose Torrance et Sparrow <TORR-67> (cf. équ. (5)).

On estime les paramètres du modèle en deux étapes : en premier la réflectance diffuse  $Rd_k$ , puis les paramètres  $m$  et  $F_k(\theta)$  de la réflectance spéculaire. Le terme géométrique  $B(\alpha, \theta, \beta)$  est, lui, complètement déterminé par la connaissance de la géométrie. Cette estimation en deux étapes nécessite une décomposition du nuage de réflectance en réflectance diffuse et réflectance spéculaire. Nous avons pour cela étudié l'aspect et la composition du nuage de réflectance pour divers coefficients de rugosité ( $m$  allant de 1 à 20).

Dans le cas de surface à fort coefficient de rugosité  $m$  (surface lisse), le lobe spéculaire est étroit : il décrit une croissance brutale de la luminance dans les régions spéculaires (cf. fig. 9). On peut alors réellement négliger la réflectance spéculaire pour des angles  $\alpha$  supérieur à 60 degrés.

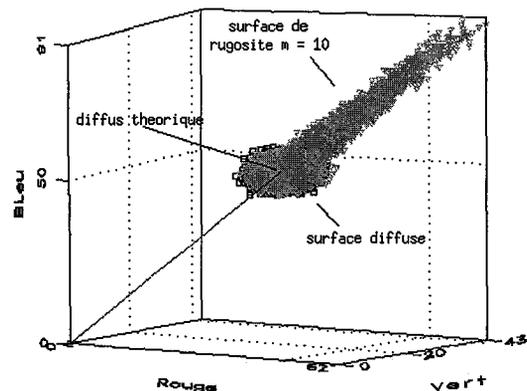


Figure 9. - Nuage de réflectance,  $m = 10$ .

Dans le cas de surface à coefficient de rugosité  $m$  faible (surface rugueuse), le lobe spéculaire est large et de faible croissance (cf. fig. 10). Pour des angles  $\alpha$  supérieurs à 60 degrés, la valeur de la réflectance spéculaire est faible mais non négligeable. Par conséquent le critère géométrique de séparation des nuages diffus et spéculaire ( $\alpha > 60$  degrés) n'est plus valable.

Dans le cas de surfaces ayant un faible coefficient de rugosité, seule **une résolution de l'équation globale de la réflectance permet d'estimer correctement la réflectance diffuse et de décomposer le nuage de réflectance**. Une méthode pour une telle résolution est présentée dans la section suivante.

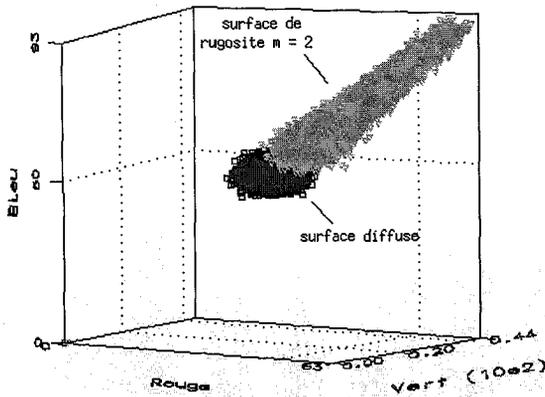


Figure 10. – Nuage de réflectance,  $m = 2$ .

### 3.3. Méthode d'estimation

#### \* Première étape :

Nous estimons la réflectance diffuse dans les conditions où elle est la composante majoritaire de la réflectance pour les triplets de réflectance satisfaisant le critère :  $\alpha > 60$  degrés. Sachant que certains de ces triplets restent une combinaison de réflectance diffuse et de réflectance spéculaire, on résout le système complet (14). En regroupant les paramètres spéculaires :

$$K_k(\alpha, m, \theta) = D(\alpha, m)F_{s_k}(\theta) \quad (15)$$

le système (14) devient :

$$Rbd_k(\alpha, \beta, \theta) = Rd_k + B(\alpha, \theta, \beta)K_k(\alpha, m, \theta). \quad (16)$$

où le terme géométrique  $B()$  est entièrement défini par les données 3D.

Pour résoudre ce système sans introduire de biais, particulièrement pour des données très bruitées, nous allons le subdiviser en sous-systèmes dans chacun desquels le terme spéculaire  $K_k()$  pourra être considéré comme constant. On peut vérifier que les variations du terme  $D(\alpha, m)$  sont négligeables pour  $60 < \alpha < 90$ . Ayant déjà pris la condition géométrique ( $\alpha > 60$ ) pour la recherche du diffus, il nous reste plus qu'à déterminer l'incidence des variations de la fonctions de Fresnel intégrale  $F_{s_k}(\theta)$  sur le terme spéculaire, pour  $\theta$  variant de 0 à 90 degrés, et pour différents matériaux dont. Un exemple de fonction de Fresnel intégrale est présenté figure 11.

On en déduit que la fonction de Fresnel peut être considérée comme constante pour des angles  $\theta$  inférieurs à 40 degrés, qu'elle croît faiblement pour des angles  $\theta$  entre 40 et 60 degrés et ne peut plus donc être négligée dans l'expression (16) à résoudre, et enfin présente une croissance rapide pour des angles  $\theta$  supérieurs à 60 degrés, pour lesquels la surface présente une forte composante spéculaire.

En pratique, on va effectuer un tri des triplets de réflectance selon la valeur de leur angle  $\theta$  associé :

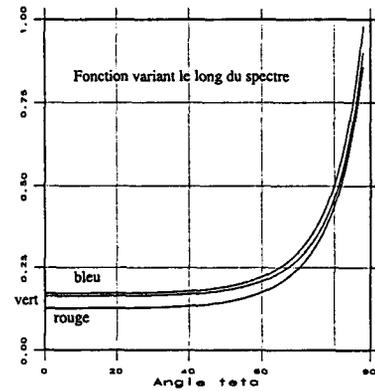


Figure 11. – Fonction de Fresnel intégrale.

– Pour l'ensemble des triplets dont l'angle  $\theta$  est inférieur à 40 degrés (et  $\alpha > 60$ ),  $K_k()$  est constant, on résout alors le système (16) directement.

– Pour l'ensemble des triplets vérifiant  $40 < \theta < 60$  ( $\alpha < 60$ ), on discrétise linéairement l'angle  $\theta$  en valeurs  $\theta_c$ . Pour un pas de discrétisation suffisamment faible, les termes intégraux de la fonction de Fresnel sont quasi-constants :  $F_{s_k}(\theta_c) \simeq F_{k,c}$ . Pour chaque  $\theta_c$ , le sous-système (16) à résoudre devient, en posant  $B_c(\alpha, \beta) = B(\alpha, \theta_c, \beta)$  et  $K_{k,c}(\alpha, m) = K_k(\alpha, m, \theta_c)$  :

$$Rbd_{k,c}(\alpha, \beta) = Rd_k + B_c(\alpha, \beta)K_{k,c}(\alpha, m). \quad (17)$$

On estime alors aux moindres carrés les paramètres  $Rd_k$  et  $K_{k,c}(\alpha, m)$ . On déduit finalement l'estimée  $Rdes_k$  de la réflectance intégrale diffuse pour chaque canal  $k$  en prenant la moyenne des  $Rd_{k,c}$ .

#### \* Seconde étape :

Nous cherchons à estimer les paramètres de la réflexion spéculaire :  $m$  (coefficient de rugosité) et  $F_{s_k}(\theta, m)$  (fonction de Fresnel intégrale). Pour cette estimation, et contrairement à la première étape, la valeur de la composante spéculaire doit être importante, ce qui correspond à un angle  $\alpha < 60$  degrés. Comme précédemment, nous allons aussi considérer la discrétisation de  $\theta$  et estimer les paramètres spéculaires à  $\theta_c$  constant. L'estimée  $Rdes_k$  étant connue, on en déduit la réflectance spéculaire  $Rs_{k,c}(\alpha, \beta)$  :

$$Rs_{k,c}(\alpha, \beta) = Rbd_{k,c}(\alpha, \beta) - Rdes_k$$

D'autre part, on déduit des équations (17) et (15) l'expression suivante de  $Rs_{k,c}()$  :

$$Rs_{k,c} = B_c(\alpha, \beta)D(\alpha, m)F_{s_{k,c}}$$

qui devient en remplaçant la distribution  $D()$  des microfacettes de la surface par son expression (5) :

$$Rs_{k,c} = B_c(\alpha, \beta)\exp^{-m_c(\alpha^2)}F_{s_{k,c}}$$

Une linéarisation de l'expression du terme spéculaire est obtenue par une transformation logarithmique :

$$\log R_{s_{k,c}} = -m_c(\alpha^2) + \log F_{s_{k,c}} + \log B_c(\alpha, \beta)$$

que nous noterons plus simplement :

$$lR_{s_{k,c}} = -m_c(\alpha^2) + lF_{s_{k,c}} + lB_c(\alpha, \beta). \quad (18)$$

Les inconnues  $m_c$  et  $F_{s_{k,c}}$  sont alors estimées par une résolution aux moindres carrés.

Dans le cas de données bruitées, pour réduire le biais de l'estimation, on effectue une analyse en composantes principales sur l'ensemble des triplets à  $\theta_c$  constant et on élimine ceux situés en dehors du cylindre de direction la direction principale du nuage spéculaire et de rayon l'écart-type du bruit de la caméra.

Par ailleurs, il faut pouvoir tenir compte des problèmes liés à la dynamique de la caméra. Ainsi, dans les fortes régions spéculaires ( $\alpha$  faible) où l'intensité atteint le seuil de saturation des capteurs, la caméra fournit une mesure tronquée de l'information couleur. Ces données sont donc rejetées. D'autre part, s'il reste un ensemble important d'angles  $\alpha$  de faible valeur, le système (18) peut être mal conditionné. Pour en améliorer la résolution numérique, on élimine également les triplets dont l'angle  $\alpha$  est inférieur à 10 degrés.

**En pratique, on résoud donc le système (18), à angle  $\theta_c$  constant, pour les triplets peu bruités vérifiant la condition 10 degrés  $< \alpha < 60$ .**

Le coefficient de rugosité estimé est la moyenne des coefficients  $m_c$  estimés. La fonction de Fresnel intégrale  $F_k(\theta)$  n'est reconstruite que partiellement à l'aide des coefficients intégraux estimés  $F_{s_{k,c}}$ , toutes les valeurs de  $\theta_c$  n'étant pas présentes dans les configurations géométriques mesurées.

## 4. Application à des images de synthèse

Pour évaluer cette méthode d'estimation nous avons implanté un module simple de synthèse d'images en couleur, selon une approche du type lancer de rayon <PERO-88, ROGE-88>, dont on peut régler interactivement les différents paramètres géométriques et spectraux. L'objet considéré pour générer les images de synthèse est un ellipsoïde centré en (30,40,80), de rayon (100,50,50). La caméra est en (0,0,500), et la source ponctuelle blanche en (-200,0,200). Dans cette exemple, la caméra et la source ponctuelle sont proches de l'objet, ce qui correspond à une configuration réaliste pour un système d'acquisition par triangulation active. Nous calculons par l'équation (10), en chaque point échantillonné de l'objet, le triplet de réflectance intégrale  $Rbd_k$  et la géométrie d'illumination ( $l, \vec{L}, \vec{N}, \vec{V}, \vec{H}$ ).

### 4.1. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE LAMBERTIEN

Deux types de simulations ont été effectuées avec le modèle lambertien pour générer des images de synthèse :

- la première considère comme connu le triplet de réflectance bidirectionnelle intégrale diffuse  $Rd_k$ ,  $k=1,2,3$ ;
- la seconde utilise des fonctions de réflectance spectrale  $Rd(\lambda)$ . Nous disposons pour cela de fonctions de répartition spectrale de pigments fournies par la "National Gallery" lors du Projet Vasari <SCHM-90>.

#### 4.1.1. Première simulation

Nous avons généré trois surfaces ayant chacune une couleur dominante : rouge ( $Rd = 0.6, 0.3, 0.3$ ), verte ( $Rd = 0.3, 0.6, 0.3$ ), et bleue ( $Rd = 0.3, 0.3, 0.6$ ). Notre méthode d'estimation par l'étude du nuage de réflectance nous donne les estimées présentées dans le tableau 1. Chaque ligne contient l'estimée d'une surface pour différents niveaux de bruits. Les valeurs du bruit choisies correspondent à des valeurs typiques mesurées sur des caméras couleur semi-professionnelles.

Nous obtenons dans tous les cas étudiés, même dans le cas le plus mauvais où tous les canaux sont très bruités ( $\sigma_k = 0.04$ ,  $k = 1,2,3$ ), une bonne estimation de la réflectance diffuse dans les trois canaux. L'erreur relative maximum commise dans l'estimation des réflectances est de 0.7%.

#### 4.1.2. Seconde simulation

Quatre fonctions de réflectance bidirectionnelle spectrale diffuse (cf. fig. 12) ont été utilisées pour générer quatre surfaces lambertiennes. Elles correspondent aux pigments suivants utilisés en peinture : cobalt violet, cerulean bleu, malakite, et plomb jaune.

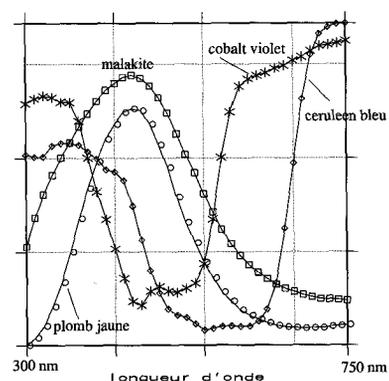


Figure 12. – Fonctions de réflectance bidirectionnelle diffuse.

Nous estimons les triplets de réflectance diffuse  $Rd_k$  et les comparons aux valeurs théoriques de la réflectance bidirectionnelle

**Tableau 1. – Réflectance diffuse estimées (première simulation).**

surface rouge					
$\vec{R}d = (0.6, 0.3, 0.3)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.6003	0.2998	0.3002
0.01	0.04	0.01	0.5999	0.2999	0.3001
0.01	0.01	0.04	0.6008	0.3000	0.3000
0.04	0.04	0.04	0.6011	0.2977	0.2987

surface verte					
$\vec{R}d = (0.3, 0.6, 0.3)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.2989	0.6004	0.3000
0.01	0.04	0.01	0.3001	0.5988	0.3008
0.01	0.01	0.04	0.2998	0.6000	0.2984
0.04	0.04	0.04	0.3013	0.6009	0.3002

surface bleu					
$\vec{R}d = (0.3, 0.3, 0.6)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.3002	0.2998	0.6005
0.01	0.04	0.01	0.2997	0.3019	0.5999
0.01	0.01	0.04	0.2998	0.3019	0.6000
0.04	0.04	0.04	0.3010	0.3009	0.5985

**Tableau 2. — Réflectance diffuse estimée (seconde simulation).**

surface plomb jaune					
$\vec{R}d = (0.2609, 0.4029, 0.3147)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.2625	0.4021	0.3149
0.01	0.04	0.01	0.2630	0.4024	0.3151
0.01	0.01	0.04	0.2605	0.4000	0.3143
0.04	0.04	0.04	0.2617	0.4011	0.3144

surface cerulean bleu					
$\vec{R}d = (0.1747, 0.2019, 0.5085)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.1741	0.2016	0.5197
0.01	0.04	0.01	0.1738	0.2089	0.5070
0.01	0.01	0.04	0.1737	0.2029	0.5100
0.04	0.04	0.04	0.1752	0.2010	0.5075

surface cobalt					
$\vec{R}d = (0.3229, 0.2267, 0.5485)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.3236	0.2268	0.5482
0.01	0.04	0.01	0.3222	0.2275	0.5488
0.01	0.01	0.04	0.3230	0.2265	0.5474
0.04	0.04	0.04	0.3234	0.2261	0.5473

surface malakite					
$\vec{R}d = (0.4002, 0.5148, 0.5399)$					
écart type du bruit			réflectance estimée		
$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
0.04	0.01	0.01	0.4019	0.5152	0.5401
0.01	0.04	0.01	0.4002	0.5128	0.5400
0.01	0.01	0.04	0.3991	0.5137	0.5388
0.04	0.04	0.04	0.4003	0.5150	0.5406

intégrale que nous évaluons par son expression exacte (cf. équ. (8)). Le tableau 2 présente pour chaque surface les valeurs des réflectances diffuses intégrales théoriques suivies, dans les lignes suivantes, des valeurs estimées pour différents niveaux de bruits.

On remarque, comme précédemment, que la reconstruction du terme de réflectance intégrale pour chaque canal converge bien pour toutes les surfaces, même dans le cas de données très bruitées où l'erreur relative maximale est de 0.81%.

#### 4.2. ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE TORRANCE-SPARROW

Les paramètres du modèle de Torrance et Sparrow représentant des caractéristiques intrinsèques physiques de la surface, nous avons donc pris soin, lors de la synthèse, d'utiliser des données réelles : les fonctions de réflectance diffuse sont celles précédemment utilisées et présentées à la figure 12. Les images d'intensité (canal rouge) pour le plomb jaune et pour différents coefficients de rugosité ( $m=1,5,10$ ) sont présentées aux figures 13, 14 et 15. La fonction de Fresnel spectrale considérée a été déterminée à partir de l'équation (4) en se donnant comme indice de réfraction spectrale  $n(\lambda)$  celui du blanc de plomb.

#### \* Première étape :

Nous commençons par estimer les réflectances diffuses en résolvant le système (17), et en tenant compte des deux critères géométriques :

- angle  $\alpha$  entre  $\vec{H}$  et  $\vec{N}$  supérieur à 60 degrés,
- angle  $\theta$  soit inférieur à 40 degrés, soit appartenant à l'intervalle  $[40, 60]$  degrés, auquel cas on résout l'équation (17) à  $\theta$  constant.

Le tableau 3 présentent pour chaque matériau et pour deux valeurs du coefficient de rugosité ( $m = 1, 10$ ) les réflectances intégrales diffuses théoriques suivies des valeurs estimées, pour chaque canal (R, V, B). Seul le résultat de l'estimation dans le cas le plus bruité ( $\sigma_k = 0.04, k=1,2,3$ ) est présenté. L'erreur relative d'estimation est inférieur pour toutes les surfaces à 1%.

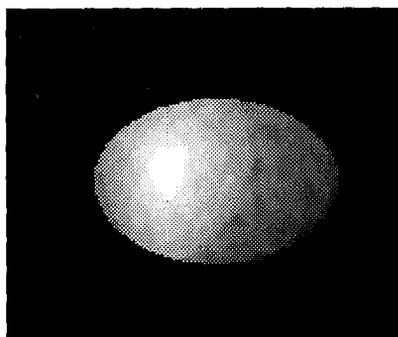


Figure 13. – Image d'intensité,  $m = 1$ .

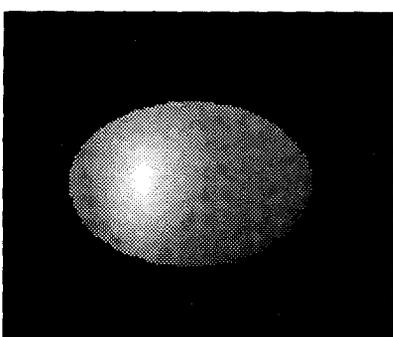


Figure 14. – Image d'intensité,  $m = 5$ .

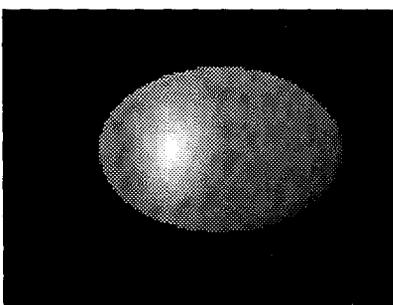


Figure 15. – Image d'intensité,  $m = 10$ .

**\* Seconde étape :**

L'estimation des paramètres spéculaires  $m_c$  et  $F_{sk}$ ,  $c$  s'opère en plusieurs étapes :

– On sépare d'abord le nuage spéculaire en éliminant tous les triplets de réflectance précédemment utilisés pour estimer la réflectance diffuse.

– Pour éviter les erreurs dues à la saturation de la caméra nous rejetons tous les triplets de réflectance correspondant au maximum d'intensité dans l'image couleur ou ceux dont l'angle  $\alpha$  associé est inférieur à 10 degrés.

– L'analyse en composantes principales du nuage spéculaire ainsi créé nous fournit la direction principale du nuage.

Tableau 3. – Estimation des réflectances diffuses.

Plomb jaune					
$\vec{R}d = ( 0.2609, 0.4029, 0.3147 )$					
m = 1			m = 10		
0.2611	0.4023	0.3150	0.2610	0.4022	0.3146
Cerulean bleu					
$\vec{R}d = ( 0.1747, 0.2019, 0.5085 )$					
m = 1			m = 10		
0.1748	0.2001	0.5060	0.1733	0.2031	0.5063
Cobalt					
$\vec{R}d = ( 0.3229, 0.2267, 0.5485 )$					
m = 1			m = 10		
0.3232	0.2270	0.5488	0.3241	0.2266	0.5490
Malakite					
$\vec{R}d = ( 0.4002, 0.5148, 0.5399 )$					
m = 1			m = 10		
0.4003	0.5150	0.5406	0.4003	0.5142	0.5406

– Nous estimons alors les paramètres spéculaires en considérant les points dont le triplet de réflectance spéculaire appartient au cylindre de rayon égal à l'écart-type du bruit de la caméra, et de direction le premier vecteur propre du nuage.

Les coefficients de rugosité estimés pour chaque canal sur des données bruitées ( $\sigma_k = 0.04$ ,  $k=1,2,3$ ) sont présentés dans le tableau 4. On y constate que les valeurs estimées varient très peu d'un canal à l'autre. Les résultats sont cependant meilleurs pour de forts coefficients de rugosité (surfaces lisses). Cette estimation reste cependant sensible au bruit puisque d'autres tests ont montré que l'erreur relative d'estimation du coefficient de rugosité ne dépasse pas 0.32% pour des données peu bruitées, alors qu'elle atteint 1.71% pour des données très bruitées comme celles présentées au tableau 4.

La fonction de Fresnel estimée dans chaque canal, dépend de l'angle  $\theta$ . Pour cela nous n'en reconstruisons qu'une portion selon

Tableau 4. – Coefficients de rugosité estimés.

Plomb jaune					
m = 1			m = 10		
0.989	0.997	0.994	10.02	9.93	9.97
Cerulean bleu					
m = 1			m = 10		
1.000	0.992	0.994	9.97	10.02	10.04
Cobalt					
m = 1			m = 10		
0.987	0.995	1.004	9.96	9.94	9.96
Malakite					
m = 1			m = 10		
1.000	0.992	0.994	10.04	10.02	10.04

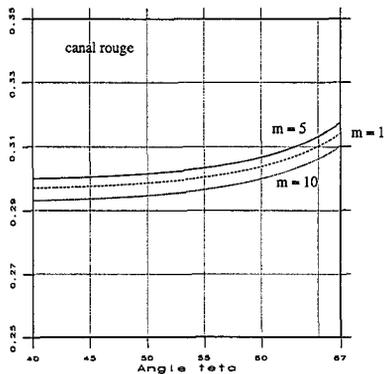


Figure 16. – Canal rouge.

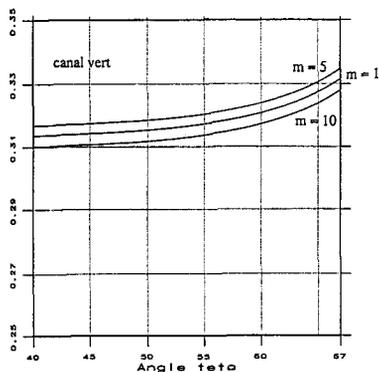


Figure 17. – Canal vert.

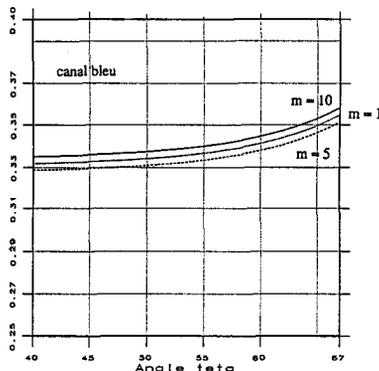


Figure 18. – Canal bleu.

la géométrie disponible. Nous comparons nos résultats avec la fonction de Fresnel intégrale théorique et ce pour des coefficients de rugosité variables. Les figures 16, 17, 18 présentent la fonction de Fresnel estimée dans le cas le plus bruité, respectivement pour le canal rouge, vert et bleu, et ce pour deux coefficients de rugosité ( $m = 1, 10$ ). On constate sur ces figures que l'erreur d'estimation est faible quelque soit le coefficient de rugosité, et que la Fonction de Fresnel est moins sensible au bruit que le coefficient de rugosité.

La fonction de Fresnel estimée dans chaque canal, dépend de l'angle  $\theta$ . Pour cela nous n'en reconstruisons qu'une portion selon la géométrie disponible. Nous comparons nos résultats avec la fonction de Fresnel intégrale théorique et ce pour des coefficients

de rugosité variables. Les figures 16, 17, 18 présentent la fonction de Fresnel estimée dans le cas le plus bruité, respectivement pour le canal rouge, vert et bleu, et ce pour deux coefficients de rugosité ( $m = 1, 10$ ). On constate sur ces figures que l'erreur d'estimation est faible quelque soit le coefficient de rugosité, et que la Fonction de Fresnel est moins sensible au bruit que le coefficient de rugosité.

### 4.3. CONCLUSION

Les tests effectués sur des images de synthèse montrent que l'approche que nous proposons pour estimer les paramètres d'un modèle d'éclairage permet d'estimer la réflectance diffuse de manière très satisfaisante, même si l'image est très bruitée. Cependant, la qualité de l'estimation des paramètres spéculaires dépend plus de la nature de la surface. Ainsi pour des surfaces peu rugueuses ayant une composante spéculaire très concentrée autour de la direction spéculaire, l'estimation est meilleure que dans le cas d'une surface très rugueuse, où l'estimation devient plus sensible au bruit. Cette estimation reste cependant bonne, pour des bruits de l'ordre de ceux rencontrés lors d'acquisitions réelles, quelle que soit la rugosité de la surface.

L'extension de cette méthode à des mesures réelles obtenues avec un système d'acquisition 3D-couleur nécessite la mise en oeuvre de procédures de calibration pour déterminer précisément l'ensemble des paramètres géométriques du système d'acquisition, les caractéristiques photométriques de la source ( $I(\lambda, \vec{L})$ ), et les caractéristiques électroniques (bruits de canal, réponses gamma) et colorimétriques de la caméra. L'ensemble complet de ces procédures a été développé dans le cadre de nos travaux <SOUA-93>.

### BIBLIOGRAPHIE

- <BARI-92> R. BARIBEAU, M. RIOUX, G. GODIN "Color modeling using a polychromatic laser range sensor", IEEE Trans. On Pattern Analysis And Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, Feb. 1992, pp. 263-269.
- <BAJC-90> R. BAJCSY, S.W. LEE, A. LEONARDIS, "Color image segmentation and color constancy", SPIE Vol. 1250, Perceiving, measuring and using color 1990, pp. 245-254.
- <BECK-63> P. BECKMANN, A. SPIZZOCHINO, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", New York : The MacMillan Company, 1963.
- <BLIN-77> J. BLINN, "Models for light reflection for computer synthesized pictures" Comp. graph., Vol. 11, No. 2, July 1977, pp. 192-198.
- <COOK-82> R.L. COOK and K.E. TORRANCE, "A reflectance model for computer graphics" ACM Tran. on Graph., Vol. 1, No. 1, Jan. 1982, pp. 7-24.
- <CYBE> CYBERWARE Laboratory Inc., 8 Harris Court, Monterey, CA 93940, USA
- <EBEL-89> R. EBEL, Y. DEMAZEAU, "Inférence de formes à partir des réflets : cas des surfaces planes et d'ordre 2", Rapport de Recherche LIFIA 93, Mai 1989.

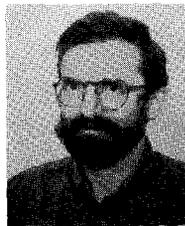
- <FRAN-70> M. FRANÇON, "Vibrations lumineuses, optique cohérente", Dunod université, 1970.
- <GERS-87> R. GERSHON, A.D. JEPSON, J.TSOTOS, "From RGB to surface reflectance : computing color constant descriptors in images", IJCAI, 1987, pp. 755-758.
- <HEAL-87> G. HEALEY, T.O.BINFORD, "The role and use of color in a general vision system", Image understanding workshop, feb 1987, pp. 599-613.
- <HORN-86> B. K. P. HORN, "Robot Vision", Cambridge, MA : MIT Press, 1986.
- <IKEU-91> K. IKEUCHI, K. SATO, "Determining reflectance properties of an object using range and brightness images", IEEE PAMI, Vol. 13, No. 11, Novembre 1991, pp. 1139-1153.
- <JORD-88> J. R. JORDAN, A. C. BOVIK, "Computational stereo vision using color", IEEE Control systems magazine, June 1988, pp. 31-36.
- <KLIN-90> G.J. KLINKER, S.A. SHAFFER, T. KANADE, "A physical approach to color image understanding", International Journal of Computer Vision, NO. 4, 1990, pp 7-38.
- <LEE-92> Sang Wook LEE, Ruzena BAJCSY, "Detection of specularity using colour and multiple views", Image and Vision Computing, Vol. 10, No 10, December 1992, pp. 643-653.
- <NAYA-91> S. K. NAYAR, K. IKEUCHI, T. KANADE, "Surface reflection : physical and geometrical perspectives", IEEE PAMI, Vol. 13, No. 7, July 1991, pp. 611-634.
- <PERO-88> B. PEROCHE, J. ARGENCE, D. GHAZANFARPOUR, D. MICHELUCCI, "La synthèse d'images", Ed. HERMES, 1988.
- <RIOU-93> M. RIOUX, T. BIRD, "White laser, Synced Scan", IEEE Computer Graphics & Applications, May 1993, pp. 15-17.
- <ROGE-88> David F. ROGERS, "Procedural elements for computer graphics", McGraw-Hill, 1985.
- <RUSH-90> H. E. RUSHMEIER, K. E. TORRANCE, "Extending the radiosity method to include specularly reflecting and translucent materials", ACM Trans. onGraphics, Vol. 9, No. 1, Jan. 1990, pp. 1-27.
- <SCHM-90> F. SCHMITT, Y. WU, H. MAITRE, JP. CRETTEZ, "Color correction for fine art paintings", Vasari project - Esprit II No 2649 - task 1.2 - Dec 1990.
- <SCHM-93> F. SCHMITT, Projet CAMILLE - Traitement tridimensionnel d'objets de Musées, Rapport de recherche, Mission de la Recherche et de la Technologie, Ministère de la Culture, février 1993.
- <SHAF-85> S.A. SHAFER, "Using color to separate reflection components", Color Research and appl., Vol 10, No 4, 1985, pp 210-218.
- <SHAF-90> S.A.SHAFFER, T. KANADE, G.J. KLINKER, C.L. NOVAK, "Physics-based models for early vision by machine", in *Perceiving, Measuring, and Using Color*, SPIE. Vol. 1250, 1990, pp. 222-235.
- <SILL-89> F. SILLON, C. PUECH, "A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection", Computer Graphics, Vol. 23, No. 3, July 1989, pp. 335-344.
- <SILL-91> F. SILLON, J. R. ARVO, S. H. WESTIN, D. P. GREENBEG, "A global illumination solution for general reflectance distributions", Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, July 1991, pp. 187-196.
- <SOUA-93> F. SOUAMI, "Traitement de la réflectance des objets dans un système d'acquisition 3D couleur", Thèse, Telecom Paris, Dec 1993.
- <TELL-89> P. TELLIER, K. BOUATOUCH, "Vers un modèle de clairement réaliste", Rapport interne IRISA No 464, Avril 1989.
- <TORR-67> K.E. TORRANCE, E.M SPARROW, "Theory for off-specular reflection from roughned surfaces", Journal of the optical society of America, Vol. 57, No 9, sept. 1967, pp. 1105-1114.
- <WOLF-91> L. B. WOLF, T. E. BOULT, "Constraining object features using a polarization reflectance model", IEEE PAMI, Vol. 13, No 7, July 1991, pp. 635-657.
- <WOOD-78> R.J WOODHAM, "Photometric stereo : A reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity", Proc. SPIE, vol. 155, 1978, pp. 136-143.
- <WAND-87> B. A. WANDELL, "The synthesis and analysis of color image", IEEE PAMI, Vol.9, No.1, January 1987, pp.2-13.
- <WYSC-82> G. WYSZECKI, W.S. STILES, "Color Science : concepts and methods". 2nd ed., Wiley, New York, 1982.

## LES AUTEURS

### Feryel SOUAMI

Feryel Souami a présenté une thèse de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications en 1993 sur le traitement de la réflectance des objets dans un système d'acquisition 3D couleur. Cet article présente le cadre théorique dans lequel cette étude s'est située.

### Francis SCHMITT



Francis Schmitt est ingénieur ECL. Il a soutenu une thèse de docteur ingénieur en physique à l'Université Paris VI en 1979 avec une étude du métamérisme en colorimétrie. Il a rejoint l'ENST en 1973 où il est actuellement Professeur et Responsable du groupe Image. Ses pôles d'intérêts scientifiques sont assez larges puisqu'ils recouvrent les domaines de la vision artificielle, de la modélisation 3D, de l'analyse et de la synthèse d'image et du traitement de l'information couleur.

*Manuscrit reçu le 3 octobre 1994.*