

# Modèle empirique pour la prédiction de spécularité : application au retexturing

Alexandre Morgand<sup>1,2</sup>

Mohamed Tamaazousti<sup>1</sup>

Adrien Bartoli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Vision & Ingénierie des Contenus - Point Courrier 94, Gif-sur-Yvette, F-91191, France

<sup>2</sup> ISIT - UMR6284 CNRS / Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand, France

{alexandre.morgand | mohamed.tamaazousti}@cea.fr, adrien.bartoli@gmail.com

## Résumé

Dans ce document nous proposons une solution au problème de prédiction de spécularité en précisant son importance en vision par ordinateur. Nous présentons un nouveau modèle empirique, représenté par une quadrique virtuelle dont la projection correspond aux spécularités dans l'image, afin de répondre à cette problématique. Nous partons de l'observation que les spécularités sont de forme conique sur une surface planaire et donc qu'il existe une quadrique virtuelle dont la projection correspond à ces spécularités (coniques). Ce modèle a été testé sur des séquences de synthèse et réelles afin de mesurer la précision de notre prédiction de spécularités. Enfin, nous présentons un exemple d'application nécessitant une prédiction de spécularité : le retexturing dynamique.

## Mots Clef

Modèle empirique, réflexion spéculaire, Phong, Blinn-Phong, prédiction de spécularité, retexturing, quadrique conique, temps réel.

## Abstract

In this paper, the unsolved problem of specularities prediction is presented by detailing its importance in computer vision. We present a new empirical model, represented by a virtual quadric whose projection fits specularities in the image, to solve this issue. We observe that specularities have a conic shape on planar surfaces which implies that a quadric, whose projection fits the specularities (conic), exists. This model is tested on synthetic and real sequences to evaluate the accuracy of our specularities prediction method. Additionally, we present an application requiring specularities prediction : dynamic retexturing.

## Keywords

Empirical model, specularities, Phong, Blinn-Phong, specularities prediction, retexturing, quadric, conic, real-time.

## 1 Introduction

Le phénomène photométrique des spécularités est souvent présent dans les images. En effet, ces éléments se manifestent sur une surface lorsque les imperfections de celle-ci

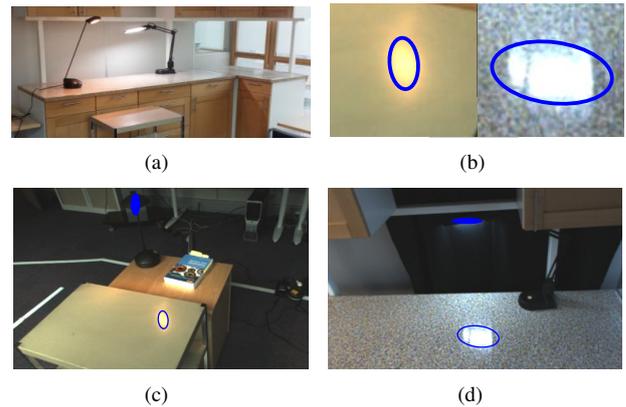


FIGURE 1 – Empiriquement, nous observons qu'une spécularité présente une forme conique. Nous la prédisons en projetant une quadrique virtuelle fixe incluant les propriétés de lumière et de matériau. Cette figure présente des exemples de reconstruction de quadrique (ellipsoïde bleue) pour deux types de lumière (ampoule (c) et néon (d)) et de matériaux (table en fer (c) et plan de travail d'une cuisine (d)). Une fois notre modèle reconstruit, nous l'utilisons pour prédire les spécularités pour des points de vue inconnus en la projetant en conique (ellipses bleues). (b) illustre un gros plan de la prédiction dans les séquences respectives.

sont plus petites que la longueur d'onde incidente. Dans ces conditions, la lumière est complètement réfléchiée sous une forme spéculaire. Si cette lumière réfléchiée rencontre l'objectif de la caméra, une spécularité est créée dans l'image. De ce fait, ces éléments sont importants dans plusieurs domaines. En vision par ordinateur et traitement d'image, elles provoquent une augmentation brusque de l'intensité de l'image ce qui a pour effet de perturber les algorithmes de détection ou de suivi 2D/3D, de localisation de caméra ou encore de reconstruction 3D. Cependant, si on les considère comme des primitives de localisation, leur présence apportent des informations pertinentes permettant une meilleure estimation de la profondeur d'une scène et donc de sa géométrie permettant d'améliorer la localisation de caméra [16, 19, 29], la reconstruction 3D [7, 27] et l'analyse de matériaux d'une scène [3, 21, 22, 28]. En

réalité augmentée (RA) ou en infographie, ces primitives permettent d'augmenter significativement le réalisme du rendu des applications [5, 8, 9, 11, 12, 14, 25, 26].

Afin de réaliser au mieux ces applications, il est intéressant de pouvoir prédire les spécularités dans une scène pour un point de vue donné.

Par observation de la forme de la spécularité sur une surface planaire, il semble intéressant de modéliser cet élément par une conique. De plus, nous savons qu'une conique est issue de la projection d'une quadrique sur un plan. À partir de ces éléments, est-il possible de reconstruire une quadrique fixe dont la projection correspond aux spécularités pour chaque point de vue? Dans ce cas, ce modèle représenterait un lien entre le phénomène photométrique des spécularités (lumières et matériaux) et la géométrie multi-vues [10].

Nous proposons un modèle empirique permettant de prédire facilement la position et la forme des spécularités pour de nouveaux points de vue. Ce modèle est composé d'une quadrique qui inclue les propriétés des lumières et des matériaux de la scène. Cette quadrique est reconstruite à partir de chaque conique associée à une spécularité observée sur une surface planaire, pour un point de vue donné. Dans cet article, nous présentons les différents modèles physiques utilisés en général en vision par ordinateur et analysons leur capacité à prédire le phénomène complexe des spécularités. Nous travaillons essentiellement sur des surfaces planaires car il est facile de retrouver ce type de surface dans une scène. L'extension de ce modèle pour des surfaces plus complexe requiert une étude plus approfondie.

Notre modèle est présenté dans la section 3. Son estimation est développée dans la section 4 en comparant différentes approches de l'état de l'art. Notre modèle et sa capacité à prédire les spécularités ont été testés sur des séquences de synthèse et réelles comprenant des sources de lumière de type ampoule et néon dans la section 5. Nous présentons une application de la prédiction de spécularité sur des séquences réelles pour du retexturing de matériaux dans la section 6.

## 2 État de l'art

La prédiction de spécularité reste un problème difficile. En effet, les spécularités représentent un phénomène photométrique complexe décrit par une taille, une position, une forme et une intensité associée. De plus, ces éléments sont fortement influencés par la caméra (sa pose et sa fonction de réponse), la scène comprenant sa géométrie et les matériaux associés (réflectance et rugosité) et les sources de lumière (position, forme, intensité, isotropie ou anisotropie). À notre connaissance, aucune méthode de l'état de l'art ne permet la prédiction de spécularité. En effet, l'approche naturelle serait d'estimer un modèle physique de la scène avec les paramètres associés : matériaux (réflectance et rugosité) et lumières (forme, pose, intensité et atténuation). Contrairement à la localisation de caméra et à la reconstruction géométrique de la scène, l'estimation de ces

paramètres est possible mais difficile en pratique.

Les méthodes d'estimation de modèle physique des sources lumineuses se divisent en deux approches : la reconstruction de l'illumination globale ou la reconstruction des sources lumineuses.

Pour l'estimation de l'illumination globale, Jacknik *et al.* [11] proposent une reconstruction d'une carte de l'environnement lumineux à partir d'un flux vidéo sur une surface planaire. Cette méthode utilise une implémentation GPU donnant un rendu photo-réaliste convaincant pour des applications de réalité augmentée. Cependant, cette estimation de l'illumination globale ne permet pas de distinguer les sources primaires et secondaires ce qui est essentiel pour la prédiction de spécularité sur des points de vue inconnus. Meilland *et al.* [18] présentent également une méthode d'estimation d'illumination globale en reconstruisant les sources primaires en tant que sources ponctuelles. Ces sources de lumières sont observées directement à partir d'une caméra RGB-D. Malgré la qualité des résultats obtenus, la méthode manque de flexibilité. En effet, la méthode représente une source étendue comme un néon par un ensemble de sources ponctuelles. Ainsi, cette méthode doit calculer l'intensité lumineuse des différentes sources ponctuelles alors qu'elles devraient être considérées comme une unique source lumineuse. De plus, aucune lumière dynamique (qui peuvent s'allumer ou s'éteindre dans la séquence) ne peut être utilisée et les matériaux pour la prédiction de spécularité ne sont pas calculés. En conséquence, cette méthode ne peut pas prédire les spécularités pour des points de vue inconnus.

En parallèle, d'autres travaux ont été proposés pour la reconstruction d'une source primaire. Idéalement, chaque modèle physique de lumière doit être associé à une géométrie (position et forme), une couleur [17] et une valeur d'intensité pour correspondre de façon réaliste à la scène. Bien qu'il existe de nombreux modèles de lumière en infographie, les modèles utilisés pour la vision par ordinateur se divisent en deux catégories : sources de lumière directionnelles et sources de lumière ponctuelles. Lagger *et al.* [15] décrivent une méthode pour calculer des sources de lumière directionnelles à partir d'un objet mobile sur un point de vue fixe. Cette application est limitée car les spécularités sont fortement dépendantes du point de vue. Les sources lumineuses doivent être estimées pour chaque position. Ni la forme ou position de la source lumineuse ou le matériau de l'objet n'est pris en compte ce qui rend cette méthode incapable de prédire les spécularités. Des approches similaires comme [13, 32, ?] souffrent des mêmes problèmes avec les mêmes limitations. Pour l'estimation de sources lumineuses ponctuelles, l'approche de Boom *et al.* [2] estime une source de lumière primaire dans un contexte Lambertien et en utilisant une caméra RGB-D. À partir du terme diffus et par comparaison avec un rendu synthétique de la scène, une unique source ponctuelle est estimée. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée pour des applications temps réel et pour une estimation d'une

source étendue comme un néon. En calculant une seule source lumineuse sans sa forme et les matériaux des surfaces de la scène, aucune prédiction de spécularité ne peut être réalisée.

Afin de prédire une spécularité à partir d'un modèle physique de lumière, plusieurs paramètres complexes doivent être estimés. En pratique, une approche physique comme celles citées précédemment ne permet pas la prédiction d'un phénomène photométrique aussi complexe que la spécularité. Afin d'adresser ce problème non-linéaire, nous proposons un modèle virtuel empirique basé sur la reconstruction d'une quadrique à partir de coniques calculées sur les spécularités dans chaque point de vue. Malgré sa simplicité, ce modèle empirique abstrait les paramètres des matériaux et sources lumineuses permettant la prédiction de spécularité pour des points de vue inconnus.

### 3 Modèle proposé pour la prédiction de spécularité

#### 3.1 Motivations

Nous partons de l'observation qu'une spécularité présente une forme conique sur une surface planaire. Si une conique correspond à la projection perspective d'une quadrique, existe-il une quadrique fixe dans l'espace dont la projection perspective correspond aux spécularités ? Dans ce cas, un modèle faisant abstraction des paramètres physiques liés à l'apparition de la spécularité peut être obtenu.

#### 3.2 Modèle

Nous proposons un modèle empirique incluant les propriétés des sources de lumières et des matériaux en reconstruisant une quadrique issue des coniques appliquées aux spécularités pour chaque point de vue comme illustré sur la Fig.2. Nous assumons des surfaces planaires non-Lambertiennes où chaque spécularité est associée avec une source de lumière. Notre étude se concentre sur ce modèle permettant de prédire les spécularités provenant de n'importe quel type de lumière.

Une démonstration de notre approximation de la spécularité, observée sur une surface planaire, par une conique est détaillée dans les sections suivantes. Nous évaluerons empiriquement cette hypothèse dans la section 3.4.

#### 3.3 Validation théorique

La fonction d'intensité du modèle de Phong [23] d'un point 3D sur une surface est donnée par la formule :

$$I(\mathbf{p}) = i_a k_a + i_d k_d (\hat{\mathbf{L}}(\mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{N}}) + i_s k_s (\hat{\mathbf{R}}(\mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{V}}(\mathbf{p}))^n, \quad (1)$$

avec  $\hat{\mathbf{R}}$  la direction normalisée d'un rayon réfléchi de lumière  $\hat{\mathbf{L}}$ ,  $\hat{\mathbf{V}}$  la direction normalisée du point de vue orientée vers le capteur,  $n$  la brillance de la surface,  $k_s$ ,  $k_a$  et  $k_d$  le ratio de réflexion des termes spéculaire, ambiant et diffus de la lumière incidente,  $\hat{\mathbf{N}}$  la normale de la surface  $S$  et  $i_s$ ,  $i_a$  et  $i_d$  l'intensité entrante sur la surface pour les termes spéculaire, ambiant et diffus.

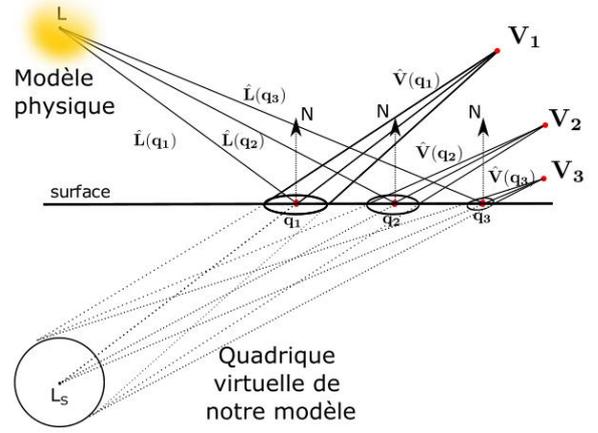


FIGURE 2 – Lien entre le modèle physique (lumière et matériaux) et la géométrie multi-vues (notre modèle empirique). À partir de plusieurs points de vue, une quadrique est reconstruite à partir de spécularités de forme conique. Cette quadrique virtuelle projetée sur chaque point de vue correspond aux spécularités.

Notre repère monde est choisi tel que la surface  $S \subset \mathbb{R}^3$  correspond au plan  $(\mathbf{XY})$  et  $S = \{\mathbf{P} \in \mathbb{R}^3 | \mathbf{P}_Z = 0\}$ . Nous pouvons paramétrer  $S$  par le point  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$  et défini par  $\mathbf{P} = \text{stk}(\mathbf{p}, 0)$  avec  $\text{stk}$  l'opérateur d'empilement par simplicité de notation. Au point  $\mathbf{p}$ , la composante spéculaire  $I_s$  est donnée par l'équation :

$$I_s(\mathbf{p}) = \max(0, (\hat{\mathbf{R}}(\mathbf{p}) \cdot \hat{\mathbf{V}}(\mathbf{p}))^n). \quad (2)$$

Nous voulons analyser les isocontours d'une spécularité sur une surface  $S$  et pour un point de vue  $\mathbf{V}$ , une source de lumière  $\mathbf{L}$  et  $\mathbf{R} = \text{stk}(\mathbf{L}_X, \mathbf{L}_Y, -\mathbf{L}_Z)$ . Dans un premier temps, nous développons Eq.3 pour un  $\tau$  général en la résolvant pour  $\tau = 1$  et  $\tau = 0$ .

$$I_s(\mathbf{p}) = \tau. \quad (3)$$

$I_s$  est un produit scalaire entre deux vecteurs normalisés, nous avons  $-1 \leq I_s \leq 1$ .

En développant le terme spéculaire Eq.1 et en rassemblant les monômes de même degré, on obtient :

$$\begin{aligned} (d^4) & (1 - \tau^2) \|\mathbf{P}\|^4 \\ (d^3) & 2(\tau^2 - 1) (\mathbf{R} + \mathbf{V})^\top \mathbf{P} \|\mathbf{P}\|^2 \\ (d^2) & \mathbf{P}^\top (\mathbf{R}\mathbf{R}^\top + 2\tau(1 - 2\tau^2)\mathbf{R}\mathbf{V}^\top + \\ & (2\mathbf{R}^\top \mathbf{V} - \tau^2 \|\mathbf{R}\|^2 - \tau^2 \|\mathbf{V}\|^2) \mathbf{I}) \mathbf{P} \\ (d^1) & 2(-\mathbf{R}^\top \mathbf{V}\mathbf{R}^\top - \mathbf{R}^\top \mathbf{V}\mathbf{V}^\top + \\ & \tau^2 \|\mathbf{R}\|^2 \mathbf{V}^\top + \tau^2 \|\mathbf{V}\|^2 \mathbf{R}^\top) \mathbf{P} \\ (d^0) & (\mathbf{R}^\top \mathbf{V})^2 - \tau^2 \|\mathbf{R}\|^2 \|\mathbf{V}\|^2. \end{aligned}$$

Pour  $\tau = 1$ , les monômes de degré 3 et 4 disparaissent tel que les termes restants forment une équation quadratique tel que :

$$\tilde{\mathbf{P}}^\top \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{P}} = 0, \quad (4)$$

où  $\tilde{\mathbf{P}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{stk}(\mathbf{P}, 1)$  sont les coordonnées homogènes de  $\mathbf{P}$ . La matrice  $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  est symétrique et définie par :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} [\mathbf{R} - \mathbf{V}]_{\times}^2 & [\mathbf{V} \times \mathbf{R}]_{\times}(\mathbf{V} - \mathbf{R}) \\ ([\mathbf{V} \times \mathbf{R}]_{\times}(\mathbf{V} - \mathbf{R}))^{\top} & (\mathbf{R}^{\top} \mathbf{V})^2 - \|\mathbf{R}\|^2 \|\mathbf{V}\|^2 \end{bmatrix}$$

Pour comprendre en détail la structure du problème, l'Eq.3 est résolue pour  $\tau = 0$ . En développant le terme spéculaire de Eq.1, on obtient :

$$\|\mathbf{P}\|^2 - (\mathbf{R} + \mathbf{V})^{\top} \mathbf{P} + \mathbf{R}^{\top} \mathbf{V} = 0, \quad (5)$$

ce qui correspond à une quadrique et plus particulièrement une sphère décrite par la matrice :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -\frac{1}{2}(\mathbf{R} + \mathbf{V}) \\ -\frac{1}{2}(\mathbf{R} + \mathbf{V})^{\top} & \mathbf{R}^{\top} \mathbf{V} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

En définissant la projection orthographique sur  $S$  :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

le contour de la spécularité est donné par la conique :

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^{\top} \mathbf{Q} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & -\frac{1}{2}(\bar{\mathbf{R}} + \bar{\mathbf{V}}) \\ -\frac{1}{2}(\bar{\mathbf{R}} + \bar{\mathbf{V}})^{\top} & \mathbf{R}^{\top} \mathbf{V} \end{bmatrix},$$

avec  $\bar{\mathbf{R}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{stk}(\mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y)$  et  $\bar{\mathbf{V}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{stk}(\mathbf{V}_X, \mathbf{V}_Y)$  correspondent aux projections orthographiques de  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{V}$  sur  $S$  respectivement.  $\mathbf{C}$  représente un cercle pour  $\tau = 0$ .

En observant le cercle  $\mathbf{C}$  sur le plan image de la caméra de centre optique  $\mathbf{V}$ , une conique est obtenue et plus particulièrement une ellipse si la spécularité est contenue entièrement dans le plan image.

Pour une valeur de  $\tau \in [0, 1]$  arbitraire, les réflexions spéculaires peuvent être approximées par une conique dans le modèle de Phong comme illustré dans la Fig.3(a). Cette approximation a également été testée et validée sur le modèle de Blinn-Phong [1] comme illustré à la Fig.3(b). Initialement, ce modèle a été défini en tant qu'approximation du modèle de Phong et régulièrement présenté en infographie comme un modèle plus précis en comparaison avec Phong. Cette observation est confirmée dans nos expériences comme illustré dans la Fig.4 et Fig.7.

Cette démonstration illustre la pertinence et la précision d'une modélisation d'une spécularité par une conique. Afin de démontrer davantage cette propriété, une validation empirique sur des données de synthèse est réalisée dans la prochaine section.

### 3.4 Validation empirique de l'hypothèse du modèle à partir de données simulées

Afin de valider notre approximation de spécularités, nous utilisons la méthode de Fitzgibbon *et al.* [6] d'estimation de conique pour différentes valeurs de  $\tau \in [0, 1]$  sur la

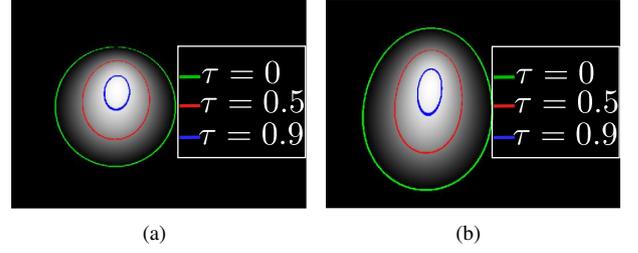


FIGURE 3 – Rendu du terme spéculaire des modèles d'illumination de Phong (a) et Blinn-Phong (b). Dans ce dernier, les spécularités sont clairement de forme elliptiques contrairement à Phong qui sont de forme plus circulaires.

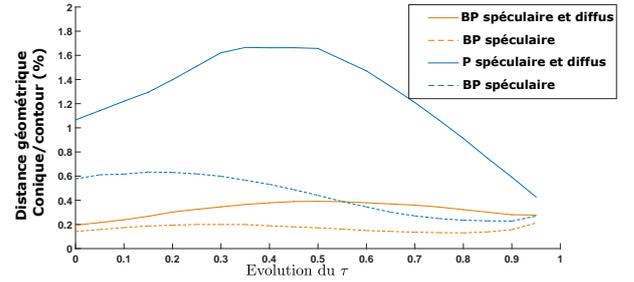


FIGURE 4 – Approximation de conique sur le modèle d'illumination de Phong (P) et Blinn-Phong (BP) pour un  $\tau \in [0, 1]$ . La partie spéculaire est testée seule puis combinée avec la partie diffuse par la suite. Pour  $\tau = 1$ , le terme spéculaire n'est défini que par un point non-modélisable par une conique. Nous pouvons assumer que l'erreur est nulle dans ce cas.

partie spéculaire uniquement et ensuite sur la partie diffuse combinée à la partie spéculaire. Dans un contexte RA, la composante diffuse et spéculaire sont corrélées. Les modèles d'illumination de Phong et de Blinn-Phong sont tous les deux testés avec notre approximation dans la Fig.4.

Cette erreur est calculée en tant qu'un ratio de la distance géométrique conique/contours avec le diamètre de la conique en pixels pour  $\tau = 0$ . Les résultats montrent que notre approximation correspond aux données de synthèse avec moins de 2% d'erreur ce qui confirme la fiabilité et la précision de notre représentation par une conique. Cependant, la pertinence de notre modélisation par une quadrique pour la prédiction de spécularités doit être démontrée, après avoir décrit le principe de reconstruction de ce modèle dans les expériences, à la section 5.1.

On peut noter que pour les sources étendues comme les néons, notre approximation de la spécularité par une conique reste pertinente. En infographie, une source étendue est généralement représentée comme un ensemble de sources ponctuelles (suivant une ligne pour un néon par exemple). Nous avons montré que pour une source ponctuelle, une conique peut être associée à la spécularité. De plus, nous considérons le contour de spécularité comme étant l'union des coniques associées pour chaque source ponctuelle qui est proche d'une conique. Ainsi, pour une

source étendue, une conique reste une bonne approximation pour la spécularité associée.

## 4 Estimation du modèle

Nous avons montré dans la section 3.4 qu'une spécularité observée sur une surface planaire peut être approximée par une conique. La contribution principale de notre méthode est de pouvoir représenter chaque lumière par une quadrique  $Q$  associée par les projections (spécularités) sur un plan  $S$  pour une caméra donnée  $\Pi$ .

### 4.1 Vue globale

Le pipeline de la méthode proposée est divisé en plusieurs étapes :

- Calcul de la conique adaptée à la spécularité sur une surface planaire.
- À partir des coniques sur plusieurs points de vue, une reconstruction de quadrique est réalisée.
- La projection perspective de cette quadrique représente la spécularité dans l'image (prédiction).

### 4.2 Reconstruction de quadrique par la méthode de Cross

Cross *et al.* [4] proposent une approche permettant de reconstruire une quadrique duale  $Q^*$  à partir de plusieurs coniques duales  $C^*$  en transformant la relation :

$$\Pi Q^* \Pi^\top = C^*, \quad (8)$$

en un système linéaire. Par vectorisation de  $Q$ ,  $\Pi$  et  $C$  en  $Q_v$ ,  $B$  et  $C_v$ , nous posons Eq.9 avec  $C$  nos spécularités modélisées en coniques et  $Q$  notre modèle de prédiction représentée en quadrique pour  $n$  points de vue tel que  $n \geq 3$ .

$$Mw = 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} B_1 & -C_{1,v}^* & 0 & \dots & 0 \\ B_2 & 0 & -C_{2,v}^* & & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ B_n & 0 & 0 & \dots & -C_{n,v}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_v^* \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = 0, \quad (9)$$

avec la matrice  $B_i \in \mathbb{R}^{6 \times 10}$ . La solution de ce système linéaire Eq.9 est calculée par décomposition en valeurs singulières de  $M$ .  $\alpha_i$  correspond à l'échelle pour l'image d'indice  $i$  tel que :  $\alpha_i C_{i,v}^* = B_i Q_{i,v}^*$ . Le processus de reconstruction de la quadrique est illustré à la Fig.2.

**Correction épipolaire des coniques.** Cross *et al.* [4] proposent un pré-traitement sur les coniques en entrée afin d'améliorer la qualité de la quadrique reconstruite lors de l'initialisation. Le principe de cette correction consiste à calculer pour chaque point de vue donné les droites épipolaires imposées par les autres points de vue (2 droites par point de vue) comme illustré à la Fig.5. Chaque conique est ainsi corrigée par un raffinement non-linéaire pour correspondre aux droites épipolaires imposées.

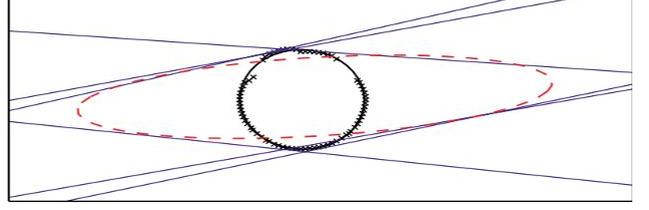


FIGURE 5 – Correction épipolaire des coniques de Cross *et al.* [4]. Dans une image, l'observation d'une quadrique apparaît sous forme d'une conique. Dans cet exemple, nous avons choisi une quadrique observée à partir de 4 points de vue. Cette figure représente, une conique pour un des quatre points de vue (ellipse noire), et ses points de contours associés (croix noires). Les droites épipolaires associées aux trois autres points de vue sont représentées en mauve. Dans ce cas, on peut trouver une unique conique duale associée à ces droites (en pointillés rouge). Cependant, cette conique respectant les contraintes imposées par les droites épipolaires, est trop éloignée des points de contours initiaux. Par conséquent, cette méthode n'est pas adaptée.

Cependant, cette correction présente des inconvénients. En effet, elle est limitée à 3 points de vue maximum (correspondant à 4 droites épipolaires pour un point de vue donné) car pour 4+ points de vue, il est difficile d'estimer une conique correspondant exactement à 6+ droites épipolaires. En effet, ces droites sont estimées à partir des coniques à corriger, plus le nombre de point de vue est important, moins la correction épipolaire sera efficace voire possible. Ce problème est illustré à la Fig.5. De plus, des méthodes plus récentes comme celle de Reyes *et al.* [24] montre que l'utilisation d'un algorithme de raffinement non-linéaire n'est pas nécessaire.

### 4.3 Reconstruction de quadrique par la méthode de Reyes

Pour la méthode de Reyes *et al.* [24], l'initialisation de quadrique est similaire à l'approche de Cross *et al.* [4]. La grande différence se situe dans la méthode de correction épipolaire des coniques plus efficace et plus fiable. Une conique est définie de manière unique pour 5 points non alignés ou 5 droites non colinéaires dans l'espace dual. Pour 3 points de vue, chaque conique est contrainte par 2 paires de droites provenant des autres points de vue ce qui rend le problème d'estimation de la conique duale sous-contraint. Une des solutions proposées est d'estimer une nouvelle droite épipolaire à partir des points de contours associés à la spécularité de l'image afin de calculer la conique duale unique. Ce processus est répété pour chaque point de contour et pour chaque points de vue. La conique corrigée correspondant aux 5 droites épipolaires, tel que la distance Conique-Point, au sens de Sturm *et al.* [30], est minimale, remplacera l'ancienne conique assurant une reconstruction de quadrique où les coniques d'entrée res-

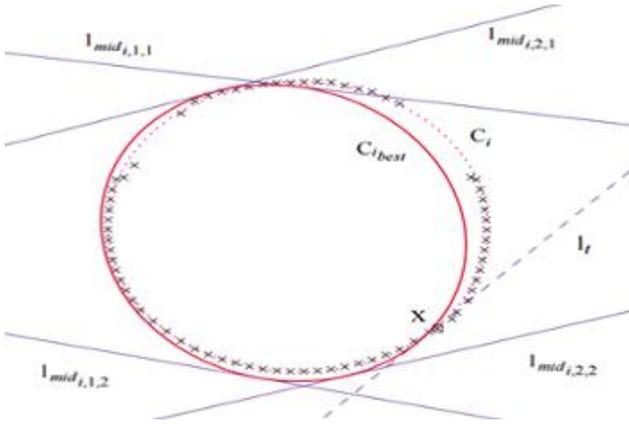


FIGURE 6 – Correction épipolaire de Reyes *et al.* [24]. On observe une quadrique sur 3 points de vue, nous donnant 3 coniques. L'image représente une conique observée (pointillés rouges) et calculée à partir des points de contours (croix noires). Les 4 droites épipolaires associées aux autres points de vue sont représentées en mauve. Afin d'estimer une conique duale, une 5<sup>ème</sup> droite épipolaire est estimée à partir de la tangente à un point de contour (ligne en pointillés mauve). On estime itérativement la meilleure conique duale corrigée la plus proche de notre conique initiale en utilisant une distance Conique-Point.

pectent la contrainte épipolaire. Ce processus est itératif, efficace et fiable.

Cependant, dans notre contexte, il n'est pas possible de limiter notre reconstruction à seulement 3 points de vue. La reconstruction de quadrique de Reyes [24] comprend un processus de raffinement non-linéaire de la quadrique minimisant la distance Conique-Point [30] entre les projections de la quadrique pour chaque point de vue et les contours associés.

Cette méthode nous permet de reconstruire la quadrique, pour 3+ points de vue de manière robuste et temps réel, utilisée pour prédire les spécularités pour des points de vue inconnus.

## 5 Résultats expérimentaux

Afin d'évaluer la pertinence et la précision de notre modèle, deux expériences sont réalisées. Nous analysons, dans un premier temps, la performance de notre modèle pour la prédiction de spécularité sur des données de synthèse générées à partir du modèle de Phong et Blinn-Phong. Cette capacité de prédiction est ensuite évaluée sur quatre séquences réelles incluant des sources de lumière de différents type tel que les ampoules ou les néons.

### 5.1 Validation du modèle sur des données de synthèse

Dans cette section, nous détaillons la validation de notre approximation par une quadrique sur des données de synthèse. La caméra utilisée a une distance focale de 50mm

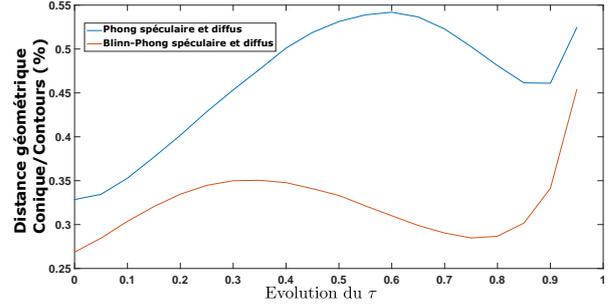


FIGURE 7 – Erreur de prédiction sur des données de synthèse. Notre modèle atteint une erreur moyenne de 0.3% et 0.5% pour Blinn-Phong et Phong respectivement ce qui confirme la pertinence et la précision de notre modèle empirique. À cause du rendu et du seuillage utilisé pour le calcul de conique, quand  $\tau$  augmente, le nombre de points de contours décroît ce qui affecte l'erreur. Cependant, l'erreur reste faible.

avec le point principal centré dans l'image. La taille des pixels est de  $0.45 \times 0.45$  pour une résolution de  $1000 \times 1000$ . Notre scène est constituée d'un plan réfléchissant  $20 \times 20cm$  où l'on observe une spécularité en mouvement. Nous sélectionnons aléatoirement les points de vue et la position de la source de lumière au dessus du plan. À partir des modèles d'illumination de Phong et Blinn-Phong pour tout  $\tau \in [0, 1]$ , 100 quadriques sont estimées par le biais de 100 points de vue. Nous calculons la distance géométrique entre les termes diffus et spéculaire combinés avec la projection de quadrique associée au point de vue au sens de la distance de Sturm *et al.* [30].

Comme illustré à la Fig.7, notre approximation par quadrique est efficace pour la prédiction de spécularité pour tout  $\tau \in [0, 1]$  pour les modèles de Phong et Blinn-Phong avec respectivement 0.3% et 0.5% d'erreur en moyenne en fonction de la taille de la scène.

### 5.2 Données réelles

La quadrique est reconstruite à partir des coniques calculées par la méthode de Fitzgibbon *et al.* [6]. Les spécularités sont détectées en utilisant la méthode de Morgand *et al.* [20]. Les poses de caméra sont calculées en utilisant une méthode de SLAM [31]. Nous utilisons la distance 2D de Sturm *et al.* [30] pour évaluer notre résultat de prédiction avec la vérité terrain. Afin de calculer la vérité terrain, nous avons manuellement annoté les spécularités sur les séquences.

**Résultats.** Nos résultats sont illustrés sur le Tab.1, la Fig.1 et 1a Fig.8. Avec une valeur maximale de 62.8 pixels d'erreur, notre modèle de quadrique se révèle très précis pour estimer les spécularités sur des points de vue inconnus et pour tout type de lumière.

## 6 Application au retexturing

Une application naturelle à notre modèle est de reproduire une spécularité sur une surface planaire tout en changeant

Distance 2D (en pixels)	I	CE	RNL
Ampoule 1 (table en fer)	110.3	82.2	62.8
Néon (plan de travail de cuisine)	135.8	76.4	23.1
Néon (Tableau blanc)	210.6	80.9	31.6
Ampoule 2 (Boîtier électronique)	77.1	53.9	19.4

TABLE 1 – Évaluation de la prédiction 2D pour deux types de lumière de type ampoule et un type de néon sur quatre séquences. Cette prédiction est évaluée pour quatre étapes : l’initialisation (I), la correction épipolaire (CE) et raffinement non-linéaire (RNL).

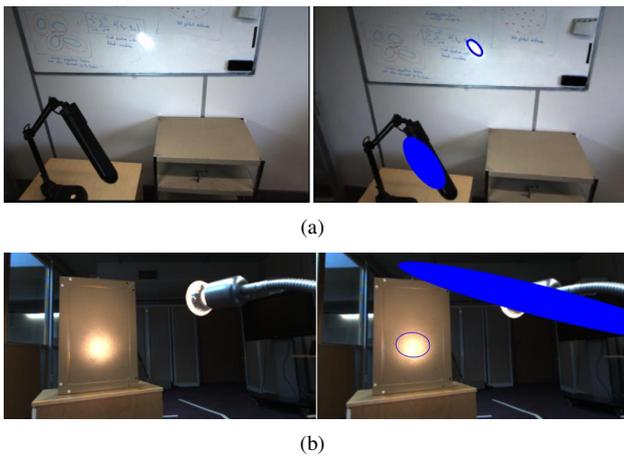


FIGURE 8 – Résultats supplémentaires de prédiction de spécularité sur un tableau blanc illuminé par un néon (a) et un boîtier électronique éclairé par un spot (b). Notre modèle virtuel est projeté sur les objets et correspond aux spécularités (ellipses bleues). Nous calculons le symétrique de nos quadriques par rapport au plan afin d’afficher l’interprétation géométrique de notre modèle sur le néon et le spot (ellipsoïdes bleues).

sa texture. En effet, à partir d’un modèle physique, il est difficile de prédire une spécularité sans calculer de nombreux paramètres (sur la lumière et les matériaux).

Nous proposons une approximation simple basée sur la modélisation de la spécularité par une fonction gaussienne en deux dimensions. En effet, une spécularité est caractérisée comme une zone de forte intensité. En partant du centre de cette spécularité, l’intensité est progressivement décroissante ce qui rend l’utilisation d’une fonction gaussienne appropriée.

Notre protocole de retexturing se découpe en plusieurs étapes. Dans un premier temps, à partir des spécularités détectées sur la séquence, nous faisons une moyenne de la couleur de la spécularité afin de correspondre au mieux au contexte lumineux de la séquence. Nous calculons ensuite la fonction gaussienne pour les canaux rouge, vert et bleu. Afin de placer notre spécularité synthétique au bon endroit

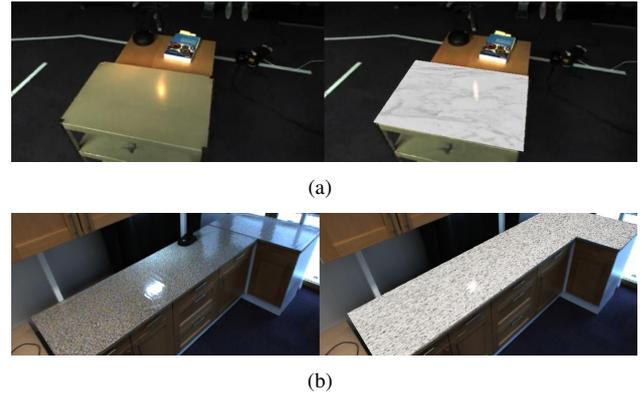


FIGURE 9 – Méthode de retexturing illustrée sur notre séquence spot/table en fer (a) en utilisant une texture de marbre et notre séquence néon/comptoir de cuisine (b) en utilisant une texture de pierre. La prédiction de spécularité permet de simuler le changement de texture de manière réaliste.

sur notre texture associée à notre plan, nous calculons 2 homographies : l’homographie  $H_2$  permettant de mettre en correspondance notre texture au plan de la scène et l’homographie  $H_1$  transformant un cercle unitaire en la conique prédite dans l’image transformée par  $H_2^{-1}$ . Nous fusionnons notre texture gaussienne avec la texture par  $H_1$  et en transformant la texture finale sur le plan de la scène par  $H_2$ . Un résultat de notre retexturing est illustré à la Fig.9(a) et Fig.9(b).

Une meilleure qualité du rendu pourrait être obtenue en modélisant également la partie diffuse. La simplicité de notre méthode fournit des résultats corrects et grandement améliorables si des paramètres additionnels sont fournis (rugosité ou réflectance de la surface).

## 7 Discussion et conclusion

Nous avons présenté un nouveau modèle empirique pour la prédiction de spécularité composé d’une quadrique. Après avoir observé la forme conique des spécularités sur une surface plane, une démonstration a été réalisée sur le modèle de Phong et Blinn-Phong afin de confirmer la pertinence de cette approximation. Dans la géométrie perspective, la projection d’une quadrique correspond à une conique. En prouvant l’existence d’une quadrique virtuelle fixe dont la projection correspond aux spécularités pour un point de vue, nous avons démontré le lien entre la photométrie (lumières et matériaux) et la géométrie multi-vues (quadrique virtuelle). Cette quadrique virtuelle est reconstruite à partir de coniques correspondantes aux spécularités. Ce modèle a été évalué sur des séquences de synthèse et réelles sous différents éclairages (ampoules et néons). Dans l’état, notre modèle pourrait grandement contribuer au domaine de la réalité diminuée. De plus, il pourrait également être raffiné en combinant spécularités et ombres dans la reconstruction ce qui permettrait également un meilleur rendu en RA. Nous prévoyons d’étendre notre méthode aux

surfaces courbes. En effet, la forme des spécularités semble être corrélée à la dérivée secondaire de la surface [7]. Ainsi, un lien pourrait être trouvé entre notre modèle et la courbure de la surface.

## Références

- [1] J. F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, SIGGRAPH, 1977.
- [2] N. M. F. Boom, Orts-Escolano. Point light source estimation based on scenes recorded by a rgb-d camera. In *British Machine Vision Conference*, BMVC, 2013.
- [3] J. Y. Chang, R. Raskar, and A. Agrawal. 3d pose estimation and segmentation using specular cues. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2009.
- [4] G. Cross and A. Zisserman. Quadric reconstruction from dual-space geometry. In *International Conference on Computer Vision*, ICCV, 1998.
- [5] M. Csongei, L. Hoang, and C. Sandor. Interactive near-field illumination for photorealistic augmented reality on mobile devices. In *Virtual Reality*, VR, 2014.
- [6] A. W. Fitzgibbon, R. B. Fisher, et al. A buyer's guide to conic fitting. *DAI Research paper*, 1996.
- [7] R. W. Fleming, A. Torralba, and E. H. Adelson. Specular reflections and the perception of shape. *Journal of Vision*, 4(9) :10, 2004.
- [8] L. Gruber, T. Langlotz, P. Sen, T. Hoherer, and D. Schmalstieg. Efficient and robust radiance transfer for probeless photorealistic augmented reality. In *Virtual Reality*, VR, 2014.
- [9] T. Hachisuka, S. Ogaki, and H. W. Jensen. Progressive photon mapping. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 27, page 130, 2008.
- [10] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN : 0521540518, second edition, 2004.
- [11] J. Jachnik, R. A. Newcombe, and A. J. Davison. Real-time surface light-field capture for augmentation of planar specular. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR, 2012.
- [12] W. Jarosz, M. Zwicker, and H. W. Jensen. The beam radiance estimate for volumetric photon mapping. *SIGGRAPH*, 2008.
- [13] M. Kanbara and N. Yokoya. Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality. In *International Conference on Pattern Recognition*, ICPR, 2004.
- [14] S. B. Knorr and D. Kurz. Real-time illumination estimation from faces for coherent rendering. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR, 2014.
- [15] P. Lagger and P. Fua. Using specularities to recover multiple light sources in the presence of texture. In *International Conference on Pattern Recognition*, ICPR, 2006.
- [16] P. Lagger, M. Salzmann, V. Lepetit, and P. Fua. 3d pose refinement from reflections. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2008.
- [17] C. Lindsay and E. Agu. Automatic multi-light white balance using illumination gradients and color space projection. In *International Symposium on Visual Computing*, ISVC, 2014.
- [18] M. Meilland, C. Barat, and A. Comport. 3d high dynamic range dense visual slam and its application to real-time object re-lighting. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR, 2013.
- [19] M. Meilland, A. Comport, P. Rives, and I. S. A. Méditerranée. Real-time dense visual tracking under large lighting variations. In *British Machine Vision Conference*, BMVC, 2011.
- [20] A. Morgand and M. Tamaazousti. Generic and real-time detection of specular reflections in images. In *8th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, VISAPP, 2014.
- [21] A. Netz and M. Osadchy. Recognition using specular highlights. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2013.
- [22] A. Netz and M. Osadchy. Recognition using specular highlights. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(3) :639–652, 2013.
- [23] B. T. Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6) :311–317, 1975.
- [24] L. Reyes and E. Bayro-Corrochano. The projective reconstruction of points, lines, quadrics, plane conics and degenerate quadrics using uncalibrated cameras. *Image and Vision Computing*, 23(8) :693–706, 2005.
- [25] K. Rohmer, W. Buschel, R. Dachsel, and T. Grosch. Interactive near-field illumination for photorealistic augmented reality on mobile devices. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR, 2014.
- [26] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 5(1) :1–12, 1999.
- [27] S. Savarese, L. Fei-Fei, and P. Perona. What do reflections tell us about the shape of a mirror ? In *Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization*, pages 115–118. ACM, 2004.
- [28] N. Shroff, Y. Taguchi, O. Tuzel, A. Veeraraghavan, S. Ramalingam, and H. Okuda. Finding a needle in a specular haystack. In *International Conference on Robotics and Automation*, ICRA, 2011.
- [29] G. Silveira and E. Malis. Real-time visual tracking under arbitrary illumination changes. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2007.
- [30] P. Sturm and P. Gargallo. Conic fitting using the geometric distance. In *Asian Conference on Computer Vision*, ACCV. 2007.
- [31] M. Tamaazousti, V. Gay-Bellile, S. Naudet Collette, S. Bourgeois, and M. Dhome. Nonlinear refinement of structure from motion reconstruction by taking advantage of a partial knowledge of the environment. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR, 2011.
- [32] K.-Y. K. Wong, D. Schnieders, and S. Li. Recovering light directions and camera poses from a single sphere. In *European Conference on Computer Vision*, ECCV. 2008.