

# Apport du Modèle de Lambert Généralisé à l'Extraction de Relief de Surfaces Rugueuses par Stéréovision Photométrique : Application aux Revêtements Routiers

Anis BENSLIMANE<sup>1</sup>, Majdi KHOUDEIR<sup>1</sup>, Jacques BROCHARD<sup>1</sup>, Minh-Tan DO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire SIC, FRE-CNRS 2731

Université de Poitiers

Bvd Marie et Pierre Curie, BP 30179

Tel : 33 5 49 49 65 67

86962 Futuroscope Cedex, France

[khoudeir@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr](mailto:khoudeir@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr)

<sup>2</sup>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

44340 Bouguenais, France

**Résumé** – Dans le cadre de l'analyse d'environnement 3D texturés par traitement d'images, nous abordons ici le cas des surfaces rugueuses pour l'analyse des variations locales de leur relief à une échelle fine. En général, l'interaction entre la lumière et ces variations locales du relief se traduit par un aspect texturé des images de ces surfaces. L'objectif recherché ici est la caractérisation de leur degré de rugosité après extraction de leurs reliefs. L'approche proposée est une adaptation originale de la technique de stéréovision photométrique au cas de surfaces à forte rugosité et au comportement photométrique de type Lambertien. En effet, l'approche usuelle traite uniquement le cas de surfaces à faible rugosité sans prise en compte des phénomènes tels que les inter-reflexions, les ombrages ou encore les masquages entre facettes de surface élémentaires. Nous proposons ici la prise en compte de ces phénomènes au travers de l'adaptation du modèle de Lambert généralisé pour la stéréovision photométrique. Ainsi nous explicitons l'incidence de ces phénomènes sur le niveau de gris de l'image puis sur l'extraction du relief. Une étude est ensuite menée pour mettre en évidence de l'apport de notre approche dans le cas de surfaces à forte rugosité est menée. Les résultats obtenus sont alors exploités pour l'analyse de l'usure de la micro texture de revêtements routiers.

**Abstract** – Within the framework of the analysis of 3D textured environment through image analysis, we approach here the case of the rough surfaces for the analysis of the local variations of their relief. Generally, the interaction between the light and these local variations of the relief leads to a textured images of these surfaces. Our aim here is to achieve their roughness characterization through a local relief extraction. The proposed approach is an original adaptation stereovision based on photometric model to the case of surfaces with a high degree of roughness and with Lambertian photometric behaviour. Indeed, the usual approach treats only the case of surfaces with weak roughness, without consideration of the phenomena such as inter-reflexions, shades or still maskings between elementary facets of surface. We propose here to take into account these phenomena through the adaptation of Lambert's generalized model for the photometric stereovision. So, we clarify the incidence of these phenomena on the image grey level and then on the relief extraction technique. A comparative study is done to put out the contribution of the proposed approach in the case of surfaces with strong roughness. The obtained results are then run for the wear estimation of road surfaces through their micro texture analysis.

## 1. Introduction

Nous nous intéressons ici à l'analyse des variations locales du relief des surfaces rugueuses à une échelle fine. En général, la rugosité de surface conduit à un aspect texturé des images correspondantes. L'objectif recherché ici est la caractérisation de leur degré de rugosité. Actuellement, l'analyse de la rugosité d'une surface est effectuée principalement au travers de capteurs tactiles ou de capteurs à focalisation de type laser [14]. Ces capteurs permettent en général d'estimer la rugosité d'une surface au travers de l'analyse d'une série de relevés profilométriques (ou monodimensionnels). De part leur fonctionnement (temps de mesure élevé, résolution, distance focale réduite, ...), ces différents types de capteurs ne permettent pas d'envisager une

utilisation sur des surfaces de dimensions importantes ou d'envisager leur transposition vers un système embarqué.

Une estimation de la rugosité par traitement d'images permettrait des avantages non négligeables tels que la prise en compte de l'information bidimensionnelle, la rapidité du traitement, et la possibilité d'une analyse en dynamique. Peu de travaux dans la littérature traitent de l'analyse de la rugosité d'une surface texturée par traitement d'images. Ces travaux effectuent une estimation de la rugosité au travers de l'extraction des variations du relief de la surface par des systèmes exploitant, selon l'application recherchée, l'utilisation combinée d'une caméra et de la projection d'une lumière structurée [2], [10], ou d'une lumière non structurée [3], [4], [6], [8], [9], [13]. L'extraction du relief est ensuite obtenue par mesure de la déformation de la trace de cette lumière structurée ou par l'exploitation de modèles photométriques (cas des systèmes de stéréovision

photométrique). L'approche proposée ici est une extension originale pour l'extraction locale du relief par stéréovision photométrique. Cette extension étant particulièrement adaptée au cas de surfaces pouvant comporter différentes échelles de rugosité. La méthode proposée sera ensuite appliquée à l'analyse de l'usure de revêtements routiers français. Nous expliciterons dans ce cadre notre apport pour la phase d'extraction de l'image du relief, le procédé d'estimation de la rugosité et les résultats obtenus.

## 2. Extraction du relief

### 2.1 Relation entre Niveau de gris, aspect et relief

Pour établir le lien entre l'image, le relief et la couleur, les surfaces considérées n'ayant pas de comportement spéculaire, nous choisissons d'utiliser un modèle Lambertien pour traduire leur comportement photométrique diffus et établir le lien entre niveau de gris, information couleur et information relief. Les différentes approches par stéréovision photométrique développées dans la littérature exploitent le modèle Lambertien dit usuel [12]. Ce modèle permet de traduire le comportement photométrique recherché sous certaines hypothèses restrictives qui conduisent à négliger les phénomènes d'inter-réflexions entre facettes élémentaires, les phénomènes d'ombrage ainsi que les phénomènes de masquage. Ces considérations limitent la validité de cette approche au cas des surfaces rugueuses avec une distribution de pentes faible. En raison de l'application visée, nous proposons ici l'exploitation du modèle de Lambert généralisé [11] qui permet de prendre en compte ces différents phénomènes et conduire ainsi à une extraction du relief par stéréovision photométrique adaptée au cas des surfaces rugueuses comportant de fortes pentes.

Pour cela, considérons une surface texturée rugueuse constituée de micro facettes Lambertienne, éclairée sous un angle d'incidence  $\theta_i$  et observée par une caméra placée perpendiculairement au plan (x,y) de la surface. La figure 1 montre cette configuration.

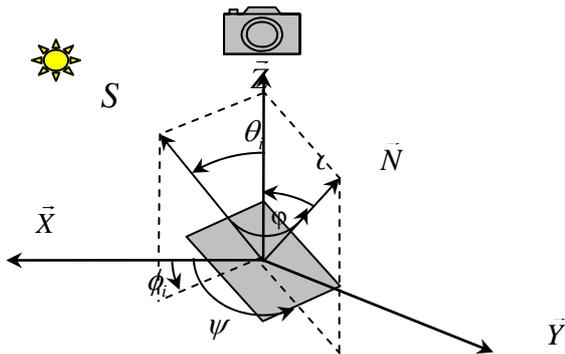


Figure 1 : Eclairage reçue capteur pour une portion élémentaire de surface

Les différents angles de cette figure sont définis ci-dessous :

$\theta_i$  : Angle d'incidence par rapport à la surface rugueuse

$\phi$  : Angle d'incidence par rapport à la facette

$\alpha$  : Angle que forme la normale à la facette avec la normale à la surface

$\phi_i$  est l'angle formé par l'axe des  $\vec{X}$  et la projection du vecteur source de lumière  $\vec{S}$  dans le plan  $(\vec{x}, \vec{y})$ .

Par un calcul simple, nous pouvons alors exprimer l'angle  $\phi$ , angle sous lequel la source éclaire la facette, en fonction des coordonnées cartésiennes (x, y et z) du point visé.

#### 2.1.1 Par exploitation du modèle de Lambert usuel

Dans ce cas, l'intensité  $I_L(x,y)$  dans l'image en niveau de gris traduit l'énergie reçue par le capteur CCD et s'exprime par la relation ci-dessous :

$$I_L(x,y) = \frac{L(x,y)}{r^2} \cos(\phi(x,y)) \quad (1)$$

Dans cette expression, les différents termes désignent :

$L(x,y)$  : est représentatif des propriétés d'aspect et de colorimétrie en chaque point de la surface,

$r$  : Distance séparant la source de lumière de la facette.

Le terme de luminance  $L$  peut s'exprimer par

$$L(x,y) = \rho(x,y) \frac{I_0}{\pi}$$

où  $\rho$  représente l'albédo de la surface et  $I_0$  représente l'intensité lumineuse de la source d'illumination.

Puis à partir de considérations géométriques simples, nous obtenons l'équation suivante :

$$I(x,y) = \frac{L(x,y)}{r^2} \frac{\cos \theta_i - \frac{\partial z}{\partial x} \sin \theta_i \cos \phi_i - \frac{\partial z}{\partial y} \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}} \quad (2)$$

Ainsi, le niveau de gris dans l'image, prend en compte des informations liées respectivement à l'aspect coloré de la surface ( $L$ ), aux variations locales de son relief ( $dz/dx$  et  $dz/dy$ ), à la configuration de prise de vues ( $\theta_i$ ) et la distance de la surface par rapport à la caméra ( $r^2$ ). Pour l'application visée, la distance  $r$  sera considérée constante du fait qu'elle est nettement supérieure aux dimensions des variations de relief recherchées qui sont de l'ordre de quelques dizaines de microns.

#### 2.1.2 Par exploitation du modèle de Lambert Généralisé

Afin de tenir compte des phénomènes d'inter-réflexions, d'ombrage ou de masquage, nous exploitons les travaux de [11] qui propose une généralisation du modèle lambertien pour les surfaces rugueuses de type diffus, pouvant inclure des dénivellations relativement importantes. Pour cela, [11] modélise les variations "importantes" de la surface par des V-Cavités, et explicite les phénomènes d'inter-réflexions et de masquage par d'une part un terme aditif au modèle de Lambert usuel et un terme d'atténuation affecté au modèle de Lambert usuel. Soit :

$$I(x,y) = \text{FAG} \cdot I_L(x,y) + I_i(x,y)$$

Où :  $I(x,y)$  représente l'éclairement total reçu

FAG représente le Facteur d'atténuation géométrique lié aux phénomènes d'ombrages et de masquage,

$I_L$  est la composante Lambertienne "usuelle"

$I_i$  est la composante Lambertienne due aux phénomènes d'inter-réflexions.

Dans notre cas de figure, où l'axe optique de la caméra coïncide avec la normale à la surface (voir figure 1), l'expression de l'éclairement reçu par le capteur CCD peut s'écrire comme suit :

$$I(x,y) = \rho \frac{I_0}{\pi r^2} \cos \phi + \rho_2 \frac{I_0}{\pi r^2} \cos \theta_i \cos \alpha (1 - \cos \alpha) \quad (3)$$

Dans cette expression, le second terme exprime l'effet des inter-réflexions et des masquages éventuels. Nous pouvons

alors exprimer cette équation en fonction des variations de relief  $p = \frac{\partial z}{\partial x}$  et  $q = \frac{\partial z}{\partial y}$  par :

$$I(x, y) = \rho \frac{I_0}{r^2} \frac{\cos \theta_i - p \sin \theta_i \cos \theta_i - q \sin \theta_i \sin \theta_i}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} + \rho^2 \frac{I_0}{\pi r^2} \cos \theta_i \left( \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \right) \quad (4)$$

## 2.2 Principe de la technique d'extraction du relief

Nous avons explicité le lien entre le relief, l'apparence couleur d'une surface et son image en niveaux de gris dans le paragraphe 2-1. L'équation (4) est une équation à trois inconnues dont deux caractérisent la géométrie de la surface à savoir la dérivée de l'altitude  $z$  par rapport à  $x$  et la dérivée de  $z$  par rapport à  $y$ , alors que la troisième caractérise son aspect coloré au travers de la luminance  $L(x,y)$ . Pour déterminer ces trois inconnues, nous exploitons trois images de notre surface, sous configurations d'éclairage différentes. Nous choisissons trois configurations d'éclairage de manière à obtenir trois équations linéairement indépendantes. A partir de l'expression des images obtenues pour ces configurations d'éclairage, nous pouvons exprimer les variations de surfaces au travers des dérivées partielles de l'altitude  $z$  par rapport à  $x$  et par rapport à  $y$ , puis par intégration numérique nous aboutissons au relief  $z(x,y)$  en tous points de la surface.

## 3. Résultats expérimentaux

### 3.1 Champs d'application et base d'images

Le développement important des infrastructures routières en France nécessite de pouvoir disposer d'outils d'auscultation et de diagnostic de l'état des routes. Cette auscultation est effectuée dans un objectif de gestion de patrimoine et de sécurité des usagers. Les concepts de sécurité liés à l'adhérence d'une chaussée routière dépendent fortement de la forme géométrique de la surface de la couche de roulement et plus particulièrement de la micro rugosité des granulats utilisés. La dégradation de la chaussée, liée au trafic routier, entraîne une évolution du relief et donc de la rugosité de ces granulats. L'étude de cette rugosité à l'échelle la plus fine appelée "micro texture" est encore aujourd'hui au stade expérimental. La mesure de cette échelle est basée essentiellement sur des méthodes profilométriques [5], [14]. Les inconvénients de ces techniques, liées d'une part à la très faible dimension de l'échantillon analysé et d'autre part au temps d'acquisition important, ne permettent pas d'envisager à terme leur transposition dans un système d'auscultation embarqué. Pour cela, nous nous intéressons ici, en collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), à la faisabilité de cette auscultation par un système de traitement d'images qui pourrait à terme être embarqué.

### 3.2 Quantification de l'apport de notre approche

Afin de pouvoir comparer les reliefs extraits pour ces deux modèles photométriques, nous choisissons d'effectuer cette comparaison sur une surface dont nous pouvons maîtriser les

variations de relief et dont les pentes peuvent varier de manière significative. La surface choisie est une surface de forme cylindrique. Ce choix est justifié par la présence de toutes les pentes sur ce type de forme géométrique. Cela nous permet de comparer les résultats de reconstruction de deux méthodes. La comparaison des reliefs reconstruits l'un avec le modèle Lambertien usuel et l'autre avec le modèle généralisé, est effectuée par rapport à un cylindre de synthèse de même dimensions que celui du cylindre objet de l'étude. La figure ci-dessous présente la cartographie du cylindre de synthèse.

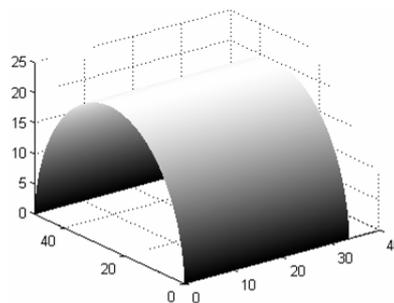


Figure 2 : Cylindre de synthèse servant de référence pour l'évaluation de l'erreur

A partir de 3 prises de vues sous angles d'éclairage différents, nous effectuons la reconstruction du relief à partir des deux modèles présentés. La figure 3 présente les profils de relief obtenus dans cas

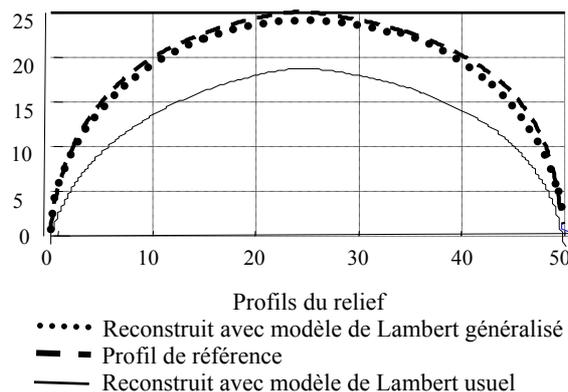


Figure 3 : Profils de relief reconstruit.

La mesure de la précision de la méthode dans les deux cas est faite par le biais de l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le rapport bruit sur signal, le bruit étant constitué de l'écart relatif en tout point entre le relief reconstruit et le relief de référence. Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Comparaison des erreurs

	EQM	Rapport bruit /signal (%)
Modèle usuel	1270,6	3,5234
Modèle généralisé	78,4	0,1881

Les résultats obtenus en tenant compte des phénomènes d'inter-réflexions et de masquage sont nettement plus précis que ceux obtenus en faisant abstraction de ces phénomènes. Cela est d'autant plus perceptible sur les profils reconstruits, pour les plus fortes valeurs de pentes. Nous adopterons par la suite le modèle généralisé de Lambert pour la reconstruction des différentes cartes de hauteurs de notre champ d'application.

L'extraction du relief sur l'ensemble des images des différentes bases d'images a ainsi été effectuée et un exemple de résultat obtenu est représenté en figure 4. Nous représentons sur cette figure l'image de la surface étudiée, l'image des variations de reliefs et la cartographie 3D (ou carte des hauteurs correspondante).

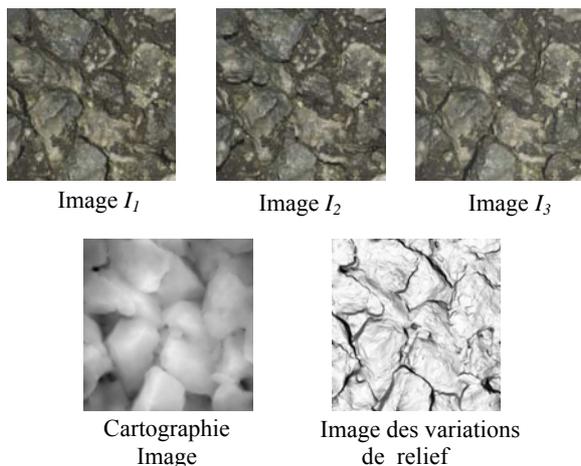


Figure 4 : Trois Images de la surface étudiée, cartographie 3D extraite par SP et image des variations de relief

### 3.3 Application à l'estimation de l'usure de revêtements routiers

L'extraction du relief sur l'ensemble des images des différentes bases d'images a ainsi été effectuée et un exemple de résultat obtenu est représenté en figure 5. Nous représentons sur cette figure l'image de la surface étudiée, l'image des variations de reliefs et la cartographie 3D (ou carte des hauteurs correspondante).

Après extraction des différentes cartographies 3D par stéréovision photométrique, nous appliquons différents critères d'estimation de la rugosité [1], [7], sur l'ensemble de nos bases d'images. Ces critères reposent sur une analyse fréquentielle et géométrique des variations de la cartographie extraite. Les résultats présentés incluent aussi, pour comparaison, l'évolution d'un critère mécanique de type « SRT » basée sur une mesure de résistance au frottement [14] et faisant référence dans le domaine des routes.

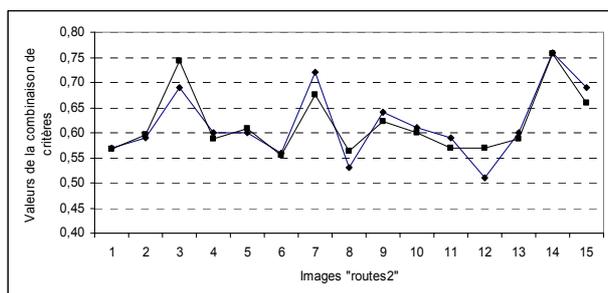


Figure 5 : Evolution du critère SRT (◆), évolutions du critère rugosité sur les cartographies « images » (■)

## 4. Conclusions et perspectives

Nous avons développé une approche d'estimation de la rugosité basée sur l'analyse de la carte des hauteurs de la surface. L'extraction de cette carte des hauteurs est effectuée

par stéréovision photométrique. Ainsi à partir des techniques de stéréovision classiques, nous développons une approche qui prend en compte les phénomènes d'inter-réflexions, de masquage et d'ombrage pouvant exister sur les surfaces à forte rugosité. Une estimation de la rugosité a ensuite été menée sur les cartes de hauteurs extraites par traitements d'images. Les résultats de discrimination de la rugosité obtenus, permettent de répondre efficacement aux différents objectifs recherchés dans l'analyse de la rugosité de chaussées routières. Ces travaux qui ont été menés sur des surfaces rugueuses statiques sont actuellement en cours d'extension à l'analyse dynamique de surfaces rugueuses.

## Références

- [1] A. Benslimane, M. Khoudeir, J. Brochard, *Caractérisation de la micro texture de chaussées par analyse d'image* International Conference on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airports (taux d'acceptation de 60%), 10 p., Toronto, Canada, juin 2004.
- [2] D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir, *Range imaging with adaptive color structured light*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(8), p.470-480, 1998.
- [3] M.J. Chantler, J. Clark, M. Umasuthan, *Calibration and operation of an underwater laser triangulation sensor: the varying baseline problem*, Optical Engineering, 36(9), pp. 2604-2611, 1997.
- [4] K. Dana, B. van Gincken, S.K. Nayar, J.J. Koenderink, *Reflectance and texture of real world surfaces* ACM Transactions on Graphics, 18(1), p.1-35, 1999.
- [5] G. Gratia, *Méthodes et matériels de mesure de l'adhérence*, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, n°185, p.107-121, 1993.
- [6] H. Hayakawa, *Photometric stereo under a light-source with arbitrary motion*, journal of optical Society of America", 11(11), p. 3079-3089, 1994.
- [7] M. Khoudeir, J. Brochard, V. Legeay, M-T Do, *Roughness Characterization through 3D Textured Image Analysis: Contribution to the Study of Road Wear Level*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 19, p. 93-104, 2004.
- [8] G. McGunnigle and M.J. Chantler, *Rough surface classification using point statistics from photometric stereo*, Pattern Recognition Letters, n°21, p. 593-604, 2000.
- [9] G. McGunnigle and M.J. Chantler, *Rough surface description using photometric stereo*, Measurement Science and Technology, n°14, p.699-709, 2003.
- [10] M. Mouaddib *Fonctions basiques et moyens de perception pour la navigation des robots mobiles* HDR soutenue le 03/12/1999.
- [11] M. Oren and S. Nayar, *Generalization of the Lambertian Model and implications for machine vision* International Journal of Computer Vision, n°14, p. 227-251, 1995.
- [12] K.E. Torrance, *Theory of Off-Specular reflection from roughened surfaces*, Journal of Optical Society of America, 57(1105), p. 32-41, 1967.
- [13] R.J. Woodham, *Photometric method for determining surface orientation from multiples images*, Optical Engineering, 19(1), p. 139-144, 1980.
- [14] H. Zahouani, R. Vargiolu and M.-T. Do, *Characterization of micro texture related to wet road/tire friction*, AIPCR/PIARC, p.195-205, June 2000.