

# Simulation de textures photométriquement réalistes pour des applications routières

to appear in *Driving Simulation Conference 99* Paris, July 99

R. Brémond - V. Boulanger

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

58 Bd Lefebvre 75015 Paris

{bremond|boulange}@lcpc.fr

**Résumé :** *Nous présentons un modèle de calcul permettant de synthétiser des images de textures réalistes sur le plan photométrique et colorimétrique. De telles images permettraient d'augmenter le réalisme des images présentées dans des simulateurs, donc le réalisme des réactions des observateurs. Ce modèle repose sur une calibration des luminances et des couleurs lors de l'acquisition des photographies des textures des matériaux à représenter. Deux modèles de calcul sont présentés, correspondant à des textures monochrome et polychrome, et des outils d'évaluation des résultats sont proposés.*

**Mots-clés :** Texture, Couleur, Simulation, Réalisme.

## 1 Position du problème

### 1.1 Motivations

Le LCPC<sup>1</sup> développe des outils de calcul et de visualisation qui sont utilisés dans des applications liées à la sécurité routière: simulation de conduite, études psychovisuelles, dimensionnement d'installations d'éclairage. Ces études ne sont exploitables que si les outils permettent de se rapprocher des conditions réelles des environnements auxquelles elles se réfèrent, une rue, un carrefour. Les études de dimensionnement, par exemple, n'ont d'utilité que si les calculs (éclairage, luminance) peuvent être comparées aux valeurs réelles sur site. De même, les présentations d'images de synthèse (fixes ou dans un simulateur) supposent que les observateurs reçoivent des stimuli visuels proches de ceux qu'ils recevraient en situation de conduite réelle. C'est une condition essentielle pour pouvoir observer des réactions comparables aux réactions en situation de conduite. Pour respecter ces exigences de réalisme, le LCPC construit sa problématique de simulation sur le lien entre modélisation et mesures. Le site représenté est modélisé à partir d'informations mesurables, et le résultat des simulation est comparé à des quantités mesurables.

### 1.2 Calculs d'éclairage

La modélisation physique des échanges lumineux, avec en particulier les algorithmes de radio-sité, est une approche de référence pour obtenir un rendu réaliste[SP94] dans des images de synthèse. Le logiciel Lise-LCPC, développé depuis plusieurs années par le LCPC [BCLN93b] utilise une approche de ce type pour évaluer les installations d'éclairage dans le domaine routier et urbain, en calculant en tout point d'une scène les quantités physiques pertinentes pour les dimensionnements: éclairage, luminance, chromaticité. Ces calculs permettent également de produire des images de synthèse (sur écran) dont le réalisme colorimétrique est satisfaisant, moyennant une calibration de l'écran. Le réalisme de ces images permettrait d'améliorer le réalisme d'un simulateur de conduite, puisque les luminances, les couleurs et les contrastes sont respectés sur les images par rapport aux sites réels.

---

1. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

**Couleur d'un matériau.** La simulation des échanges lumineux calcule les couleurs des surfaces à partir d'une modélisation du comportement optique des matériaux de la scène. Pour simuler le comportement d'un matériau, on le représente par son spectre de réflectance. La distribution spectrale de la lumière issue d'une source (primaire ou secondaire) est réfléchiée par le matériau avant de se diriger vers l'observateur. La couleur perçue dépend à la fois du spectre d'émission de la source et du spectre de réflectance du matériau.

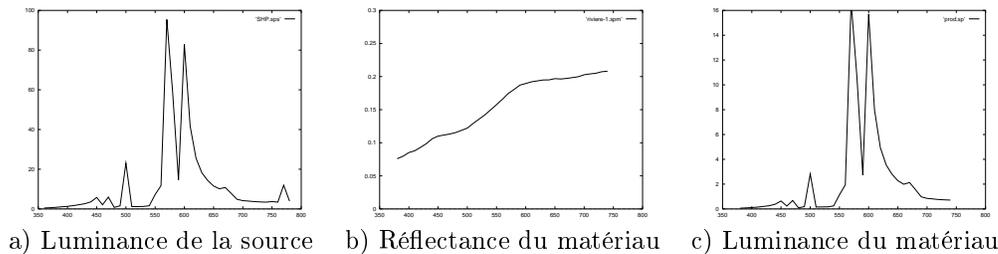


FIG. 1 – Distributions énergétiques spectrales et réflectance spectrale.

**Mesures.** Le réalisme des simulations de Lise-LCPC est lié au fait que les spectres de réflectance des différents matériaux peuvent être mesurés au laboratoire de photométrie du LCPC, ce qui permet de faire correspondre une simulation à un site réel et d'être quantitativement comparables à des mesures sur site.

### 1.3 Texture

Dans le domaine des images de synthèse, les textures sont en général des images qui sont plaquées sur des surfaces. Cette représentation ne convient pas pour des simulations d'éclairage puisque les couleurs des matériaux varient en fonction des sources d'éclairage utilisées. Une photographie digitalisée du matériau ne permet pas de représenter la texture dans une simulation d'éclairage, parce qu'elle mélange des propriétés du matériau (la texture physique) et des propriétés de la scène (les conditions d'éclairage). Le modèle le plus proche de la réalité physique est celui qui utilise une image de réflectances [CCWG88]. Il définit la texture comme une image caractérisée en chaque pixel par une réflectance.

Dans un premier temps, le modèle calcule les échanges lumineux sans tenir compte de la texture. Dans un deuxième temps la luminance de chaque pixel est obtenue en multipliant le résultat calculé pour la maille de calcul par la valeur de la réflectance au pixel considéré. [GSH94] calcule les échanges entre éléments de calcul selon les 3 composantes RVB, mais l'espace colorimétrique peut être différent sans modification importante de l'algorithme.

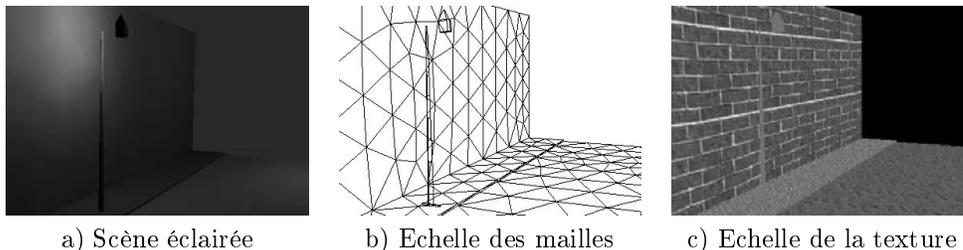


FIG. 2 – Différentes échelles pour les calculs d'éclairage.

**Réflectance spectrale.** Nous proposons d'utiliser la même approche avec une description spectrale de la lumière. L'éclairage calculé pour chaque élément de surface est alors modifié

en fonction d'un spectre de réflectance local propre à chaque pixel. C'est la représentation des textures que nous avons retenu, parce que les contraintes de précision colorimétrique nous l'imposent dans les applications d'éclairage public: les sources usuelles ont des spectres d'émission comportant des raies spectrales importantes, ce qui ne peut être rendu sans un échantillonnage fin des spectres.

## 1.4 Méthode

Ce qui suit a pour but de valider une méthodologie permettant de simuler de manière réaliste l'éclairage des matériaux texturés. L'objectif de réalisme, aussi bien colorimétrique que photométrique, signifie que l'on génère des textures de synthèse de matériaux existants et que l'on sait évaluer l'erreur commise. On ne peut donc pas faire l'économie d'une comparaison entre simulation et mesures physiques[Bre97]. Nous nous appuyons ici sur des images numérisées de matériaux photographiés dans des conditions d'éclairage contrôlées. Nous nous situons dans le cadre du paradigme de calcul cité plus haut, qui définit une texture comme une image de réflectances. On peut ainsi construire des images de synthèse des mêmes matériaux éclairés par une source arbitraire. La procédure que nous utilisons est la suivante (Fig. 3):

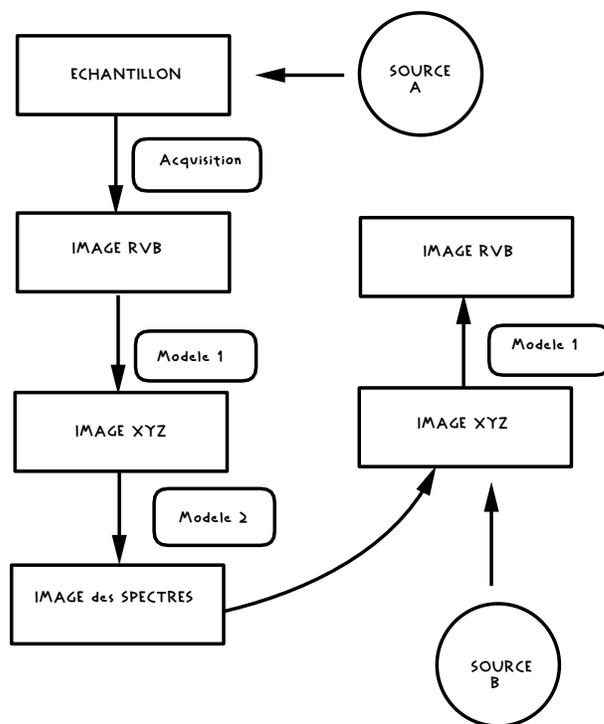


FIG. 3 – Vue d'ensemble du modèle de simulation. On distingue la calibration (modèle 1) du modèle de représentation (modèle 2).

1. Photographies des échantillons de matériaux sous éclairage contrôlé, au *Laboratoire des équipements de la rue* de la Ville de Paris (film *Kodak Gold, 200 Asa, 24 poses*).
2. Numérisation des négatifs au LCPC (Scanner *Nikon*).
3. Mesure du spectre de réflectance moyen du matériau au LCPC.
4. Modélisation des spectres des pixels (Cf. section 4).
5. Evaluation du modèle (Cf. section 5).

Les mesures de propriétés optiques moyennes des matériaux se font sur des échantillons de matériaux [HCR93]. Le résultat de ces mesures est une moyenne spatiale valable pour tout échantillon suffisamment grand, qui ne permet pas de connaître la variabilité de la réflectance d'un point à un autre d'un matériau hétérogène. Le spectre de réflexion mesuré est utilisé pour le calcul de radiosité, alors que l'image des réflectances est utilisée en post-traitement pour proposer des images réalistes texturées.

## 2 Acquisition des données

Le problème se pose de l'acquisition de ces images de réflectances. Dans la littérature en synthèse d'image[GSH94], elles sont construites à partir d'images numérisées de matériaux texturés considérées comme des images de réflectances. Autrement dit, des images obtenues dans des conditions d'éclairage particulières sont utilisées pour définir des propriétés intrinsèques des matériaux. Si les images en question correspondent à des matériaux éclairés par la source qui éclairera la scène lors des calculs d'éclairage, les couleurs sont en quelque sorte pré-stockées. Si par contre la scène est calculée dans d'autres conditions d'éclairage, ces couleurs de référence ne correspondent plus aux couleurs réelles. Pour éviter cette difficulté, il est proposé ici d'estimer les couleurs physiques [XYZ] des images numérisées, puis de proposer un spectre de réflectance pour chaque pixel, compatible avec les données, sous réserve que l'on connaisse la source d'éclairage. La figure 4 résume la procédure d'acquisition des images de texture.

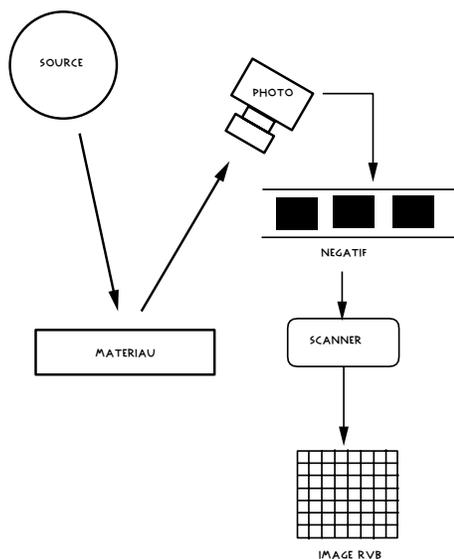


FIG. 4 – *Principe d'acquisition des données.*

A partir d'une image numérisée de la texture du matériau, on estime d'après une calibration de la chaîne d'acquisition la luminance et la chromaticité correspondant à chaque pixel, et on construit selon un certain modèle (Cf. section 4 un spectre de réflectance par pixel. Ces spectres de réflectance permettent de calculer la couleur de chaque pixel sous un nouvel éclairage (par exemple, un éclairage au sodium à partir d'une photographie prise de jour).

**Matériaux.** Dans cette étude, on a sélectionné des matériaux de génie civil (sable, gravier, chaussée) disponibles au LCPC: sable du Boulonnais (échantillon A), roulé du Boulonnais (échantillon B), graviers de rivière (échantillon C), sable brun (échantillon D), granulats de silice (échantillon E), chaussée colorée (échantillon F). Les différents échantillons ont été photographiés au *Laboratoire des équipements de la rue* de la ville de Paris sous plusieurs éclairages

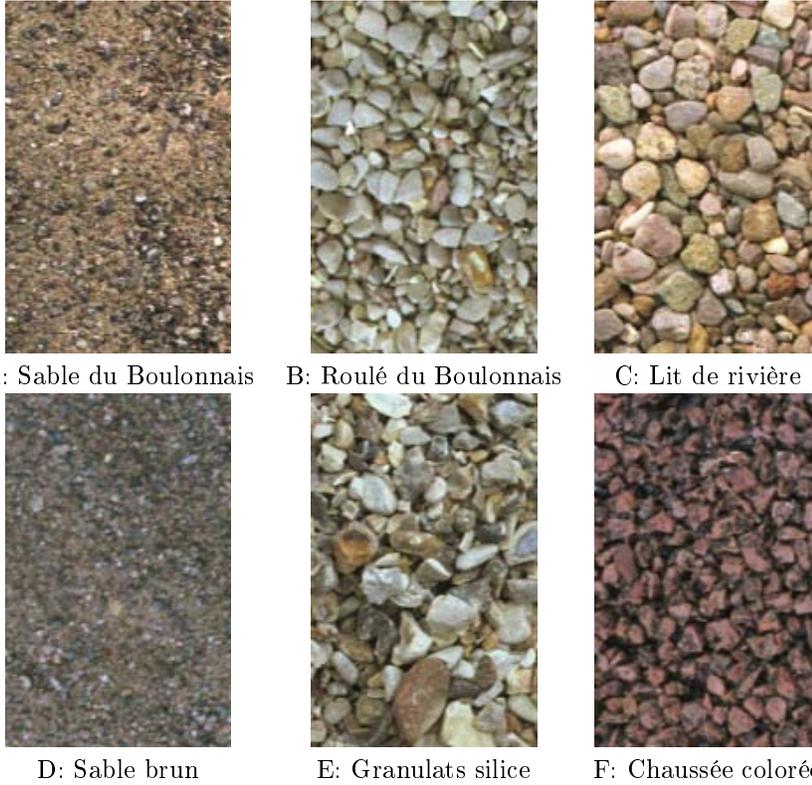


FIG. 5 – *Echantillons de matériaux texturés sous D65*

(Sodium haute pression et Halogène), puis en site extérieur. La figure 5 représente des échantillons de ces 6 matériaux photographiés en éclairage diurne.

### 3 Calibration

#### 3.1 Calibration des luminances

**Modèle de luminance.** On suppose ici que la luminance relative (rapport entre la luminance du pixel et la luminance moyenne de l'image) peut être déduite de la couleur [RVB] de manière unique pour chaque image. Malheureusement, cette relation n'est pas la même d'une image à l'autre, puisque les puissances des lampes, la durée d'exposition des pellicules et les réglages de sensibilité du scanner varient. On recherche une expression de la luminance, valable pour une photographie, sous la forme:

$$L = f(R, V, B)$$

La littérature ne donne pas de modèles généraux pour le mode d'acquisition utilisé (photographie + scanner). Nous nous appuyons ici sur les modèles de calibration des écrans[BCLN93a], sous la forme:

$$L = aR^{\gamma_1} + bV^{\gamma_2} + cB^{\gamma_3}$$

On utilise également l'observation qu'en pratique, pour des systèmes usuels,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  et  $\gamma_3$  sont très proches pour faire une hypothèse encore plus forte, en cherchant une relation de la forme

$$L = aR^\gamma + bV^\gamma + cB^\gamma$$

Il s'agit bien entendu d'une approximation, mais nous estimons qu'elle est suffisante à cette étape de nos travaux.



FIG. 6 – *Charte utilisée pour la calibration de la chaîne d'acquisition*

**Etalonnage.** On calcule successivement  $\gamma$ , puis  $a$ ,  $b$  et  $c$ . On utilise pour cela des photographies particulières, de manière à estimer le  $\gamma$ , avec l'hypothèse qu'il est constant d'une photographie à l'autre. Une charte *Gray Scale* Kodak (Fig. 6) est utilisée, de manière à avoir une série de zones grises standard, correspondant toutes à la même chromaticité, mais avec des luminances différentes. Simultanément, les luminances de ces régions ont été mesurées au luminancemètre. Dans la mesure où tous les gris sont de même teinte, on retrouve (approximativement) que les  $[RVB]_i$  sont tous proportionnels entre eux (Cf. Fig. 7). On peut écrire pour cette série de gris:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ V_i \\ B_i \end{bmatrix} = K_i \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix}$$

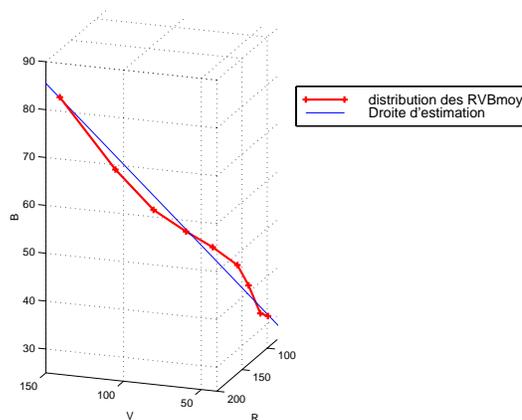


FIG. 7 – *Exemple de la linéarité des données  $[RVB]_i$*

Dans un premier temps, on peut estimer  $\gamma$  à partir de l'équation

$$L_i = (a\alpha_1^\gamma + b\alpha_2^\gamma + c\alpha_3^\gamma)K_i^\gamma$$

en remarquant que

$$\frac{L_i}{L_j} = \left(\frac{K_i}{K_j}\right)^\gamma$$

On peut estimer  $\gamma$  à partir d'un calcul aux moindres carrés à partir des  $L_i$  et des  $K_i$ . Les valeurs des  $K_i$  sont estimées en projetant les points  $M_i[R_i, V_i, B_i]$  sur la droite de direction  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ .

**Linéarité.** Sur l'ensemble des photographies utilisées (on ne retient que celles pour lesquelles l'exposition est satisfaisante) on constate une linéarité approximativement vérifiée de [RVB] en fonction de L. La figure 7 donne un exemple de cette approximation, qui se situe dans tous les cas en dessous de  $x\%$  pour chacun des canaux RVB, si on se restreint aux valeurs ni trop fortes (saturation) ni trop faibles (perte de sensibilité), c'est à dire dans le cas présenté ici aux valeurs comprises entre 20 et 200 sur une échelle allant de 0 à 255.

**Exponentielle.** L'hypothèse selon laquelle on peut ensuite expliquer la luminance comme une fonction exponentielle est assez bien vérifiée, comme le montre sur un exemple la figure 8.

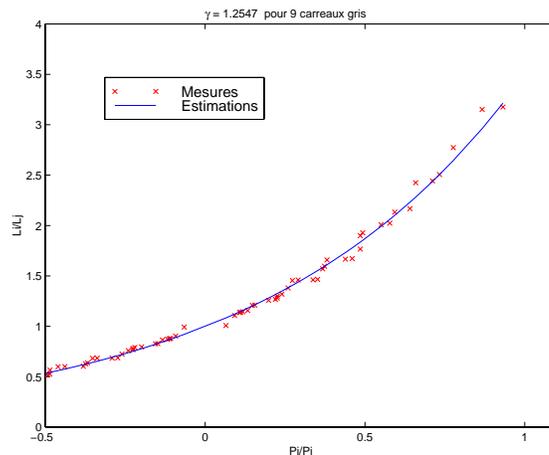


FIG. 8 – Exemple d'estimation de  $\gamma$  à partir des  $K_i$ .

[Valeur de  $\gamma$ . Variabilité?]

**Coefficients.** On peut estimer ensuite les valeurs de  $a$ ,  $b$  et  $c$  avec un système d'équation, à conditions que ces équations correspondent à des points *indépendants*, c'est à dire des points de chromaticité différente. On utilise pour cela les régions colorées de la charte Kodak.

[Valeurs de  $a$ ,  $b$  et  $c$ . Variabilité?] [Valeurs à utiliser pour les images de matériaux???] [Evaluer l'erreur sur la luminance due au modèle retenu, pour les carreaux qui ont été utilisés pour construire ce modèle. On veut une erreur relative, du type  $\Delta L/L$ .]

### 3.2 Calibration des couleurs

On évalue également la distribution des chromaticités  $(x,y)$  d'un matériau éclairé à partir des images numérisées. Etant données les conditions d'acquisition, on suppose que la teinte  $(x,y)$  d'un pixel peut être déduite de la couleur [RVB] d'une manière unique pour toutes les photos numérisées: elle ne dépend que des sensibilités colorimétriques des pellicules et du scanner. On pose dans la suite:

$$[rvb] = \frac{[RVB]}{R + V + B}$$

et

$$[xyz] = \frac{[XYZ]}{X + Y + Z}$$

**Références.** On dispose de carreaux émaillés de différentes couleurs sur la scène à photographier. Leurs spectres de réflectances ont été mesurés au laboratoire de photométrie du LCPC. On les utilise comme référence par la suite en les faisant figurer sur chaque photographie. On

construit, à partir des images numérisées, des images  $(x,y)$  correspondant aux teintes réelles des échantillons au moment des photographie. Pour cela, on se base sur les données connues: on peut calculer pour chaque photographie la chromaticité  $[x,y]$  de chaque carreau ainsi que celle du matériau en moyenne. On va ainsi pouvoir calculer une matrice de passage de  $[rvb]$  vers  $[xyz]$ , et mesurer les erreurs qui en résultent sur les points de contrôles précités.

**Pré-validation.** On a vérifié tout d'abord que les couleurs calculées pour les carreau utilisant les spectres des sources et ceux des matériaux sont du même ordre que les couleurs mesurées au spectrophotomètre au laboratoire de la Ville de Paris. Les erreurs sont inférieures à 0.01 en  $x$  et en  $y$ .

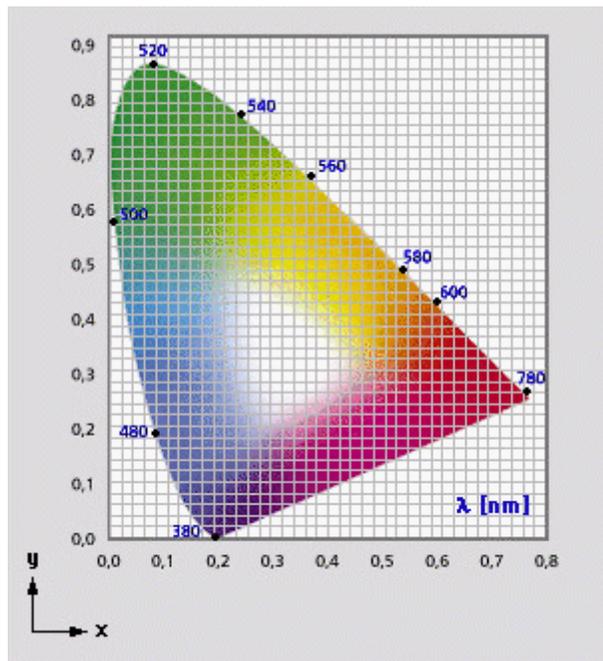


FIG. 9 – Diagramme de chromaticité  $(x,y)$ .

**Estimation.** La matrice recherchée est une propriété, *a priori inconnue*, de la chaîne d'acquisition. Nous avons pour un ensemble d'échantillons les vecteurs  $[xyz]$  et  $[rvb]$ . Ce que l'on cherche, ce n'est pas la solution d'une équation, mais la matrice la moins mauvaise compte tenu des données. Si on écrit l'équation sous la forme

$$[xyz] = [A][rvb]$$

on peut dire que cette équation matricielle est vérifiée si  $[A]$  est la matrice optimale pour le couple formé par la couleur  $[rvb]$  et la teinte  $[xyz]$ . Nous avons  $N$  échantillons qui sont caractérisés par une teinte  $[xyz]_i$  et une couleur  $[rvb]_i$ . On pose:

$$\Delta = [A][rvb] - [xyz]$$

A partir d'un ensemble de données, on dira que la matrice est optimale pour ces données si la quantité:

$$dE = \sum_{i=1}^N \|\Delta_i\|^2$$

est minimale.

**Résultat.** On ne considère pour évaluer la matrice  $[A]$  que les données les mieux établies. Sont exclus les carreaux des photos de plein air qui ont un comportement spéculaire. Les spectres des sources des matériaux et des carreaux ont été mesurés, ce qui permet de calculer les valeurs  $(x,y)$ . Dans le cas présent, ce sont  $N=26$  points (18 matériaux et 8 carreaux) qui ont été utilisés pour calculer la matrice.

**Estimation de l'erreur.** Cette approximation linéaire n'est qu'une approximation, dont on doit estimer la qualité en fonction de la précision recherchée. Si on note  $(x_R, y_R)$  et  $(x_C, y_C)$  respectivement les teintes de référence et les teintes calculées avec la matrice  $[A]$ , on estime l'erreur moyenne par:

$$e = \frac{1}{N} \sum_1^N [(x_R - x_C)^2 + (y_R - y_C)^2]^{1/2}$$

Dans le cas présent,  $\Delta = 0.021$ , valeur qui est homogène à une distance dans le plan de chromaticité  $(x,y)$ . Cette erreur est sans doute essentiellement due à l'hypothèse de linéarité faite précédemment. Cette valeur est suffisamment importante pour que les erreurs soient perceptuellement visibles, sans pour autant qu'on change de couleur au sens sémantique (Cf. Fig 9 le diagramme de chromaticité).

## 4 Modèles de spectres

L'objectif de la modélisation des spectres consiste, à partir du spectre de réflectance moyen  $\beta(\lambda)$  d'un matériau, et d'une image de couleurs  $[XYZ]$  d'un échantillon de la texture, à définir une image de spectres de réflectance compatible avec les données. Cette image de spectres servira ultérieurement (Cf. figure 3) à construire des images de synthèse de ces textures sous divers éclairages.

### 4.1 Modèle monochrome

Le modèle qui semble le plus naturel[CCWG88] consiste à utiliser directement le résultat des calculs d'éclairage (sans texture) et à moduler la luminance en fonction des modulations observées dans l'image de texture.

On définit plus précisément la représentation monochrome à partir du spectre moyen mesuré et d'une image des luminances de la texture, en affectant à chaque pixel le spectre de réflectance moyen multiplié par la luminance relative locale, c'est à dire le rapport  $L_i/L$  si  $L_i$  est la luminance du pixel  $i$ , et  $L = \langle L_i \rangle$  la luminance moyenne de l'échantillon. Dans cette représentation, tous les pixels de la texture ont bien la même chromaticité  $(x,y)$ . Cette chromaticité dépend des conditions d'éclairage, mais elle est unique pour une éclairage donné.

**Domaine de validité.** Cette modélisation paraît adéquate pour des surfaces pour lesquelles la texture n'est due qu'à la rugosité, qui crée des variations d'ombre et de lumière.

### 4.2 modèle polychrome

Dans le cas général, c'est à dire lorsque la distribution des couleurs est dispersée, il est nécessaire d'avoir un modèle de construction des spectres qui reproduise correctement la dispersion des couleurs. On s'inspire ici de [Gla89] dans lequel un spectre de luminance est construit en utilisant une base de fonctions, de manière à être vu avec une couleur [RVB] donnée. L'idée est de trouver une distribution d'énergie qui produise le même effet visuel que la couleur [RVB], c'est à dire un

métamère[Sev96]. Nous nous intéressons ici à un problème légèrement différent: à partir d'une couleur [RVB] obtenue en éclairant un matériau avec une source connue, on cherche à définir une réflectance  $R(\lambda)$  compatible avec cette couleur.

**Principe de construction.** La calibration des chromaticités permet de connaître la valeur de  $(x,y)$  en chaque pixel à partir de la couleur RVB. Or cette chromaticité peut également se calculer à partir de la réflectance spectrale  $R(\lambda)$  au pixel considéré, convoluée avec la distribution d'éclairement  $E(\lambda)$ , qui est la même en tout point et que nous avons enregistrée lors des prises de vue. Pour que la couleur du matériau éclairé par  $E(\lambda)$  soit bien  $(x,y)$  au pixel considéré, on choisit  $R(\lambda)$  dans un espace engendré par trois fonctions  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$ . On écrit:

$$R(\lambda) = aF_1(\lambda) + bF_2(\lambda) + cF_3(\lambda)$$

Le fait que la couleur produite par  $E(\lambda)$  éclairant  $R(\lambda)$  soit  $[RVB]_i$  permet de déterminer le triplet  $(a,b,c)$  en résolvant un système linéaire.

**Base de fonctions.** Dans ce qui suit, nous utilisons les fonctions  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  proposées par [Gla89].  $\lambda_m$  et  $\lambda_M$  sont les bornes du domaine visible.

- $F_1(\lambda) = 1$
- $F_2(\lambda) = \sin(2\pi \frac{\lambda - \lambda_m}{\lambda_M - \lambda_m})$
- $F_3(\lambda) = \cos(2\pi \frac{\lambda - \lambda_m}{\lambda_M - \lambda_m})$

**Remarque.**  $R(\lambda)$  ne correspond pas à la réflectance physique du matériau: ce modèle utilise une base de fonction dont le choix influe sur le résultat. On constate qu'en général, les spectres proposés par ce modèle ne ressemblent pas aux spectres mesurés. Par contre, et par construction, les couleurs calculées en chaque pixel par ce modèle pour la source utilisée lors de la prise de vue sont identiques aux couleurs de l'image.

## 5 Validation

**Principe.** La validation expérimentale consiste à calculer une texture sous un certain éclairage, et à comparer le résultat avec des photographies du même matériau éclairé de la même manière. La modélisation concerne un matériau particulier, par conséquent la validation ne peut se faire que matériau par matériau.

**Indicateurs.** Nous avons retenu, pour comparer les images simulées aux photographies, deux indicateurs principaux: la couleur moyenne, et la répartition des chromaticités autour de cette couleur. Le but de cette évaluation est de juger si un modèle, monochrome ou polychrome, est adapté à la simulation de la texture de tel ou tel matériau de génie civil. On peut avant de montrer les résultats proprement dits faire deux commentaires généraux:

- La couleur moyenne des images simulées par le modèle monochrome sera toujours correct, dans la limite des hypothèses: elle est construite de manière à reprendre la valeur d'un calcul d'éclairage sans texture.
- La distribution des chromaticités dans le modèle monochrome est réduit à sa plus simple expression: tous les pixels de l'image ont la même chromaticité.

Il ressort de ces deux remarques qu'on ne peut pas prévoir *a priori* lequel des deux modèles sera le meilleur, pour un matériau donné.

**Modèle polychrome.** Le tableau suivant permet d'évaluer le modèle polychrome à partir des photographies des six matériaux de génie civil retenus, photographiés chacun sous trois sources: D65 (ce qui correspond à la lumière du jour), Sodium haute pression, et Halogène. On a calculé ci-dessous les couleurs moyennes des échantillons (présentées en [RVB]) pour les différentes photographies, qu'on a comparé aux couleurs moyennes des simulations calculées à partir des images sous D65. Les valeurs simulées sous D65 avec le modèle polychrome sont identiques aux valeurs des photographies correspondantes, par construction. Il est important de remarquer que ces comparaisons sont faites sur entre des échantillons différents du même matériau, ce qui conduit naturellement à de légères variations.

Materiau	D 65	SHP		Halo	
	photo	modèle	photo	modèle	photo
Ech. A	[120,104, 86]	[164,130,51]	[143,129,52]	[160,136,64]	[145,136,63]
Ech. B	[140,137,119]	[188,176,70]	[176,154,63]	[149,150,61]	[157,139,62]
Ech. C	[157,136,111]	[157,116,45]	[143,108,41]	[165,137,54]	[163,125,60]
Ech. D	[141,122,117]	[126,108,45]	[135,101,33]	[127,117,50]	[126,112,51]
Ech. E	[137,130,117]	[156,145,58]	[161,134,58]	[148,146,61]	[162,130,63]
Ech. F	[ 96, 77, 72]	[153,116,49]	[155,101,42]	[124,102,43]	[129, 86,44]

Couleurs moyennes estimée par le modèle polychrome.

**Distribution des couleurs.** On représente sur la figure 10 l'histogramme cumulé des distances à la couleur moyenne, exprimée dans le plan  $[xy]$ . Cet histogramme permet d'estimer la manière dont les couleurs sont distribuées autour de la couleur moyenne, dans la photographie et dans la simulation. On ne représente pas les courbes correspondant au modèle monochrome, puisque tous les pixels de l'image simulée ont la même chromaticité. Sur ces courbes, l'axe des abscisses est gradué en pourcentage de la distance maximale. Dans le premier cas (Echantillon C) la distance maximale est de 0,26 et dans le second cas (Echantillon D) de 0,23. Le cercle qui contient 95% des chromaticités, qui est un paramètre plus significatif que le maximum, a pour rayon XX (Echantillon C) ou YY (Echantillon D).

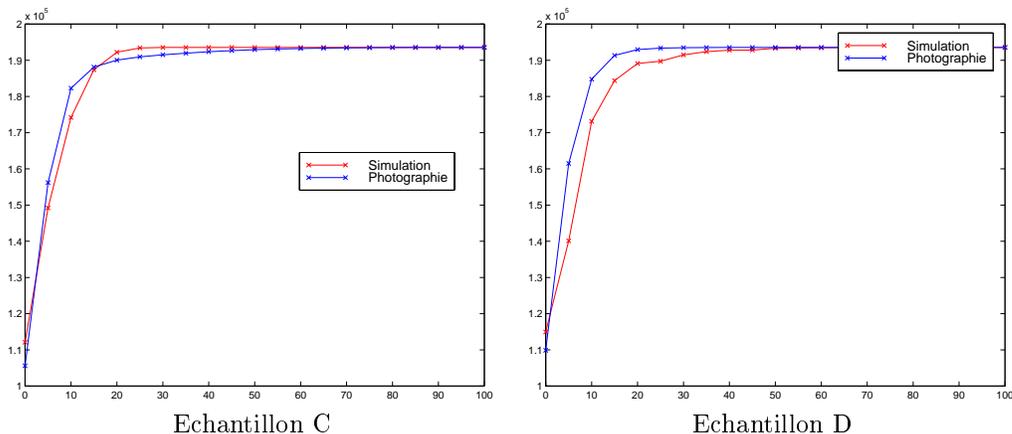


FIG. 10 – Histogrammes cumulés.

**Comparaisons.** On Visualise d'une part (Fig. 11) le résultat de la simulation sous une source SHP avec le modèle polychrome et avec le modèle monochrome, que l'on peut comparer à la photographie prise sous une source SHP, d'autre part les images correspondantes pour le matériau de l'échantillon D. On s'attend à ce que le premier matériau (gravier de rivière) soit mieux adapté au modèle polychrome, et que le second soit mieux adapté au modèle monochrome.

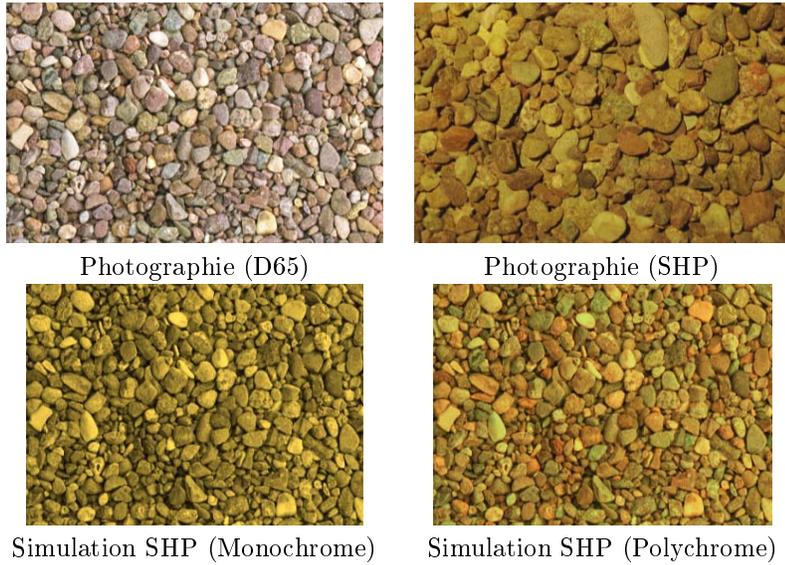


FIG. 11 – *Comparaison des modèles sur l'échantillon C.*

C'est bien le cas, visuellement: le caractère monochrome de la simulation est le principal défaut pour l'échantillon C (Fig. 11) alors que dans l'autre cas ((Fig. 12) c'est la dérive chromatique du modèle polychrome qui constitue l'erreur prépondérante.

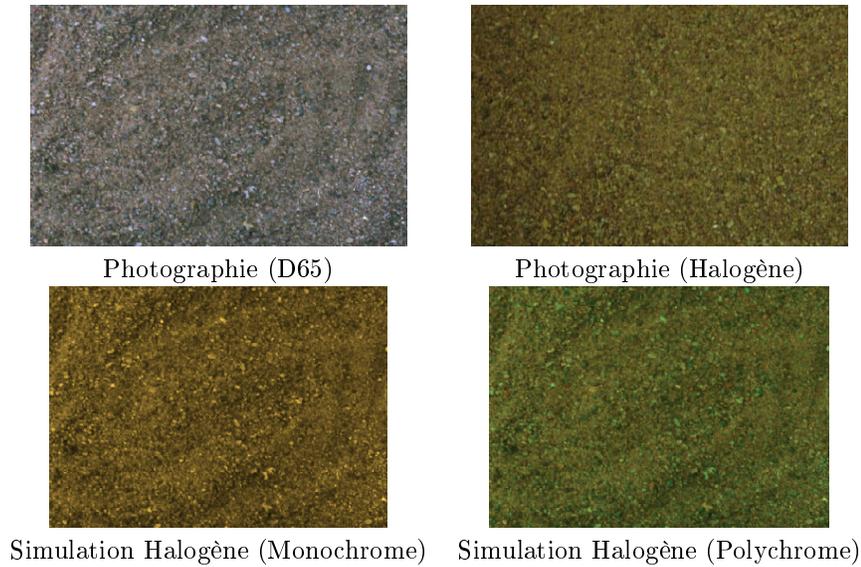


FIG. 12 – *Comparaison des modèles sur l'échantillon D.*

## 6 Perspectives

Nous proposons dans cet article deux modèles de simulation d'éclairage de textures de matériaux réels. Ces modèles sont intégrés dans une méthodologie qui permet de les évaluer au cas par cas pour des matériaux réels.

A partir de ce travail, notre objectif est double. D'une part nous nous orientons vers une amélioration de la modélisation, soit en améliorant les modèles eux-même, soit en améliorant les outils d'évaluation. D'autre part, nous souhaitons utiliser la méthodologie décrite ici pour établir une typologie des matériaux de génie civil en vue de leur intégration dans un modèle complet de simulation d'éclairage.

## Références

- [BCLN93a] C. Brusque, V. Carta, J. Louage, and V. Nguyen. Validation de lise comme outil de simulation de la propagation de la lumière. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, pages 141–154, February 1993.
- [BCLN93b] C. Brusque, B. Charlot, J. Louage, and V. Nguyen. Lise, la synthèse d'image au service de l'éclairage. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, pages 127–140, February 1993.
- [Bre97] R. Bremond. *Définition d'une texture photométriquement réaliste pour les calculs d'éclairage, 5èmes journées de l'AFIG, Rennes*. 1997.
- [CCWG88] M. Cohen, S.E. Chen, J.R. Wallace, and Donald P. Greenberg. A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation. *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '88 Proceedings)*, 22(4):75–84, August 1988.
- [Gla89] A. S. Glassner. How to derive a spectrum from rgb triplet. *Computer Graphics and applications*, 9(4):95–99, 1989.
- [GSH94] R. Gerschbein, P. Schröder, and P. Hanrahan. Texture and radiosity: controlling emission and reflexion with texture maps. In *Computers Graphics proceedings, annual conference series*, pages 51–58, 1994.
- [HCR93] R. Hubert, M. Canestrelli, and J.-P. Richard. Le laboratoire de photométrie pour les études de visibilité et la qualité des équipements. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, pages 61–70, February 1993.
- [Sev96] R. Seve. *Physique de la couleur, de l'apparence colorée à la technique colorimétrique*. Masson, 1996.
- [SP94] F.X. Sillion and C. Puech. *Radiosity and Global Illumination*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1994.