

Définition d'une texture colorimétriquement réaliste pour les calculs d'éclairage

Roland Brémond

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58 Boulevard Lefebvre 75015 Paris

bremond@lcpc.fr

Résumé : *Le rendu de texture est un point faible des algorithmes de radiosité. Les méthodes existantes sont examinées, en mettant l'accent sur les problèmes de réalisme colorimétrique du rendu, et de réalisme de la représentation. Concernant la représentation, les problèmes liés à l'acquisition des données sont posés, pour aboutir à une méthodologie de définition et de contrôle d'une texture de matériau.*

Mots-clés : texture, couleur, photométrie, colorimétrie, éclairage, simulation, radiosité.

1 Etat de l'art

1.1 Texture et radiosité

La modélisation physique des échanges lumineux, avec en particulier les algorithmes de radiosité, est une approche de référence pour obtenir un rendu réaliste [SP94]. Des développements récents permettent d'augmenter le réalisme du rendu des techniques de radiosité en prenant en compte des situations de plus en plus complexes (coefficient de luminance directionnel [SAWG91], mouvement [LD96], milieux participants [RT87], échantillonnage spectral [PR97]).

En même temps, la prise en compte des textures dans les algorithmes de rendu réaliste a substantiellement transformé la représentation usuelle de la texture qui était définie par une image, ou (ce qui revient au même de notre point de vue) par un algorithme capable de synthétiser une image. Le rendu des textures, de ce point de vue, consistait à affecter une image de texture à chaque élément de calcul, et à la plaquer sur la surface. La simulation des échanges lumineux, au contraire, ne présuppose pas les couleurs des différentes surfaces, elle les calcule à partir d'une modélisation du comportement optique des matériaux de la scène. Il a donc été proposé de représenter la texture par une image de réflectances plutôt que de couleurs [CCWG88].

1.2 Paradigme de calcul

Les simulations d'éclairage s'appuient sur une partition de la scène en éléments de calculs, et les échanges d'énergie se font entre ces éléments. Les différentes approches actuelles pour le rendu de texture ont en commun une démarche qui peut se résumer comme suit:

1. Définition des textures.
2. Définition géométrique de la scène.
3. Plaquage des textures dans la scène.
4. Calcul des propriétés optiques moyennes des éléments de calcul à partir de la texture plaqu e.
5. Calcul de radiosité, avec une couleur calculée pour chaque élément de calcul.
6. Transformation de la texture plaqu e en utilisant la couleur calculée.

A partir de cette procédure très souple, différents auteurs ont amélioré les résultats du rendu en raffinant le maillage en fonction de la texture [DSG91], ce qui donne de bons résultats visuels mais qui est malheureusement très couteux en temps de calcul, ou en utilisant une description hiérarchique des images de réflectances [GSH94], ce qui consitue une variante des algorithmes de radiosité hiérarchique.

Nous recherchons ici une méthodologie qui améliore ce qui semble être le point faible des algorithmes actuels, à savoir le réalisme photométrique et colorimétrique de ces textures.

1.3 Image des réflectances

Traditionnellement, le réalisme des textures de synthèse est défini comme une propriété subjective liée à l'identification par un observateur du matériau simulé (bois, marbre, etc) avec la texture attendue du matériau réel. De ce point de vue, la meilleure texture est une photographie digitalisée du matériau.

Cette description est inadéquate pour représenter les textures 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 des réflectances [CCWG88]. Il définit la texture comme une image caractérisée en chaque pixel par une réflectance, qui peut être soit un nombre (coefficient de réflectance global), soit un triplet (correspondant aux canaux RVB par exemple), soit (bien que cette description n'ait pas été implémentée à ce jour) une description spectrale.

Le problème se pose de l'acquisition de ces images de réflectances. En pratique, elles sont construites à partir d'images de textures considérées comme des images de réflectances. On utilise des images obtenues dans des conditions d'éclairage particulières 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 de radiosité, les couleurs sont en quelque sorte pré-stockées, donc il n'y a pas d'erreur. Si par contre la scène est calculée dans d'autres conditions d'éclairage, le risque existe que ces couleurs de référence ne correspondent plus aux couleurs réelles. [GSH94] pose clairement le problème du réalisme de ce type de construction: *"an interesting research question is how to manage the texture data"*.

Algorithmes de rendu. En fonction de la représentation des textures, on a plusieurs manières de calculer le rendu. Dans un cas [Mic97], la texture est représentée par une image, et la radiosité est utilisée pour calculer les transports d'énergie. L'éclairement calculé pour chaque élément de calcul permet de définir une luminance pour chaque pixel à partir de l'image des réflectances, les couleurs étant directement empruntées à l'image de la texture en coordonnées (x,y) ou (U,V) .

[GSH94] calcule les échanges entre éléments de calcul selon les 3 composantes RVB, et obtient le résultat final en multipliant chaque composante calculée de l'éclairement (au niveau de l'élément de calcul) par la valeur de la réflectance (pour ce canal) au pixel considéré. L'article cité utilise les canaux RVB, mais l'espace colorimétrique pourrait être différent sans modification de l'algorithme. La même approche pourrait d'ailleurs être utilisée avec une description spectrale de la lumière, comme dans [BCLN93]. La couleur calculée pour chaque élément de calcul serait modifiée en fonction d'un spectre de réflectance local propre à chaque pixel.

2 Mesures de texture

2.1 Nécessité de la mesure

Cette exigence de définir la texture comme un ensemble de propriétés intrinsèques d'un matériau, indépendantes des conditions d'éclairage et d'observation, est difficile à réaliser en pratique parce que les quantités mesurables dépendent de ces conditions. On peut néanmoins s'appuyer

sur la description optique usuelle des matériaux par un spectre de réflexion et une BRDF¹, qui sont des propriétés intrinsèques des matériaux.

Cela revient à poser le problème de la génération des textures comme un problème d’acquisition de données: si le rendu de texture dépend de paramètres qui ne sont pas mesurables, on ne respecte pas le critère de réfutabilité caractéristique des modèles scientifiques [Pop73]. Si la réflectance locale n’est pas mesurable, le résultat des simulations perd son caractère réaliste, puisqu’il n’est ni acceptable, ni réfutable.

2.2 Mesure des propriétés optiques des matériaux

Les propriétés optiques des matériaux peuvent se décomposer en un comportement spectral, mesuré à l’aide d’un spectrophotomètre, et un comportement directionnel, mesuré à l’aide d’un gonioréfectomètre. La première mesure est obtenue, en général, en 45/0, ce qui signifie qu’un échantillon du matériau est éclairé (par une source aux caractéristiques connues) à 45 degrés, et que la lumière réémise est mesurée normalement à la surface. La luminance est comparée à celle émise par un échantillon de référence dans les mêmes conditions, ce qui permet de calculer le spectre de réflexion du matériau étudié. le résultat de cette mesure est sans dimension.

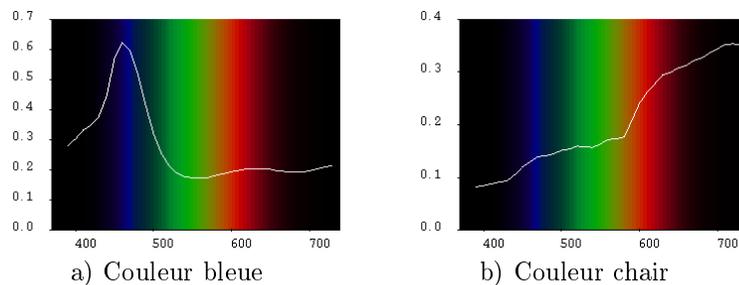


FIG. 1 – Spectres de réflexion de matériaux ayant le même coefficient de réflectance globale (0.20)

Mesure de variabilité. Les mesures de propriétés optiques se font sur des échantillons de matériaux qui ont une dimension de l’ordre de 10 cm sur 10 cm pour que les mesures soient significatives [HCR93]. Le résultat de ces mesures est une intégrale spatiale sur toute la surface de l’échantillon, on ne peut donc en déduire de propriétés locales à une échelle plus petite. Par conséquent, les propriétés optiques des matériaux peuvent être mesurées à l’échelle des éléments de calcul, mais pas, en général, à l’échelle de la texture.

Cela pose deux types de problèmes: Si l’échantillon n’est pas représentatif, il faut s’appuyer sur un grand nombre de mesures pour évaluer la variabilité spectrale, et même le spectre moyen. Sans compter qu’il est alors difficile d’évaluer les corrélations spatiales entre les différents spectres de réflectance. Si par contre l’échantillon est représentatif de la texture, la représentation mentionnée en section 1.3 qui consiste à définir le spectre de réflexion d’un élément de calcul comme la moyenne des spectres des éléments de texture ne peut pas être issue de spectres mesurés. Au contraire, il est nécessaire de s’appuyer sur le spectre moyen du matériau (qui lui est mesurable) pour décrire la texture.

On a dans tous les cas une contrainte sur le modèle qui est issue des mesures, mais cette contrainte ne permet pas de déterminer entièrement le modèle.

Information manquante. Ces remarques mettent en évidence une insuffisance entre les informations nécessaires pour faire un modèle réaliste de texture, et celles qu’il est possible d’acquérir par des mesures sur les matériaux. Cela écarte les modèles a priori, et impose de valider chaque modèle à partir de mesures sur le matériau que l’on cherche à représenter. Cette

1. BRDF: Bidirectional Reflexion Distribution Fonction, c’est à dire le coefficient de luminance.

démarche conduit naturellement à l'établissement d'une typologie des matériaux en fonction du modèle de texture qui en rend le mieux compte. Les mesures permettent de connaître, sur un matériau donné:

- les propriétés moyennes (spectre, BRDF).
- les images de la texture. Ces images ne correspondent pas à des couleurs physiques, et leur calibration n'est pas maîtrisée.

Le modèle de texture le plus complet pour la simulation de l'éclairage suppose connus:

- les propriétés moyennes (spectre, BRDF) utilisées pour le calcul de radiosité.
- les propriétés locales (image des réflectances spectrales locales et des BRDF locales) permettant de calculer les propriétés moyennes et de procéder au rendu.

Nous nous sommes intéressés, dans la suite, au réalisme colorimétrique des textures, sans aborder le problème de la variabilité des BRDF. Il nous faut donc passer des images de couleurs aux spectres de réflexion locale. La solution idéale consisterait à avoir des images de la texture dans toutes les longueurs d'onde, mais cette possibilité ne semble pas envisageable actuellement. La solution la plus réaliste semble être d'adapter le principe des mesures de luminances par caméra CCD [BH96] à la mesure des couleurs, mais cela implique un programme de travail de métrologie important, avec la définition de filtres (X,Y,Z) à adapter à une caméra donnée (ou à un appareil photographique numérique), la définition des domaines de validité de ces filtres, et le recalage des 3 images X,Y,Z entre elles.

2.3 Validation

Avant d'examiner comment on peut contrôler le passage des images de couleurs aux images de spectres de réflectance, il faut savoir comment on peut valider (ou rejeter) une telle représentation de la texture avec des mesures sur les matériaux réels.

On s'appuie pour cela sur la représentation décrivant à chaque pixel d'une texture la réflectance spectrale locale. L'intérêt de cette représentation est que le calcul de radiosité usuel utilise une représentation de ce type, dans laquelle les propriétés optiques de chaque pixel sont égales aux propriétés moyennes. Cette référence permet de tester la qualité d'un modèle de texture. D'autre part, si les données locales correspondent à des données réelles, le calcul de radiosité utilisant des moyennes spatiales sur des éléments de calcul est aussi exact que possible compte tenu des échantillonnages.

On distingue pour la colorimétrie deux critères: D'une part, la moyenne des propriétés locales (modélisées) doit être égale aux propriétés moyennes (mesurées), aux incertitudes de mesure près. D'autre part, le modèle doit être cohérent par rapport à une image de la texture. Si on ne connaît pas les conditions d'éclairage, ce critère est d'usage délicat. On peut en général faire des hypothèses: si les couleurs ne sont pas fiables, on peut supposer que les variations par rapport à la couleur moyenne le sont, et ainsi les comparer aux variations de couleurs observées lors d'une simulation.

Exemple. On définit 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 locale. Dans cette représentation, tous les pixels de la texture ont la même chromaticité (x,y). Cette chromaticité dépend des conditions d'éclairage, mais elle est unique pour une éclairage donné. Cette chromaticité dépend des conditions d'éclairage, mais elle est unique pour une éclairage donné.

Cette hypothèse est facilement vérifiable sur une photographie, même si on ne maîtrise pas les conditions d'éclairage, puisqu'on ne mesure que la dispersion des chromaticités. Ce type de

modèle convient par exemple pour tous les matériaux pour lesquels la texture n'est due qu'à la rugosité.

Dans le cas général, la validation expérimentale consiste à calculer une texture sous un certain éclairage, et à comparer le résultat avec des images digitalisées de la même scène. La modélisation concerne un matériau particulier, par conséquent la validation ne peut se faire que matériau par matériau.

3 Images de texture

3.1 Position du problème

La validation a posteriori n'est pas suffisante, et on doit chercher une méthodologie permettant d'utiliser les représentations précédentes à partir de données réelles (des images et un spectre moyen).

Contrainte fondamentale. La couleur moyenne du rendu dans un élément de calcul doit être égale à la couleur calculée par l'algorithme de radiosité à partir des couleurs moyennes, ce qui suppose qu'on a une définition de la couleur moyenne. On pose:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i,j} C_{i,j} \tag{1}$$

Mais il faut remarquer que le résultat n'est pas indifférent à l'espace colorimétrique utilisé. Par exemple, la moyenne dans l'espace colorimétrique Lab est différente de la moyenne dans l'espace colorimétrique XYZ (la moyenne est une opération linéaire, alors que le passage de Lab en XYZ ne l'est pas). Si on utilise des résultats de mesure exprimés en XYZ, il est crucial de calculer les moyennes dans le même repère.

Comment décrire un modèle permettant de passer d'une image à une distribution de réflectances? Il semble qu'on peut distinguer deux problèmes, qui sont liés aux deux approches de la texture décrites par [Gag83]: soit comme image structurée, soit comme ensemble de propriétés statistiques. Les deux problèmes sont résumés par les figures 2 et 4.

3.2 Représentation locale

Le premier problème consiste, à partir du spectre moyen de réflectance et d'une image de la texture, à définir une image de spectres de réflectance (fig. 2) compatible avec les données. Pour cela, on cherche une fonction Φ (spectre moyen, couleur locale) qui produit un spectre local dont la couleur est spécifiée. La fonction Φ doit être caractéristique du matériau. Cette démarche permet d'utiliser des mesures de spectre moyen et de couleur du pixel à partir d'une image de la texture dans un modèle explicite.

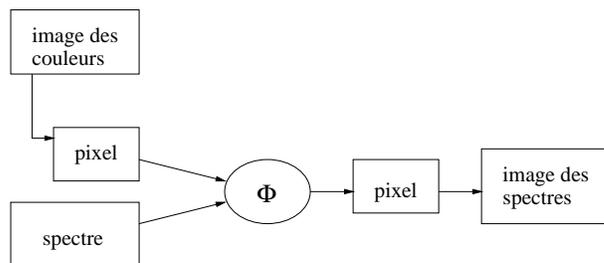


FIG. 2 – Modèles à représentation locale

Segmentation de la texture. Dans certains cas, on peut définir plusieurs matériaux différenciés au sein d'une texture. Il s'agit de matériaux composés (par exemple fig. 3.a) pour lesquelles on est capable de déterminer les constituants sur les images. Si on connaît par ailleurs les propriétés optiques moyennes de chacun des constituants, on peut les affecter localement en fonction de cette segmentation de l'image de texture (figure 3.c). On rencontre néanmoins dans le cas général des difficultés d'attribution (c'est à dire de segmentation des images), et d'acquisition des spectres moyens des constituants isolées.

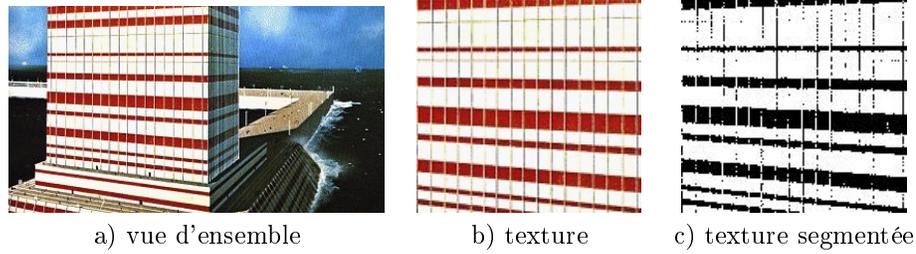


FIG. 3 – *exemple de texture à deux constituants*

Pour trouver les proportions de deux matériaux, on peut dans certains cas utiliser directement le spectre moyen (qui doit être une combinaison linéaire des deux spectres), en minimisant une erreur. Mais cette évaluation ne permet pas toujours de conclure, puisque si les coefficients de réflexion globaux au sein d'un même matériau varient d'un point à l'autre, on introduit des inconnues supplémentaires qui ne peuvent être levées qu'au prix d'hypothèses nouvelles (par exemple sur la répartition des coefficients de réflectance globaux au sein d'un même matériau).

Spectres équivalents. Si on utilise plus de 3 canaux pour représenter la réflectance, il y a une indétermination, puisque pour chaque couleur (X, Y, Z) , il existe une infinité de spectres de luminance qui sont vus (par un œil humain) avec cette couleur [Sev96]. Il est nécessaire pour spécifier un spectre de réflectance correspondant à cette couleur de faire une hypothèse anticipatrice [Mat78], qui puisse ensuite être testée.

Pour caractériser les spectres de luminance équivalents du point de vue visuel, on peut remarquer que deux spectres $f(\lambda)$ et $g(\lambda)$ sont vus avec la même couleur si et seulement si les produits scalaires suivants sont nuls ($x(\lambda)$, $y(\lambda)$ et $z(\lambda)$ sont les fonctions définies par la CIE² pour caractériser l'espace colorimétrique XYZ):

$$\int_{400nm}^{700nm} (f(\lambda) - g(\lambda))x(\lambda)d\lambda = 0 \quad (2)$$

$$\int_{400nm}^{700nm} (f(\lambda) - g(\lambda))y(\lambda)d\lambda = 0 \quad (3)$$

$$\int_{400nm}^{700nm} (f(\lambda) - g(\lambda))z(\lambda)d\lambda = 0 \quad (4)$$

Autrement dit si $f - g$ appartient au sous-espace orthogonal à celui engendré par $\{x, y, z\}$. On pourrait expliciter ce sous-espace en décomposant x , y et z sur une base orthonormée, construite par exemple avec les polynômes de Legendre ou de Chebichev, pour déterminer une base de ce sous-espace et ainsi avoir une procédure explicite de génération de spectres de luminance d'une couleur donnée.

Si les conditions d'éclairage sont maîtrisées, c'est à dire si le spectre d'émission de la source est connu, il est possible de proposer des spectres de réflectances compatibles avec des données, en l'occurrence la couleur d'un pixel sur une image. On aurait ainsi une procédure répondant au schéma de la figure 2.

2. CIE: Commission Internationale de l'Éclairage.

Représentation relative. En étendant le modèle monochrome (Cf. section 2.3) à une représentation trichromatique des réflectances, on peut essayer de s'affranchir de l'incertitude sur les couleurs d'une image digitalisée lorsque les conditions d'acquisition sont mal maîtrisées. On définit pour cela une réflectance sur chaque canal de manière relative, par rapport à la réflectance moyenne. On peut ensuite représenter le matériau éclairé par des sources dont on contrôle les propriétés.

On remarque que si C_D est la couleur moyenne de l'image digitalisée, C_1 celle du matériau réel mesurée dans des conditions comparables, et C_2 celle du matériau mesurée dans d'autres conditions d'éclairage, la représentation relative, dans le cas trichromatique, revient pour représenter le matériau dans les nouvelles conditions d'éclairage à modifier les couleurs des pixels de l'image d'origine comme suit:

$$C_{i,j}.x \mapsto C_{i,j}.x \frac{C_2.x}{C_D.x} \quad (5)$$

$$C_{i,j}.y \mapsto C_{i,j}.y \frac{C_2.y}{C_D.y} \quad (6)$$

$$C_{i,j}.z \mapsto C_{i,j}.z \frac{C_2.z}{C_D.z} \quad (7)$$

C'est à dire qu'on n'a pas besoin de connaître la couleur réelle C_1 . Cette représentation revient implicitement à faire une homotétie suivie d'une translation de l'histogramme dans l'espace colorimétrique utilisé, d'un ensemble de couleurs centré sur C_D à un ensemble de couleurs centré sur C_2 . La validité d'un tel modèle doit être contrôlée sur chaque matériau.

Validation partielle. La variance des couleurs fournit un exemple de validation partielle. Le modèle relatif qui vient d'être décrit fournit une prédiction des changements de couleurs qui n'est pas forcément réaliste. Dans le cas trichromatique (auquel on peut toujours se ramener à partir d'une description spectrale), le calcul de la variance sur des images réelles permet de réfuter le modèle dans certains cas. Si on définit la variance des couleurs par:

$$V = \langle \|C_{i,j} - \langle C_{i,j} \rangle\|^2 \rangle \quad (8)$$

le modèle prévoit que pour une image $C'_{i,j}$, la nouvelle variance V' est:

$$V' = V \frac{\| \langle C'_{i,j} \rangle \|^2}{\| \langle C_{i,j} \rangle \|^2} \quad (9)$$

qui ne dépend que de quantités moyennes, donc mesurables. On a ainsi une indication qui permet de préjuger de la pertinence de la représentation relative trichromatique sur un matériau donné.

3.3 Représentation statistique

La représentation des textures peut également se construire à partir de paramètres statistiques calculés sur des images de couleurs, selon le principe présenté à la figure 4. Pour certains types de textures, on ne dispose que de quelques images, et plutôt que de définir l'image des spectres de réflectance pixel par pixel à partir d'une image particulière de la texture (une photographie digitalisée), on recherche un modèle d'image de synthèse permettant de générer des images de texture qui aient les mêmes propriétés colorimétriques. La génération des images de spectres, qui a été abordée à la section précédente, n'intervient qu'ensuite, à partir de textures de synthèse.

Dans cette approche, on a besoin de définir un ensemble de paramètres qui seront considérés comme suffisants pour représenter ces propriétés significatives de la texture. Dans le contexte

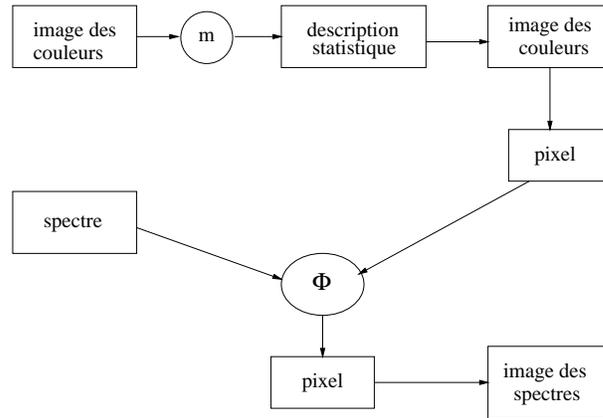


FIG. 4 – Description statistique des textures

de la simulation d'éclairage, on recherche particulièrement les propriétés colorimétriques indépendantes des conditions d'éclairage.

Les images synthétisées doivent restituer les paramètres statistiques retenus, mais on peut être plus ou moins sévère sur la définition de ces paramètres, en conservant seulement la couleur moyenne, la variance des couleurs ou l'histogramme tout entier.

Il ne suffit certes pas de reproduire une image ayant un histogramme donné pour avoir une texture visuellement équivalente, puisque la disposition spatiale des couleurs rentre également en compte dans l'identification de la texture. Mais cette disposition n'influe pas sur le mélange de couleurs caractéristique de la texture. A partir de ce constat, on s'est attaché à déterminer des modèles d'images qui respectent la distribution de couleurs d'une image, en ne retenant qu'un petit nombre de propriétés spatiales de texture.

Exemple. On présente ici un modèle d'image qui reproduit l'histogramme de l'image originale (dans le cas général, l'histogramme peut être reproduit soit tel quel, soit par une approximation qui prendrait la forme d'une densité de probabilité dans l'espace des couleurs).

Ce modèle présente une perte d'information importante par rapport à l'image de départ, tout en gardant l'information colorimétrique. On a choisi de décrire les propriétés géométriques de manière simplifiée, pour avoir un mode opératoire simple de génération de texture. La description des propriétés spatiales est ici limitée à deux paramètres, représentant les dimensions horizontale et verticale d'un élément de texture monochrome. Ces deux dimensions sont mesurées sur l'image en calculant les portées horizontale et verticale, c'est à dire dans chaque cas la distance à partir de laquelle les couleurs ne sont plus corrélées. On a ainsi un modèle d'image permettant de synthétiser des textures dont on contrôle les propriétés colorimétriques, en tirant au sort la couleur de chaque zone à partir de la densité de probabilité que définit l'histogramme des couleurs.

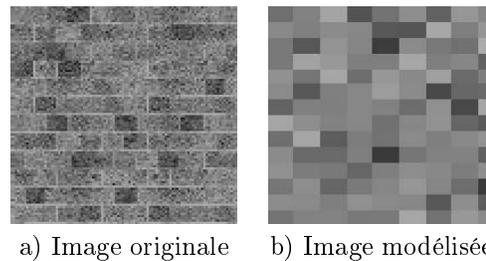


FIG. 5 – Modélisation de texture à partir de propriétés statistiques

La figure 5 présente un exemple d'une telle simplification de la géométrie, qui se justifie ici par une connaissance a priori sur le matériau (si on ne s'intéresse qu'à une seule échelle de structure). Pour un mur de briques, deux dimensions permettent de donner une première description, qui pourra ensuite être complétée en fonction de la précision souhaitée du réalisme de la géométrie. La simplification géométrique est bien visible, mais elle n'affecte pas la distribution des couleurs.

Un principe de cohérence élémentaire consiste à vérifier que l'image de synthèse est à elle-même son propre modèle. L'importance de ce type de modèle est liée à la nécessité de synthétiser des textures dont on contrôle la distribution des couleurs.

4 Conclusion

L'utilisation des textures dans une simulation d'éclairage peut poser un problème de réalisme lié aux possibilités de mesure, dans les cas où ces dernières ne sont pas réalisables à l'échelle des représentations utilisées par les textures. On est conduit à définir des modèles qu'il est possible de réfuter sur des matériaux précis à partir de données accessibles (spectre de réflectance moyen, images du matériau).

Plusieurs directions de recherche ont été abordées concernant la modélisation et la validation des modèles. Ce premier défrichage devrait permettre d'établir par la suite une typologie de textures réelles, afin de définir le domaine de validité des différents modèles de texture, et de déterminer les facteurs pertinents pour décrire les différentes familles de matériaux. Ce travail doit à son tour conduire à la constitution d'une base de données d'images de matériaux texturés, qui servira également de référence pour la validation des différents modèles.

Parallèlement, il apparaît nécessaire de caractériser plus précisément la chaîne d'acquisition des images de texture, dans des conditions maîtrisées tant en ce qui concerne les conditions d'éclairage que les couleurs physiques des images.

Enfin, la simplification des modèles de texture devra s'appuyer sur la recherche des invariants des images texturées, de manière à fonder les modèles sur des données facilement mesurables. Ces paramètres ne doivent pas varier:

- D'une image à l'autre du même matériau.
- Pour différentes sources d'éclairages.
- Pour diverses orientations de l'observateur et de la source.

Il semble raisonnable de séparer a priori les paramètres de rugosité, qui produisent une texture dépendante des directions d'éclairage et d'observation, et les paramètres colorimétriques, qui produisent une texture dépendante du spectre de la source lumineuse.

Références

- [BCLN93] 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.
- [BH96] C. Brusque and R. Hubert. La métrologie de la luminance par caméra ccd, étalonnage et qualification du système melusine. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, pages 39–47, September 1996.
- [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.

- [DSG91] J. Dorsey, F.X. Sillion, and D.P. Greenberg. Design and Simulation of Opera Lighting and Projection Effects. *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '91 Proceedings)*, 25(4):41–50, July 1991.
- [Gag83] A. Gagalovicz. *vers un modèle de textures*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1983.
- [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.
- [LD96] C. Loscos and G. Drettakis. Algorithme incrémental de mise à jour du maillage de discontinuité pour les environnements dynamiques. *IVe journées de l'AFIG*, pages 282–291, November 1996.
- [Mat78] G. Matheron. *Estimer et choisir*. Cahiers de géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Centre de Géostatistique, 1978.
- [Mic97] S. Michelin. *Communication orale*. 1997.
- [Pop73] K. Popper. *La logique de la découverte scientifique*. Payot, 1973.
- [PR97] B. Péroche and G. Rougeron. An adaptative representation of spectral data for reflectance computation. *8th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 127–138, 1997.
- [RT87] H.E. Rushmeier and K.E. Torrance. The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium. *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '87 Proceedings)*, 21(4):293–302, July 1987.
- [SAWG91] F.X. Sillion, J.R. Arvo, S.H. Westin, and D.P. Greenberg. A Global Illumination Solution for General Reflectance Distributions. *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '91 Proceedings)*, 25(4):187–196, July 1991.
- [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.