

Rendu en temps réel du changement d'aspect de matériaux poreux

K.Hnat, D.Porquet, S.Merillou, D.Ghazanfarpour

Laboratoire MSI - Université de Limoges
83 rue d'Isle 87000 LIMOGES

{hnat,porquet}@msi.unilim.fr



FIG. 1 – Résultats de notre méthode : gauche. - bas-relief poreux, milieu. - bas-relief pollué, droite. - bas-relief mouillé

Résumé : *Les interactions lumière/matière sont d'une importance cruciale en synthèse d'images réalistes. Dans l'optique d'obtenir un haut degré de réalisme, il est nécessaire d'étudier les propriétés de surface de la matière. Le défaut de surface le plus couramment rencontré est la rugosité. Bien qu'en général indiscernable à l'oeil nu, il implique de nombreux changements visibles au niveau de la réflexion lumineuse. La plupart des fonctions bidirectionnelles de réflectance prennent en compte ce phénomène. Cependant, la porosité des matériaux joue également un rôle important mais est souvent oublié en synthèse d'images. C'est pourtant une caractéristique très courante des matériaux réels et elle intervient dans un grand nombre de phénomènes de changement d'aspect et de vieillissement. Dans ce papier nous proposons une implémentation interactive d'un modèle de porosité de surface permettant de prendre en compte de nouveaux comportements visuels des surfaces. Ces nouvelles applications sont importantes en synthèse d'images réalistes et peuvent avoir des implications dans d'autres domaines tel que la sauvegarde du patrimoine culturel ou l'architecture.*

Mots-clés : porosité, vieillissement de surface, pollution atmosphérique, BRDF, rendu en temps réel

1 Introduction

Les images issues du rendu en temps-réel sont de plus en plus réalistes. Cependant, dans le but de franchir un nouveau pallier dans ce domaine, la simulation de l'interaction lumière/matière doit être améliorée. Une composante fondamentale de cette description est la micro-géométrie de la surface. Les défauts de surfaces visibles à l'oeil nu peuvent être rendus en utilisant des techniques modifiant la géométrie de manière virtuelle ([Bli78]) ou réelle ([Coo84]). Néanmoins, les surfaces possèdent également des défauts invisibles à l'oeil nu, impliquant des changements visibles. Parmi ces défauts, on peut noter la rugosité de la surface qui intervient dans la plupart des fonctions bidirectionnelles de réflectance (BRDF). La porosité est un autre de ces défauts. Elle est peu prise en compte en synthèse d'images alors qu'elle peut être très présente dans certains matériaux ([BS90]). Par exemple, la porosité d'un matériau comme la brique peut atteindre 0.4 (il s'agit de la proportion de surface couverte par des pores). De plus, outre son influence propre, la porosité est à l'origine de nombreux phénomènes liés aux changements d'aspect des surfaces. Elle est par exemple impliquée dans la corrosion destructrice car le réseau de pores de la rouille permet aux réactions chimiques de se propager à l'intérieur du matériau. La porosité permet également d'expliquer

les changements d'apparence des surfaces mouillées, qui deviennent plus sombres et plus spéculaires. La simulation virtuelle des matériaux poreux peut être d'une grande importance dans un domaine tel que la préservation du patrimoine culturel. Un logiciel permettant de déterminer les zones préférentielles de vieillissement des constructions pourrait aider à en prévenir les dommages. Notre approche est une première étape dans l'élaboration d'un logiciel complet de simulation en temps réel de vieillissement, capable de prendre en compte de manière physiquement plausible de nombreux phénomènes naturels affectant les matériaux de construction. Dans cet article, nous proposons une simulation temps réel de surface poreuse ainsi que certaines extensions permettant de prendre en compte de nouveaux phénomènes de changement d'aspect. La section suivante décrit le modèle de porosité et son implémentation en temps réel. Nous présentons ensuite deux extensions concernant la pollution des surfaces poreuses ainsi que le cas des surfaces mouillées. La section 4 montre les résultats obtenus. Finalement nous présentons nos conclusions et travaux futurs.

2 Le modèle de porosité en temps réel

2.1 Description du modèle utilisé

Le modèle présenté ici est décrit en détails dans [MDG00]. Ce modèle rajoute un pore déformé (à base cylindrique) à la représentation micro-géométrique de la surface classiquement utilisée pour décrire l'éclairage local. La distribution des pores est supposée uniforme sur la surface. L'influence d'un pore, considéré individuellement, suit quelques principes simples :

- La contribution de l'éclairage incident à la réflexion spéculaire est remplacée par une contribution à la réflexion diffuse, avec une modulation effectuée grâce à un coefficient d'ombrage et de masquage.
- la contribution de l'éclairage incident à la réflexion diffuse est modulée par les pertes éventuelles engendrées par le passage du rayon lumineux dans le pore (multiples rebonds).

Ces règles de fonctionnement peuvent être appliquées à n'importe quelle BRDF séparable en une composante diffuse et une composante spéculaire. Les coefficients diffus et spéculaires sont remplacés par des coefficients prenant en compte la porosité. De manière générique, une BRDF f_r modifiée s'exprime de la manière suivante :

$$f_{r,poro} = k_{d-poro}(\alpha, G_p, A_p) \cdot F_s + k_{d-poro}(\alpha, G_p, A_p) \cdot F_d \quad (2.1)$$

où α représente la porosité, G_p et A_p représentent respectivement les nouveaux coefficients d'ombrage/masquage et de perte d'énergie.

La mise en équation de ce modèle et son intégration dans les BRDF courantes sont détaillées dans [MDG00].

2.2 Rendu en temps-réel

Le rendu en temps réel de la porosité est effectué en utilisant les capacités des cartes graphiques actuelles. Leur flexibilité nous permet d'appliquer directement le modèle d'éclairage sans aucune approximation. Ces cartes décomposent le processus de rendu en deux parties correspondant à deux programmes distincts exécutés par la carte graphique : le *vertex shader* et le *pixel shader*. Ces programmes sont évalués respectivement au niveau des sommets du maillage et au niveau du pixel affiché.

1. Le *vertex shader* calcule en chaque sommet du maillage des informations qui seront interpolées sur la surface du maillage et utilisées ensuite par le *pixel shader*. Dans notre cas, ces informations sont d'une part les paramètres classiques de l'éclairage, c'est à dire les composantes diffuse et spéculaire F_d et F_s de la BRDF de Blinn-Phong, et d'autre part les informations géométriques (normale, position, coordonnées de texture).
2. Le *pixel shader* correspond à l'implémentation directe du modèle de porosité. En utilisant les valeurs de F_d et de F_s ainsi que les autres informations issues du *vertex shader*, nous calculons l'éclairage comme défini dans le modèle original.

3 Extension du modèle de porosité.

Pour étendre ce modèle de porosité à de nouveaux effets visuels, nous proposons d'utiliser une approche phénoménologique. Celle-ci nous permet d'obtenir des résultats physiquement plausibles tout en conservant un modèle simple et intuitif.

3.1 Pollution atmosphérique des surfaces poreuses

La pollution présente dans l'air, due notamment à la hausse de la combustion du fuel et de ses dérivés, dégrade beaucoup de constructions réalisées en pierres [Der99]. Cette pollution atmosphérique est un facteur majeur du changement d'aspect et de couleur de leur surface. Dans les sections suivantes, nous décrivons les altérations dues à la pollution, puis nous présentons un modèle permettant de réaliser le rendu d'un tel phénomène pour du rendu.

3.1.1 La pollution atmosphérique

Au cours des deux siècles précédents, la production et la consommation d'énergie ont fortement augmenté. L'utilisation de nouveaux combustibles ont menés à l'émission dans l'atmosphère de soufre et de dérivés soufrés (SO_4) sous forme de particules telles que la suie. Par exemple, la sulfatation des matériaux constituant le patrimoine culturel mondial est une observation courante [GDG98]. Ce processus affecte également la quasi-totalité des constructions urbaines.

Les mécanismes de la pollution atmosphérique sur les pierres poreuses font apparaître trois zones non uniformes, dont la localisation dépend : du type de pollution, du matériau, de la géométrie ou de l'exposition à la pluie. L'observation de telles surfaces polluées met en évidence trois zones distinctes [BPA⁺04, ABML98, Str01] les zones dites "blanches", "noires" et "grises" comme le montre la photo figure 2.

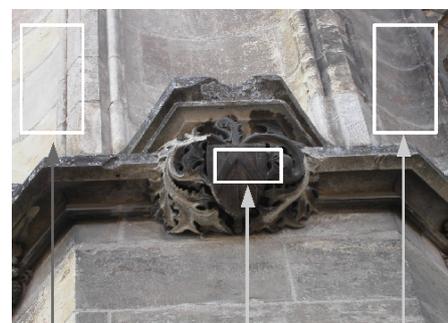
Zones grises Ce type de zone définit les parties du matériau protégées de la pluie ou du ruissellement. Le dépôt de particules présentes dans l'atmosphère y provoque un changement de couleur. Cependant, ces particules sont très sensibles au ruissellement : tout passage d'eau nettoie la surface de ses impuretés et stoppe le processus de croissance de la couche de pollution.

Phénoménologiquement, seules les parties de l'objet non exposées aux pluies correspondent à cette zone.

Zones noires Le noircissement de la surface est dû à un dépôt de particules carbonées dans les pores du matériau. Ces pores se remplissent de ces particules, elles-mêmes issues de la combustion du bois et du pétrole. Ce dépôt s'accompagne de formation de gypse ($CaSO_4$) qui cimente les particules dans le pore. Les matériaux très poreux et présentant un facteur de rugosité très important sont très sensibles à ce phénomène. Les particules piégées dans le pore ne peuvent être enlevées sans utiliser de procédé de nettoyage chimique ou mécanique. Un ruissellement d'eau même intense, par exemple, est sans effet. Ce nettoyage est une opération qui reste coûteuse, quand elle est possible. L'intensité et la rapidité de ce phénomène dépendent de la concentration en particules dans l'atmosphère et des caractéristiques du matériau. On peut également noter qu'une partie du noircissement peut être due au développement d'organismes bactériologiques (tel que des mousses) qui se développent quand l'humidité ambiante est forte. Ici, nous ne prenons pas en compte ce phénomène.

Phénoménologiquement, ce type de pollution se développe dans les creux et les angles saillants de la géométrie de l'objet.

Zones blanches Ce type de zone correspond à l'érosion de la surface soumise à la pluie et au ruissellement. La pluie nettoie la surface qui sans cela aurait été grise. Les objets retrouvent alors leurs couleurs d'origine car les



Blanche Noire Grise

FIG. 2 – Zones de pollution. Sur la partie gauche de l'image, le bâtiment est exposé au nord et à la pluie, tandis que la partie droite en est protégée.

particules déposées entre deux pluies sont enlevées.

Phénoménologiquement, seules les parties de l'objet soumises directement à la pluie sont concernées par ce phénomène.

Ces considérations phénoménologiques sont à l'origine du modèle présenté ci-après.

3.1.2 Description de la méthode

L'effet du vieillissement sur la géométrie elle-même (l'érosion) intervient assez tard dans le processus de pollution. Notre modèle ne prend pas en compte ce type de dégradation. Ainsi, nous ne simulons que le phénomène de pollution en utilisant comme base le modèle originel [MDG00]. Dans un premier temps nous expliquons comment détecter les trois zones de vieillissement sur un objet, puis nous modifions le post-traitement défini dans la section 2.1 pour réaliser le rendu de l'objet pollué.

Conceptions des textures représentant les trois zones de pollution La zone blanche est définie comme la partie de l'objet exposée à la pluie. Nous localisons les zones exposées à la pluie en utilisant une texture d'éclairage (*light map*). Nous construisons cette texture en assimilant la pluie à l'émission de lumière blanche issue d'une surface située au dessus de l'objet. Nous obtenons une texture d'éclairage 2D (voir figure 3(b)) correspondant aux zones directement exposées à la pluie. Cette texture nous renseigne également sur la localisation des zones grises (non exposées à la pluie) car elles sont complémentaires des zones blanches.

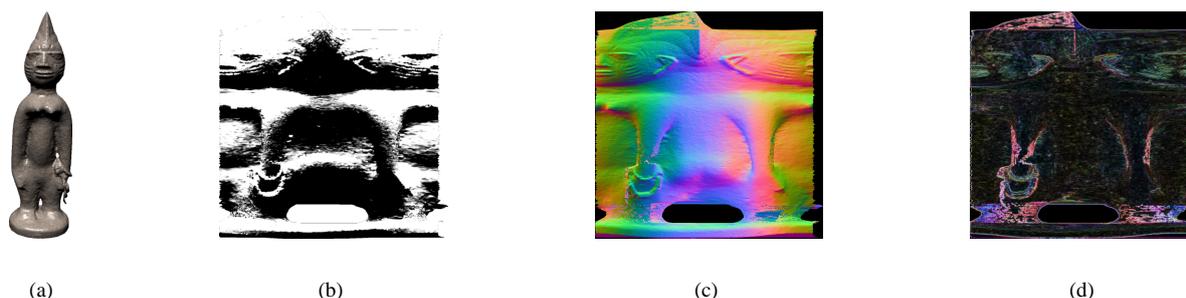


FIG. 3 – Texture d'éclairage (b), de normales (c) et de contours (d) issues d'une statue Africaine (a).

La zone noire correspond à une pollution qui se propage dans les creux et les bosses de la géométrie. Nous devons donc mettre en évidence ces endroits particuliers d'un objet. Dans ce but, nous utilisons la texture de normales de l'objet (voir la figure 3(c)). Cette texture est convoluée en utilisant un simple filtre d'extraction de contours (Sobel). Celui-ci permet de localiser les zones préférentielles de dépôt de la pollution, en donnant pour chaque pixel la variation de la normale sur la surface (i.e. creux et bosses). La figure 3(d) montre un exemple de cette texture de normales filtrée : les arêtes franches y sont directement visibles. Nous utilisons alors la moyenne des trois canaux de couleurs RVB comme seuil permettant de faire apparaître progressivement la pollution sur l'objet. D'autres méthodes de détection de variation de géométrie, plus précises, pourraient être utilisées ([OBS04]). Dans la mesure où nous devons simplement détecter des *départs de croissance de zones*, cette simple convolution s'est avérée suffisante.

Intégration de la pollution dans le modèle de porosité La zone blanche est nettoyée par la pluie. Le rendu est donc effectué en utilisant la BRDF post-traitée originale de l'objet. La zone noire est due à un dépôt de particules de carbone dans les pores. Le gypse cimente ces particules. La figure 4 montre l'évolution du dépôt de particules à l'intérieur d'un pore, qui peut être décomposée en trois parties :

- Etat initial : les pores du matériau sont vides. La surface est *propre*
- Etat intermédiaire : les particules se déposent et les pores se remplissent. Le gypse se crée et cimente les particules. L'aspect visuel global de la surface change.
- Etat final : les pores sont complètement remplis par les particules. Le dépôt est stoppé. Le noircissement est au maximum.



FIG. 4 – Remplissage du pore au cours du temps.

Les particules étant essentiellement composées de dérivés carbonés, nous pouvons en déduire que leur couleur est proche du noir et que leur comportement vis à vis de la lumière est purement diffus. Quand les pores du matériaux sont remplis par ces particules, la partie du modèle décrivant l'interaction entre le pore et la lumière est modifiée car la géométrie du pore a changé (leur hauteur diminue). Nous simulons le remplissage graduel des pores au cours du temps par l'utilisation d'un paramètre empirique t_{fil} représentant la temps de remplissage moyen des pores. Le seuil extrait de la texture de contours donne le temps t_0 à partir duquel le pore doit commencer à être rempli. Quand $\Delta t = t - t_0$ devient plus grand que le temps de référence t_{fil} , le pore est plein et le noircissement est au maximum. Durant Δt , la contribution du pore à la réflexion diffuse est remplacée par une contribution du polluant à cette même réflexion. La figure 5 montre les trois contributions prise en compte par notre modèle. La formulation mathématique du modèle devient :

$$\begin{aligned}
 k_{d-poro-polluted} &= k_d \cdot (1 - \alpha \cdot G_p) \\
 &+ \left(k_d \cdot \alpha \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \right. \\
 &+ \left. k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha \cdot G_p \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{t_{fil}} \right) \\
 &+ k_{d-pollution} \cdot \alpha \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \cdot \frac{\Delta t}{t_{fil}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Avec A_p la perte totale d'énergie lumineuse due aux rebonds dans le pore, G_p le coefficient de masquage/ombrage, α la portion de surface couverte par la porosité et $k_{d-pollution}$ le coefficient diffus des particules de pollution.

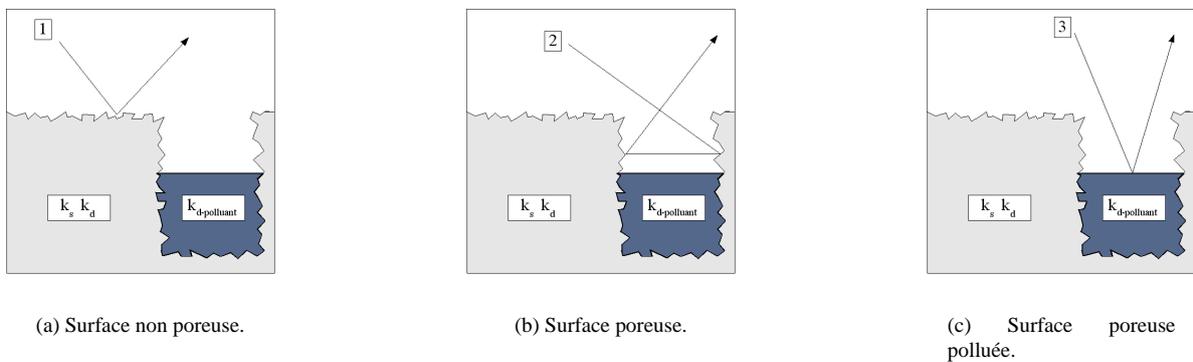


FIG. 5 – Les trois types de contributions prises en compte dans notre modèle.

3.2 Surfaces poreuses mouillées

Le changement d'aspect des surfaces poreuses mouillées a été par deux fois étudiée en synthèse d'image. D'une part, dans [JLD99], Jensen *et al.* utilisent un modèle de réflexion à double couche pour simuler ces changements en faisant apparaître les matériaux plus sombres, plus spéculaires ou transparents. D'autre part, dans [LGR⁺05], Lu *et al.* simulent le séchage de surface poreuses mouillées en se basant sur des paramètres issus de mesure. Dans la prochaine section nous proposons un modèle de rendu phénoménologique de surfaces mouillées.

3.2.1 Description du phénomène

Notre méthode est basée sur un phénomène simple. Quand une surface poreuse reçoit de l'eau, celle-ci pénètre dans ses pores et modifie l'aspect global de la surface

3.2.2 Le modèle de rendu

La figure 6 montre une surface poreuse dont un pore est partiellement rempli d'eau. Dans cet article et pour isoler l'influence de la porosité, nous considérons que la partie de surface non poreuse est inchangée. Nous approximons la surface de l'eau prisonnière des pores comme étant proche d'un miroir parfait. Ainsi, la contribution de chaque pore à la réflexion diffuse est remplacée par une contribution progressive à la réflexion spéculaire. Ce phénomène correspond au remplissage progressif du pore et est simulé en utilisant le procédé décrit en section 3.1.2.

Le modèle devient alors :

$$\begin{aligned}
 k_{d-poro-wet} &= k_d \cdot (1 - \alpha \cdot G_p) \\
 &+ \left(k_d \cdot \alpha \cdot G_p \cdot (1 - A_p) \right. \\
 &\left. + k_s \cdot (1 - A_p) \cdot \alpha \cdot G_p \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{t_{fil}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$k_{s-poro-wet} = k_s (1 - \alpha \cdot G_p) + k_{s-water} \cdot \alpha \cdot G_p \cdot \frac{\Delta t}{t_{fil}} \tag{3.3}$$

Avec A_p la perte totale d'énergie lumineuse due aux rebonds dans le pore, G_p le coefficient de masquage/ombrage, α la portion de surface couverte par la porosité et $k_{s-poro-wet}$ le coefficient spéculaire de l'eau. Pour augmenter le réalisme de nos images, nous utilisons la texture d'éclairage pour faire apparaître progressivement l'eau sur les objets (voir section 3.1.2). En effet, sur la texture d'éclairage (comme la texture 3(b)), les parties les plus exposées à la pluie sont colorées dans une couleur proche du blanc. À l'opposé les portions de l'objet qui ne sont jamais mouillées sont de couleur noire. Nous utilisons cette texture pour déterminer le moment où nous commençons à mouiller l'objet, c'est à dire à utiliser notre modèle (le pixel shader est modifié pour prendre en compte les nouvelles valeurs de $k_{s-poro-wet}$ et de $k_{d-poro-wet}$).

Le paramètre t_{fil} peut être compris comme un paramètre physique. Cependant on ne peut donner une formulation mathématique de ce paramètre car il dépend d'énormément de données (vitesse de dépôt des particules, pluviométrie, volume moyen et diamètre des pores).

4 Résultats

La figure 7 montre une comparaison entre un pot en céramique rendu avec le modèle de Blinn-Phong (à gauche) et avec notre modèle de porosité basé sur le même modèle de Blinn-Phong. On peut noter que le comportement attendu est obtenu : après application du modèle de porosité, la partie diffuse de la BRDF de l'objet est augmentée alors que la partie spéculaire est diminuée.

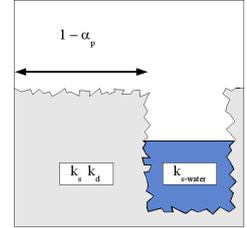


FIG. 6 – Pore partiellement rempli d'eau.

La figure 8 montre la pollution progressive d'un bas relief à intervalle de temps régulier. On peut remarquer que sur les bords de la sculpture, la zone noire s'étend. De même, la zone grise se développe dans la partie basse qui est protégée de la pluie par le relief de la sculpture elle-même.

La figure 9 montre l'influence de la porosité sur le modèle. Nous avons fixé le temps t et augmenté progressivement la proportion de pores sur la surface. On peut ainsi noter que plus le pourcentage augmente, plus la pollution se développe vite et plus la couleur devient noire, ce qui est physiquement valide.

La figure 10 montre une scène complète qui vieillit progressivement, en temps réel.

La figure 11 montre un exemple de surface poreuse mouillée. On peut voir la différence de spécularité entre la partie mouillée et la partie sèche. Les deux images présentées montrent le même objet sous deux angles différents pour bien faire apparaître le comportement spéculaire. On remarque également que le matériau devient plus sombre dans les parties où il est mouillé. On peut retrouver dans la figure 12 les mêmes effets présentés sur un bas relief. Le résultat de l'utilisation de la texture d'éclairage, permettant de localiser les zones où l'objet se mouille en priorité, est visible. La figure 13 montre un surface présentant les mêmes conditions, mais avec une proportion de pore qui augmente. On peut voir que plus la porosité est grande, plus la spécularité et l'assombrissement de la surface sont importants.

Des vidéos illustrant ces résultats sont disponibles à l'adresse suivante : <http://msi.unilim.fr/hnat/afig2005>



(a) Blinn-Phong $k_s = 0.5, k_d = 0.4, \alpha_{poro} = 0.0$

(b) Blinn-Phong + modèle de porosité $k_s = 0.5, k_d = 0.4, \alpha_{poro} = 0.35$

FIG. 7 – Le modèle de porosité appliqué à une poterie.



(a) $t = 0$

(b) $t = 0.2$

(c) $t = 0.4$

(d) $t = 0.6$

FIG. 8 – Evolution temporelle de la pollution sur un bas relief.

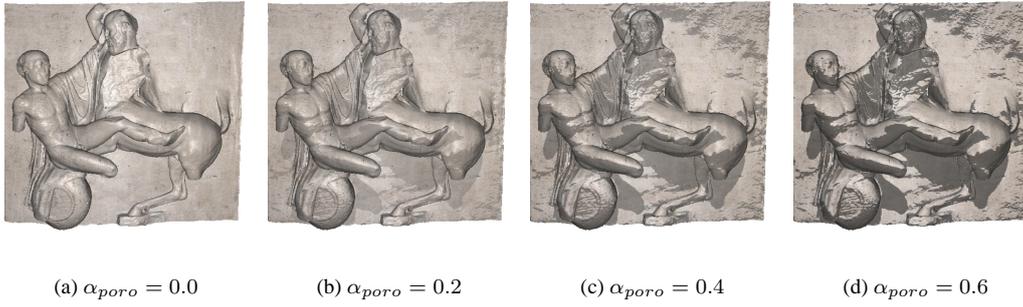


FIG. 9 – Influence du paramètre α_{poro} .

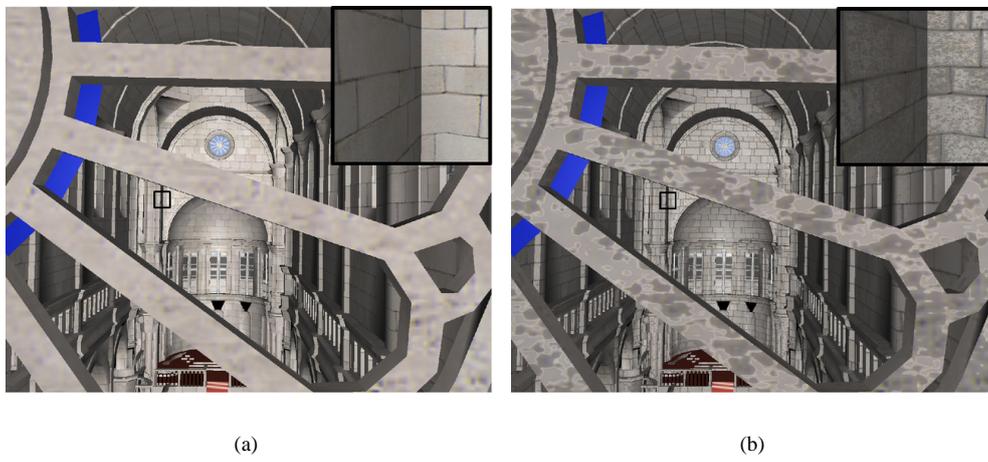


FIG. 10 – Une scène d'intérieur complète (cathédrale).



FIG. 11 – Effet de mouillage sur un bas relief.

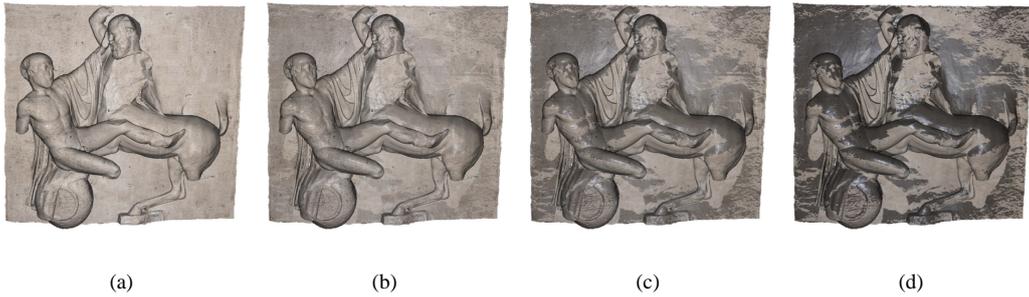


FIG. 12 – Effet de mouillage sur un bas relief - évolution au cours du temps.

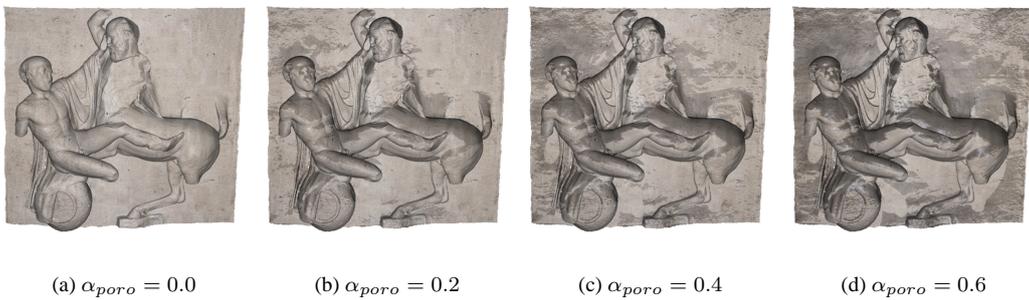


FIG. 13 – Influence du paramètre α_{poro} sur l'aspect mouillé d'une surface.

5 Conclusion et travaux futurs

Dans ce papier, nous avons proposé une implémentation du rendu de surface poreuse en temps réel ainsi que des extensions prenant en compte des changements d'aspects courants. Ces extensions permettent de réaliser le rendu de la pollution des surfaces poreuses ainsi que leur aspect mouillé. En sus de leur importance visuelle, ces défauts majeurs peuvent être également d'une grande importance dans d'autres domaines. Ainsi la prédiction de la pollution des monuments publics (cathédrales par exemple) est un enjeu économique dans le secteur du nettoyage. Comme notre modèle est phénoménologique, donc simple et intuitif, il est facile de l'intégrer dans des logiciels de simulations pour des applications d'architecture.

L'objectif de nos travaux en cours est d'introduire de nouveaux modèles de vieillissements liés à la porosité. Par exemple, le vieillissement de la peinture ou des vernis dépend notamment de la porosité sous-jacente du matériau. Par ailleurs, la porosité en surface, bien qu'importante, ne doit pas être prise en compte seule pour un calcul efficace et précis de l'interaction locale entre matière et lumière : des modèles de réflexion volumique peuvent également être induits par la porosité contenue dans le matériau. Ces travaux consistent donc à tendre vers des modèles physiquement robustes pour améliorer la qualité globale des images produites.

6 Remerciements

Maya a été utilisé pour calculer les textures de normales et d'éclairément. Les modèles 3D utilisés sont mis à disposition par Paul Debevec (<http://www.debevec.org>) et Marco Dabrovic de RNA Studio (<http://www.rna.hr>), grâce leur soient rendues.

Références

- [ABML98] P. Ausset, F. Bannery, M. Del Monte, and R.-A. Lefèvre. Recording of pre-industrial atmospheric environment by ancient crusts on stone monuments. In *Atmospheric Environment*, volume 32, pages 2859 – 2863, 1998.
- [Bli78] James F. Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. In *Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 286–292. ACM Press, 1978.
- [BPA⁺04] A. Baulig, J. J. Poirault, P. Ausset, R. Schins, T. Shi, D. Baralle, P. Dorlhene, M. Meyer, R. Lefèvre, A. Baeza-Squiban, and F. Marano. Physicochemical characteristics and biological activities of seasonal atmospheric particulate matter sampling in two locations of paris. In *Environmental Science and Technology*, volume 22, pages 5985 – 5992, 2004.
- [BS90] C. J. Brinker and G. W. Scherer. Sol-gel science. Harcourt Brace and Company Publishers, SanDiego, 1990.
- [Coo84] Robert L. Cook. Shade trees. In *Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 223–231. ACM Press, 1984.
- [Der99] Mickaël Derbez. Rôle des apports atmosphériques dans l’altération de calcaires tendres en environnement urbain : La cathédrale de Tours. *Doctorat de l’université de Paris XII - Val de Marne*, 1999.
- [GDG98] R. Van Grieken, F. Delalieux, and K. Gysels. Cultural heritage and the environment. In *Pure and Applied Chemistry*, volume 70, page p. 2327, 1998.
- [JLD99] H. W. Jensen, J. Legakis, and J. Dorsey. Rendering of wet materials. In Eds. D. Lischinski and G. W. Larson, editors, *Rendering Techniques '99*, pages 273 – 282, 1999.
- [LGR⁺05] J. Lu, A. S. Georghiades, H. Rushmeier, J. Dorsey, and C. Xu. Synthesis of material drying history : Phenomenon modeling, transferring and rendering. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pages 9–16, 2005.
- [MDG00] S. Merillou, J.-M. Dischler, and D. Ghazanfarpour. A BRDF post-process to integrate porosity on rendered surfaces. In *IEEE Transaction on Vizualisation and Computer Graphics*, volume 6, pages 306–318, 2000.
- [OBS04] Yutaka Ohtake, Alexander Belyaev, and Hans-Peter Seidel. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. *ACM Trans. Graph.*, 23(3) :609–612, 2004.
- [Str01] M. F. Striegel. Materials and cultural resources. In *National Center for Preservation Training and Technology*, 2001.