

surface est représentée comme une série de couches, et les patines sont formées par l'application à la structure en couches d'une série d'opérateurs intuitifs, tels «oxyder», «éroder» ou «polir». Par exemple, l'opérateur «oxyder» ajoute de l'oxyde à la couche supérieure. «Éroder» simule la perte de matériau détaché par l'action du vent ou de la pluie. Pour simuler en détail des variations d'épaisseur en fonction du temps, nous avons expérimenté une série de modèles à utiliser conjointement à la structure en couches, et où la patine croît sur la surface selon des motifs fractals (les fractales, des formes qui gardent la même structure quelle que soit l'échelle, sont très utilisées en infographie, pour engendrer des sols réalistes, de la végétation, etc.). L'apparence finale de la patine de cuivre dépend de la manière dont la lumière interagit avec les couches successives que nous simulons à l'aide du modèle de Kubelka-Munk (voir la figure 1).

La pluie est l'un des principaux phénomènes susceptibles de changer l'aspect des matériaux. Le ruissellement de l'eau enlève les salissures de certaines zones, et en dépose ailleurs. Cet effet est simulé à l'aide d'un modèle simple d'écoulement de l'eau, dit à «particules» : chaque particule représente une goutte d'eau dont le mouvement est commandé par la gravité, les frottements, le vent, la rugosité, les forces d'adhérence... Un ensemble d'équations décrit les interactions chimiques entre l'eau et la surface des matériaux : la vitesse d'absorption de l'eau, sa solubilité et la vitesse de sédimentation des dépôts. Nous avons ainsi simulé les effets de l'eau sur une reproduction virtuelle de la célèbre statue de la *Vénus de Milo* (voir la figure 3).

Nous avons d'abord recouvert la statue d'une couche uniforme de poussière, puis nous avons lavé la surface en lui appliquant une simulation d'écoulement. L'écoulement a engendré des stries nettes dans la poussière, ainsi que des caractéristiques aléatoires liées à la nature discrète des «particules» d'eau. La saleté s'est accumulée sur les portions de surface situées

hors du chemin emprunté par l'eau, par exemple sous le bras. Les salissures se sont réparties inégalement près des plis du vêtement ; par exemple, la surface des parties convexes des plis était propre vers le haut, et sale vers le bas. Les salissures sont par ailleurs plus uniformes à la base de la statue et vers le bas, parce que cette zone était moins exposée à l'eau.

Des pierres ancestrales

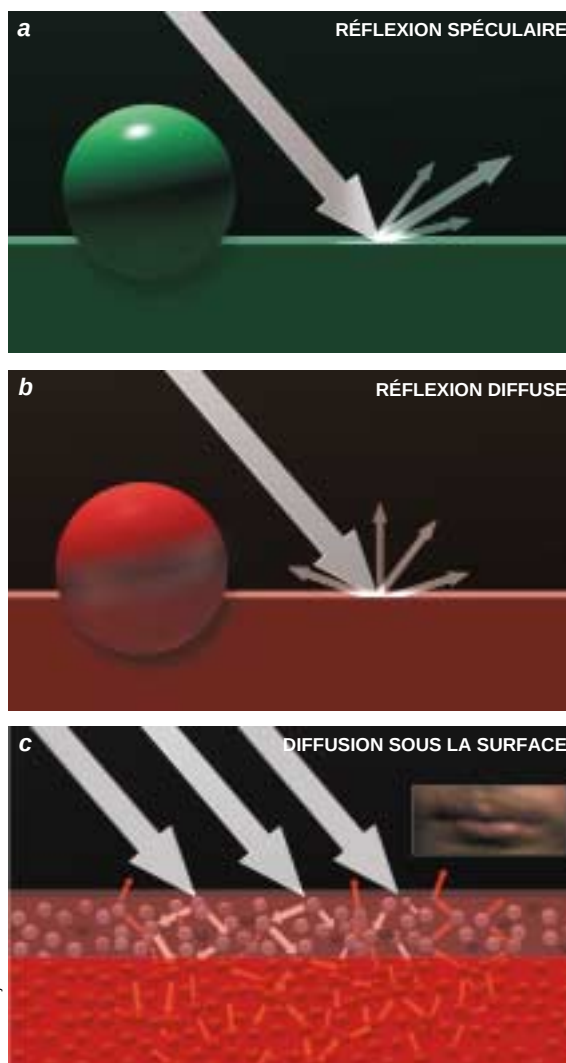
Les modèles de patine et d'écoulement de l'eau ne simulent que des effets de surface, car seule une mince couche de matériau proche de la surface est modifiée. Plus récemment, nous avons examiné des phénomènes naturels qui

agissent en profondeur, comme l'érosion des pierres. Les pierres sont un assemblage serré de microcristaux. L'arrangement de ces cristaux caractérise le type de roche et détermine en partie ses propriétés physiques et chimiques, dont sa dureté, sa couleur et sa longévité.

Comme le métal, la pierre est attaquée par les produits atmosphériques, oxydes de carbone, de soufre et d'azote qui, dilués dans l'eau, donnent les pluies acides, tristement célèbres. Au lieu de rester en surface, cette solution pénètre la pierre. Parfois, la roche subit alors des transformations chimiques, et une recristallisation engendre une croûte plus fragile que la roche initiale. Des morceaux de croûte se détachent, et une nouvelle couche de la pierre est exposée aux attaques acides. Le vieillissement des roches s'accompagne d'effets variés : changements de coloration, formation de croûtes sales, érosion de surface et dégâts structurels, telle la fissuration.

Comment un sphinx de granit est-il modifié par une telle érosion ? Nous avons modélisé la statue comme une coquille de pierre d'une épaisseur assez importante et dont la face externe correspond à la surface de la statue. Une fonction à trois dimensions décrit les minéraux présents dans la masse de cette «surface volumétrique». Le modèle environnemental inclut de l'eau et des polluants qui réagissent à la surface et à l'intérieur de la coquille. De cette manière, le modèle engendre un mélange volumétrique de minéraux et une «microgéométrie» de surface complexe. Afin de rendre la coloration et la translucidité dues aux minéraux proches de la surface, nous simulons la dispersion de la lumière à l'intérieur de la roche à l'aide du lancer de rayons stochastique.

L'infographie est fréquemment conduite à chercher des compromis entre des calculs trop longs et une médiocre qualité des images. Par exemple, quand une statue érodée apparaît à l'arrière-plan d'une scène, on a intérêt à remplacer une description précise des petites irrégularités



6. LA RÉFLEXION SUR LES SURFACES est un élément crucial des systèmes de création d'images. La réflexion spéculaire (a) engendre des surfaces brillantes avec des reflets. Les matériaux mats simples, tels que le carton, sont modélisés à l'aide d'une réflexion diffuse (b) qui disperse la lumière de manière isotrope. Pour de nombreux matériaux, la propagation de la lumière sous la surface (c) détermine l'apparence finale.

géométriques de sa surface par une carte de répartition des microfacettes. La texture reste admissible, mais les calculs sont bien moins longs. En revanche, lorsque la position de la caméra change et que la statue passe au premier plan, l'utilisation d'une carte des irrégularités s'impose (voir l'encadré ci-contre).

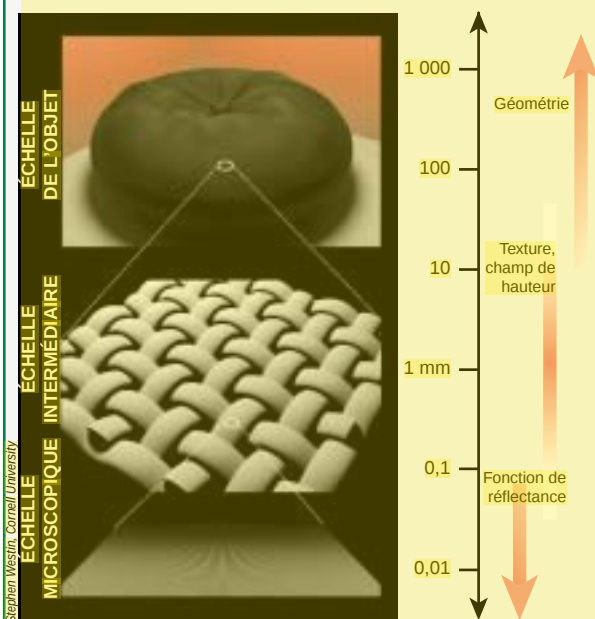
Nouveaux modèles, nouveaux rendus

La mise au point de modèles de matériaux pour l'infographie commence seulement, mais certaines questions fondamentales sur leurs limites se posent déjà. La physique décrit encore assez mal l'apparence des matériaux. La corrosion des métaux, par exemple, est très étudiée en raison de son intérêt scientifique et de son évidente importance pratique, mais les chercheurs n'en comprennent qu'imparfaitement les mécanismes. De surcroît, toutes les applications ne requièrent pas le même degré de précision du modèle. Par exemple, au cinéma, les objets doivent seulement donner l'illusion de la réalité ; peu importe que les algorithmes utilisés pour obtenir cet aspect correspondent ou non aux phénomènes physiques réels. En revanche, dans certaines applications scientifiques et techniques, l'exactitude physique est capitale. Ainsi, le modèle de peau que nous avons présenté illustre les compromis à réaliser et leurs contraintes : il convient pour de nombreuses applications, mais il ne tient pas compte des follicules pileux, des pores et des glandes sébacées, de sorte qu'il intéresse peu les dermatologues ou les biologistes.

La création de modèles de matériaux fondés sur les lois physiques et l'élucidation de leur vieillissement sont des chantiers importants en infographie. Les spécialistes cherchent une gamme plus variée de modèles de matériaux et de mécanismes qui modifient leur apparence. Le projet à long terme est la création des palettes de matériaux qu'un large public pourrait utiliser, de la même manière qu'il a aujourd'hui accès aux bibliothèques d'images. À mesure que les physiciens percent les mystères de la structure des matériaux, de nouveaux modèles informatiques apparaîtront, et les applications techniques et artistiques fleuriront. Dans la conception automobile, on pourra ainsi étudier de nombreux revêtements en les appliquant à

Différents niveaux de détail

Pour créer une seule image, les systèmes infographiques doivent parfois traiter des millions de formes géométriques et calculer des millions de fonctions de réflectance. L'utilisation de modèles de matériaux doit se faire astucieusement, sans quoi le nombre de calculs est rédhibitoire. Par exemple, on peut calculer la réflectance, ou en chercher des valeurs approchées, lors d'une phase préparatoire, et garder les résultats en mémoire pour le calcul du rendu proprement dit.



Le meilleur modèle d'une surface, ici celle d'un coussin, dépend du niveau de détail nécessaire.

sera représentée par de fines variations de l'ombrage et par l'ajout éventuel d'ombres portées. Pour des prises de vues lointaines, une description par des microfacettes est suffisante.

La détermination automatique des représentations adéquates des surfaces et des matériaux selon la distance de la caméra est un domaine de recherche actif en infographie. Comment obtenir un programme informatique qui trouve automatiquement le bon niveau de détail ? Aujourd'hui, ces scènes où l'on peut se déplacer à différentes échelles sont très complexes : elles contiennent des dizaines de millions de surfaces, de sorte que, pour l'efficacité du calcul, les approximations sont cruciales.

Une autre technique consiste à introduire une hiérarchie d'échelles et à utiliser la bonne échelle selon les circonstances. Lorsqu'une caméra s'approche d'un objet, les détails à sa surface doivent être modélisés correctement. Lorsque la caméra recule, les détails les plus fins deviennent inutiles. Par exemple, une surface rugueuse est habituellement représentée par un champ de hauteur. Pour les vues proches, ces irrégularités sont effectivement représentées par des déplacements de la surface. Pour des vues à des distances intermédiaires, seule une moyenne de la surface sera utile, et la rugosité

des voitures virtuelles, afin de connaître la structure, l'apparence et les performances des revêtements sur la durée de vie du véhicule. Les architectes et les conservateurs simuleront la durabilité à long terme des matériaux, et ils étudieront l'efficacité des différentes

méthodes de préservation. Enfin, les modèles informatiques de matériaux aideront même les stylistes à créer des apparences entièrement nouvelles, qui ne se contenteront plus d'imiter la nature, mais embelliront le monde où nous vivons.

Julie DORSEY travaille au Laboratoire d'informatique de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT). Pat HANRAHAN enseigne au département d'informatique et de génie électrique de l'Université de Stanford.

Pat HANRAHAN et Wolfgang KRUEGER, *Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering*, in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ACM, 1993.

Julie DORSEY et Pat HANRAHAN, *Modeling and Rendering of Metallic Patinas*, in *Proceedings of SIGGRAPH 96*, ACM, 1996. *Texturing and Modeling*, deuxième édition, sous la direction de D.S. Ebert et al., Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

Julie DORSEY, Alan EDELMAN, Henrik JENSEN, Justin LEGAKIS et Hans PEDERSEN, *Modeling and Rendering of Weathered Stone*, in *Proceedings of SIGGRAPH 99*, ACM, 1999.