

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

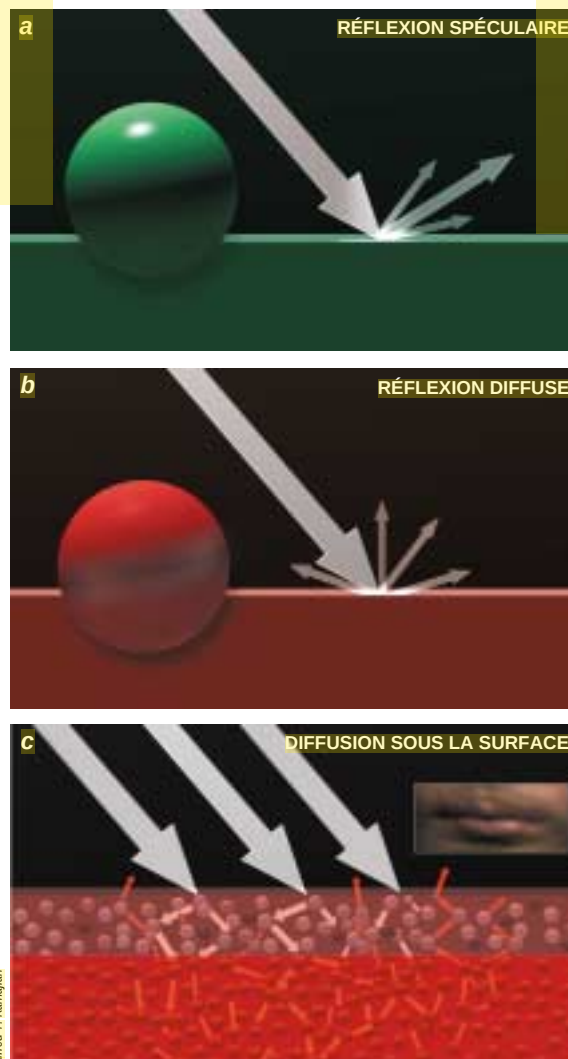
Les modèles de patine et d'écoulement de l'eau ne simulent que des effets de surface, car seule une mince couche de matériau proche de la surface est modifiée. Plus récemment, nous avons examiné des phénomènes naturels qui

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.