

reproduire les nuances naturelles de la peau humaine, à l'aide de couches successives de peinture et de laque. Au XIX^e siècle, le physicien anglais Lord Rayleigh identifia les principes optiques à la base de la couleur bleue du ciel, des irisations des ailes de papillon ou du lustre des surfaces polies. Aujourd'hui, les infographistes combinent intuitions et théories pour obtenir des simulations informatiques des mécanismes qui engendrent toute la gamme des apparences.

Pour créer des images réalistes, on doit modéliser la lumière et ses interactions avec l'environnement : les objets du décor, les accessoires et les personnages. On doit tenir compte des diverses sources lumineuses et analyser les scènes du point de vue d'une caméra virtuelle : une fois une scène définie, le programme de rendu calcule les chemins suivis par la lumière, des sources lumineuses jusqu'à la caméra (voir la figure 5).

Plusieurs algorithmes simulent la propagation de la lumière. Avec celui de radiosité, on décrit comment la lumière réfléchie par les surfaces mates éclaire leur environnement. Avec celle du lancer de rayons, on cherche la trajectoire des rayons lumineux à partir de l'observateur, en calculant ses réflexions sur les surfaces. Aujourd'hui, la technique de pointe est le lancer de rayons stochastique : les rayons lumineux qui arrivent sur une surface sont réfléchis aléatoirement dans différentes directions, avec des probabilités qui prennent en compte les propriétés des surfaces ou d'autres facteurs de l'environnement (la brume, par exemple). Cette technique simule efficacement l'interaction de la lumière avec des objets aux formes variées et avec des types de matériaux différents.

Les premières méthodes de rendu de surface ont été mises au point dans les années 1970 à l'Université de l'Utah. Les formes étaient souvent simplifiées : on les approchait par des triangles jointifs. Henri Gouraud, alors jeune étudiant français parti faire une thèse outre-Atlantique, a mis au point un modèle où le sommet de chaque triangle était d'une couleur donnée et la couleur de la lumière réfléchie était interpolée sur le triangle. Lance Williams et Edwin Catmull (qui fonda ensuite la Société Pixar) ont été les premiers à proposer le plaquage de texture, où la couleur d'un objet résulte d'une image



Pat Hanrahan et Wolfgang Krueger

2. LA PEAU HUMAINE est très difficile à simuler. Pour obtenir cette image, on a calculé l'interaction de la lumière avec l'épiderme (en surface) et avec le derme, fortement irrigué, situé en dessous. Les lèvres, par exemple, sont roses parce que l'épiderme y est très mince. Les données utilisées pour cette image ont été obtenues par les techniques de résonance magnétique nucléaire.

qui est plaqu e sur une représentation en trois dimensions de la surface de l'objet, comme le collage d'une décalcomanie sur une maquette en plastique.

Les premiers algorithmes de réflexion de la lumière sur les objets décrivaient les aspects essentiels de l'apparence des objets à partir de formules simples, sans considérer le comportement réel de ces objets. Ces algorithmes de réflexion «phénoménologiques» utilisent une fonction mathématique nommée «fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle».   chaque matériau, on associe une fonction particulière. Par exemple, certaines fonctions correspondent aux matériaux mats, tel le carton, qui dispersent la lumière de manière isotrope (c'est la loi de réflexion de Lambert). D'autres s'appliquent aux miroirs parfaits, qui réfléchissent un rayon lumineux dans une seule direction (voir la figure 6). Entre ces extrêmes, les surfaces brillantes émettent de la lumière dans des directions centrées autour de la direction de réflexion spéculaire. On modélise ces surfaces en ajustant les tailles des taches réfléchies les plus brillantes.

L'infographie classique traite séparément la texture et les reflets. En fait, pour la plupart des matériaux, la texture visuelle est plus distinctive que les propriétés de réflexion, d'où l'importance de savoir engendrer et utiliser des

textures afin de calculer la réflexion en différents points d'une surface. Deux techniques très utilisées créent des combinaisons de texture et de réflexion : d'une part, les modèles procéduraux pour lesquels le résultat obtenu dépend de l'évaluation de fonctions prédéfinies, et, d'autre part, la peinture interactive en trois dimensions.

Dans un modèle procédural, un programme calcule et engendre le motif souhaité. Par exemple, on représente le bois à partir d'un système de cylindres. Ce système de base détermine alors la couleur et l'intensité de la lumière réfléchie par des pièces découpées dans le bois, des pieds de table par exemple.   l'inverse, dans la peinture directe en trois dimensions, l'ordinateur simule l'application d'une peinture sur un objet tridimensionnel. Les propriétés de la peinture déterminent l'apparence du matériau, et le motif est obtenu par l'application de coups de pinceau sur différentes parties de l'objet. Cette technique est très appréciée dans l'industrie du film d'animation, car elle est naturelle et intuitive pour l'artiste, qui visualise alors instantanément les modifications apportées.

Ces approches, quoique puissantes, ont leurs limites, notamment en raison du considérable travail manuel qu'elle impose : la peinture d'un motif complexe sur un bâtiment de pierre requiert des jours de travail. Des méthodes algorithmiques seraient clairement utiles en pareil cas. Par ailleurs, à mesure que les images numériques se banalisent, la gamme d'apparences à simuler s'élargit. Les techniques spécifiques à certains objets et à certaines applications atteignent vite leurs limites. La volonté de dépasser ces limites a conduit les informaticiens   intégrer davantage d'informations sur la structure des matériaux et sur l'interaction de la lumière avec la matière.

Du lisse au rugueux

La rugosité d'une surface, par exemple, modifie l'aspect d'un matériau. Une surface métallique bross e ou usin e comprend souvent de fines rayures. Un tissu contient des fibres entrecroisées (la trame et la chaîne), qui créent des différences de niveau. Les caractéristiques d'une surface peuvent également évoluer ; par exemple, quand on polit une surface, les aspérités disparaissent, d'où un aspect plus brillant.

À l'échelle microscopique, on obtient une surface rugueuse en modifiant de façon systématique une surface moyenne. On décrit les perturbations soit par une fonction aléatoire qui possède des propriétés statistiques données, soit par une carte détaillée des structures microscopiques de la surface.

Au XVIII^e siècle, le géophysicien français Pierre Bouguer a étudié le premier les reflets des surfaces rugueuses. Il pensait qu'une surface était un assemblage de nombreuses facettes microscopiques, ou «microfacettes». La quantité de lumière réfléchie vers un observateur dépendait de la proportion de microfacettes alignées de sorte qu'elles réfléchissent la lumière de la source vers l'observateur. Bouguer espérait expliquer la loi de Lambert, qui décrit l'apparence des surfaces mates, en construisant un arrangement de microfacettes qui réfléchirait la lumière de la même manière dans toutes les directions, mais il n'y parvint pas.

Toutefois, les microfacettes se sont imposées pour la représentation des surfaces spéculaires ou brillantes. Les simulations infographiques de la réflexion spécifient directement la répartition des orientations de microfacettes. Le plus souvent, on utilise une répartition simple : un paramètre de rugosité définit le degré de déviation

des microfacettes par rapport à la forme générale de la surface.

Même pour des surfaces brillantes, les techniques fondées sur la répartition des microfacettes ont leurs limites. Par exemple, lorsqu'un rayon lumineux atteint une surface rugueuse avec un angle d'incidence faible, les reliefs engendrent une ombre importante, qui change radicalement l'apparence de la surface. Or, ces effets d'ombre de la surface sur elle-même sont difficiles à calculer. Lorsque la longueur d'onde du rayon lumineux devient comparable à la taille des microreliefs, le problème est encore plus ardu : le modèle de réflexion de Bouguer n'est plus applicable, car les effets ondulatoires, telles la diffraction et les interférences, interviennent.

Prendre le problème en profondeur

Pour de nombreux matériaux, la réflexion ne se résume pas à la simple interaction de la lumière avec la surface, c'est-à-dire avec l'interface de l'air et du matériau. Des interactions à l'intérieur du matériau entrent en jeu. Ce phénomène de dispersion sous la surface est courant dans les matériaux organiques, tels les plastiques. La profondeur d'interaction de la lumière est comprise entre

quelques micromètres (dans le cas de la peinture et d'autres enduits) et plusieurs millimètres (dans le cas de la peau ou du marbre).

Lors d'une réflexion sous la surface, la lumière pénètre au sein du matériau. À l'intérieur, la lumière est diffusée et absorbée par les constituants du milieu, atomes ou molécules. Ce phénomène est comparable à l'interaction de la lumière avec une nappe de brume constituée de gouttelettes d'eau. Une partie de la lumière diffusée revient à la surface et ressort du milieu, donnant à l'observateur l'impression qu'il s'agit de lumière réfléchie. La plupart des diffusions dévient la lumière d'un angle bien inférieur à 90 degrés, et de nombreuses diffusions de ce type sont parfois nécessaires pour renvoyer la lumière vers l'extérieur. Quand le nombre de déviations est grand, avant l'absorption de la lumière, la direction de propagation de la lumière devient aléatoire. Ce mécanisme, qui explique pourquoi la lumière ressort du matériau suivant une direction aléatoire, est celui que traduit la loi de Lambert.

Les physiciens ont d'abord mis au point la théorie de la dispersion dans les milieux stratifiés afin d'expliquer le transport radiatif (le mouvement de la chaleur et de la lumière par rayonnement) dans les atmosphères solaires



3. LE RUISSELLEMENT DE LA PLUIE modifie l'apparence des matériaux. À l'aide d'un algorithme qui décrit l'écoulement des particules d'eau sur une surface (ci-dessus au centre), on simule l'altération d'une *Vénus de Milo* couverte de poussière (ci-dessus à droite) et d'une façade (à droite).



Images : Julie Dorsey, Hans Pedersen et Pat Hamahan