

La structure interne de Callisto est aussi paradoxale que sa surface : le grand âge et la jeunesse s'y côtoient. Contrairement aux autres satellites galiléens, sa densité semble relativement homogène, signe que la majeure partie des glaces et des roches qui le constituent sont mélangées : le satellite n'a pas de noyau. Selon cette hypothèse, l'intérieur de Callisto n'a jamais été chauffé beaucoup, ni par des désintégrations radioactives ni par des marées solides. À l'inverse des autres satellites galiléens, ce satellite ne subit les effets d'aucune résonance orbitale.

Pourtant Callisto est loin d'être un corps inerte. Le magnétomètre de *Galileo* a détecté que le satellite perturbe le champ magnétique jovien d'une façon très particulière. Cette perturbation, différente de celle de Ganymède, s'apparente à ce que l'on observe dans les expériences de physique lorsque l'on soumet une sphère de cuivre creuse à un champ magnétique variable : ces champs provoquent la circulation de courants électriques dans l'enveloppe conductrice de la sphère, ce qui engendre ensuite un champ magnétique exactement opposé au champ imposé. Le champ magnétique de Callisto serait induit d'une manière analogue.

Quelle serait la composition de la couche conductrice d'électricité ? Les roches, la glace et les particules ionosphériques sont de mauvais conducteurs. Reste une possibilité qui aurait semblé farfelue il y a peu : un océan d'eau salée couvrirait la surface du satellite. On a calculé qu'une couche d'eau de mer d'une épaisseur de quelques dizaines de kilomètres expliquerait les mesures magnétiques. Cette coexistence d'un intérieur relativement indifférencié et d'un océan de surface intrigue les théoriciens. Callisto doit être assez chaude pour abriter un océan, mais pas trop chaude, sans quoi les matériaux lourds et légers se dissocieraient.

La couche aqueuse pourrait se trouver en sandwich entre un intérieur chauffé par la radioactivité, où les maté-

riaux resteraient mélangés par convection, et un mince manteau de glace, où un cycle de convection différent refroidirait l'océan.

Bien que la mission *Galileo* se soit concentrée sur l'étude des satellites galiléens, l'orbiteur n'a pas négligé les membres moins importants de la famille jovienne. Ses capteurs ont enregistré des images des quatre petits satellites intérieurs : Métis, Adrasteé, Amalthée et Thébé, par ordre de distances croissantes à Jupiter. D'après les images, ces petits satellites sont directement responsables des anneaux de Jupiter. Une série de photographies, prises alors que la sonde se trouvait dans l'ombre de Jupiter, a montré les minuscules particules de poussières de ces anneaux éclairées par la lumière solaire arrière. Ces images montrent les anneaux principaux et l'anneau ténu et filamenteux déjà observés par *Voyager* en 1979. Elles révèlent aussi la structure complexe de l'anneau filamenteux. Il est constitué de nombreuses couches directement reliées aux orbites de Thébé et d'Amalthée. Ainsi, les anneaux sont probablement constitués de débris microscopiques expulsés de ces satellites par les impacts de minuscules météorites.

Les données recueillies par *Galileo* ont radicalement modifié la vision que l'on avait du système jovien. Le système semblait simple ; on sait maintenant qu'il a une complexité comparable à celle du Système solaire tout entier. Avec les survols de *Voyager*, on avait connu l'excitation du premier regard sur un monde inconnu, mais seule l'étude détaillée faite par *Galileo* pouvait en faire découvrir toutes les nuances, et montrer les limites des catégories simplistes comme les «nuages porteurs d'orages» et les «satellites de glace». Bientôt, nous découvrirons le système de Saturne : une autre sonde, *Cassini-Huygens*, l'atteindra en 2004. Là encore, les planétologues s'attendent à obtenir quelques réponses, et beaucoup de questions...

Torrence JOHNSON travaille au Laboratoire pour la propulsion spatiale à Pasadena, en Californie.

Thérèse ENCRENAZ, *Les planètes géantes*, Belin, 1996.

Galileo Orbiter, section spéciale de *Science*, vol. 274, pp. 377-413, 18 octobre 1996.

Remote Sensing of the Galileo Orbiter

Mission, numéro spécial d'*Icarus*, vol. 135, n° 1, septembre 1998.

André BRAHIC, *Enfants du Soleil*, Odile Jacob, 1999.

The New Solar System, quatrième édition, sous la direction de J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Peterson et Andrew Chalkin, Sky Publishing, 1999.

Matériaux numériques et dégradation virtuelle

JULIE DORSEY • PAT HANRAHAN

Les ordinateurs formeront des images plus réalistes quand on décrira mieux la structure physique des matériaux et que l'on saura simuler leur dégradation par l'environnement.

En 1995, l'infographie franchit une étape décisive avec la réalisation du film d'animation *Toy Story* : pour la première fois, un long-métrage est entièrement fait sur ordinateur. Toutefois, les décors et les personnages «numériques» qui sont créés pour ce type de production ont souvent un aspect trop parfait, irréel. Tout est un peu trop lisse, trop propre, comme si des personnages de plastique sortaient de leur moule. Il manque la saleté et la poussière, les fissures et les rayures, le filet de rouille sur le mur à côté du tuyau percé, les plaques de vert-de-gris sur une statue de cuivre ancienne, les nuances subtiles de la peau humaine, avec ses taches de rousseur, ses pores, ses rides, sa couperose... Bref, il manque la marque du temps.

L'équipe de la Société Pixar qui a réalisé le long-métrage *Toy Story 2*, à la fin de 1999, a ajouté des effets d'«usure» tels que des rayures et de la saleté, en peignant des motifs sur des surfaces. Malheureusement, cette technique conçue au coup par coup allonge notablement les temps de calcul. Ni l'application des techniques existantes, ni le recours à davantage de puissance de calcul ne suffiront à faire perdre aux personnages obtenus par infographie leur apparence cireuse. Afin de créer des simulations qui n'aient pas l'air d'en être, les infographistes doivent apprendre à modéliser l'apparence des matériaux dans toute leur variété, avec des traces

d'usure et de salissure convaincantes. Les techniques de simulation d'éclairage comme le lancer de rayons et la «radiosité» augmentent le réalisme des scènes grâce à des effets d'éclairage tamisé et à des reflets, mais la complexité des images ainsi produites et, donc, la qualité du rendu dépendent avant tout d'une bonne compréhension du comportement optique des matériaux.

Le réalisme de ces modèles ne cesse de s'améliorer, en partie parce que l'on modélise explicitement la structure interne des matériaux : on simule la propagation et la dispersion de la lumière sous la surface. On modélise également mieux l'évolution des surfaces lors des mécanismes de vieillissement tels que la corrosion, qui crée des couches irrégulières d'oxydes et, à terme, détache des morceaux de la surface. Les infographistes cherchent aujourd'hui à créer une palette d'outils logiciels afin de «passer une couche» de ces mécanismes physiques,



1. LA FORMATION D'UNE PATINE sur une statue de Bouddha en cuivre est simulée à l'aide d'une série de couches qui représentent la structure physique de la surface. L'algorithme décrit l'oxydation de la couche supérieure et l'élimination de morceaux de matériaux endommagés, comme le feraient le vent et la pluie. L'interaction de la lumière avec les couches superposées détermine l'apparence finale.

de la même manière que l'on applique aujourd'hui de la peinture ou des textures simples sur les objets créés par ordinateur.

Les techniques de création d'images et de rendu ne sont plus l'apanage de l'industrie du spectacle : la Société

Boeing a utilisé les techniques de rendu destinées aux systèmes de réalité virtuelle dans la conception de son modèle 777 ; les architectes et les urbanistes utilisent les techniques de rendu pour mieux juger de l'impact visuel des bâtiments proposés sur leur voisinage.

Lancer de rayons, reflets et texture

Qu'est-ce qui donne son apparence au monde réel ? Au XVII^e siècle, Rembrandt et d'autres artistes hollandais et flamands ont appris à



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



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

et planétaires. Cette théorie a été reprise et étendue par des informaticiens intéressés par l'apparence de la peinture, de la peau, de la végétation et des océans. Ces modèles ont été récemment adaptés à l'infographie. Leur efficacité

et leur universalité est remarquable : ils décrivent aussi bien un mur fraîchement peint que les nuances du teint d'un visage humain, qui sont respectivement les textures les plus simples et les plus complexes à modéliser.

Ceux qui ont déjà acheté de la peinture savent que la peinture de couleur se prépare à partir de peinture blanche. La blancheur de la peinture blanche lui est conférée par du dioxyde de titane, qui diffuse très bien la lumière et ne l'absorbe presque pas. Lorsque la lumière tombe sur une surface peinte en blanc mat, les rayons lumineux pénètrent dans la couche de peinture et sont diffusés par les particules de dioxyde de titane en suspension dans le liant avant de ressortir de la peinture. La blancheur de la surface résulte de la très faible absorption de la lumière et de l'égale restitution des différentes longueurs d'onde du domaine visible. Les multiples diffusions, à l'intérieur de la peinture, font perdre à la lumière la mémoire de sa direction initiale : la direction résultante est aléatoire, ce qui donne l'aspect mat.

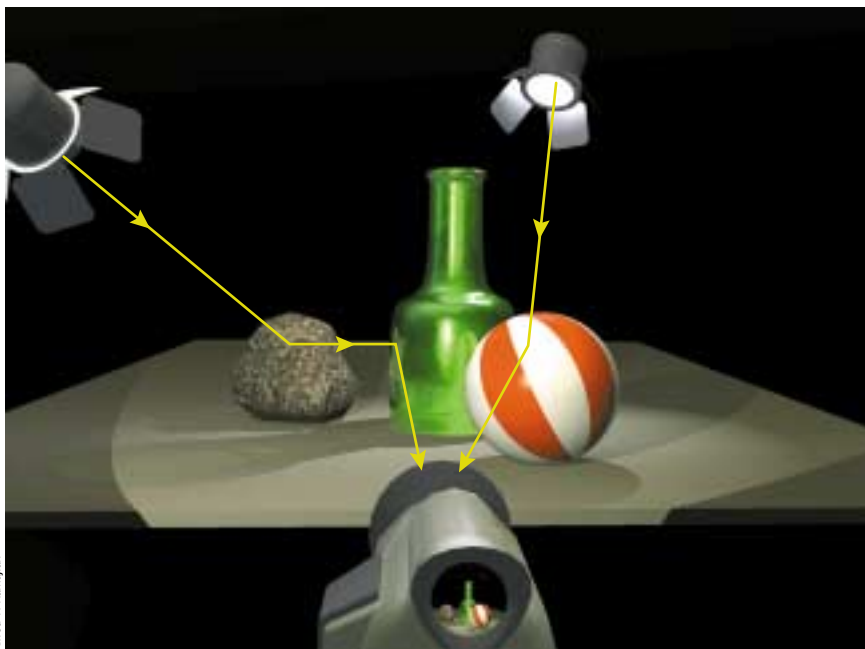
Une peinture de couleur s'obtient par le mélange d'une petite quantité de pigment à la peinture blanche. Ces pigments sont des composés qui absorbent certaines longueurs d'onde. Puisque les pigments sont en suspension dans un milieu diffusant presque parfait, la lumière finit par interagir avec un pigment et elle est partiellement absorbée : la lumière qui ressort a la couleur qui correspond aux longueurs d'onde qui n'ont pas été absorbées. Ce mécanisme a été modélisé pour la première fois par Paul Kubelka et Franz Munk en 1931. En supposant que le milieu contient des particules qui dispersent et absorbent la lumière de manière isotrope, ils déduisaient la couleur et l'intensité de la lumière ressortant du milieu selon son épaisseur et sa concentration en pigment.

Le modèle Kubelka-Munk est le modèle de réflexion sous la surface le plus simple et le plus utilisé. Toutefois, comme il suppose une diffusion isotrope, il ne s'applique qu'aux matériaux mats. Pour prendre en compte la réflexion dans des directions privilégiées, comme c'est le cas des surfaces brillantes, on a mis au point d'autres modèles où l'on sépare la lumière en deux composantes. La première correspond à la lumière qui ressort du matériau après une diffusion unique, et la seconde correspond au reste de la lumière, qui subit de multiples diffusions. Comme dans le modèle Kubelka-Munk, on suppose que la lumière diffusée plusieurs fois obéit à la loi de Lambert, alors que la lumière issue d'une diffusion unique



Julie Dorsey, Alan Edelman, Henrik Jensen, Justin Legakis et Hans Pedersen

4. L'USURE D'UN SPHINX DE GRANIT est simulée à l'aide d'une coque épaisse (cartouche). On a calculé comment l'eau et les molécules qui y sont dissoutes pénètrent la coque et réagissent chimiquement avec la pierre ; simultanément, des sels recristallisent dans la croûte érodée.



Alfred T. Kanajian

5. L'INTERACTION DE LA LUMIÈRE avec son environnement doit être simulée pour obtenir des images informatiques réalistes. L'environnement comprend des sources lumineuses, des objets et des caméras qui observent la scène. La simulation doit prendre en compte la réflectivité des surfaces et l'absorption de la lumière par les métaux.

est renvoyée selon la loi de diffusion de la particule concernée.

À l'aide de ces idées, nous avons modélisé la peau et résolu aussi un problème important de l'infographie. Le rendu de la peau est particulièrement difficile, à la fois parce qu'elle possède une structure complexe et parce que le système de vision humain a acquis une aptitude particulière pour discriminer les visages : nous obtenons un aspect plus proche de la réalité que pour les autres objets. Les modèles de diffusion sur des couches superposées surmontent ces difficultés avec efficacité.

La peau humaine est constituée de deux couches principales : le derme, à l'intérieur, et l'épiderme à l'extérieur. Le derme contient beaucoup de sang, ce qui le rend rouge. L'épiderme, beaucoup plus mince, contient de la mélanine qui, selon sa concentration, rend la peau claire, brune ou noire. De surcroît, l'épiderme peut être recouvert d'huile, de saleté ou de produits cosmétiques.

Afin d'engendrer des visages réalistes, nous choisissons les concentrations de sang et de mélanine, ainsi que les épaisseurs relatives du derme

et de l'épiderme. Par exemple, la mineur de la couche d'épiderme, sur les lèvres, explique que ces dernières sont plus rouges que le reste du visage. Les taches de rousseur sont modélisées par des «éclaboussures» de mélanine réparties aléatoirement sur les joues (voir la figure 2).

La simulation de la corrosion

Aux débuts de l'infographie, les modèles étaient idéalisés : on négligeait les changements dus à l'environnement et au temps. Toutefois, l'aspect des objets est déterminé par les phénomènes de vieillissement : les murs en brique patinés par les ans, les métaux rouillés, les pierres recouvertes de mousse, les poutres desséchées et fendillées résultent de phénomènes physiques, chimiques ou biologiques : corrosion, érosion, croissance biologique, sédimentation... L'évolution d'un matériau dépend étroitement de sa structure ; la pierre, le bois et les métaux évoluent différemment, parce qu'ils ont des structures distinctes. Les

méthodes de préparation, comme la taille, le polissage ou la teinture, ont également une influence. Depuis quelques années, nous simulons des mécanismes qui modifient l'aspect des matériaux d'abord en identifiant le phénomène physique à l'origine d'une modification spécifique de l'apparence, puis en élaborant les modèles appropriés.

Les patines métalliques sont un exemple classique de modification de l'apparence d'un matériau par interaction avec son environnement. Une patine est une pellicule sur une surface, qui résulte de la modification chimique de la surface, ou bien de l'adjonction ou de la disparition de matière. Les patines apparaissent naturellement, par corrosion atmosphérique (comme la pluie), ou artificiellement, par la peinture ou d'autres traitements de surface. La composition d'une patine et sa vitesse de croissance dépendent de l'environnement. Par exemple, les patines croissent en général plus vite en ville qu'à la campagne, car l'air contient plus de composés soufrés.

L'un de nos modèles reproduit la formation des patines de cuivre. La

La modélisation de la réflexion

La manière dont une surface réfléchit la lumière peut être caractérisée par une «fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle». Cette fonction mathématique définit la proportion de la lumière qui est réfléchie dans les diverses directions de l'espace, en fonction de la direction d'incidence.

La plus ancienne loi de réflexion, connue des Grecs anciens, stipule que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence. La distribution de réflectance bidirectionnelle est nulle dans toutes les directions, excepté dans l'unique direction où toute la lumière repart.

La loi de Lambert décrit la réflexion sur les surfaces mates : la lumière se réfléchit de manière isotrope, quelle que soit la direction de la lumière incidente. La loi de Lambert est un bon exemple de modèle phénoménologique, car elle rend bien compte de l'apparence de matériaux mats, comme le carton, sans description du mécanisme physique à l'origine de cette redistribution de la lumière. Entre ces deux extrêmes que sont les miroirs parfaits et les surfaces mates, les surfaces brillantes ont des distributions de réflectance qui considèrent une réflexion autour d'une direction principale.



Mesure de la réflectance d'un objet.

Depuis des années, les spécialistes de l'optique et des radars, ainsi que certains spécialistes des matériaux mesurent directement les distributions de réflectance des matériaux. De telles mesures ont certainement joué un rôle important dans la conception des avions furtifs.

Les distributions des réflectances intéressent également la télédétection : l'apparence des forêts et des champs, entre autres, varie en fonction de l'angle du Soleil et de l'angle d'observation du satellite. C'est un problème inverse de la simulation de l'apparence d'un matériau : il s'agit d'identifier un matériau à partir de son apparence.

Des instruments mesurent les distributions de réflectance (voir la figure ci-contre). Une source lumineuse éclaire un échantillon placé au centre de l'appareil. Un photomètre se déplace tout autour de l'échantillon et mesure la lumière réfléchie dans chaque direction. Afin d'obtenir la réflectance du matériau étudié dans tout l'espace, on répète les mesures en modifiant la position de la source lumineuse. Les fonctions de réflectance déjà connues ne sont pas encore utilisées à grande échelle en infographie, mais plusieurs groupes examinent cette approche.

Marc Levoy, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz et Duane Fulk, Stanford University

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

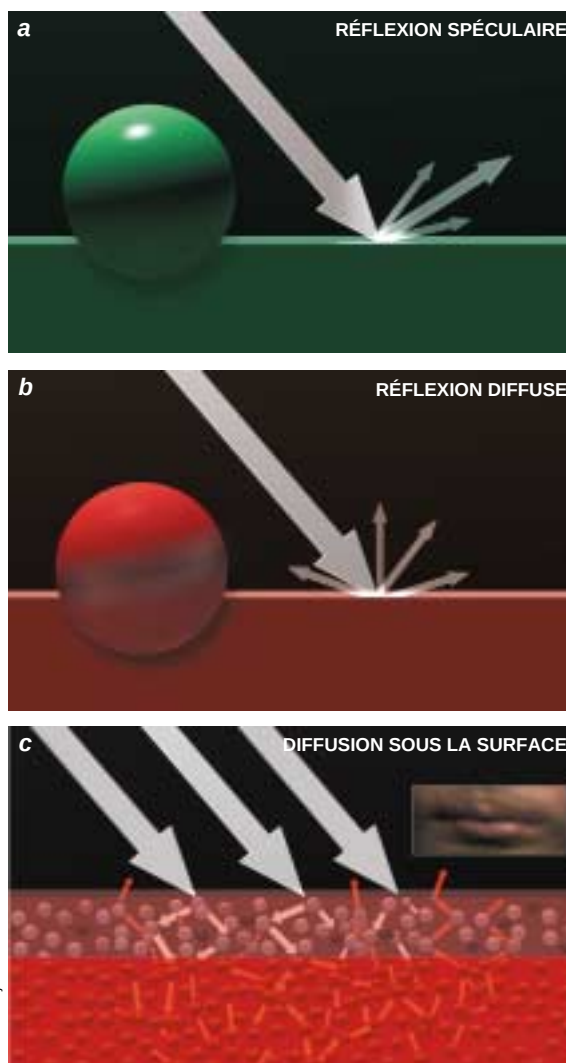
Les modèles de patine et d'écoulement de l'eau ne simulent que des effets de surface, car seule une mince couche de matériau proche de la surface est modifiée. Plus récemment, nous avons examiné des phénomènes naturels qui

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).

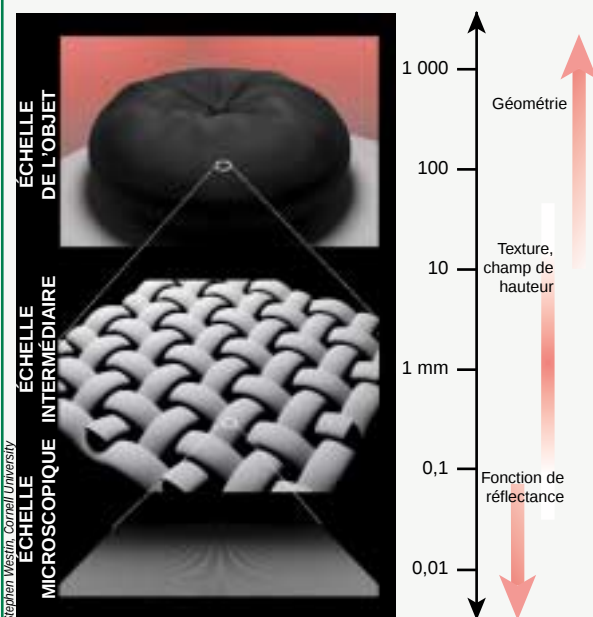
Nouveaux modèles, nouveaux rendus

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.

