

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 réfléchi 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 réfléchi 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 plaquée 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». À 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 réfléchi par des pièces découpées dans le bois, des pieds de table par exemple. À 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 à 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 brossée ou usinée 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.