

5. RECRÉATION MODERNE de la Toison d'or de Louis XV, dite « de la parure de couleur », avec, en son centre, le grand diamant bleu de Louis XIV. Supervisée par le haut-joaillier genevois Herbert Horowitz, cette récréation nécessita quatre années d'un patient et minutieux travail scientifique impliquant l'auteur et les meilleurs artisans (lapidaires, orfèvres, sertisseurs, ainsi que maroquiniers et relieurs pour l'écrin de l'insigne). Hauteur : 16 centimètres.

✓ SUR LE WEB

Retrouvez une simulation du diamant bleu en vidéo sur notre site Internet www.pourlascience.fr

Un site consacré à l'épopée du diamant bleu : www.lediamantbleu-lelivre.fr

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Farges et T. Piantanida, *Le diamant bleu* [roman historique], Michel Lafon, 2010.

F. Farges et al., *The French Blue and the Hope : new data from the discovery of a historical lead cast*, *Gems & Gemology Spring*, pp. 2-17, 2009.

F. Farges et al., *Deux découvertes majeures autour du diamant bleu de la couronne*, *Revue de gemmologie*, vol. 168, pp. 17-24, 2008.

R. Kurin, *Hope Diamond : the Legendary History of a Cursed Gem*, Harper Collins, 2006.

Les diamants, du cœur de la Terre au cœur du pouvoir, *Dossier Pour la Science*, n°35, 2002.

H. Bari et V. Sautter, *Diamants*, Muséum national d'histoire naturelle, 2001.

B. Morel, *Les bijoux de la couronne de France*, Fonds Mercator, 1988.

J.-B. Tavernier, *Les six voyages de Jean-Baptiste Tavernier*, Clouzier, 1676.

environ 300 carats. En d'autres termes, le diamant de Tavernier n'était probablement que la partie centrale d'un cristal plus important qui a cristallisé dans le manteau terrestre il y a plus de 1,2 milliard d'années (âge de la mise en place des cheminées diamantifères d'Inde), et qui a été scindé en trois parties depuis.

Où sont passés les deux autres volumes qui entouraient le diamant de Tavernier ? Ont-ils été clivés lors de l'éruption qui a rapproché la gemme de la surface terrestre ? Ont-ils été récupérés par les Indo-Moghols lors de leurs explorations minières ? Sont-ils coincés dans la croûte terrestre ? Ou le cristal d'origine a-t-il été coupé en trois morceaux par un mineur indien et vendu à trois clients différents ? Plusieurs candidats sont possibles : un diamant bleu de 35 carats et de couleur similaire a été vendu au roi d'Espagne vers 1660 ; Marie-Antoinette aurait eu un diamant bleu de 5,6 carats ; la famille des ducs de Brunswick en possédait un de 13,5 carats en provenance d'Inde. Sans parler de *Tereschenko*, un grand diamant bleu indien de 43 carats. Sont-ils issus de ce même cristal ? L'enquête sur la gemme elle-même trouve ici ses limites, mais les archives mogholes nous renseigneront peut-être.

D'où provient la couleur bleue ?

Ainsi, le mythique diamant bleu de la couronne, le plus beau des bijoux de la couronne de France avec le *Régent*, a été retrouvé grâce à un modèle en plomb resté inaperçu pendant 170 ans dans les réserves de minéralogie du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. C'est aussi grâce à ce modèle en plomb et à la description de Tavernier que nous avons pu retrouver les caractéristiques du diamant acheté par le voyageur, puis remonter au cristal tel qu'il s'est formé dans le manteau terrestre de Golconde, il y a plus de 1,2 milliard d'années, avant d'être projeté à la surface.

D'où venait ce modèle en plomb ? L'hypothèse la plus logique est qu'Achard connaissait le retailleur londonien (Jean Francillon, selon l'historien Bernard Morel), car ils étaient tous deux des lapidaires français protestants. La fabrication d'un moule en plomb avant de retailer un diamant est une tradition londonienne bien documentée, utilisée notamment pour le *Régent*. Pourquoi Achard a-t-il donné ce modèle en plomb au Muséum de façon aussi discrète ? Nous n'en savons rien, sinon que le « secret



professionnel » des grands joailliers prévaut encore de nos jours. Une chose est sûre : de par les qualités optiques du diamant décelées par simulation, la réplique en plomb a prouvé qu'elle était, bien plus que le diamant *Hope*, la digne héritière du diamant bleu français.

L'enquête n'est pas terminée pour autant. Nous recalculons actuellement la couleur du diamant bleu à partir d'une structure de carbone dopée en bore. Les gemmologues supposent que le bore confère au diamant sa couleur bleu métallique, mais nous n'en avons aucune preuve formelle et directe. Au moyen de calculs fastidieux assistés par ordinateur, nous estimons quelles longueurs d'onde sont absorbées par un diamant dopé en bore, afin de vérifier si le bore est la source de la couleur des diamants bleus. L'enquête historique se poursuit aussi, notamment sur les joailliers impliqués dans cette histoire : Pittan et Achard. Plusieurs documents ont été retrouvés, qui permettent de mieux cerner les personnalités de deux joailliers encensés en leur temps et aujourd'hui injustement tombés dans l'oubli. ■

NOUVELLE VERSION

SigmaPlot® 12



— DISPONIBLE POUR WINDOWS —



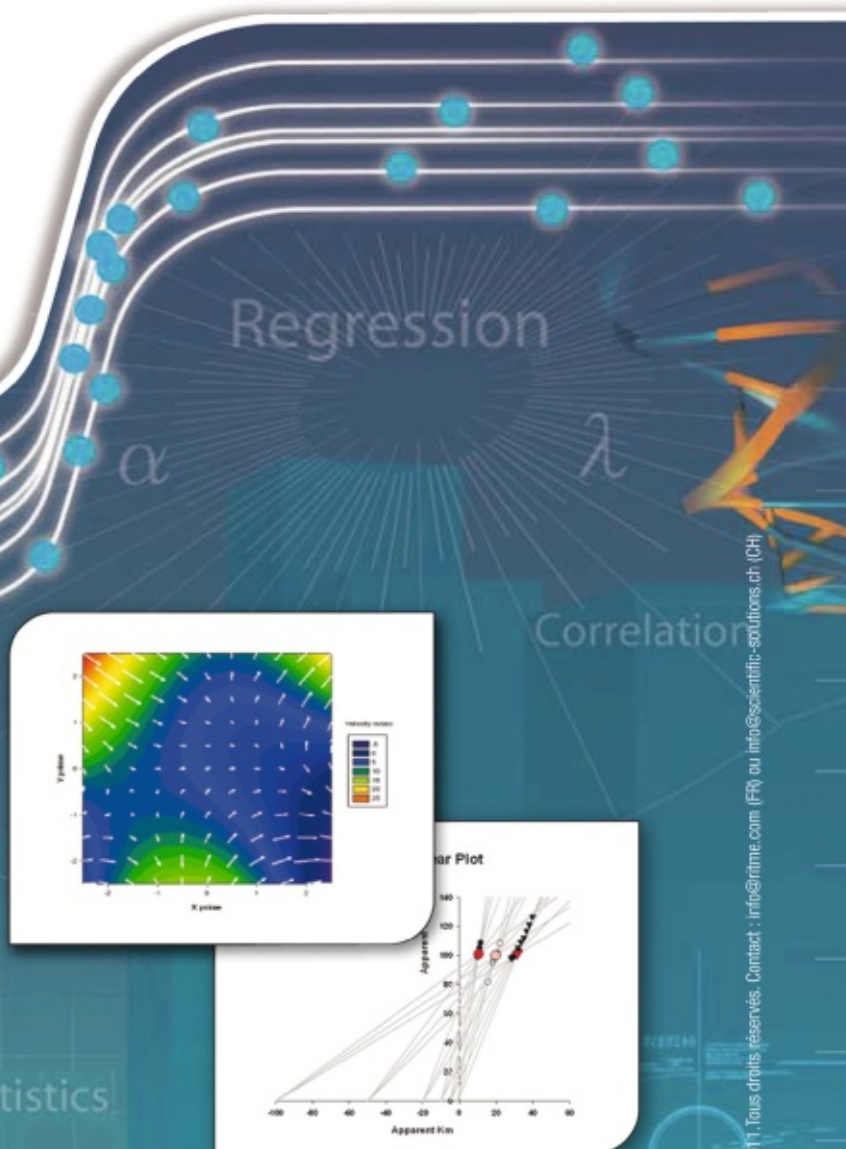
**Le logiciel d'analyse et de visualisation
de données scientifiques simple et performant**

SIGMAPLOT INTÈGRE MAINTENANT SIGMASTAT & LE MODULE ENZYME KINETICS

SigmaPlot offre de puissantes capacités graphiques, des outils d'édition performants, et la possibilité d'exporter aux formats EPS, TIF, JPEG, PDF, HTML pour publier vos travaux sur tous supports. Un large éventail de fonctions d'analyse : statistiques de base, régression, ajustement... ainsi que l'accès direct à SigmaStat vous permettent d'interpréter facilement vos données !

SigmaPlot & SigmaStat sont tous les deux parfaitement intégrés à Excel : vous pouvez utiliser les fonctions, les tableaux croisés dynamiques et les macros de MS Excel directement dans SigmaPlot & SigmaStat, et analyser votre feuille de travail Excel dans SigmaStat.

Module Enzyme Kinetics : maintenant intégré à SigmaPlot, il met à votre disposition plus de 40 équation-modèles pour l'analyse des réactions enzymatiques, de nombreux graphiques types vous permettant de déterminer le meilleur modèle d'inhibition.



SCIENTIFIC solutions

www.scientific-solutions.ch

Distribué en Suisse par Scientific Solutions SA

www.ritme.com

Distribué en France par Ritme Informatique



Des jeux vidéo plus réalistes



Henrik Wann Jensen et Tomas Akenine-Möller

Grâce à l'évolution conjointe des algorithmes et des composants matériels, l'informatique graphique crée des images de plus en plus proches de la réalité.

Depuis l'émergence, au début des années 1960, de l'informatique graphique à trois dimensions, ou 3D, les spécialistes du domaine rêvent de créer des univers virtuels dits photoréalistes, impossibles à distinguer du monde réel. Créateurs, architectes, éclairagistes, passionnés de jeux vidéo et du graphisme scientifique souhaitent que les cartes vidéo puissent afficher des scènes 3D interactives.

Les concepteurs et fabricants de matériels informatiques et d'algorithmes ont fait des progrès spectaculaires en la matière ; il suffit de regarder un adolescent s'adonnant aux jeux les plus récents pour s'en convaincre. Il reste néanmoins des défis de taille, à commencer par la tâche de calcul nécessaire pour produire de telles images. Des progrès ont été réalisés à l'aide d'algorithmes ingénieux, et les générations successives des processeurs graphiques ont permis d'organiser et réaliser les calculs lourds nécessaires à la synthèse d'images.

Pourtant, afficher des images photoréalistes en temps réel reste difficile. La plupart des ordinateurs de bureau n'utilisent

qu'une minuscule fraction de leurs cycles de calcul pour effectuer les tâches de routine. Rien à voir avec l'écrasante tâche qui incombe aux applications 3D les plus avancées : le rendu d'une seule image peut demander plusieurs heures de calcul aux machines les plus rapides, afin par exemple de suivre le chemin de milliards de photons ou les diffusions de la lumière sous la surface d'objets translucides.

La quête du temps réel

Or les joueurs vidéo les plus performants réclament aujourd'hui que les scènes 3D s'affichent à raison de 60 images par seconde au moins. Cette quête du temps réel est motivée non seulement par le désir de voir des scènes d'un bon réalisme, mais aussi par le besoin d'interagir avec elles. La norme télévisuelle de 29,97 images par seconde est suffisante pour un spectateur passif ; les applications en temps réel, tels les jeux et les simulateurs de vol, doivent fonctionner à la

vitesse des réflexes humains. Il s'agit de photoréalisme en temps réel.

En tant que participants à cette entreprise de création de graphismes à rendu réaliste (l'un d'entre nous se consacre plus particulièrement à la recherche d'une plus grande vitesse, l'autre à l'élaboration d'un meilleur réalisme), nous passerons en revue les différents types de calculs requis, les dispositifs qui ont été proposés pour les alléger, et l'univers parallèle du développement de matériels capables de mener ces calculs.

Les matériels et les logiciels évoluent de conserve depuis plusieurs décennies. Le secteur du matériel, porté principalement par la soif de vitesse des joueurs vidéo, a produit des cartes graphiques d'une extraordinaire puissance. Les calculs ont été transférés des unités centrales (CPU, *Central Processing Units*) des ordinateurs aux processeurs graphiques (GPU, *Graphics Processing Units*) des cartes vidéo commerciales. Le bond des prouesses de calcul entraîne alors la création d'algorithmes capables d'accroître le réalisme.

L'ESSENTIEL

✓ La puissance des cartes graphiques actuelles permet d'afficher des images de synthèse proches de la réalité à partir d'environnements virtuels en trois dimensions.

✓ Les jeux vidéo doivent manipuler de façon interactive un volume de données colossal et ne peuvent pour l'heure restituer des images parfaitement réalistes.

✓ Le rendu fluide et réaliste de scènes 3D demande des algorithmes qui réduisent le temps de calcul tout en créant les effets visuels typiques du monde réel.

Pour représenter la complexité visuelle des environnements virtuels 3D, les applications actuelles de graphisme en temps réel, les jeux par exemple, convertissent les descriptions des scènes en millions d'unités de construction nommées primitives géométriques : des points, des lignes et des polygones – souvent des triangles –, assemblés pour former des surfaces polygonales, c'est-à-dire des surfaces constituées de polygones.

Les premiers jeux (comme *3D Monster Maze*, dont on voit une image à côté du titre) représentaient les scènes à l'aide de quelques centaines de polygones ; même si à l'époque, déjà, interagir avec ces environnements 3D pouvait être prenant, l'attrait des jeux ne devait pas grand-chose au réalisme.

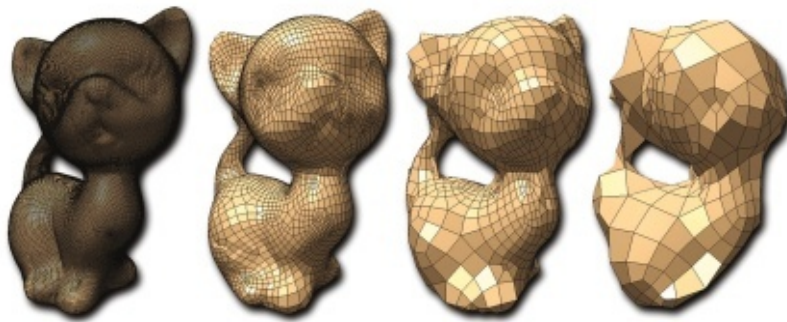
Construire une scène

Pour produire des images plus réalistes, une première étape a consisté à accroître le nombre de polygones sur les modèles 3D des scènes. Il faut bien choisir l'équilibre entre le plus grand réalisme ainsi rendu possible et le temps de calcul alors nécessaire. Le concepteur doit toujours se demander jusqu'à quel point pousser le souci du détail. Aujourd'hui, les processeurs graphiques sont capables d'afficher des scènes 3D composées de plusieurs millions de polygones à un rythme de 60 images par seconde, le point de référence des joueurs vidéo.

Si la tendance se poursuit, nous pouvons nous attendre à brève échéance à

1. LA DEMANDE DES USAGERS, couplée à l'amélioration des algorithmes et des composants matériels, rapproche l'informatique graphique de l'un de ses objectifs ultimes : l'animation au rendu réaliste. À la pointe de la technologie, le film d'animation 3D *Ratatouille*, des studios *Pixar*, a été produit par environ 850 ordinateurs équipés de près de 3 200 processeurs. Le temps moyen de calcul de chaque image était d'environ six heures, la projection se déroulant à 25 images par seconde. Chaque image était précalculée, mais il en va autrement pour les jeux vidéo, où une excellente qualité visuelle doit être conciliée avec la fluidité de l'animation, qui demande 60 images par seconde, calculées en temps réel. Les choses avancent en ce sens, comme on peut le voir avec le jeu interactif *Mirror's Edge* de la Société *Electronic Arts*, datant de 2008 (*ci-contre*). Ce jeu éblouissant parvient à afficher plus de 60 images par seconde sur des ordinateurs de bureau.

EA Digital Illusions Creative Entertainment



2. POUR VISUALISER ET ANIMER DES MODÈLES 3D, et afficher rapidement les images résultantes, il faut combiner optimisation et approximation. Les algorithmes optimisent les calculs nécessaires, et des éléments de la scène 3D tels que les ombres, les réflexions et même la géométrie peuvent n'être qu'approximatifs, la précision étant sacrifiée au profit de la vitesse. Ainsi, avec la technique de rastérisation, qui crée un rendu de polygones correspondant au modèle 3D, le nombre de polygones peut être plus ou moins grand. Les deux modèles de chat du milieu permettraient un rendu beaucoup plus rapide que celui de gauche. Plus la distance entre le spectateur et le chat augmente, moins le nombre de polygones à utiliser est élevé, avec une perte de qualité réduite.

l'arrivée de matériels qui manipuleront des centaines de millions, voire des milliards, de polygones à une vitesse suffisante. L'un des fondateurs des studios d'animation *Pixar*, producteurs d'animations 3D allant de *Toy Story* à *Ratatouille*, affirmait que 80 millions de polygones seraient nécessaires pour le rendu réaliste d'une scène donnée. Il semble donc que le matériel sera bientôt au rendez-vous du photoréalisme en temps réel. Toutefois, ce dernier est loin de se résumer au nombre de polygones mis en œuvre.

Avec le matériel informatique et les logiciels actuels, le moyen le plus rapide d'afficher une scène 3D sur un ordinateur, c'est-à-dire de convertir les données géométriques 3D des objets – leurs coordonnées dans l'espace à trois dimensions – en une image formée de pixels, est la rastérisation, ou rendu de polygones, la technique utilisée par les jeux vidéo actuels.

À partir de la position de l'observateur, l'algorithme traite la scène 3D en détectant ses parties géométriques visibles et ses parties cachées (y compris les parties postérieures des objets faisant face à l'observateur). Ce qui n'est pas visible est écarté pour accélérer le calcul, puis l'algorithme détermine quels sont les sommets géométriques les plus proches de l'observateur. Les polygones formés par ces sommets sont projetés sur un écran virtuel constitué de pixels (voir la figure 3). La couleur de chaque pixel est alors définie par la couleur et les propriétés de surface (aspérités, éclat, etc.) assignées au polygone correspondant, ainsi que par l'éclairage de la scène. On fait

enfin disparaître de l'image les angles entre polygones contigus en prenant la moyenne des valeurs de leurs couleurs.

Ce sont des instructions logicielles nommées *shaders* (nuanceurs) qui déterminent la couleur et les propriétés de surface d'un polygone. En général, l'information sur la surface est fournie grâce à des « cartes de texture », images numériques plaquées sur l'objet 3D. Le placage de textures est un art en lui-même. Dans les chaînes de production des studios 3D, les artistes se spécialisent pour reproduire, par exemple, non seulement la couleur d'une orange, mais aussi la rugosité de sa surface et le brillant de la cire.

Ombres et lumière

Le placage de textures en relief, conçu par l'un des pionniers de l'infographie, l'Américain James Blinn, à la fin des années 1970, a représenté l'une des premières percées en la matière. Ce dernier a apporté de nombreuses contributions capitales à la production d'images convaincantes à partir de données 3D. Le placage de relief rend les détails de la microstructure de la surface sans alourdir la géométrie globale. Il donne pour instruction à la carte graphique de manipuler l'éclairage local comme si la surface était bosselée, les bosses étant définies par les zones claires et sombres de la carte de texture.

Un environnement 3D est éclairé par des sources lumineuses virtuelles placées dans la scène. Les techniques de rastérisation utilisent quelques équations simples

pour calculer quelle quantité de lumière issue d'une source lumineuse donnée arrive sur chaque polygone, et quelle fraction est réfléchiée vers l'observateur.

Les premiers rendus de scènes 3D avaient une apparence irréaliste caractéristique, parce qu'il leur manquait un aspect essentiel du réalisme visuel : les ombres. La rastérisation a résolu ce problème en utilisant une technique qui procède à un affichage en plusieurs phases, ou passes. Par exemple, avec l'algorithme de placage d'ombres, une première image est construite du point de vue de la source lumineuse pour déterminer les polygones éclairés. Lors d'une deuxième passe, du point de vue de la « caméra », c'est-à-dire de l'observateur – différent de celui de la source lumineuse –, le calcul de couleur réalisé pour chaque polygone interroge la carte des ombres pour indiquer si celui-ci est visible depuis la source lumineuse ou s'il est dans l'ombre. La couleur du polygone est alors estimée pour rendre compte de l'ombre.

La rastérisation présente toutefois une faiblesse indiscutable pour reproduire les réflexions et les réfractions de la lumière. Les réfractions sont les déviations de la lumière quand elle traverse un milieu transparent tel que l'eau ou le verre ; comme les ombres, elles contribuent beaucoup au réalisme. Pour diverses raisons, ces deux types d'effets optiques ne peuvent être calculés au moyen de la technique de « peinture de polygones », la stratégie centrale de la rastérisation. Plusieurs propositions scientifiques ont tenté de contourner ce problème afin de donner l'impression d'effets miroirs ou de transparence, mais la méthode reste fondamentalement inadaptée à ces effets.

Il existe d'autres effets de lumière que la rastérisation ne parvient pas à reproduire. Dans les scènes réelles, les couleurs tendent à s'étaler lorsque des surfaces diffuses sont éclairées par des réflexions multiples. Ainsi, dans une pièce blanche garnie d'un tapis rouge, le tapis projette une subtile lueur rouge sur les murs blancs. Ce phénomène ne peut être simulé par rastérisation. Il en est de même des caustiques, concentrations lumineuses produites sur des surfaces par des objets transparents ou qui réfléchissent la lumière, comme celles que l'on voit au fond d'une piscine ou tout près d'un verre de vin posé sur la table.

Autre phénomène que la rastérisation n'arrive pas à simuler, la diffusion de la lumière sous les surfaces est un développement récent particulièrement important

du photoréalisme. Quand la lumière traverse la surface d'un matériau réel, elle est diffusée, en partie vers l'intérieur, et en partie vers l'extérieur, selon un effet de translucidité. La qualité visuelle distinctive de la diffusion sous la surface des objets entre en jeu dans l'apparence, entre autres, de la peau humaine, et la difficulté à la reproduire avec exactitude explique le rendu peu convaincant des visages.

Aujourd'hui, pour diverses raisons, dont les limites de la rasterisation dans le traitement des effets de lumière complexes, beaucoup de spécialistes pensent que cette technique ne pourra pas concrétiser l'affichage photoréaliste des scènes 3D en temps réel. La solution est à rechercher en partie du côté du matériel. L'une des technologies clefs du graphisme en temps réel repose sur des processeurs graphiques spécialisés capables de traiter et d'afficher rapidement quantités d'objets géométriques. Ces processeurs sont performants grâce à un haut degré de parallélisme : la tâche consistant à afficher une scène est divisée en tâches plus petites, traitées en parallèle par des unités de calcul spécialisées.

Programmer les processeurs

Pour cette raison, le graphisme peut être perçu comme un « trou noir » de puissance de calcul : plus vous injectez de la puissance pour répondre au problème, plus les consommateurs et les développeurs en demandent pour que leurs ordinateurs affichent des images toujours plus complexes. Les concepteurs des architectures matérielles, des processeurs centraux comme des processeurs graphiques, ont ces demandes du marché à l'esprit.

Depuis quelques années, on sait programmer les processeurs graphiques. Il y a dix ans, il s'agissait essentiellement d'unités à fonction fixe dont seuls certains paramètres étaient ajustables pour permettre quelques types de calculs différents. Cette rigidité limitait fortement les types d'effets graphiques possibles. Avec la flexibilité nouvelle des processeurs graphiques programmables, un programmeur peut choisir des modèles d'éclairage complexes pour tirer le maximum du matériel.

Le matériel programmable a également permis de trouver des astuces susceptibles de surmonter les limites inhérentes à la rasterisation. Par exemple, les chercheurs et les développeurs de jeux du monde entier,

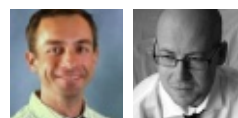
en quête de scénarios de jeux toujours plus réalistes, ont développé des algorithmes approximatifs à plusieurs passes qui imitent l'étalement de couleur, les caustiques et la diffusion de la lumière sous les surfaces en implémentant la rasterisation dans des processeurs graphiques. Cependant, cette solution commence à se heurter à un mur. Ses résultats sont attrayants, pour ne pas dire époustouflants, et pourtant, pour les standards du rendu réaliste, ils ne sont pas convaincants.

En fait, afin d'obtenir un véritable photoréalisme, il faut changer la façon dont le traitement en temps réel gère la géométrie des scènes 3D et leur éclairage. La course est lancée pour développer du matériel capable de prendre en charge de tels algorithmes. L'un d'eux est le lancer de rayons.

Conceptuellement, le lancer de rayons et la rasterisation ne sont pas très différents : tous deux déterminent ce qui est rendu visible le long d'un rayon. Le lancer de rayons diffère en ceci qu'il simule des rayons lumineux qui traversent une scène 3D, y compris les multiples nouveaux rayons nés de la réflexion de lumière par les éléments géométriques de la scène. En faisant remonter les rayons lumineux jusqu'à une source lumineuse, on peut rendre compte de façon assez naturelle des phénomènes physiques associés à la lumière, non seulement de la réflexion et la réfraction, mais également d'effets particuliers tels que les diffusions lumineuses multiples et les caustiques.

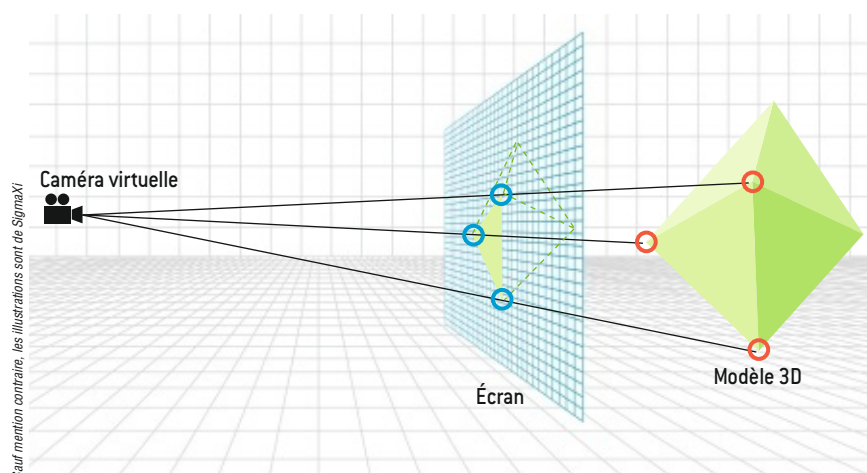
Le lancer de rayons est un algorithme élégant, relativement simple à programmer.

LES AUTEURS

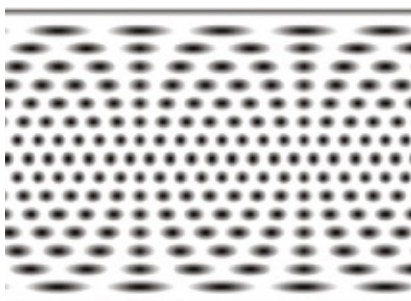
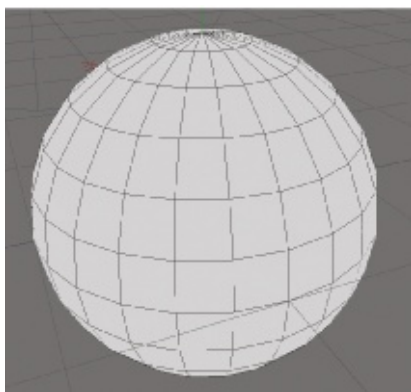


Henrik WANN JENSEN est professeur à l'Université de Californie à San Diego. Tomas AKENINE-MÖLLER est professeur d'informatique à l'Université de Lund, en Suède, et collabore avec Intel.

© American Scientist



3. LES ALGORITHMES DE RASTERISATION affichent un modèle 3D d'une scène en projetant, depuis la caméra virtuelle qui détermine la prise de vue, des rayons sur les sommets géométriques (en rouge) de la scène. Ces sommets définissent des polygones qui sont alors associés aux pixels d'un écran virtuel (en bleu). L'apparence de surface assignée aux polygones du modèle est alors calculée et projetée sur l'écran pixellisé pour créer une image.



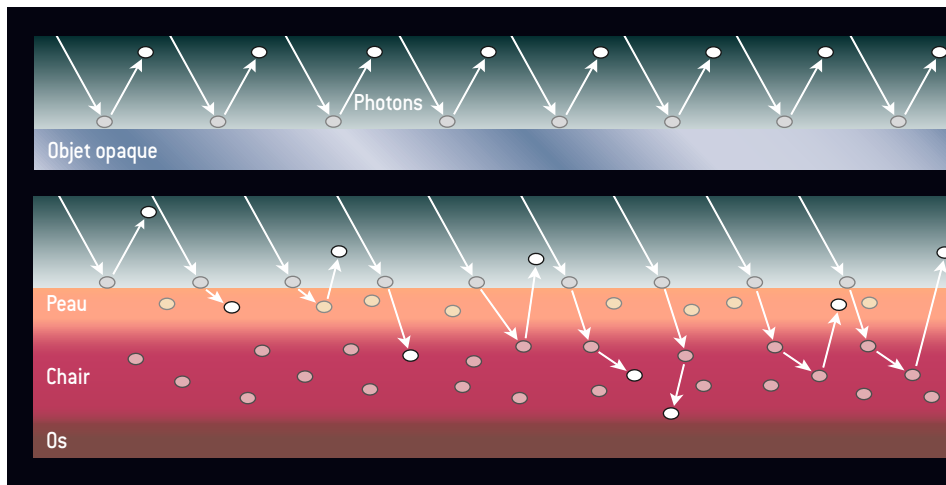
Carte de texture ou carte des bosses



Les zones claires et foncées de la carte des bosses sont converties au moment du rendu en information de hauteur.



4. LE PLACAGE DE RELIEF à partir de textures est une technique efficace pour faire apparaître des détails fins de surface au moment du rendu. En assignant une texture à un modèle 3D (*en haut*), on donne des instructions d'ombrage à la carte graphique sous forme de zones claires et foncées. Cela indique si les régions doivent projeter des ombres, comme si elles étaient légèrement surélevées ou abaissées par rapport à la surface réelle.



Ainsi, les instructions d'un simulateur de rayons opérationnel que Paul Heckbert, architecte graphique 3D pour le fournisseur de cartes graphiques NVIDIA, a codées, sont imprimables lisiblement sur une carte de visite. Le traitement naturel de la lumière par le lancer de rayons fait de ce dernier un candidat de choix pour remplacer la rasterisation.

Des millions de rayons

Les performances de vitesse de la rasterisation sont obtenues en déterminant les caractéristiques visibles d'un polygone, puis en passant au polygone suivant. Le lancer de rayons doit, lui, rendre compte d'une scène 3D entière dans laquelle les rayons lumineux rebondissent en tous sens. Ainsi, les algorithmes doivent traiter simultanément tous les polygones de la scène. Cela nécessite de définir une « structure accélératrice », c'est-à-dire une configuration des données qui optimise la capacité à déterminer si un rayon lumineux particulier atteint un polygone. Certains effets lumineux peuvent bénéficier de structures accélératrices supplémentaires. En effet, pour chaque étape des calculs de simulation et d'affichage, les concepteurs cherchent à optimiser les calculs pour rendre le processus plus rapide.

Comme l'algorithme de lancer de rayons suit la trajectoire de chaque rayon lumineux qui éclaire la scène, il peut être amené à tracer plusieurs millions de rayons. Si l'on incorpore des effets plus complexes, plusieurs dizaines de millions de rayons sont nécessaires. Il en résulte des images d'une grande beauté. Par exemple, contrairement à l'éclairage imparfait des méthodes

plus simples, les méthodes de simulation de l'éclairage, par lesquelles les environnements sont éclairés comme dans la réalité – non pas par une ou quelques sources lumineuses, mais par toutes les surfaces qui reflètent la lumière diffusée et la restituent à la scène – produisent des images d'un réalisme à couper le souffle.

Étant donné les qualités de vitesse des bonnes méthodes de rasterisation, et les énormes calculs nécessaires au lancer de rayons, il peut paraître judicieux d'associer les deux types d'algorithmes. Effectivement, les trois principaux fabricants de processeurs graphiques, *Intel*, *NVIDIA* et *AMD/ATI* – qui représentaient à eux trois près de 98 pour cent du marché en 2008 –, parient sur des architectures où les processeurs seront programmés de façon à implémenter le lancer de rayons en complément de la rasterisation.

Ainsi, le plus gros fabricant mondial de microprocesseurs, *Intel*, s'est lancé dans le développement d'une nouvelle architecture nommée *Larrabee*, un « moteur de calcul multicœur » reposant sur la famille de processeurs centraux *x86*, que l'on trouve à la fois dans les PC et les Macintosh. L'architecture *Larrabee* a été qualifiée de processeur graphique généraliste, ce qui est révélateur du brouillage des frontières entre les processeurs graphiques et les processeurs centraux. Tout en prenant en charge des fonctions traditionnelles des processeurs graphiques, telle la rasterisation, les processeurs hybrides de type *Larrabee* peuvent être utilisés pour des tâches de type lancer de rayons et des calculs physiques avancés.

En décembre 2009, *Intel* a annoncé que le premier produit graphique reposant sur



5. DES SUBTILITÉS VISUELLES

demandant une grande puissance de calcul peuvent être nécessaires pour un rendu réaliste. La lumière qui traverse une surface telle que la peau est diffusée, et l'éclaire de l'intérieur, créant un effet translucide. Un algorithme reproduit cet effet en propageant des rayons lumineux et en suivant leurs chemins, d'après les propriétés matérielles assignées à l'objet 3D. Les peintres de la Renaissance répondaient au même défi du réalisme avec la technique du glacis : ils appliquaient des couches de pigments translucides pour capter et diffuser la lumière.

cette architecture ne sera pas, comme prévu, un produit grand public. Au lieu de cela, le matériel sera une plateforme de développement logiciel. *Intel* et d'autres concepteurs l'exploiteront pour explorer le potentiel des applications multicœur. C'est une étape classique du développement de l'informatique graphique : les souhaits des consommateurs entraînent la mise au point de matériels plus performants, et ce développement fait à son tour progresser les applications logicielles, tel le lancer de rayons en temps réel, qui peuvent être implantées dans les nouvelles architectures matérielles.

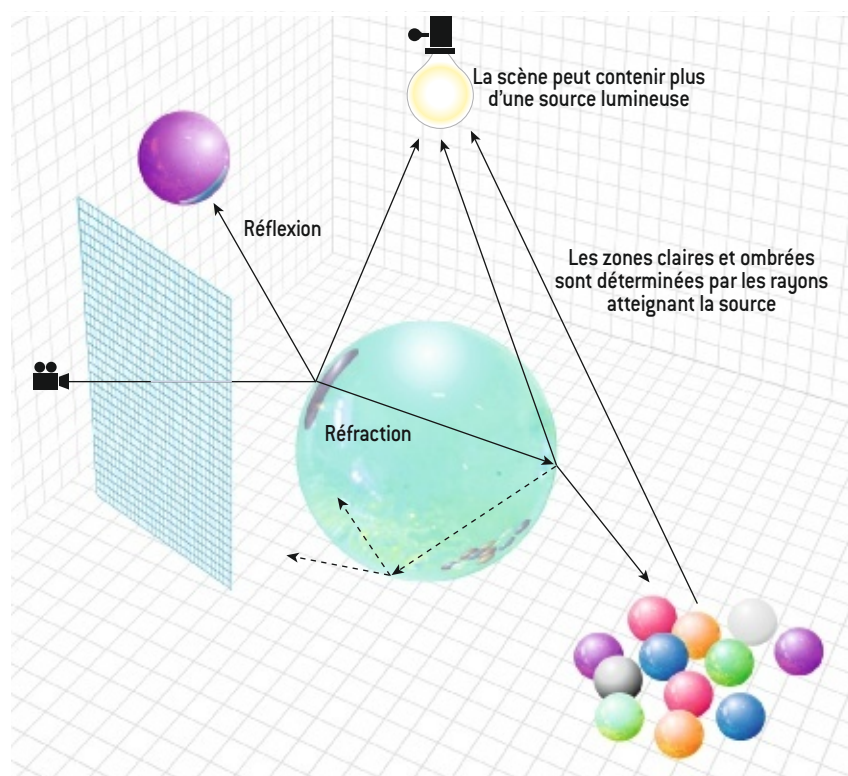
La roue de la réincarnation

Le passage de processeurs graphiques à fonction fixe aux processeurs programmables, et maintenant aux architectures aux fonctions fixes réduites, est le signe d'une évolution que Todd Myer et Ivan Sutherland, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), ont nommée, en 1968, la « roue de la réincarnation » : on transfère une fonctionnalité de l'unité centrale à un matériel spécialisé susceptible d'améliorer les performances, après quoi ce périphérique évolue à son tour pour devenir de plus en plus gourmand en puissance de calcul. Les deux chercheurs écrivaient ainsi : « Nous avons tenté [de créer un processeur graphique] en partant d'un dispositif simple et en ajoutant des commandes et des caractéristiques dont nous sentions qu'elles renforceraient la puissance de la machine. Progressivement, le processeur est devenu plus complexe. Cela ne nous perturbait pas vraiment puisque, après tout, l'infographie

elle-même est complexe. Finalement, le processeur graphique en est arrivé à ressembler à un ordinateur à part entière... »

Pour échapper à ce cycle de la réincarnation, T. Myer et I. Sutherland suggéraient que si une architecture a besoin d'augmenter sa puissance de calcul, on devrait l'ajouter au cœur du système, plutôt que de créer des unités matérielles spécialisées. C'est en un sens ce à quoi nous assistons avec l'émergence de processeurs multiples, de cœurs multiples au sein des processeurs, et d'architectures adaptées qui, de plus en plus, prennent en charge un traitement en parallèle.

Où en sommes-nous donc ? Le matériel d'informatique graphique actuel est capable de traiter des dizaines de millions de rayons par seconde. Pour impressionnante qu'elle soit, la performance est encore loin de ce qu'exige un jeu vidéo moderne. Un affichage à 60 images par seconde en haute résolution, soit $1\,920 \times 1\,080$ pixels et 16 rayons par pixel pour tous les effets



6. DANS LE LANCER DE RAYONS, l'algorithme lance, à travers chaque pixel de l'image, un rayon lumineux depuis le point de vue de l'observateur (la caméra) vers la vue 3D, à l'inverse du cheminement normal des rayons lumineux. Le point d'intersection du rayon avec une unité géométrique de la scène définit l'objet concerné par le pixel traversé par ce rayon. Un avantage important du lancer de rayons par rapport à la rasterisation est sa capacité à représenter la réflexion et la réfraction. Pour cela, des rayons sont lancés depuis les points d'intersection et on suit leur trajectoire dans le reste de la scène 3D. Ces rayons peuvent être lancés en direction des sources de lumière pour déterminer la façon dont l'objet est éclairé. Pour une vue 3D très détaillée, des millions de rayons peuvent être nécessaires.

de lumière, nécessite deux milliards de rayons par seconde ($60 \times 1\,920 \times 1\,080 \times 16$), soit approximativement 100 fois plus que ce dont le matériel actuel est capable.

Pour relever ce défi, on peut augmenter la capacité de calcul du matériel. L'un des gros avantages du lancer de rayons est d'être un algorithme hautement parallèle, dans lequel chaque rayon peut être tracé indépendamment. Cela permet d'exploiter le fait que les processeurs graphiques peuvent travailler en parallèle ; là où 100 processeurs en parallèle ne parviennent pas à traiter un grand nombre de rayons assez vite, 1 000 en seront peut-être capables.

Calculs parallèles

NVIDIA, AMD/ATI et Intel parient tous sur le calcul parallèle. Les derniers processeurs graphiques en date contiennent des centaines d'unités de calcul, chacune étant capable de tracer des rayons. L'architecture *Larrabee* d'Intel utilise une stratégie hybride dans laquelle de multiples processeurs dérivés du x86 utilisent un traitement vectoriel pour tracer simultanément des lots de rayons. Cette approche est difficile à programmer, et l'on ne sait pas encore si le lancer de rayons peut tirer parti de tout le potentiel du matériel, mais des travaux prometteurs ont été réalisés sur les processeurs centraux actuels.

Ne sous-estimons pas néanmoins le défi que cela représente. D'après la loi de Moore, qui prédit les progrès de puissance des ordinateurs depuis 40 ans, les ordinateurs doublent leurs performances tous les 18 mois. Mais il faudra environ dix ans avant que les machines grand public soient capables de tracer les quelques milliards de rayons nécessaires pour donner un rendu réaliste aux configurations de jeux actuellement disponibles. Et dans dix ans, les exigences pour les jeux et le graphisme en temps réel en général pourraient avoir changé, appelant peut-être des résolutions plus grandes ou de nouveaux algorithmes.

Les sceptiques pourront soutenir, non sans raison, que le lancer de rayons en temps réel est une chimère qui restera à jamais hors de notre portée, les processeurs restant toujours trop lents. Et même si le matériel devient suffisamment rapide pour gérer 16 rayons par pixel dans une image à résolution maximale, cela ne suffira pas forcément pour obtenir tous les effets de lumière nécessaires à un rendu



7. DE NOMBREUX EFFETS DE RENDU de scènes 3D nécessitent de procéder à un affichage en plusieurs passes, les informations de chaque passe étant combinées pour produire l'image finale. Un algorithme spécialisé, qui détermine l'information sur les ombres, donne une vision de la profondeur de la scène (a). Une deuxième passe donne la couleur diffuse sans les ombres (b). Les deux images sont combinées (c) et complétées par des informations sur l'éclairage telles que l'aspect brillant (la spécularité, d), ce qui améliore le réalisme.

réaliste. Sur cette base, on tend de plus en plus, comme nous l'avons déjà signalé, à une approche hybride combinant rasterisation et lancer de rayons.

Une telle association n'est pas une idée neuve en infographie. L'approche de base utilise la rasterisation pour décider quels polygones peuvent être vus sur l'écran, et se sert ensuite du lancer de rayons pour calculer l'éclairage. On peut mettre en œuvre cette méthode avec les processeurs graphiques actuels, en employant sélectivement le lancer de rayons pour ajouter réflexions et réfractions aux endroits stratégiques. Sans aucun doute, les générations à venir de l'infographie en temps réel pour les jeux adopteront cette approche aussi longtemps que le lancer de rayons pur et dur restera trop gourmand en calcul pour le matériel disponible.

Un avenir hybride

Pour créer ses films 3D, *Pixar* utilise une technique hybride reposant sur l'algorithme REYES (*Render Everything You Ever Saw*, faites le rendu de tout ce que vous avez vu), une forme avancée de rasterisation. Cet algorithme produit des micropolygones : la géométrie de la scène est alors une mosaïque de triangles ou de quadrilatères de la taille d'un pixel. Des « cartes de déplacements » reposant sur cette mosaïque de micropolygones permettent de créer des effets géométriques complexes. Voisines des cartes de rugosité évoquées précédemment, elles reconstruisent des éléments géométriques localisés à la surface des objets, plutôt que de donner une impression de relief.

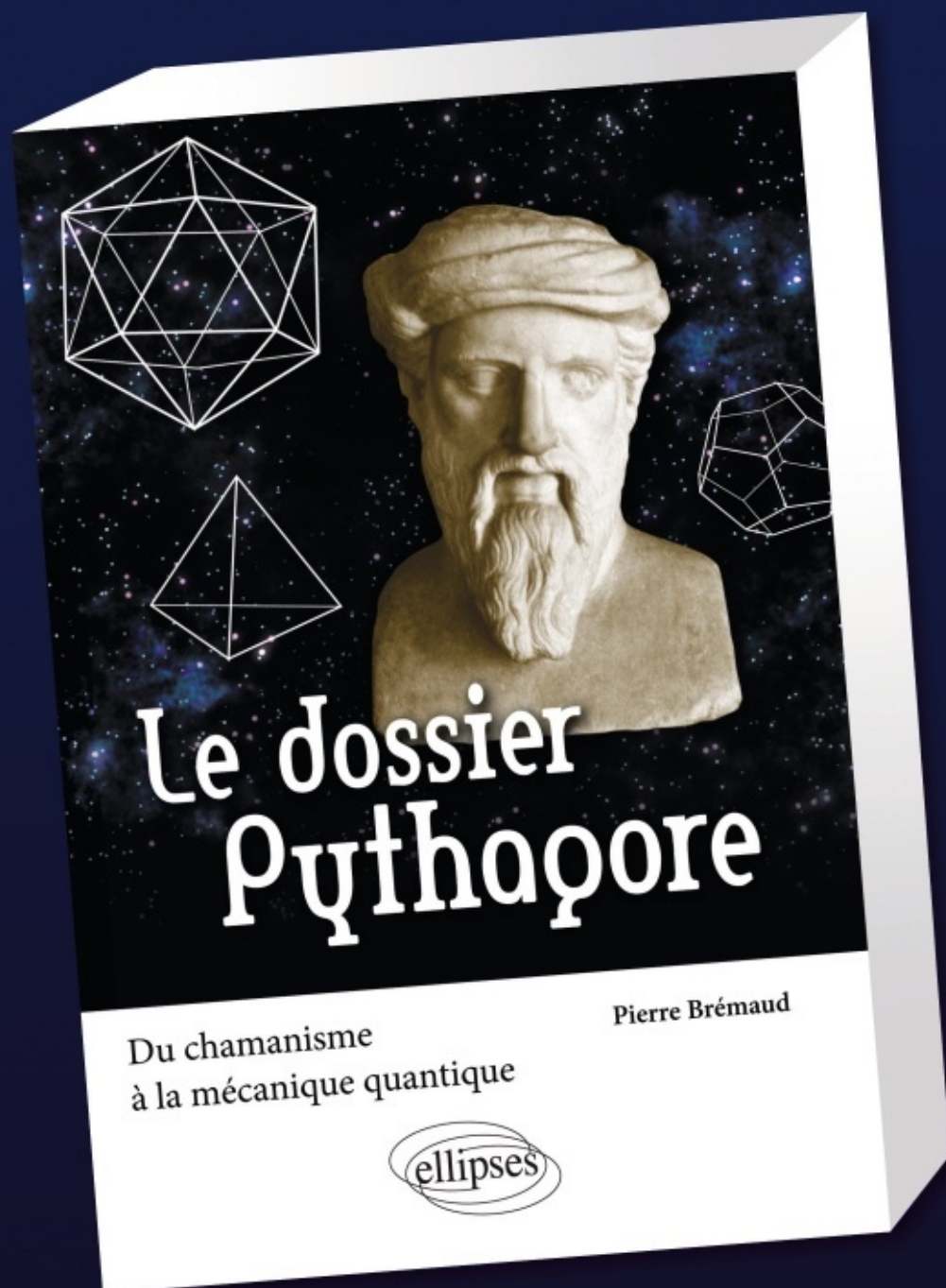
Puissante pour créer des détails tels que les pores de la peau humaine, l'approche par micropolygones peut produire une géométrie sensiblement plus complexe que ce que les algorithmes de lancer de rayons actuels sont capables de traiter. Si les jeux devaient utiliser ce type de rendu, la qualité visuelle pourrait être comparable à celle du film *Toy Story*.

Cependant, le rendu par micropolygones ne parvient pas à simuler les effets de lumière qui limitent la rasterisation. Pour remédier à cet inconvénient, les studios *Pixar* ont couplé le lancer de rayons au rendu par micropolygones. Le temps de calcul devient alors très important. Mais, contrairement au cas des jeux vidéo, exigeant un affichage en temps réel de



« Tout est Nombre »

Vient
de
paraître



Pythagore

Chamane charismatique
ou mathématicien aux
intuitions géniales ?

Pourquoi fut-il considéré
comme un dieu
de son vivant ?

Quelle fut la réelle
contribution des
pythagoriciens
aux mathématiques,
à la musique
et à l'astronomie ?

336 pages + 8 pages couleur

24 € / 978-2-7298-6088-2



32, rue **B**argue 75740 **P**aris cedex 15

www.editions-ellipses.fr

Une chaîne complexe à maîtriser

La construction d'une image réaliste à partir d'un environnement 3D nécessite de reproduire les phénomènes physiques des interactions entre la lumière et les objets. La compréhension de chaque phénomène permet de définir un modèle mathématique et d'en déduire un algorithme pour le reproduire le plus fidèlement possible. Avec cette méthodologie, on peut non seulement comprendre certains mécanismes physiques, mais également les faire « fonctionner » pour les reproduire et les valider en les comparant à des mesures.

L'un des grands défis actuels concerne le calcul de tous les échanges lumineux possibles entre les objets eux-mêmes alors qu'ils se déplacent à 60 images par seconde. Les méthodes actuelles en temps réel simplifient les calculs pour permettre un affichage suffisamment rapide, mais c'est au détriment de la qualité de la simulation.

Cependant, l'affichage lui-même n'est qu'une partie du processus de la synthèse d'images. La chaîne complète doit être minutieusement maîtrisée, avec des difficultés de mise en œuvre pour chaque partie : la construction de la forme d'objets 3D complexes (les outils de modélisation géométrique) ; l'animation pour les déplacer de façon réaliste : par exemple, faire marcher, courir ou tomber un humanoïde est difficile à comprendre, concevoir et programmer, de même que les interactions d'objets lorsqu'ils se heurtent, par exemple ; la définition des matériaux utilisés, avec éventuellement le placage de textures et les sources lumineuses. Les calculs des interactions lumineuses et l'affichage de l'image correspondent à la dernière partie de ce processus.

Le jeu vidéo et le cinéma sont les applications les plus visibles de la synthèse d'images, mais d'autres domaines bénéficient de ces tra-

vaux. Par exemple, les concepteurs dans les domaines de l'automobile ou de l'aéronautique exploitent ces outils pour obtenir des représentations 3D avant la construction effective. La publicité audiovisuelle, les simulateurs de conduite ou de vol, l'architecture, l'archéologie, l'imagerie médicale constituent d'autres exemples de recherches actives dans le monde.

Si certains chercheurs s'intéressent à reproduire le plus fidèlement possible les phénomènes naturels ou créent des photographies d'environnements réels avec les méthodes de rendu à base d'images, d'autres proposent des systèmes alternatifs, par exemple destinés à produire un affichage non pas photoréaliste, mais expressif, avec des styles de dessin animé, des effets d'aquarelle, etc. L'informatique renouvelle alors les méthodes de l'art pictural.

Daniel Meneveau, Université de Poitiers,
Département Signal, image, communications

60 images par seconde, les réalisateurs des films d'animation n'ont pas à se soucier du temps nécessaire pour produire un rendu de scène 3D : les images sont calculées à l'avance.

Berner le joueur

Il existe une autre alternative au lancer de rayons : elle consiste à berner l'observateur. Après tout, la prochaine génération de jeux n'a peut-être pas besoin d'un éclairage et de réflexions d'une parfaite exactitude physique, comme c'est le cas actuellement. La communauté du graphisme en temps réel a créé maintes astuces pour produire de belles images. Par exemple, NVIDIA diffuse une démonstration en temps réel où un processeur graphique produit l'effet de translucidité de la peau humaine, c'est-à-dire montre la diffusion de la lumière à travers ce tissu. Des techniques de filtrage intelligent peuvent aussi produire des images réalistes difficiles à distinguer d'un affichage par lancer de rayons.

Cependant, les approches reposant sur des astuces ont leurs limites. Chacune est en général très spécialisée et tend à faire mauvais ménage avec d'autres. Par exemple, il faudrait un codage acrobatique pour simuler un éclairage indirect sur un visage humain avec une technique à effet de translucidité. C'est cela qui rend, au bout du compte, le lancer de rayons si attrayant.

Il change facilement d'échelle en augmentant le nombre d'instructions par seconde, et on peut reproduire des effets de lumière complexes en traçant tout simplement davantage de rayons.

Lors de l'édition 2009 de la conférence annuelle du SIGGRAPH (*Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques*), le rendez-vous majeur de la recherche en informatique graphique, son festival d'animation sur ordinateur a présenté une nouvelle session « Rendu en temps réel ». Parallèlement aux œuvres « pré-rendues » (films d'animation), qui constituaient le plat de résistance de la conférence, les développeurs y réalisaient des démonstrations de leurs jeux et d'autres applications en temps réel. Par exemple, Intel, à l'aide de son architecture de processeurs central *Nehalem*, lancée fin 2008, a présenté un jeu utilisant la technique du lancer de rayons et affichant environ 15 images par seconde. Il figurait un fond marin visible à travers la surface scintillante d'un lagon.

Nul doute donc que la technologie progresse. Billy Zelnack, vétéran des jeux vidéo, déclarait il y a quelques années, avec un mélange d'ironie et d'espoir : « Dans pas si longtemps, les ordinateurs seront rapides. » Ces mots restent valables. Nous pouvons ajouter, avec moins d'ambiguïté : « Dans pas si longtemps, le photoréalisme s'affichera en temps réel. » ■

✓ SUR LE WEB

<http://www.afig.fr>

<http://www.siggraph.org/>

[http://www.presence-pc.com/
tests/raytracing-rasterisation-
23129/8/](http://www.presence-pc.com/tests/raytracing-rasterisation-23129/8/)

<http://graphics.ucsd.edu/~henrik/>

✓ BIBLIOGRAPHIE

T. Akenine-Möller et al., *Real-Time Rendering*, 3^e éd., A.K. Peters, 2008.

B. Péroche et D. Bechmann, *Informatique graphique et rendu*, Hermès-Lavoisier, 2007.

R. Malgouyres, *Algorithmes pour la synthèse d'images et l'animation 3D*, 2^e éd., Dunod, 2005.

H. W. Jensen, *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, 2^e éd., A.K. Peters, 2005.

J. D. Foley, *Introduction à l'infographie*, Vuibert, 2000.



SOUTENEZ

REPORTERS SANS FRONTIÈRES

ACHETEZ LE NOUVEL ALBUM

100 PHOTOS DE
DAVID BURNETT
POUR LA LIBERTÉ DE LA PRESSE

EN VENTE PARTOUT DÈS LE 9 DÉCEMBRE
9,90 € SEULEMENT

L'INFORMATION EST PRÉCIEUSE, PROTÉGEONS-LA ENSEMBLE

**REPORTERS
SANS FRONTIÈRES**
POUR LA LIBERTÉ DE LA PRESSE
www.rsf.org



avec le soutien de

presstalis

RELAY