

atomes dans le cristal et de l'angle avec lequel les rayons X frappent le réseau. Eli Yablenovitch, de l'Université de Los Angeles, a eu l'idée de transposer cette loi à un réseau à trois dimensions. Avec des collègues de l'Université de l'Iowa, il a trouvé une structure dans laquelle certaines longueurs d'onde ne peuvent se propager dans aucune direction : la structure possède une bande photonique interdite. Si l'on crée localement un défaut dans cette structure et que l'on place un émetteur de lumière à une longueur d'onde adéquate de la bande interdite, cette lumière reste confinée au voisinage du défaut et est amplifiée. C'est le principe de base d'un nouveau type de laser.

Avec mes collègues, nous avons ainsi construit un réseau hexagonal de minuscules colonnes d'arséniure de gallium, espacées de telle façon qu'il piège la lumière infrarouge. Cette structure n'est pas encore un laser, mais nous pensons en obtenir un en excitant l'une des colonnes pour lui faire émettre de la lumière, qui serait ensuite réfléchiée de façon répétée (et efficacement confinée) par les autres colonnes du réseau.

Dans le même esprit, mais en remplaçant les colonnes par des trous dans un semi-conducteur, des chercheurs de l'Institut de technologie du Massachusetts ont fabriqué un minuscule pont de silicium de 470 nanomètres de largeur et de 200 nanomètres d'épaisseur percé, dans sa longueur, par une rangée de trous microscopiques. La lumière ne peut pas s'échapper par les côtés de ce pont, à cause de la différence des indices de réfraction du semi-conducteur et de l'air. Des simulations numériques avaient permis de calculer l'espacement périodique entre les trous pour obtenir un «réseau» qui confine la lumière infrarouge. En outre, on avait calculé qu'en écartant un

peu plus les deux trous situés de part et d'autre du centre du pont on créerait une «boîte» d'à peine un vingtième de micromètre cube de volume où un mode optique fondamental pourrait s'établir. Cette «boîte» devrait devenir un jour une cavité laser, les trous adjacents servant de miroirs. Cette structure a été construite sur un socle de verre, et l'on a vérifié que les résultats expérimentaux étaient comparables aux simulations.

D'autres travaux ont exploré des «réseaux photoniques» à trois dimensions qui, en théorie, confinaient la lumière dans toutes les directions, caractéristique idéale pour un laser sans courant de seuil. De telles structures sont toutefois difficiles à fabriquer, car les techniques disponibles ont surtout été mises au point pour la fabrication de composants électroniques couche par couche, en deux dimensions.

Les lasers sans courant de seuil réagiraient beaucoup plus rapidement que les lasers actuels : les électrons émis le sont tous dans le mode laser, et celui-ci s'établit très vite. En d'autres termes, faire bouillir un récipient d'eau ne prendrait que le temps de craquer l'allumette. Certains lasers peuvent déjà être mis en marche et éteints plus de 20 milliards de fois par seconde.

De telles vitesses s'imposent pour les communications par fibres optiques, et d'autres applications apparaîtront à mesure que ces dispositifs deviendront encore plus rapides, plus petits et plus efficaces. Les lasers sans courant de seuil, qui semblent aujourd'hui d'avantage à notre portée, grâce aux récentes percées dans la fabrication de structures d'échelle nanométrique, sont très prometteurs comme futurs composants pour transmettre et manipuler des informations.

Paul Gourley travaille aux Laboratoires Sandia.

J. JEWELL, J. HARBISON et A. SCHERER, *Les microlasers*, in *Pour La Science*, janvier 1992.

H. YOKOYAMA, *Physics and Device Applications of Optical Microcavities*, in *Science*, vol. 256, pp. 66-70, 3 avril 1992.

Optics of Nanostructures, numéro spécial de *Physics Today*, vol. 46, n° 6, juin 1993.

Paul GOURLEY, Kevin LEAR et Richard SCHNEIDER, Jr., *Surface-Emitting Lasers*,

in *IEEE Spectrum*, vol. 31, n° 8, pp. 31-37, août 1994.

Paul L. GOURLEY, *Microstructured Semiconductor Lasers for High-Speed Information Processing*, in *Nature*, vol. 371, pp. 571-577, 13 octobre 1994.

John D. JOANNOPOULOS, Robert D. MEADE et Joshua N. WINN, *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.

Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications, sous la direction de John Rarity et Claude Weisbuch, Kluwer Academic Publishers, 1996.

La simulation du mouvement humain

JESSICA HODGINS

Utilisant les lois de la physique, des ordinateurs font courir, sauter ou plonger des personnages de dessins animés.

Nous percevons instinctivement les moindres détails des mouvements humains ; parfois même, nous reconnaissons un ami à sa seule démarche. Comment nous étonner que les films d'animation qui mettent en scène des personnages humains ne paraissent pas réalistes ? Nous remarquons facilement qu'une action n'est pas naturelle ou qu'elle est peu plausible, même si nous ne savons pas toujours identifier les défauts. En outre, nous percevons bien quand manquent les petits mouvements qui traduisent la personnalité ou l'humeur de l'individu.

La synthèse numérique du mouvement humain n'est pas limitée aux dessins animés ; elle est également utilisée dans la réalisation d'environnements virtuels, de jeux vidéo, mais aussi à des fins scientifiques, en ergonomie, en analyse des gestes sportifs et en rééducation motrice. Dans le film numérique *Toy Story*, produit en 1995 par les studios *Disney*, les personnages animés étaient des jouets que l'on supportait de voir bouger différemment d'un être humain, mais la réalisation de films analogues où les personnages seraient des enfants, par exemple, reste inaccessible. D'autre part, les entraîneurs formeraient mieux les athlètes s'ils disposaient de concurrents virtuels crédibles. Les créateurs de jeux vidéo recherchent des produits plus interactifs et plus attractifs... L'animation

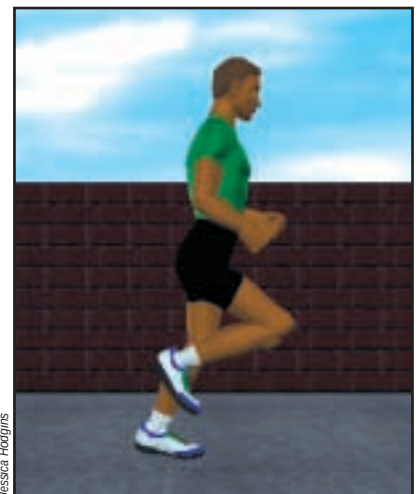
progresses grâce aux perfectionnements de la simulation numérique complète des mouvements humains, fondée sur les lois physiques et sur les caractéristiques biomécaniques des individus.

Les réalisateurs d'animations numériques utilisent aujourd'hui trois techniques de base : l'interpolation entre positions clés, la captation du mouvement réel et la simulation. L'interpolation entre positions clés laisse plus de liberté à l'animateur, mais aussi plus de responsabilités dans la qualité du résultat, que la captation du mouvement réel ou la simulation.

L'interpolation entre positions clés n'est que l'automatisation partielle de la technique du même nom, autrefois entièrement manuelle : l'animateur spécifie certaines positions des objets, et l'ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation entre ces positions. Les personnages du film *Toy Story* étaient animés de cette façon : chaque personnage était décrit par plus de 700 points que l'on pouvait bouger indépendamment ; pour faire froncer un sourcil, par exemple, on indiquait la position des divers points du sourcil et on laissait l'ordinateur interpoler la position de chaque point dans les images intermédiaires.

Le dessin des positions clés par l'animateur peut être partiellement automatisé grâce à des techniques d'aide au placement des articulations du corps : si la main d'un personnage

doit être à un endroit donné, l'ordinateur calcule les angles correspondants du coude et de l'épaule. Le travail de l'animateur est ainsi simplifié, mais ce dernier doit tout de même savoir en détail comment se comporte un objet en mouvement et avoir le talent d'exprimer ces informations pour le des-



1. ON SIMULE LA COURSE en confiant à l'ordinateur les lois de la physique. Pour créer la séquence reproduite dans la partie inférieure de la figure, un ordinateur a déterminé les couples de force nécessaires pour faire osciller la jambe droite vers l'avant avant le contact au sol, évitant que le coureur ne trébuche. À l'aide de nombreux calculs de ce type, les ordinateurs simulent la mécanique de la course réelle (en haut). Les images des deux séquences, réelle et synthétisée, sont espacées de 0,066 seconde.

Jessica Hodgins

sin des positions clés. Cette technique est très utilisée, car elle permet le contrôle fin des mouvements.

La captation du mouvement réel est la deuxième grande technique d'animation : des capteurs magnétiques ou optiques enregistrent les mouvements de sujets humains ou animaux en trois dimensions ; puis un traitement des données par un ordinateur anime des personnages. Ainsi, de nombreux athlètes célèbres ont servi de modèles à l'animation de personnages de jeux vidéo sportifs.

La captation du mouvement est de plus en plus utilisée, notamment pour des animations de films publicitaires, parce que de nombreuses actions humaines peuvent être facilement enregistrées, mais cette technique est imparfaite. D'abord, on place, sur la peau ou sur les vêtements, des marqueurs, dont la position est perçue par les capteurs, mais qui glissent lorsque le sujet bouge, ce qui perturbe les mesures. Ensuite, on doit remettre à l'échelle du personnage graphique les informations

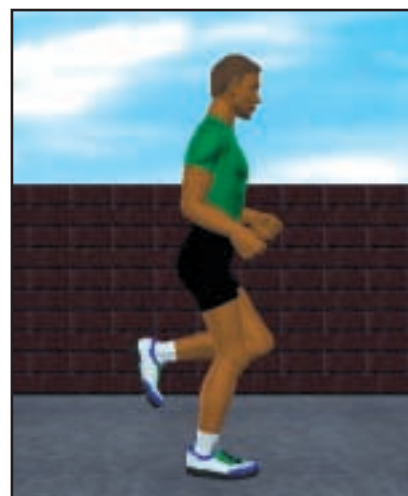
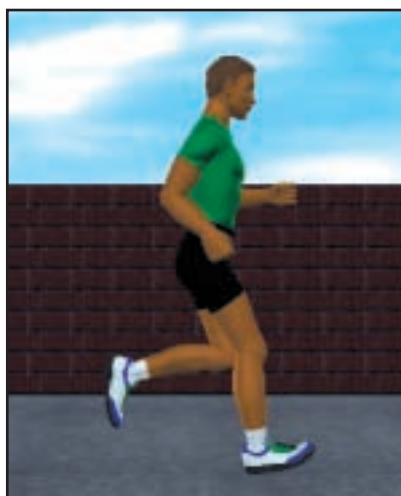
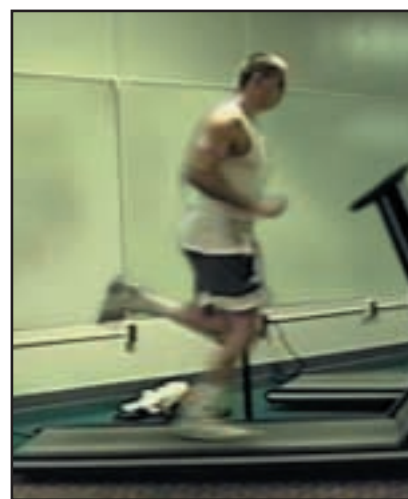
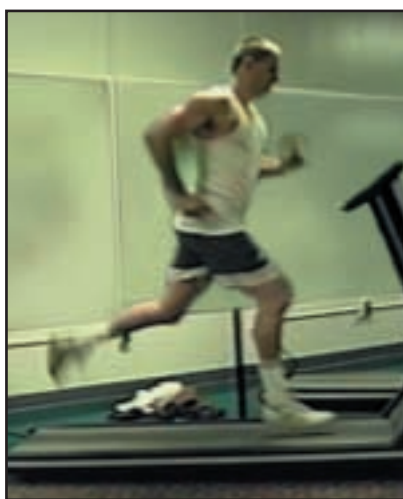
enregistrées sur un sujet réel qui n'a ni la même taille ni les mêmes proportions corporelles : sans ces ajustements, la main d'un personnage virtuel plus petit que l'original semblerait pénétrer dans une table plutôt que se poser dessus. Enfin, certains mouvements sont mal enregistrés avec les techniques actuelles. Avec les systèmes magnétiques, les câbles qui relient le sujet à un ordinateur restreignent sa liberté de mouvement, et la proximité d'objets métalliques ou d'un tapis roulant, qui peut être utilisé pour enregistrer le mouvement d'un sujet en train de courir, perturbe les mesures. Avec les systèmes optiques, on perd des informations lorsqu'une partie du corps en masque une autre.

Déduire le mouvement de la physique

Contrairement à l'interpolation entre positions clés et à la captation du mouvement, la simulation engendre le mouvement des personnages et des

objets en se fondant uniquement sur les lois de la physique. Les personnages sont généralement représentés par un ensemble de segments corporels rigides. Le corps, par exemple, peut être constitué d'un tronc, de segments supérieurs et inférieurs, et de pieds, reliés par des articulations. Avec mes collègues, nous avons recueilli de nombreuses données biomécaniques, y compris en prenant des mesures sur des cadavres, pour élaborer des modèles précis. L'avant-bras de notre homme adulte virtuel, par exemple, a une masse de 1,1 kilogramme, une longueur de 24 centimètres et une circonférence moyenne de 25 centimètres.

Malgré nos efforts, nos modèles ne ressemblent encore qu'approximativement au corps humain. Ainsi, les segments corporels sont rigides, et l'on ne tient pas compte du mouvement des muscles sur l'os. Par ailleurs, bien que l'épaule soit généralement modélisée comme une articulation unique à trois degrés de liberté, la



clavicule et l'omoplate humaines autorisent des mouvements plus complexes, tel le haussement d'épaules.

D'autre part, un ordinateur calcule plus difficilement le mouvement des organismes que celui des objets inertes. Pour ces derniers, des équations issues de lois physiques suffisent. Ainsi, le mouvement d'un ballon qui dévale une pente ne dépend que des forces auxquelles il est soumis (la gravité, les frottements contre le sol ou dans l'air...) et des conditions initiales. Les êtres vivants, en revanche, sont animés par des sources internes d'énergie. Pour simuler leur comportement, nous avons mis au point un programme générateur de commandes musculaires, nommé système de contrôle : il calcule les couples de forces nécessaires au déplacement de chaque articulation pour permettre au personnage d'accomplir les actions choisies, et les applique à ces articulations. Pour la course, par exemple, le système de contrôle détermine les couples nécessaires pour ramener la jambe vers

l'avant avant le contact avec le sol, afin que le coureur ne trébuche pas.

Nous avons mis au point des systèmes de contrôle pour des activités physiques telles la course, le plongeon, la bicyclette ou le saut de cheval en gymnastique. Bien que les mouvements liés à ces activités soient différents, nos programmes fonctionnent globalement de la même façon, et ils sont construits à partir du même ensemble de composants.

Le fonctionnement du système de contrôle

Un système de contrôle utilise un «automate d'états», qui détermine ce que chaque articulation doit faire à chaque instant, puis, tel un chef d'orchestre, assure que les articulations exécutent ces fonctions au moment approprié. La course, par exemple, est une activité cyclique où alternent une phase de soutien, lorsqu'une jambe sert d'appui, et une phase d'envol, quand aucun des deux pieds n'est en

contact avec le sol. Pendant la phase de soutien, la cheville, le genou et la hanche, du côté de la jambe en contact avec le sol, doivent assurer le soutien et l'équilibre. Quand cette même jambe est en l'air, la hanche a une fonction différente, celle de faire osciller la jambe vers l'avant pour préparer le contact suivant. L'automate d'états sélectionne, parmi les différents rôles de la hanche, l'action appropriée pour la phase en cours.

Ensuite, à chaque phase du mouvement sont associées des lois de contrôle, équations qui représentent la manière dont chaque segment corporel doit bouger pour accomplir le mouvement prévu, avec lesquelles l'ordinateur calcule les angles nécessaires pour chacune des 30 articulations du corps humain virtuel. Pour déplacer les articulations vers les positions désirées, le système de contrôle calcule ensuite les couples de force adaptés grâce à des équations qui reproduisent la fonction motrice des muscles.

Trois techniques d'animation

L'interpolation entre positions clés



Everett Collection



Toy Story, film des studios Disney, a été animé surtout par interpolation : les animateurs spécifiaient la position des objets, et un ordinateur créait les images manquantes par interpolation automatique.



La captation du mouvement



Microsoft Motion Capture Group



C'est la technique la plus utilisée pour les animations publicitaires. Un ordinateur «rediffuse» des données saisies lors du mouvement de sujets réels pour animer un personnage de synthèse.

La simulation



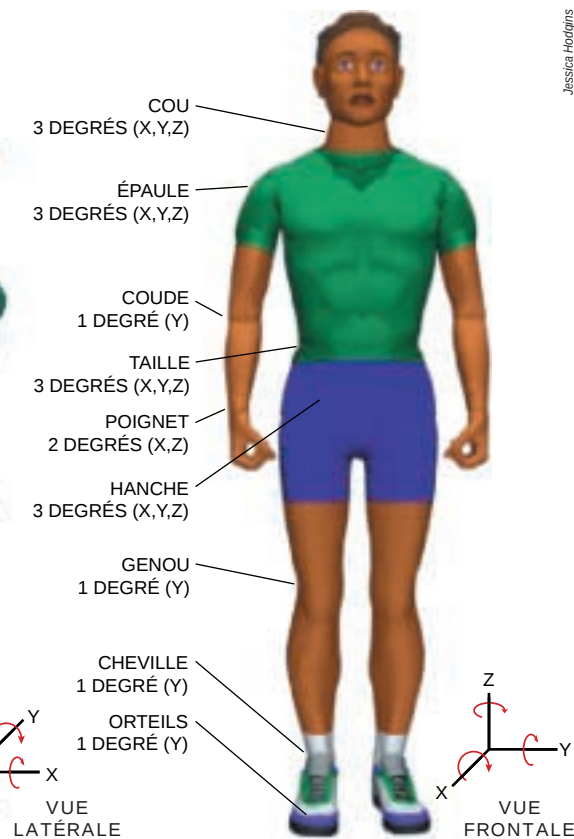
James O'Brien et Victor Zordan

L'ordinateur utilise les lois de la physique pour synthétiser les mouvements de personnes et d'objets virtuels.

Pour simplifier l'écriture des lois de contrôle, nous utilisons souvent des synergies de plusieurs segments corporels. Ainsi les articulations de la cheville et du genou du coureur simulé coopèrent-elles dans la poussée sur le sol pendant la phase de soutien. Lorsque c'est possible, les lois de contrôle utilisent aussi les comportements passifs du corps pour obtenir l'effet désiré : nous supposons que le corps humain est une machine efficace et, par conséquent, qu'il minimise sa consommation d'énergie en se fondant le plus possible sur des comportements passifs. Par exemple, pendant la phase de soutien, le genou du coureur se comporte comme un ressort, qui stocke de l'énergie lorsqu'il est comprimé et la libère lorsqu'il se détend.

Les mouvements sont mieux décrits lorsque bougent aussi des segments qui ne travaillent pas au cours de phases particulières, pour réduire les perturbations provoquées par le déplacement des autres segments. Dans le cas de la simulation de la course, les lois de contrôle font osciller les bras de l'athlète en opposition de phase par rapport aux jambes, afin de réduire les balancements du corps.

La technique de la simulation a deux avantages par rapport à l'interpolation entre positions clés et à la captation des mouvements. D'abord, les simulations sont plus générales : les mêmes lois décrivent des mouvements légèrement différents ; par exemple, les mêmes techniques de simulation animent une course à quatre mètres par seconde et une course à cinq mètres par seconde. Avec les autres techniques d'animation, le mouvement perd de son naturel si l'on se contente d'accélérer ou de ralentir la séquence. Ensuite les simulations, en temps réel, peuvent être interactives, qualité importante pour les environnements virtuels et les jeux vidéo, où des personnages doivent réagir aux actions de per-



2. LES MODÈLES INFORMATIQUES DU CORPS humain sont composés de segments corporels rigides, reliés par des articulations auxquelles on assigne un, deux ou trois degrés de liberté selon les axes de coordonnées x , y et z .

sonnes réelles. En revanche, les animations par interpolation entre positions clés ou à partir de captation de mouvements reproduisent seulement des mouvements déjà calculés, et stockés dans la mémoire de l'ordinateur.

La simulation reste toutefois d'emploi difficile, et elle n'est exécutable que par des ordinateurs puissants. Afin de faciliter la programmation, nous avons mis au point une banque de sous-programmes qui peuvent être associés de différentes façons pour créer de nouveaux mouvements : l'ordinateur combine quatre systèmes de contrôle fondamentaux (sauter, tourner en l'air, atterrir et s'équilibrer) pour engendrer des figures plus complexes, tels les sauts périlleux ou les plongeurs.

L'adaptation de la simulation à la morphologie

Nous explorons aussi l'adaptation automatique à d'autres personnages des comportements déjà mis en équations. Les systèmes de contrôle sont adaptés aux propriétés dynamiques particulières d'un modèle donné et, en général, le système mis au point

pour un adulte ne fonctionne pas pour un enfant. Nous étudions des techniques d'optimisation et d'ajustement des systèmes de contrôle qui permettent la modification d'un comportement existant et son adaptation à un autre personnage dont les caractéristiques physiques sont différentes de celles du personnage initialement étudié. Ainsi, nous avons adapté à une femme et à un enfant de quatre ans notre système de contrôle de la course conçu pour un homme, en prenant en compte les différences des masses des segments corporels de ces trois modèles, ainsi que de nombreux autres paramètres.

Ces dernières années, des informaticiens ont cherché des méthodes, fondées sur la simulation, qui engendrent des mouvements sans l'éla-

boration préalable d'un système de contrôle. La synthèse de mouvements peut, par exemple, être traitée comme un problème d'optimisation de trajectoires : on traite alors les équations du mouvement et certaines caractéristiques importantes de l'action désirée comme des contraintes, et l'on recherche le mouvement qui satisfait ces contraintes en dépensant l'énergie minimale. Ainsi, dans une simulation de saut, les contraintes seraient que le personnage parte du sol, qu'il soit ensuite en l'air et qu'il revienne au sol. Le logiciel d'optimisation déterminerait alors automatiquement que le personnage plie les genoux avant de sauter pour obtenir la hauteur maximale en dépensant le minimum d'énergie.

D'autres équipes confient à l'ordinateur la recherche du système de contrôle parmi toutes les possibilités. Dans le cas le plus général, cette technique doit déterminer comment un personnage pourrait bouger de tout état initial possible à tout état final possible. Comme cette méthode résout un problème plus général que celui de l'identification d'une trajectoire optimale unique d'un point de départ donné

vers un point d'arrivée, elle est particulièrement efficace pour les simulations simples et pour des problèmes qui ont de nombreuses solutions, car la probabilité que l'ordinateur en trouvera une est grande. Les techniques

entièrement automatiques sont naturellement préférables à celles qui nécessitent une conception manuelle, mais les informaticiens n'ont pas encore trouvé de méthodes automatiques capables de simuler les comportements

de systèmes aussi complexes que l'être humain, sans fournir au préalable des connaissances précises sur les mouvements à effectuer.

Bien que la mise au point des systèmes de contrôle soit difficile, leur

Copie conforme

Comment synthétiser les mouvements et les expressions d'un visage, qui traduisent l'humeur, les sentiments et la personnalité ? La Société *Lamb & Company* a animé un «jumeau» numérique d'Alan Alda, acteur qui a tourné en particulier avec Woody Allen.

La Société *Lamb & Company* a construit un modèle numérique de la tête d'A. Alda à partir de mesures prises par balayage laser de l'acteur réel : les ingénieurs ont utilisé une «grille» de

12 000 polygones pour représenter la géométrie tridimensionnelle de la tête de l'acteur ; chaque polygone était associé à une carte de texture contenant des informations telles que la coloration et la régularité de la peau.

Les balayages laser ont été faits pour quatre poses : une vue de base, où A. Alda n'affichait aucune émotion, et des vues statiques de l'acteur souriant largement, grimaçant et souriant à demi. L'ordinateur a ensuite créé d'autres expressions par combinaison des quatre poses de base. Les animateurs ont aussi construit des vues statiques de l'acteur virtuel prononçant différents phonèmes (unités de base du langage tel le son «r» dans «rat»). Ce travail a surtout été réalisé à la main, bien que les outils d'assistance par ordinateur aient fourni une aide rudimentaire dans la modification des modèles informatiques. Au total, les animateurs ont créé une banque d'une soixantaine de vues, qu'ils peuvent à nouveau combiner pour produire de nouvelles variations.

Pour apporter mouvement et «vie» au modèle numérique, les animateurs ont travaillé avec des textes prononcés par l'acteur qu'un laboratoire japonais avait synthétisés, en séparant et en réassociant les phonèmes d'un véritable enregistrement de la voix d'A. Alda. La synchronisation des mouvements des lèvres de synthèse avec cette simulation audio a été très laborieuse.

Ce travail a nécessité l'analyse minutieuse de cassettes vidéo montrant l'acteur en action. L'équipe a observé comment il bouge la bouche lorsqu'il produit des sons 'oh' ou 'ooh', par exemple. Les animateurs ont aussi prononcé certains mots devant un miroir pour étudier les mouvements de leur propre visage.

La création de chaque image, dans la séquence synthétisée, aurait pris un temps considérable sans l'aide de l'interpolation entre positions clés, technique où un animateur ne spécifie que certaines positions d'un objet et où un ordinateur crée les images intermédiaires par interpolation. Ainsi, la synthèse d'un personnage prononçant le mot «sel» sera fondée sur des photographies de la personne disant «sss», «eh» et «ell», l'ordinateur créant automatiquement les images intermédiaires. Cette technique a aussi été utilisée pour d'autres mouvements du visage, tels les clignements de paupières. Grâce à l'interpolation, 20 pour cent seulement des images ont été créées à la main.

Enfin, pour que le visage virtuel bouge naturellement, les ingénieurs ont effectué des semaines d'ajustements manuels : il y a

tant d'irrégularités dans les mouvements du visage et dans ceux associés à la prononciation du langage chez les êtres humains, qu'il faut près de dix fois plus de travail pour le réglage fin que pour produire le mouvement de base.

Le résultat est un film de deux minutes, composé d'environ 2 500 images. Il a coûté une fortune... mais le personnage créé n'est pas encore naturel au point qu'on le prenne pour un personnage réel.



Photographie par Sam Ogden au Museum of Fine Arts, Boston

Lamb & Company



3. LES MODÉLISATIONS D'UN HOMME, d'une femme et d'un enfant qui courent nécessitent des modifications : la simulation doit tenir compte des différences de masse des segments corporels des trois modèles, et de nombreux autres paramètres. Le saut de cheval est une action plus simple à simuler que la course, parce que le gymnaste est en l'air pendant la plus grande partie de la figure. Pendant cette période son corps obéit simplement à la loi physique de conservation de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

utilisation est relativement facile. Les animateurs utilisent maintenant ces systèmes pour reproduire des mouvements sans comprendre le déroulement de ces mouvements ni les équations sous-jacentes.

Toutefois, si la simulation permet la reproduction d'actions générales, elle n'aide pas à programmer des mouvements détaillés. Par exemple, l'animateur spécifiera le chemin suivi par une bicyclette, mais il ne pourra utiliser la simulation pour stipuler que le cycliste pédale de façon décontractée. Cette limite peut être en partie franchie par une combinaison de techniques : on engendre automatiquement les mouvements globaux par simulation, puis on affine les mouvements, telles les expressions faciales, par interpolation ou par enregistrement du mouvement. Les mouvements simulés sont également rendus plus réalistes par l'addition d'éléments secondaires, passifs, qui réagissent selon les mouvements du personnage principal : un trampoline se déforme lorsqu'un gymnaste rebondit dessus ; le sable qui se tasse sous les pieds d'un coureur, sur une plage, modifie l'allure de la course ; les vêtements, que l'on peut modéliser comme un ensemble de points reliés par des ressorts, bougent avec la personne qui les porte.

Par simulation, on reproduit aussi le comportement des foules. Un petit programme inséré en amont du système de contrôle évite les collisions en calculant la vitesse de chaque individu en fonction de la distance aux autres et des obstacles présents. Cette vitesse est alors utilisée par le système de contrôle de la locomotion de chaque individu.

Nous avons choisi d'étudier des activités sportives telles que la course ou la bicyclette, parce que la dynamique de ces actions contraint le mouvement et limite la recherche de lois de

contrôle. Les simplifications sont particulièrement nettes dans la simulation du saut de cheval : le gymnaste est en l'air la plupart du temps, et son moment cinétique est conservé. La course est une action plus compliquée, parce que l'athlète est le plus souvent en contact avec le sol, et que les couples de forces appliqués aux articulations, calculés par les lois de contrôle, modifient directement de nombreux détails du mouvement. Plus généralement, la simulation est beaucoup plus difficile quand les mouvements humains sont exécutables de différentes façons, selon les personnes : les mouvements où se manifeste le caractère, mimes ou gesticulations, par exemple, échappent à nos descriptions. Lorsque les lois physiques n'imposent pas les grandes lignes d'un mouvement, la simulation risque de ne pas sembler naturelle. On doit alors introduire des règles supplémentaires fondées sur l'observation et sur la mesure des mouvements réels.

Comment évaluer la qualité du mouvement humain simulé ? Tout dépend du but visé. Des environnements virtuels utilisables pour l'entraînement, le travail avec une machine ou le divertissement exigent des mouvements assez variés, expressifs et réalistes. On doit les évaluer avec un test analogue à celui qui avait été proposé par le mathématicien britannique Alan Turing : on se demande si l'on perçoit une différence entre le mouvement simulé et le mouvement réel, quand ils sont tous les deux présentés avec le même système graphique. Les premières expériences indiquent que l'on ne reproduit pas encore correctement le mouvement humain, mais certaines personnes trouvent les mouvements simulés plus réalistes que les mouvements réels lorsque le corps est schématisé par des points placés sur les articulations.



Nancy Pollard

Dans le cas des simulations destinées à l'étude de questions scientifiques ou d'ingénierie, on évalue simplement les simulations en superposant le mouvement réel et l'enregistrement vidéo du mouvement de synthèse. On compare alors des données biomécaniques, tels les forces de réaction au sol, le temps de vol, la vitesse ou la longueur des pas. Les résultats de ces évaluations permettent, à leur tour, de corriger les modèles et les systèmes de contrôle et font progresser les simulations vers des scènes plus réalistes.

Jessica HODGINS est professeur à l'Institut de technologie de Georgie.

Andrew WITKIN et Michael KASS, *Spacetime Constraints*, in *Proceedings of SIGGRAPH 88*, ACM, 1988.

J. Thomas NGO et Joe MARKS, *Spacetime Constraints Revisited*, in *Proceedings of SIGGRAPH 93*, ACM, 1993.

Jessica K. HODGINS, Wayne L. WOOTEN, David C. BROGAN et James F. O'BRIEN, *Animating Human Athletics*, in *Proceedings of SIGGRAPH 95*, ACM, 1995.

G. MAESTRI, *Digital Character Animation*, New Riders Publishing, 1996.

Jessica K. HODGINS et Nancy S. POLLARD, *Adapting Simulated Behaviors for New Characters*, in *Proceedings of SIGGRAPH 97*, ACM, 1997.

Les poussières sahariennes

STEFANO GUERZONI • EMANUELA MOLINAROLI

Des poussières du Sahara traversent la Méditerranée et retombent sur l'Europe, notamment sous la forme de «pluies rouges».

D'Europe, le désert du Sahara est lointain, et plus lointaine encore l'idée que le sable et la poussière provenant d'Afrique du Nord puissent se faire sentir dans tout le bassin méditerranéen et dans la majeure partie de l'Europe. Certains de ces effets sont pourtant manifestes : des pluies laissent des traces rouges sur les voitures, et les vents de sirocco violents apportent parfois du sable. D'autres conséquences sont

plus discrètes, mais tout aussi importantes : certains carbonates basiques des poussières réduisent l'acidité des pluies, et les poussières apportent des éléments nutritifs (des ions contenant du fer et du phosphore) qui favorisent la croissance des algues dans les eaux marines, habituellement pauvres en ces substances.

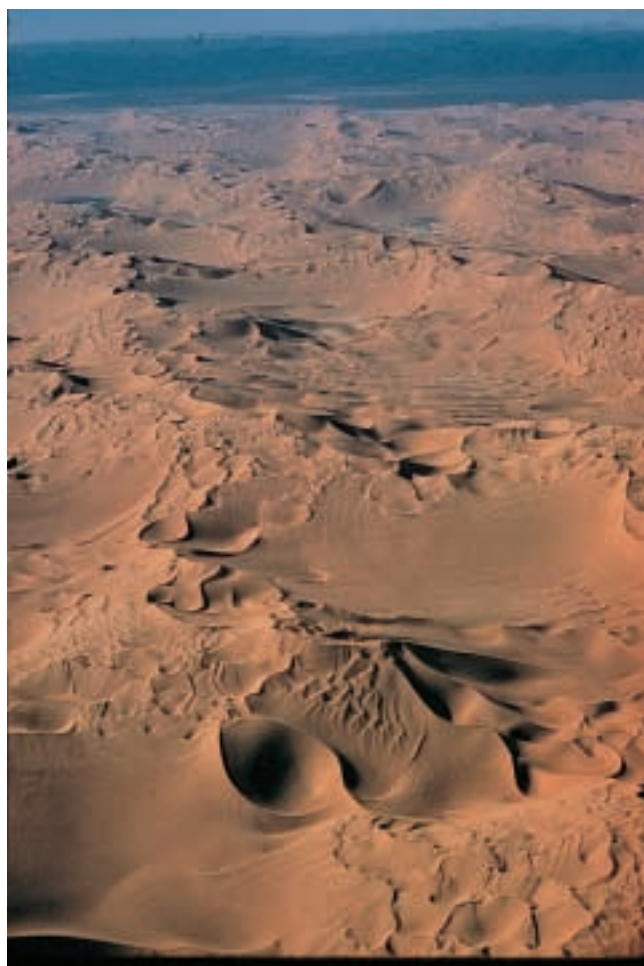
Ce transport des poussières est visible de l'espace : les astronautes à bord de la station *Skylab* ont observé

la trajectoire du sable du Sahara qui, soulevé par une tempête à l'Ouest du Sahara, traversait l'Atlantique et atteignait les Caraïbes. Chaque année, les vents transportent des centaines de milliers de tonnes de sable du Nord du Sahara vers l'Ouest et vers l'Europe. Sur les côtes méridionales de l'Europe, certains couchers de soleil ne sont pas rouges, mais d'un jaune d'or. Cette couleur est due à un voile de particules qui filtre la lumière

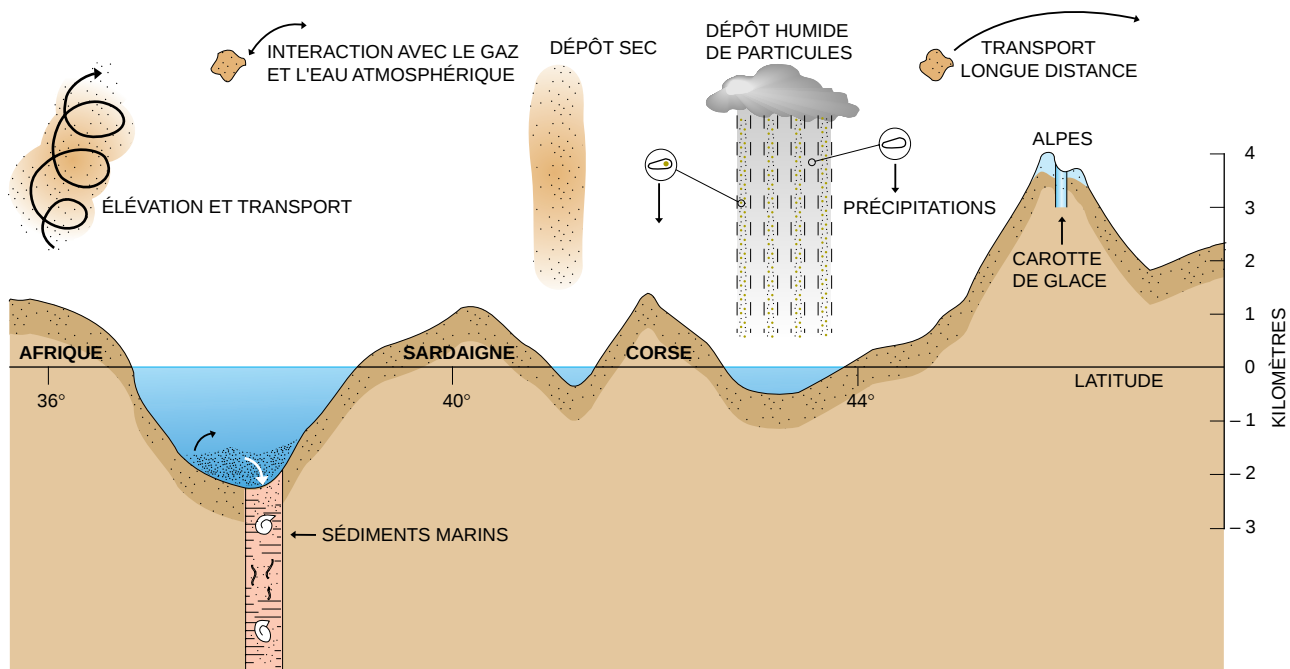


Pierre Boulet/Cosmos

1. LA COLORATION DORÉE de certains levers et couchers de soleil (à gauche), caractéristique du Sahara, résulte de la présence de poussières en suspension dans l'atmosphère. Ce spectacle



est parfois observable dans le Midi de la France. L'environnement saharien s'érode facilement, à l'image de la région de Tassili (à droite).



2. DESTINATIONS POSSIBLES des poussières sahariennes le long d'un profil Sud-Nord, de l'Afrique jusqu'aux Alpes. Les particules provenant du désert africain sont d'abord soulevées et transportées en altitude, où elles interagissent avec le gaz et l'eau. Elles sont ensuite déposées dans la mer et sur la terre, par l'intermédiaire de précipitations sèches ou humides. Dans la mer, cette

poussière reste dans la colonne d'eau ou sédimente sur le fond, avec les particules transportées par les fleuves, les glaciers et celles qui se forment aux dépens de substances dissoutes dans l'eau et par l'intervention d'organismes vivants. Sur la terre, les particules sont piégées dans les glaces, tant alpines que polaires.

solaire. Outre leur aspect esthétique, ces poussières modifient le bilan d'énergie de la Terre et perturbent le climat.

Grâce à un réseau de stations d'échantillonnage (en Sicile, en Sardaigne et en Corse), des géophysiciens ont estimé la quantité de matériaux déposés et ils ont élaboré un modèle du transport de ces particules africaines. Les concentrations moyennes en poussières sahariennes dans l'air diminuent de façon exponentielle lorsque la latitude augmente : d'environ 2 000 microgrammes par mètre cube dans les régions limitrophes au Sahara (35 degrés de latitude Nord), la concentration chute à moins d'un microgramme par mètre cube dans les Alpes et au-delà (entre 45 et 50 degrés de latitude). La quantité annuelle de poussières reçues par la terre et par la mer est ainsi comprise entre moins d'une tonne et plus de 100 tonnes par kilomètre carré.

L'apport n'est pas régulier, mais résulte principalement de quelques épisodes violents : les tempêtes de poussières. Les climato-

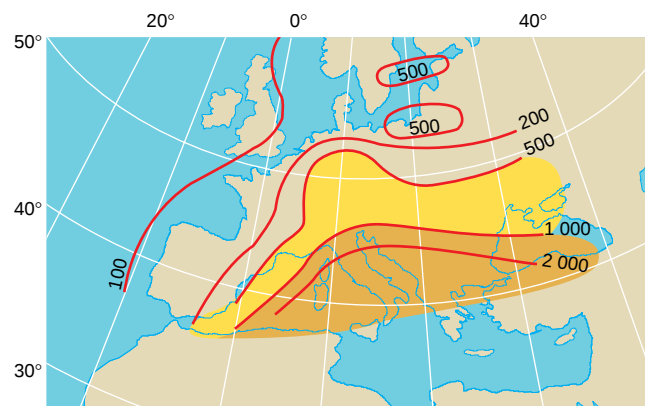
logues cherchent à prévoir l'impact climatique de ces poussières. Dans certains cas, l'impact est clair, comme pour l'éruption du Pinatubo, en 1991 : les poussières volcaniques ont été si abondantes (30 millions de tonnes) et projetées si haut (plus de 30 kilomètres) qu'elles sont restées dans l'atmosphère pendant plusieurs mois, diminuant la température moyenne du Globe de 0,5 °C.

Chaque grain de poussière parti d'Afrique interagit de façons variées avec l'air, le gaz et l'eau le long d'un

trajet qui atteint quelques centaines, voire quelques milliers de kilomètres. Ces longs transports ne se limitent pas uniquement au bassin méditerranéen et à l'Europe méridionale : les poussières sahariennes se déposent souvent dans toute la France, en Allemagne et, dans certains cas, à des latitudes supérieures (pays scandinaves et pôle Nord). Un événement important est survenu en mars 1991. Après l'avoir examiné, nous verrons comment l'analyse des poussières sahariennes qui arrivent aux pôles révèle les changements climatiques naturels. Puis nous examinerons les conséquences variées de ces épisodes de transport.

Une grande tempête de sable

Le 8 mars 1991, vers midi, le ciel au-dessus de la région de Sidi Bouzid, en Tunisie, fut obscurci par des nuages de poussières en provenance du désert. Simultanément, des vents chauds soufflèrent pendant plusieurs jours sur le Sahara ; la température enregistrée par de nombreuses stations météorolo-



3. LE CONTINENT AFRICAIN enrichit l'atmosphère européenne en calcium. Les lignes rouges indiquent des zones de quantités égales de calcium (quantités annuelles moyennes relevées au niveau du sol, en milligramme par mètre carré). Cet enrichissement est lié à la dissolution partielle des carbonates présents dans les poussières désertiques transportées.