

onde sans milieu sous-jacent. Autrement dit, la notion d'onde, qui, jusque vers 1865, ne semblait correspondre qu'à la déformation d'un milieu, devint brusquement un être à part entière, qui n'avait plus besoin de substrat. L'onde, ou plutôt le champ, devient un objet physique.

Pouvait-on alors mesurer directement la vitesse de la lumière par rapport à la Terre? Dans un train, on peut mesurer la vitesse des sons émis à une extrémité du wagon : elle est différente de celle que l'on mesure à partir du repère immobile des rails : le son, qui se propage dans le couloir du wagon à 300 mètres par seconde, se propage à 300 mètres par seconde plus 10 ou 20 mètres par seconde (la vitesse du train) pour quelqu'un qui est immobile sur le quai d'une gare. Peut-on faire la même expérience avec la lumière? C'est la fameuse expérience du physicien américain Albert Michelson (1851-1931), qui donna un résultat négatif, au début du siècle. Le résultat était inattendu : la vitesse de la lumière ne s'additionnait pas avec celle de la Terre, comme on s'y attendait depuis Galilée.

Pourquoi la vitesse de la lumière refusait-elle obstinément de s'ajouter? Albert Einstein montra qu'elle est une limite absolue, valable pour tous les corps. On découvrit d'abord que la vitesse de la lumière est identique dans tous les repères : la lumière émise par un corps qui se déplacerait aux neuf dixièmes de la vitesse de la lumière serait, pour nous, toujours, de 300 000 kilomètres par seconde. À la fin du XIX^e siècle, la vitesse de la lumière apparut ainsi comme une limite.

Naturellement des physiciens proposèrent alors de procéder comme pour les températures, afin que la vitesse de la lumière, valeur inaccessible (sauf pour la lumière), soit considérée comme infinie : de même qu'il est de plus en plus difficile de s'approcher de la température du zéro absolu, il est de plus en plus difficile de s'approcher de la vitesse de la lumière. En revanche, une différence apparut, parce qu'il semble exister deux types d'objets matériels. Nous sommes habitués aux objets massifs, tels les atomes ou leurs particules : quand on les accélère, leur masse, c'est-à-dire leur quantité de matière, ne change pas, mais

leur inertie, c'est-à-dire la résistance à la transformation de l'état de mouvement, croît indéfiniment. D'autre part, les photons, ou «grains de lumière», ont toujours la vitesse de la lumière : comme les neutrinos, sans doute, ils ont une inertie nulle.

Ces considérations approfondissent la notion de vitesse. Dans un train, il existe plusieurs façons de mesurer la vitesse

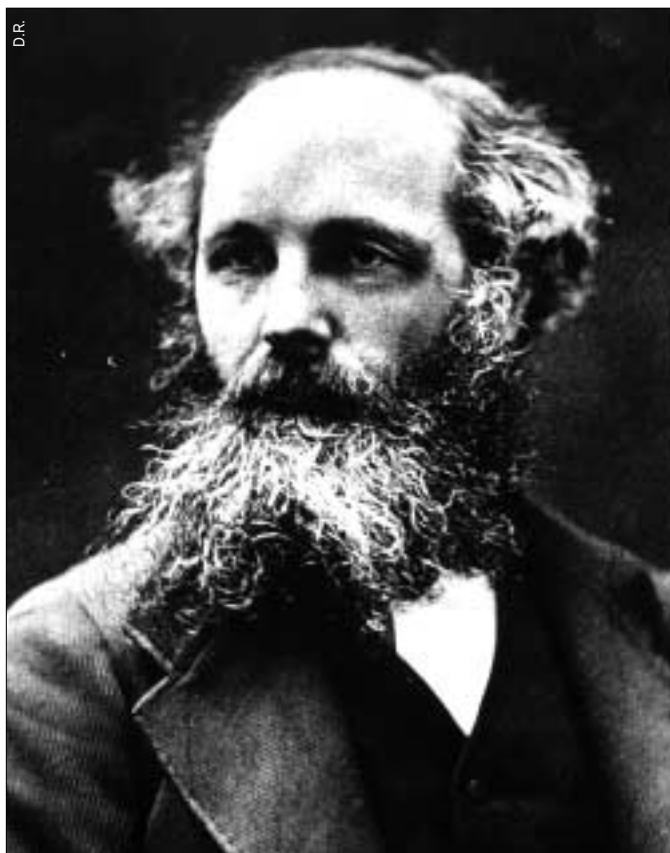
d'un système physique. Or l'accélération est le taux de variation de la vitesse avec le temps : ayant mesuré l'accélération, on peut l'«intégrer» en fonction du temps, afin de calculer la vitesse moyenne. Dans le cadre de la mécanique classique, galiléenne, ces deux mesures de vitesse donnent les mêmes résultats. La deuxième mesure, c'est-à-dire l'intégration de l'accélération dans le train, est une

mesure beaucoup plus naturelle, intrinsèque. Or cette mesure-là, curieusement, dans le cadre einsteinien, donne un nombre qui peut aller jusqu'à l'infini.

Pourquoi? Parce que la notion de vitesse galiléenne a plusieurs propriétés. C'est le rapport de l'espace parcouru au temps mis à le parcourir. C'est aussi une grandeur qui s'ajoute, mais dans le cadre einsteinien, cette seconde propriété correspond à une nouvelle grandeur. Les physiciens la nomment plutôt rapidité. Les deux grandeurs sont liées : connaissant l'une, on peut calculer l'autre et réciproquement, mais ce sont deux généralisations différentes de la notion initiale de la vitesse.

D'autres inattendus sont-ils... attendus? Toutes les constantes de la physique peuvent-elles être considérées comme infinies, par une méthode analogue à celle que nous avons déjà examinée deux fois? Ne généralisons pas, mais ne soyons pas non plus surpris ou choqués, si l'on découvre une nouvelle limite : pen-

sons par exemple à l'âge de l'Univers, que les astrophysiciens calculent égal à 15 milliards d'années environ. On peut montrer que cette valeur finie a, en réalité, un contenu infini. Ainsi, l'Univers peut être à la fois âgé de 15 milliards d'années et infiniment vieux...



2. Le physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) expliqua la relation inattendue entre l'électrostatique, où les charges électriques sont immobiles, la magnétostatique, où les aimants ne bougent pas, et la propagation de la lumière.

par rapport aux rails. La plus banale consiste à regarder par la fenêtre et à examiner les bornes kilométriques, ainsi que les horloges sur les quais des gares. En divisant la distance parcourue par le temps écoulé entre deux gares, on obtient la vitesse moyenne entre les deux gares. La vitesse ainsi mesurée est toujours inférieure à celle de la lumière, quelle que soit l'accélération du train. Imaginons maintenant que nous soyons enfermés dans un wagon, que quelqu'un ait baissé le rideau et que nous voulions connaître la vitesse du train. Dans le wagon, on ne ressent pas l'impression de vitesse, mais on sent l'impression d'accélération éventuelle : une valise peut tomber d'un filet quand le train accélère beaucoup, et un pendule s'incline. La mesure d'une accélération peut ainsi se faire de l'inté-

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND est professeur de physique à l'Université de Nice. Il publie aux éditions Gallimard le livre *Aux contraires (L'exercice de la pensée et la pratique de la science)*.

Ce texte est une transcription partielle du débat enregistré avec Émile Noël au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture le 6 novembre 1996.

Le champagne dans la flûte

Les bulles de champagne sont plus stables dans des verres lavés sans produit de rinçage.

Le coup d'œil que l'on jette sur le vin avant de le boire est une promesse de bonheur, quand la robe est d'une parfaite limpidité. C'est pourquoi les vignerons évitent les «voltigeurs» qui troublent le vin. Dans le cas du champagne, le plaisir annoncé n'est parfait que si l'on voit une mousse fine, de quelques millimètres de hauteur, qui se rassemble sur la périphérie de la flûte pour former une collerette alimentée en permanence par des bulles de petite dimension (diamètre inférieur au millimètre).

L'absence de mousse est-elle le signe infaillible d'une mauvaise qualité? Pas nécessairement : nous avons utilisé la technique des plans d'expériences pour étudier expérimentalement l'effet des verres sur la mousse du champagne. Un robot verseur, qui reproduit le geste de l'opérateur, versait du champagne dans des flûtes où nous suivions l'effervescence à l'aide d'un système de vision artificielle qui enregistrerait le temps de versement et la hauteur de mousse en fonction du temps, pendant et après le versement.

La théorie de la formation des bulles est simple : le champagne n'est pas en équilibre stable quand il est à l'air libre,

et le gaz s'échappe en formant des bulles sur les défauts présents à la surface du verre. La taille des bulles dépend de l'énergie de surface du récipient, c'est-à-dire de la facilité avec laquelle il accepte le contact avec d'autres matériaux (gaz ou liquide). Puis, une fois formées, les bulles grossissent par diffusion du dioxyde de carbone dissous, jusqu'à ce que la poussée d'Archimède devienne supérieure aux forces d'adhésion : la bulle se détache alors de la paroi.

Or l'énergie d'adhésion d'une bulle sur la surface du verre est proportionnelle à l'aire de la surface de contact de la bulle et du verre, aire qui dépend elle-même de l'énergie de surface. Cette dernière peut être évaluée à partir de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur le matériau qui constitue le récipient : si le récipient a une forte énergie de surface, c'est-à-dire si le liquide mouille bien le verre, la surface de contact est faible et la bulle est quasi sphérique ; la bulle se détache alors dès que son diamètre atteint quelques dixièmes de millimètre. C'est le cas des flûtes propres en verre sodocalcique (le verre le plus ordinaire) ou en cristal. Au contraire, si l'énergie de surface est faible, c'est-à-

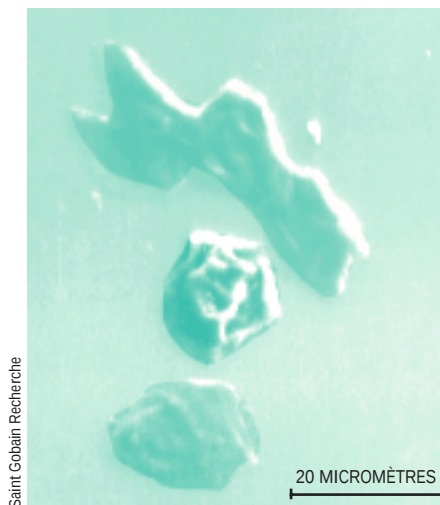
dire si le liquide mouille mal la surface, la bulle ne se détache que lorsqu'elle est assez grosse (plus de un millimètre de diamètre pour les parois en polyéthylène). On observe même des bulles pathologiques, de plusieurs millimètres de diamètre, quand la surface des flûtes est recouverte d'un polymère fluoré tel que celui qui tapisse les poêles anti-attachantes. Ce type d'analyses explique pourquoi les bulles sont fines quand le champagne est versé dans les flûtes en verre, et pourquoi elles sont plus grosses dans les gobelets en plastique.

Toutefois les surfaces de haute énergie se contaminent rapidement (en quelques heures, pour le verre), en fixant les molécules organiques de l'air (elles sont nombreuses dans les cuisines). Ainsi l'avantage du verre ou du cristal sur le plastique diminue quand les flûtes ont été salies par une longue station en atmosphère contaminée, tel le repos sur une planche de bois (qui libère des essences organiques).

Par diverses méthodes de microscopie, nous avons également étudié la naissance des bulles : contrairement aux idées reçues, elles ne se forment pas souvent sur des défauts du verre (les rayures sont rares), mais plutôt sur des dépôts de calcaire, de tartre, et sur les fibres de cellulose qui sont abandonnées sur la surface des verres par les torchons d'essuyage.

Les bulles qui se forment alimentent la collerette, dont la hauteur dépend du nombre et des dimensions des bulles, mais aussi de leur stabilité. Certains composés sont connus pour modifier celle-ci : on savait que les agents anti-moussant des rouges à lèvres nuisent à la mousse, mais nous avons découvert qu'il en était de même des produits de rinçage fréquemment utilisés dans les lave-vaisselle. Adsorbés par les surfaces de verre, ces produits organiques se dissolvent dans le champagne au cours du remplissage des flûtes. Ils ne perturbent pas l'effervescence, mais nuisent à la stabilité de la mousse : les bulles éclatent dès qu'elles arrivent en surface. Les produits de lavage sont également nocifs, mais ils sont moins gênants, car le rinçage les élimine en grande partie.

Patrice LEHUÉDÉ,
Saint Gobain Recherche
Bertrand ROBILLARD, Moët & Chandon



Deux des principaux sites de formation des bulles de champagne : les cristallisations (à gauche) et les fibres de cellulose laissées par les torchons, lors de l'essuyage (à droite).

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 22 novembre 1996, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Relief dans un cube

Des lasers forment des images en trois dimensions dans un cube de verre.

Imaginez un film en relief. Vous tournez autour du cube-écran et, sans lunettes spéciales ni casque, l'image apparaît sous divers angles, comme si vous tourniez autour d'un objet réel. Cela n'est plus tout à fait de la science-fiction depuis qu'Elizabeth Downing, de l'Université de Stanford, et ses collègues ont mis au point un système qui affiche une image en trois dimensions à l'intérieur d'un cube de verre.

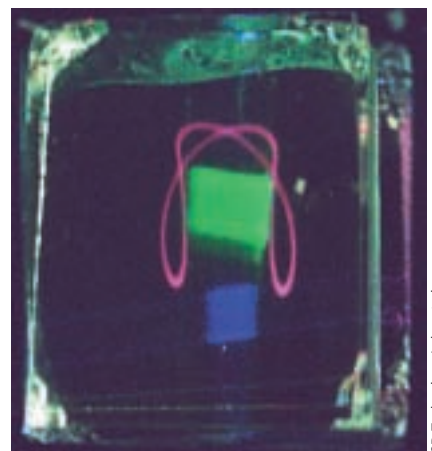
Sur un écran de télévision, un faisceau d'électrons excite des atomes qui émettent de la lumière en se désexcitant. Lorsque le canon électronique balaye l'écran, différents atomes s'illuminent : une image plane apparaît.

Dans le système d'affichage en trois dimensions, l'image est produite de manière analogue, par désexcitation d'atomes du matériau. Les atomes, de la famille des terres rares, ont la propriété de s'exciter lorsqu'ils absorbent simultanément deux photons infrarouges de longueurs d'onde différentes et de se désexciter ensuite rapidement en émettant un photon de longueur d'onde visible. Le nouvel écran est ainsi constitué d'un cube de verre,

transparent aux infrarouges, dopé avec des atomes de terres rares.

Les physiciens utilisent des verres fluorés dopés avec différents atomes, un par couleur d'émission : le praséodyme pour le rouge, l'erbium pour le vert et le thulium pour le bleu. Des miroirs orientables focalisent le point d'intersection de deux faisceaux lasers en une région donnée du matériau. Par exemple, lorsque l'on utilise deux lasers, dont les longueurs d'onde sont 1,5 micromètre et 0,85 micromètre, les atomes d'erbium absorbent ces deux photons et émettent un photon dans le vert, à la longueur d'onde de 0,545 micromètre. On utilise ainsi une paire de lasers différents pour chaque couleur : chaque paire de lasers, qui produit deux photons infrarouges de longueurs d'onde différentes, excite un type d'atome.

Le dispositif d'affichage, de la taille d'une assiette, permet d'illuminer jusqu'à 5 000 éléments d'images en trois couleurs dans un cube de 1,5 centimètre de côté. Les miroirs sont couplés à un dispositif mécanique qui fait osciller les miroirs, de sorte que le point d'inter-



Des lasers infrarouges dessinent des formes colorées à l'intérieur d'un cube de verre.

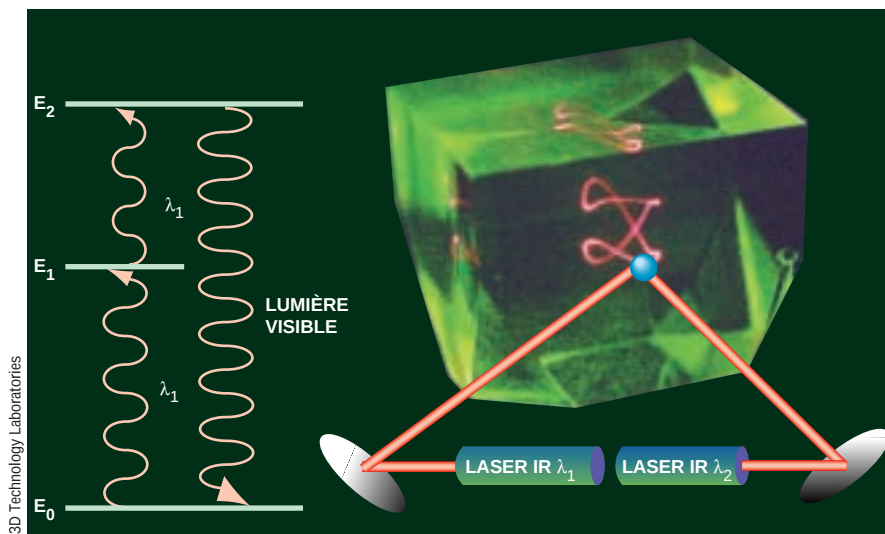
section des deux lasers balaye le cube et forme des figures tridimensionnelles simples, telles des surfaces colorées.

VERS LA TÉLÉVISION EN RELIEF?

En agrandissant la taille de l'affichage, on pourra envisager toutes les applications qui nécessitent la visualisation tridimensionnelle de données. Par exemple, plusieurs médecins pourraient observer, en même temps, l'image d'un cerveau prise par résonance magnétique. Les contrôleurs aériens pourraient voir les avions évoluer en trois dimensions.

Quand verrons-nous un film en relief par ce procédé? Pas tout de suite, car cet appareil ne peut pas encore afficher des images tridimensionnelles riches en informations : par rapport à un affichage de télévision de 300 points de côté, la quantité de données nécessaires à l'affichage tridimensionnel serait multipliée par au moins 300 (pour la troisième dimension). Ce procédé nécessite donc beaucoup plus de données que l'affichage stéréoscopique qui utilise deux images planes prises sous des angles légèrement différents. Ainsi, même en utilisant les techniques de compression les plus récentes, les disques de la nouvelle génération de disques optiques vidéo, les DVD, ne contiendraient que les données nécessaires à quelques secondes de film.

De même, la quantité de calculs nécessaires à la gestion de ces données est hors de portée des ordinateurs d'aujourd'hui. La solution viendra peut-être des ordinateurs à architecture parallèle qui généreraient des batteries de faisceaux lasers et, pour la gestion des données, de nouvelles techniques de compression ainsi que de l'utilisation de mémoires holographiques à cristaux, qui promettent des capacités accrues. □



Dans un cube de verre, des atomes de la famille des terres rares absorbent des photons infrarouges de longueurs d'onde différentes émis par deux lasers. Ainsi excité, chaque atome émet un photon visible (à gauche) qui illumine une région du cube. Des miroirs déplacent le point d'intersection des lasers à travers le cube, ce qui permet de tracer des formes tridimensionnelles.