

Une photo sensible

Un nouveau procédé multiplie jusqu'à dix fois la sensibilité des films photographiques.

Un coucher de soleil, un portrait, une fleur... Quel que soit le sujet, les événements qui se succèdent, du déclic jusqu'à l'observation du tirage papier, sont toujours les mêmes : pendant un bref instant, un film de plastique recouvert d'une émulsion de gélatine, où sont dispersés des cristaux de bromure d'argent, est exposé à la lumière. Lors de cette exposition, dans chacun des cristaux, les photons convertissent quelques ions argent (Ag^+) en atomes d'argent (Ag). Au cours du développement, les films, où les images restent latentes puisque tous les cristaux sont encore transparents, trempent dans un liquide révélateur qui fait apparaître l'image négative ; certains cristaux noircissent complètement, tandis que d'autres restent intacts. Selon quel critère ? Le nombre d'atomes d'argent par cristal de bromure d'argent : au-delà d'un nombre critique d'atomes d'argent, le cristal s'assombrit.

Aujourd'hui, cinq à dix photons sont en moyenne nécessaires à la conversion d'un ion argent en un atome. Jacqueline Belloni, du Laboratoire CNRS de physico-chimie des rayonnements, à l'Université Paris-Sud d'Orsay, Mona Treguer et Hynd Remita, et René de Keyzer, de la Société *Agfa Gevaert*, ont mis au point un procédé qui augmente

notablement la sensibilité des films photographiques.

Lorsqu'un photon atteint un cristal de bromure d'argent, il arrache un électron d'un ion bromure et crée simultanément, en vertu du principe de l'électroneutralité, un défaut d'électron, nommé trou, qui circule d'ion bromure en ion bromure. Trois scénarios sont alors possibles. Dans le premier, un ion argent positif capte l'électron pour devenir un atome (l'argent est réduit) et le trou migre jusqu'à la périphérie du cristal où il est happé par la gélatine environnante : c'est le cas favorable, puisque ce sont les atomes d'argent qui donneront l'image négative ! Dans un deuxième cas, le trou et l'électron se recombinent et disparaissent en formant un photon qui est émis. Ce phénomène, nommé fluorescence, diminue l'efficacité de la lumière et la qualité de l'image, car le nouveau photon crée parfois un atome d'argent dans un cristal adjacent. Enfin, le trou peut détruire un atome d'argent, qui a été formé par la capture d'un électron : l'atome redevient un ion (voir la figure).

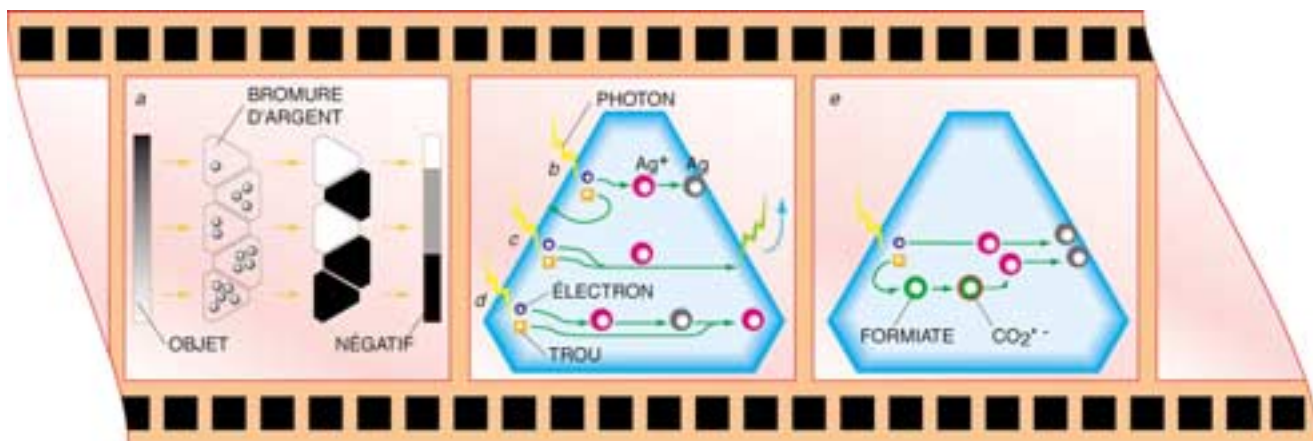
Un seul des trois modes d'action des photons engendre des atomes d'argent. Comment améliorer ce rendement ? Il s'agit de favoriser la rencontre de l'électron avec un ion argent en écartant le trou. Les chimistes ont eu l'idée de mêler aux ions argent et bromure, avant la formation du cristal, des ions formiates (HCO_2^-). De petite taille, ces ions se substituent à quelques ions bromure pendant la cristallisation du bromure d'argent, et sont de bons capteurs de trous.

Lorsqu'un photon crée une paire électron-trou, l'électron transforme un ion

argent en atome, tandis que le trou est rapidement capté par l'ion formiate qui libère l'hydrogène. La recombinaison du trou et de l'électron n'a plus lieu : la fluorescence, qui est responsable de la perte de 80 pour cent des électrons dans les émulsions standards, est supprimée. De plus, le trou et l'ion formiate forment un ion radical $\text{CO}_2^{\cdot -}$ qui est capable de réduire un second ion argent en un atome dans le même cristal de bromure d'argent. En présence d'ions formiates, un photon transforme ainsi deux ions argent : là où il fallait environ dix photons, désormais, un seul suffit.

Le développement des films reste inchangé. Dans un cristal, plus le nombre d'atomes d'argent formés par la lumière et groupés en amas est grand, plus la capacité de cet amas à attirer les électrons augmente. Ainsi, le révélateur réduit les cristaux de bromure d'argent à condition que le nombre d'atomes d'argent en amas dépasse le seuil critique, soit environ trois ou quatre par cristal selon le révélateur : les cristaux noircissent. En revanche, lorsqu'un cristal ne contient qu'un ou deux atomes d'argent, il n'est pas réduit par le révélateur et reste transparent.

Grâce au formiate, tous les photons sont efficaces (doublement) : le temps de pose est réduit et le flash, même pour des photographies d'intérieur, est superflu. L'augmentation de la sensibilité permet également de diminuer la taille des cristaux de bromure d'argent des émulsions, laquelle impose la résolution qui est ainsi améliorée. Les photographes amateurs et professionnels peuvent espérer profiter de ces résultats d'ici deux ou trois ans.



Lors d'une prise de vue (a), dans les cristaux de bromure d'argent, la lumière transforme des ions argent transparents en atomes d'argent. Au-delà d'un nombre critique d'atomes d'argent par cristal (ici, trois), le révélateur noircit tout le cristal : on obtient ainsi le négatif. Lorsqu'un photon heurte un cristal de bromure d'argent (b), il crée un électron (en bleu) qu'un ion argent (en rose) capte pour devenir un atome (en gris), et un «trou» (en orange) qui s'échappe hors du cristal. Toutefois, des réactions parasites diminuent l'efficacité : l'électron et le trou se

recombinent en un nouveau photon (c), ou bien, le trou est capté par l'atome d'argent qui a été formé par la capture de l'électron (d). Au total, trois photons ont formé un seul atome d'argent. Avec des ions formiate (en vert), un photon convertit deux ions argent en atomes (e). Le formiate capture le trou avec lequel il forme un ion radical $\text{CO}_2^{\cdot -}$ (en vert cerclé de rouge), tandis que l'électron est capturé par un ion argent sans réaction parasite. De plus, l'ion radical $\text{CO}_2^{\cdot -}$ transforme lui aussi un ion argent en un atome.

Nouvelle espèce de grenouille

Une rainette qui pond en altitude.

La biodiversité semble souvent menacée : des espèces disparaissent, parfois à cause de l'homme qui chasse à outrance, modifie son environnement, par exemple en déboisant les zones tropicales, et qui renforce l'effet de serre. Pourtant, on continue à découvrir régulièrement de nouvelles espèces. Jusqu'à présent, quelque 5 000 espèces de grenouilles ont été répertoriées. Une vingtaine d'entre elles vivent en France ; le Pérou, pour sa part, en compte près de 400. Le parc péruvien du Manu, qui est une zone où la flore et la faune sont particulièrement abondantes et variées, constitue une importante réserve de batraciens. Situé à 200 kilomètres à l'Est de Cuzco, entre 300 et 4 000 mètres d'altitude, ce parc couvre une superficie de 15 000 kilomètres carrés de forêt amazonienne. Pour les seules grenouilles, 81 espèces différentes ont été dénombrées à la station biologique de Cocha Cashu. Lily Rodríguez, spécialiste de la biodiversité à l'Université de Lima, a récemment découvert une nouvelle rainette de l'espèce *Osteocephalus*.

L. Rodríguez participe au programme *Diversitas*, coordonné par l'UNESCO, et auquel coopèrent de nombreux groupes d'étude de la biodiversité. C'est au cours d'une expédition nocturne en forêt amazonienne qu'elle a remarqué un chant nouveau, une sorte de gloussement de poule, qui provenait d'un trou caché dans un arbre. Il s'agissait d'une grenouille, difficile à démasquer parce qu'elle était tapie en hauteur. Cette nouvelle espèce de grenouille n'a pas encore été nommée ; mar-

ron clair, elle appartient à la famille des rainettes. Comme chez la plupart des grenouilles arboricoles, les pattes sont très longues, et le bout des doigts est recouvert d'un tissu rugueux qui leur permet de s'accrocher. Le mâle, dépourvu de sac vocal, mesure près de six centimètres et la femelle sept à huit centimètres (en France, une rainette mesure environ cinq centimètres).

La particularité de cette rainette péruvienne est de se reproduire dans des trous d'eau situés parfois très haut dans les arbres, à l'endroit des ramifications des branches ou dans les anfractuosités du bois. Posté sur l'arbre, un mâle chante pour attirer une femelle, qui le rejoint et pond une cinquantaine d'œufs. Les têtards naissent au bout de quatre à cinq jours. La situation haut perchée et cachée du trou d'eau protège les petits des prédateurs, mais la nourriture y est fort rare (au contraire, dans les mares, les têtards des autres espèces se nourrissent à volonté d'algues et de brins d'herbe). Pour pallier ce manque de ressources, la mère revient pour nourrir les têtards : elle pond dans l'anfruosité d'autres œufs, qui servent à l'alimentation des jeunes.

Pendant la saison humide, d'octobre à avril, le parc du Manu offre un festival de soirées musicales, les grenouilles, notamment, chantant toute la nuit. Ces chants, très spécifiques, permettent de différencier les espèces. Il semble que les femelles aient des tympans «programmés» pour n'entendre qu'une certaine fréquence. L. Rodríguez et Alessandro Catenazzi ont observé différents mâles de la nouvelle espèce et ont enregistré leurs chants. Malgré de grandes similitudes, ils ne sont pas identiques : les mâles les plus gros ont des fréquences inférieures et, lorsqu'on fait entendre à un mâle le chant d'un rival, il se met en colère et glousse différemment.

La plupart des grenouilles arboricoles, les autres rainettes tropicales, par exemple, qui vivent dans les arbres à plusieurs dizaines de mètres du sol, redescendent à terre pour se reproduire et jusqu'à présent, on ne connaît que très peu de grenouilles qui adoptent le comportement de la nouvelle espèce. Outre une grenouille appartenant à la famille des dendrobatidés, de petites grenouilles tropicales aux couleurs vives dont les glandes cutanées sécrètent une toxine très violente, deux autres rainettes seulement se reproduisent aussi dans cavités élevées remplies d'eau – l'une vit en Chine, l'autre au Nord du Pérou et au Brésil.

Marie-Thérèse Landousy





Logique et calculs de la téléportation

JEAN-PAUL DELAHAYE

Une idée de science-fiction confrontée à la réalité : limites et raisons en matière de téléportation.

Lorsque, exaspéré du retard pris par votre train ou par votre avion vous attendez, bouillonnant de rage sur votre siège ; lorsqu'une grève, un problème technique, une surprise météorologique vous immobilisent des heures entières et vous fait manquer vos rendez-vous ; lorsque, pris dans un embouteillage en plein été, vous respirez à pleins poumons les gaz des pots d'échappement des véhicules environnants et que vous réalisez que vous ne ferez pas la partie de tennis prévue, alors vous rêvez d'un système de transport rapide et infallible qui vous emmènerait sans effort et instantanément – du moins à la vitesse de la lumière – là où vous voulez.

La science-fiction a déjà proposé la solution, et les épisodes de *Star Trek* ou, plus récemment, de *Stargate* ont rendu familiers ces appareillages magiques où, debout dans une armoire transparente, le voyageur se dématérialise, alors qu'au même instant, à des centaines ou à des millions de kilomètres de là, dans une autre armoire transparente, des atomes s'organisent pour le recomposer.

Si l'appareillage de *Stargate* s'apparente au miroir magique d'*Alice au pays des merveilles*, l'effet obtenu est le même qu'avec l'armoire de *Star Trek* : le déplacement sans effort et ultrarapide, objet de vos rêves de forçat du volant, des gares ferroviaires et des terminaux d'aéroport.

Vous vous interrogez : cela sera-t-il possible un jour ? N'y a-t-il pas une impossibilité de principe que la science permet dès maintenant d'énoncer clairement et qui démasquerait irrémédiablement ces histoires de transports fulgurants ?

La science n'est pas une timide demoiselle qui s'interdit toute spéculation, mais au contraire un ensemble d'outils permettant de poser toutes les questions, y compris celles qu'aujourd'hui nous n'arriverons pas à régler : une spéculation raisonnée ne produit pas nécessairement la vérité, mais a plus de chances de s'en approcher qu'un délire incontrôlé que rien ne modère.

Formuler des réponses précises à ces questions de téléportation est délicat – cela contribue à leur charme –, car de nombreuses considérations doivent être combinées. Nous nous proposons d'aborder quelques aspects logiques liés à la téléportation, ce qui nous posera des questions profondes et insolites sur la quantité d'information qui définit un être humain ou sur la nature quantique ou algorithmique de l'esprit. L'article qui suit, *La téléportation quantique*, détaille les phénomènes quantiques envisageables.

Les modèles de téléportation font appel à divers principes qui respectent plus ou moins les objets et personnes transportés, qui obligent parfois à en connaître un plan (plus ou moins détaillé), et qui sont compatibles ou non avec la possibilité de dupliquer les objets ou personnes transportés. Un travail logique de classification s'impose.

La téléportation par raccourcis topologiques

Le premier modèle de téléportation respecte entièrement l'objet déplacé et permet d'aller d'un point à un autre de l'univers sans même se préoccuper de la vitesse de la lumière (nous négligerons ici les effets concernant le temps,

qui accompagnent ou perturbent de tels hypothétiques voyages).

En s'appuyant sur la théorie de la relativité générale d'Einstein ou sur d'autres théories physiques concurrentes de l'espace-temps, à coup de trous noirs, de trous de ver (des sortes de tunnels créant des liens entre des points en apparence éloignés), de plis spatiaux (des déformations de l'espace créant des jonctions inattendues entre points distants) ou d'hyperespaces opportuns (le passage dans une autre dimension habituellement inaccessible engendrant un raccourci), certains physiciens envisagent que l'humanité future, maîtrisant des forces et des énergies sans commune mesure avec celles à notre portée aujourd'hui, modifiera la topologie de l'espace-temps et l'exploitera pour se déplacer d'un point à un autre sans emprunter le chemin naturel.

Considérations théoriques très hasardeuses ! En dehors du fait que, parmi les théories en compétition, toutes ne sont certainement pas justes (peut-être aucune) ces théories ne donneront des machines à téléporter qu'en supposant des progrès technologiques que nous ne formulons pas précisément.

Il n'est pas logiquement exclu que certains aspects de notre espace nous échappent encore et que, les ayant compris et maîtrisés, nous n'en tirions un jour des moyens de transport ultrarapides, par création de raccourcis topologiques. L'imagination des mathématiciens et des physiciens théoriciens est telle qu'il leur est possible de plonger notre espace-temps dans d'autres autorisant ces raccourcis miraculeux. Toutefois, entre imaginer et avoir de bonnes raisons de croire, le chemin est long... et peut-être sans raccourcis !

- ^ Teleport Exit
- ^ Baggage
- ^ Hover Cabs
- ^ Skyway
- ^ Rentals

ENTROPY
ENTROPY DELAY
ELECTRON LOCK
DECORRENCE
PLANCK FACTOR

QUANTUM
TRANSIT
AUTHORITY

Aujourd'hui donc, même si, sur le plan logique, aucun raisonnement définitif n'interdit de croire à ces jonctions inopinées ou à ces plis heureux, rien de sérieux ne nous permet de soutenir que nous pourrions un jour réaliser des appareils qui nous feraient voyager sans fatigue et sans attente par des raccourcis de l'espace.

Quant aux trous noirs, les physiciens qui étudient leur nature ont démontré que les variations fortes de la gravitation déchiquetaient tout objet physique lors de son entrée dans le trou noir. Cette voie, la plus réaliste (car la physique relativiste est bien attestée et elle prévoit l'existence de trous noirs dont des manifestations indirectes ont été observées), ne conduira donc pas à des outils de transport nouveaux, même dans cent ans ou mille ans.

Notons trois caractéristiques de ces improbables mais possibles voyages par raccourcis topologiques :

- ils n'exigent pas la connaissance préalable de l'objet qui voyage, car celui-ci garde son intégrité, le voyage n'étant finalement qu'un simple déplacement, par un chemin inhabituel ;

- ils permettraient de s'affranchir de la limite de la vitesse de la lumière : sans jamais localement se déplacer plus vite que la lumière, nous joindrions, grâce aux raccourcis empruntés, deux points plus vite que ne le fait la lumière par le chemin usuel ;

- ils n'aident pas *a priori* la duplication des objets ou des personnes.

Téléportation par analyse-transmission-recomposition

À défaut d'emprunter des raccourcis topologiques, l'idée qui vient le plus naturellement à l'esprit pour obtenir un déplacement à la vitesse la plus grande possible est la suivante :

- analyser l'objet à téléporter ;
- envoyer, à l'aide d'ondes électriques ou électromagnétiques, la description obtenue de l'objet ;

- reconstituer l'objet à l'arrivée, à partir des données captées, avec des atomes rassemblés sur place (ceux qui composaient l'objet au point de départ y restent et ne voyagent pas, car les accélérer coûterait trop cher en énergie).

L'application de ce schéma engendre de multiples difficultés que nous allons envisager une à une. Remarquons que ce schéma est déjà mis en œuvre avec succès pour certains objets matériels simples et qu'il pourrait, sans effort

insurmontable, l'être pour d'autres. La télécopie est un télétransport authentique fondé sur le schéma *analyse-transmission-recomposition* : une feuille de papier recouverte de «taches» d'encre est analysée (avec un niveau de précision limité), le résultat numériquement codé de l'analyse est transmis par le réseau téléphonique (donc à une vitesse proche de celle de la lumière), et l'appareil destinataire produit une feuille semblable à celle du départ, en exploitant l'information qui a voyagé.

Les télécopies sont souvent de médiocre qualité, mais c'est par souci d'économie et pour accélérer la transmission des informations sur la ligne téléphonique. Nous disposons de toutes les techniques nécessaires pour réaliser des fax en couleur de grande précision qui respecteraient l'épaisseur du papier et sa qualité. Sans grands efforts, on saurait de même téléporter des livres entiers : l'appareil émetteur ferait une analyse du format, de la nature de la reliure, de la couverture, des papiers, puis de chacune des feuilles, et, après transmission de toutes ces données, l'appareil récepteur réimprimerait et relierait un livre semblable ou approchant.

Est-ce qu'un tel appareil de télétransport de livres aurait un intérêt économique ? Sans doute pas, mais l'exemple est suffisant pour affirmer que la téléportation n'est pas de la science-fiction.

Jusqu'où peut-on aller en suivant le schéma analyse-transmission-recomposition ? Pour les objets bidimensionnels, il est clair que les techniques de photographie associées à des techniques d'analyse de la nature des supports pourraient, si on le souhaitait et si on s'en donnait les moyens, conduire à des machines à téléporter des tissus, des rouleaux de papiers peints, des films de plastiques imprimés ou tout autre objet plat décoré. La qualité de l'objet reconstitué n'est limitée que par les efforts qu'on entreprend dans les phases d'analyse et de recomposition.

Certains objets tridimensionnels peuvent eux aussi, dès aujourd'hui, être téléportés d'un endroit quelconque de la terre à un autre par analyse-transmission-recomposition. C'est le cas des objets en plastique : ils peuvent être analysés par un laser qui en détermine la forme géométrique tridimensionnelle, forme qui est transmise à une machine laquelle reconstruit un objet identique à partir de la définition géométrique. Les machines de stéréolithographie créent

des couches de résines superposées qui matérialisent n'importe quelle forme préalablement analysée. De telles machines associées à un système de peinture automatisé seraient de parfaits terminaux d'arrivée pour la téléportation de petits objets tridimensionnels dont la composition interne est sans importance : petites statues, jouets pour enfant, figurines peintes, etc.

L'analyse chimique par spectrométrie de masse ou, dans le cas des séquences d'ADN, par électrophorèse sur gel, rend possible de téléporter des composés chimiques dont chaque molécule serait identifiée et dont les proportions respectives seraient mesurées ; l'ensemble de ces informations conduirait, après synthèse et mélange, à la reconstitution du composé initial.

De tels appareils ont pour l'instant des capacités très limitées, mais ils sont d'actualité, et une équipe suisse dirigée par Denis Hochstrasser, de l'Institut suisse de bio-informatique, a conçu un scanner moléculaire destiné à l'analyse des protéines qui, en automatisant l'analyse de cette classe de molécules, fait faire un pas en avant à d'éventuels téléporteurs moléculaires.

Actuellement, seules des solutions liquides très pures d'un petit nombre de composants ou des mélanges solides très simples pourraient être ainsi moléculairement télétransportés, mais des progrès continus sont certains. D'ici peu, nous aurons donc la possibilité de construire de véritables machines à téléporter pouvant faire voyager des composés chimiques complexes.

L'ADN ou l'ARN de certains virus a été entièrement séquencé, et certains virus sont connus protéine par protéine ; nous pourrions donc, dans un proche avenir, téléporter certaines classes de petits organismes. Si nous partons à la conquête du système solaire ou de la galaxie, de telles machines pourraient devenir indispensables pour envoyer de nouveaux médicaments, de nouveaux aliments, de nouveaux colorants etc., à nos colonies éloignées.

Des limites infranchissables ?

Venons-en au problème des limites intrinsèques de l'approche de la téléportation par analyse-transmission-recomposition.

Plus un objet est complexe, plus sa téléportation exige qu'on l'analyse finement. Si, pour téléporter ce qui nous

intéresse dans une feuille de papier, point n'est besoin de mener l'analyse chimique de la feuille, en revanche, pour téléporter un gâteau au chocolat, il ne suffit pas de reconstituer un bout de plastique coloré en marron. Ce qui nous importe dans le gâteau est sa forme, sa couleur et son goût : le téléporter signifie donc reconstituer ces trois éléments, ce qui est bien sûr extrêmement difficile et hors de portée aujourd'hui, car le nombre de molécules d'un arôme de chocolat est énorme (plusieurs dizaines), et même en y prenant tout le temps qu'on veut les résultats actuels sont imparfaits.

La reconstitution de certains objets (comme les cristaux et les êtres vivants) oblige à une précision encore plus

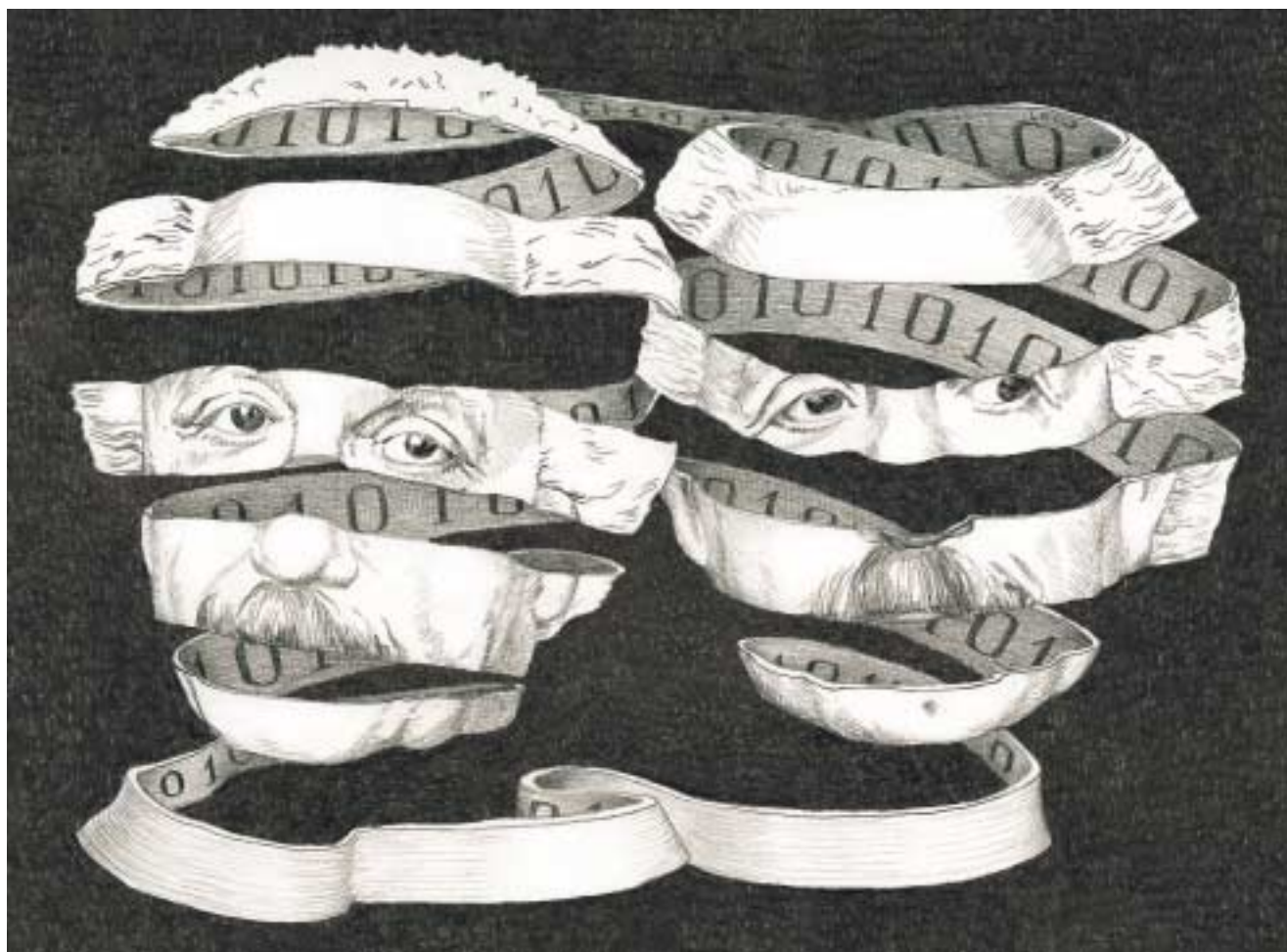
grande, d'ordre atomique. En effet, le déplacement d'un atome peut correspondre à la mutation d'un gène important chez un être vivant : pour téléporter un être vivant, chaque molécule et chaque atome doit être identifié au départ et remplacé à l'arrivée avec exactitude.

Si l'on tente d'aller le plus loin possible dans la réalisation de téléporteurs, le moment arrivera donc vite où il faudra respecter la position exacte de chaque atome de l'objet à déplacer. Y a-t-il une impossibilité fondamentale à cette téléportation par analyse-transmission-recomposition avec une précision atomique? Nous entrons dans un domaine où il va être difficile de for-

muler des conclusions définitives. Cependant quelques commentaires méritent d'être notés.

Analyse impossible?

Qui aurait pensé, il y a deux siècles, qu'on réussirait à voir les os ou les organes internes d'un animal vivant sans avoir à en découper la peau? Peut-être réussirons-nous à aller plus loin et à mener l'analyse, atome par atome, de petits volumes de matière. La mécanique quantique impose toutefois des limites à ce qu'on peut connaître des petits objets. Est-ce que ces limites concernent notre problème? Le physicien Samuel Braunstein (spécialiste de



1. QUANTITÉ D'INFORMATION POUR DÉCRIRE UN ÊTRE HUMAIN. Combien d'informations binaires (bits) faut-il pour décrire un être humain (qu'on voudrait téléporter en communiquant la description)? **10^{32}** En indiquant la position, la nature et la vitesse de chaque atome composant un être humain avec une précision de l'ordre de grandeur d'un atome moyen, il faut environ 10^{32} bits d'information pour décrire un être humain. **10^{20}** Les nombreuses informations redondantes que la description précédente contiendrait pourraient être considérablement réduites par les techniques de compression de données. Sans qu'aucun nombre puisse être avancé sur des bases sérieuses, on peut quand même risquer que 10^{20} bits seraient suffisants, surtout si l'on accepte de ne garder que les informations pertinentes (qu'importe, par exemple, la longueur exacte de chaque cheveu, la

position précise de chaque pore de la peau, etc.). **10^{15}** Si l'on ne souhaitait garder qu'une description algorithmique de l'esprit (et si une telle chose est possible!), le nombre d'informations caractérisant une personne serait sans doute bien inférieur à 10^{20} . On peut considérer que, vu la taille du génome (moins de 10^{10} bits d'information), vu le vocabulaire qu'une personne connaît (50 000 mots est exceptionnel, cela fait moins de 10^7 bits), vu le nombre de souvenirs qu'une personne possède (un livre de 100 000 pages permet certainement de les consigner tous, cela représente moins de 10^9 bits), on peut avancer que 10^{15} bits de programmes seraient grandement suffisants. Peut-être même pourrait-on risquer les nombres de 10^{12} ou 10^{10} . Bien sûr, la haute idée que l'homme a de lui-même rend choquantes de telles évaluations, que bien peu de gens acceptent.

2. La synthèse est-elle toujours possible ?



Le problème de la reconstitution d'objets dont on connaît le plan n'est pas toujours facile. Ne rencontrera-t-on jamais des molécules apparues grâce à des réactions utilisant des catalyseurs définitivement disparus ou inconnus ? Ne se peut-il pas aussi qu'une molécule n'apparaisse que dans des circonstances très particulières que nous ne reproduirons jamais (la synthèse du diamant, par exemple, exige de très fortes pressions), ou demandant des durées si longues que nous ne pourrions pas les réaliser ? Chacun de ces objets difficiles à synthétiser serait un obstacle majeur à la mise au point de la porte de sortie d'un téléporteur.

Le problème de la durée de la synthèse d'objets complexes pourrait bien être aussi un obstacle majeur à la téléportation. En informatique, la théorie de la complexité des algorithmes étudie des problèmes dont la solution ne peut pas être découverte en temps raisonnable (problèmes exponentiellement difficiles). Une voie pour démontrer définitivement l'impossibilité de la téléportation serait d'établir un lien entre ces problèmes et la synthèse de certains composés chimiques.

la téléportation quantique) s'est posé la question. La mécanique quantique indique que la précision avec laquelle on peut mesurer la position et la vitesse d'une particule est limitée par la formule d'Heisenberg, qui indique que le produit de l'incertitude sur la position par l'incertitude sur la vitesse est supérieure à la constante de Planck.

Si l'on souhaite mesurer chaque atome, d'hydrogène par exemple, de masse m avec une précision égale à la taille de l'atome, l'incertitude quant à la vitesse sera d'environ 300 mètres par seconde. Cela semble beaucoup, mais la vitesse v des atomes, due au seul fait que nous sommes à température ambiante T , donnée par $1/2mv^2 = kT$ (où k est la constante de Boltzmann), est plusieurs fois supérieure à cette vitesse. Il semble donc que le principe d'incertitude d'Heisenberg ne soit pas un obstacle à la réalisation d'un analyseur atome par atome servant pour la porte d'entrée d'un téléporteur du futur.

L'impossibilité d'un analyseur est peut-être à rechercher dans la logique géométrique des objets tridimensionnels. Certains objets de notre univers, pour des raisons mécaniques et géométriques, semblent en effet impos-

sibles à analyser : les banques utilisent par exemple des boîtes de transport de billets qui, en cas de tentative d'ouverture forcée, détruisent leur contenu (en répandant à l'intérieur un produit acide ou tachant). Une telle boîte dont la clef aurait été détruite ne constituerait-elle pas un objet à jamais impossible à analyser ? Et si ce type de boîte peut être ouverte par un expert, n'est-il pas possible d'en concevoir d'autres utilisant des explosifs et des serrures bloquantes dont la logique de la conception empêcherait définitivement toute analyse du contenu ? Je ne serais pas étonné que cette impossibilité structurelle se produise lorsqu'on a affaire à des molécules complexes imbriquées, c'est-à-dire formant des agrégats solides dont toute tentative d'analyse entraîne la destruction (sans produire de résultats).

De tout cela, nous concluons qu'un analyseur atomique universel (qui produirait une description atomique de tout système physique qu'on lui confierait) n'existera sans doute jamais. Toutefois, cela reste à démontrer, et il est certain que l'analyse atomique de bien des objets progressera au-delà de ce que nous savons faire pour l'instant.

Quantité d'information trop importante ?

On a évalué la quantité d'information nécessaire pour décrire un objet de la taille d'un être humain, et l'on en a parfois conclu que la téléportation humaine est à jamais impossible. La quantité d'information à transmettre par le signal électrique ou électromagnétique dépasserait toujours tout ce que nous saurons stocker et communiquer. Examinons ces arguments qui pourraient régler par la négative une fois pour toutes le problème de la téléportation par la méthode d'analyse atomique.

L'Institut américain de la santé, pour son projet de «L'homme visible» (*The visible human project*), utilise environ 10^{11} bits (informations 0 ou 1) de données qui servent au stockage des détails au millimètre près, en trois dimensions, d'un être humain (un cadavre congelé qui a été découpé en fines tranches). Ces 10^{11} bits d'information sont loin de constituer une définition complète, atome par atome, du pauvre homme (un condamné à mort exécuté par injection mortelle au Texas). En fait, on évalue que la description atome par atome d'un être humain demanderait environ 10^{32} bits d'information, ce qui, en transcrivant cette information sur des CD-ROM, en fournirait une quantité suffisante pour remplir un cube de 1 000 kilomètres de côté !

On peut espérer prochainement transmettre 10^{12} bits d'information par seconde, et peut-être un jour ira-t-on jusqu'à 10^{15} ; or, même à cette vitesse de transmission, il faudra 10^{17} secondes (environ trois milliards d'années) pour transmettre les données relatives à un seul individu décrit atome par atome. Même si je suis prêt à accorder que jamais on ne saura transmettre 10^{32} informations binaires dans un délai raisonnable (ni sans doute les mémoriser), je crois que cet argument contre la téléportation n'est pas recevable, car il oublie la possibilité de compresser les données.

La compression de données est déjà utilisée par les fax (c'est ce qui explique que, lorsque vous passez une feuille presque blanche, elle est transmise bien plus rapidement que lorsque vous passez une feuille couverte d'un texte en petits caractères). La compression des données est ce qui rend possible la superposition sur une même onde radio de plusieurs canaux de télévision numérique. Cette technique, presque totalement ignorée il y a vingt ans, est devenue

indispensable dans nombre d'applications informatiques et multimédias, et elle est très loin d'avoir donné tout ce qu'on peut en attendre. Elle permet à la fois de gagner de l'espace pour le stockage des données, et du temps quand on fait voyager les données.

Notons que, comme cela se passe pour un fax, la compression peut se faire par morceaux et dynamiquement, et ne demande donc pas qu'à un moment donné toute l'information à compresser soit présente dans les mémoires des machines concernées : la compression de données est donc susceptible de résoudre à la fois le problème du stockage et le problème de la transmission de très grandes quantités d'information.

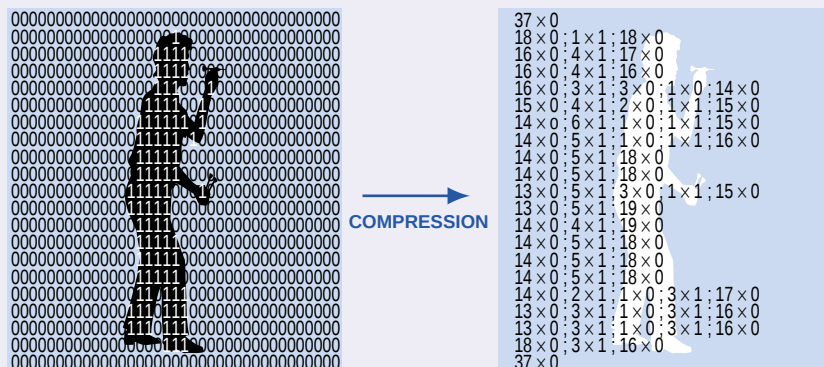
Il est évident que, pour un être humain défini atome par atome, de nombreuses informations sont redondantes et donc sujettes à compression. Chaque cellule, par exemple, contient les mêmes chromosomes (sept milliards d'informations binaires qui, d'une cellule à l'autre, se répètent identiquement). Nul ne sait aujourd'hui ce que les tentatives de compression des données relatives à un être vivant fourniront et de quel facteur le 10^{32} pourra être réduit. Les redondances dans un être vivant sont tellement nombreuses qu'on peut imaginer que 10^{20} bits d'information seraient suffisants (c'est déjà dix milliards de fois plus que le génome humain qui contient déjà tant de choses, et qui, notons-le, est susceptible d'être comprimé lui aussi).

Ainsi, la question du stockage informatique et de la transmission radio d'une description atome par atome d'un être humain n'est pas tranchée. Si elle est impossible, aucun argument définitif n'a été formulé.

Synthèse à partir d'une description atomique

Pour ce qui est de la synthèse à l'arrivée, nous sommes loin de pouvoir replacer un par un des atomes d'objets volumineux. Notons cependant que nous approchons de cette synthèse atome par atome. L'utilisation du microscope à balayage à effet tunnel permet d'analyser des surfaces atome par atome et a déjà conduit à la manipulation d'atomes un par un. Deux physiciens de l'Université Cornell, aux États-Unis, ont ainsi réussi, il y a quelques mois, à lier un atome de fer à une molécule d'oxyde de carbone (CO) pour former une molécule de carbonyle de fer (COFe).

3. Transmettre l'information en la comprimant



Un argument a été utilisé plusieurs fois pour démontrer définitivement l'impossibilité de la téléportation par analyse-transmission-reconstitution atome par atome : la quantité d'information à collecter et à transmettre (évaluée à 10^{32} bits pour un être humain) dépassera toujours les capacités de traitement de nos machines, cela même dans un avenir lointain.

Cet argument oublie que la compression de données réduirait considérablement ce 10^{32} . La compression de données consiste à réunir les données de même nature, ce qui diminue la quantité d'information à transmettre. Même si, aujourd'hui, il est difficile d'indiquer quel serait le facteur de compression que nous pourrions obtenir sur des données de ce type, il est certain que ce taux de compression sera considérable. Le nombre de types de cellules humaines est assez limité et, dans une même catégorie, deux cellules se ressemblent énormément, ce qui permet un gain considérable d'information. Bien d'autres redondances, comme celle des génomes identiques dans toutes les cellules d'un même organisme, créent des opportunités de compression.

Nul ne sait jusqu'où nous irons dans cette voie et s'il y a des impossibles définitifs en matière de synthèse atome par atome, mais, comme pour l'analyse et la transmission, il n'est pas établi qu'on rencontrera là un obstacle fatal au projet de téléportation.

L'impossibilité de la téléportation d'objets complexes par analyse-transmission-recomposition atome par atome n'a donc pas été démontrée, et rien n'interdit de rêver. Notons que, contrairement à la téléportation par raccourci topologique, ce second type de téléportation :

- ne permet pas de dépasser la vitesse de la lumière ;
- s'accompagne toujours de la possibilité de dupliquer les objets téléportés ; en effet, même si la phase d'analyse les détruit (c'est peut-être inévitable), une fois l'information (éventuellement comprimée) obtenue, rien n'interdira de l'utiliser plusieurs fois pour reconstituer plusieurs fois l'objet ou le sujet télétransporté.

Nous laisserons aux générations futures le soin de résoudre les innombrables problèmes délicats que pourraient poser de telles duplications humaines (lequel des deux Monsieur

X reste l'époux de Madame X? lequel doit payer les impôts? etc.).

Et l'âme dans tout cela ?

Une objection d'une autre nature concerne la téléportation des humains. L'état mental d'un être humain n'est peut-être pas reproduit, même lorsque l'on met en place des atomes selon un plan exactement conforme à celui de son cerveau et de son système nerveux, analysés au point de départ. Des ondes particulières, par exemple celles que considère la mécanique quantique, doivent peut-être être reproduites pour que l'état mental le soit. Autrement dit, même en reconstituant atome par atome un être humain, peut-être n'obtiendrions-nous qu'une masse amorphe dépourvue de vie et de pensée. L'analyse, première phase de la téléportation, devrait aller voir de plus près dans les objets qu'elle veut déplacer pour les reconstituer entièrement à l'arrivée.

Dès que l'on considère des objets quantiques, même des particules, l'impossibilité de l'analyse est une loi établie : l'état de polarisation d'un photon inconnu, par exemple, ne peut pas être mesuré entièrement. Pire, si vous