

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.

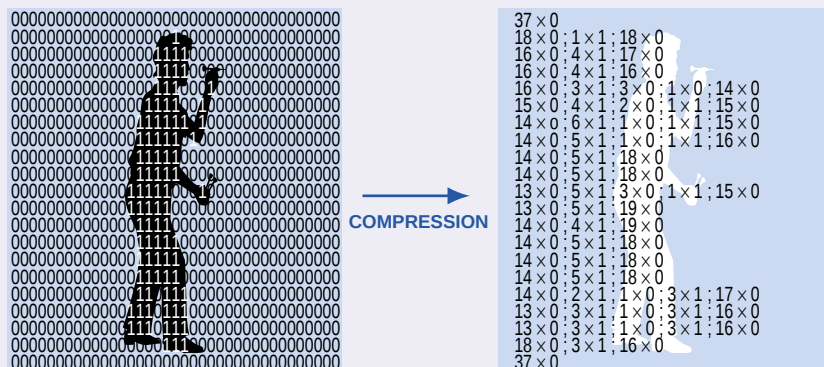
Il est évident que, pour un être humain défini atome par atome, de nombreuses informations sont redondantes et donc sujettes à compression. Chaque cellule, par exemple, contient les mêmes chromosomes (sept milliards d'informations binaires qui, d'une cellule à l'autre, se répètent identiquement). Nul 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

tentez de lire la polarisation d'un photon, vous n'obtiendrez qu'une information partielle, votre mesure ayant par ailleurs l'effet de détruire définitivement l'état quantique initial, qu'il sera alors totalement impossible de connaître.

Le schéma analyse-transmission-reconstruction ne peut pas être envisagé si l'on prend en compte l'état quantique des photons, des atomes ou objets qu'on cherche à téléporter. Si l'état mental d'un cerveau demande une précision quantique, alors la situation est définitivement compromise, et aucun appareil de téléportation n'existera jamais ; ceux fondés sur une recombinaison atome par atome ayant le malheureux effet de ne reconstruire qu'un fantôme inerte de l'individu placé dans la machine d'entrée.

Face à cet argument, certaines réponses sont possibles.

D'abord, même si, pour téléporter un humain, il faut aussi téléporter les états quantiques du cerveau, états par principe inconnaissables, cela n'interdit pourtant pas d'en envisager la téléportation. En effet, Charles Bennett, Gilles Brassard et quelques autres physiciens et informaticiens spécialistes de l'information quantique ont proposé en 1993 un schéma de téléportation d'un état quantique inconnu par utilisation d'une paire de photons corrélés. Leur méthode permet, sans en prendre connaissance (ce qui de toute façon est impossible), de téléporter des états quantiques (voir l'article qui suit sur la téléportation quantique).

Les propriétés de cette téléportation quantique, que plusieurs équipes ont su réaliser expérimentalement il y a deux ans, sont :

- l'état quantique est nécessairement détruit en son point de départ ;
- l'état quantique téléporté est toujours resté inconnu ; ni Jean ni Claude n'ont jamais disposé d'information suffisante pour l'identifier ;

- le voyage s'est fait, au mieux, à la vitesse de la lumière, car Jean a dû transmettre à Claude le résultat de sa manipulation par un canal classique.

Cette théorie ouvre la voie à la téléportation d'états quantiques qui, si on réussit à aller plus loin, pourrait conduire à la téléportation de cerveaux humains entiers, avec non seulement un niveau de détail atomique, mais quantique.

Même si vous pensez que la description atome par atome de votre cerveau n'est pas suffisante pour capter

la totalité de votre identité mentale et si vous soutenez que, pour télétransporter un cerveau, il faut aussi reproduire à l'arrivée l'ensemble des états quantiques du cerveau (atomes, molécules, groupes de molécules), rien n'indique qu'on ne pourra pas y parvenir.

Si cette téléportation quantique est mise en œuvre, le problème de la duplication ne se posera pas, car elle est impossible : il n'y aura jamais duplication des humains transportés, ce qui évitera les délicats problèmes juridiques, éthiques et fiscaux évoqués plus haut.

Samuel Braunstein, face à la question de savoir si, pour décrire un cerveau, on peut s'arrêter au niveau atomique ou s'il faut prendre en compte la nature quantique du cerveau, évoque un argument intéressant. Des gens vont quotidiennement dans des hôpitaux subir des scanners à résonance magnétique nucléaire. Or ces examens altèrent les états quantiques d'un très grand nombre d'atomes des personnes qui les subissent. Cela ne semble avoir aucun effet ni sur leur état mental, ni sur leur état de santé et conduit donc à l'idée que le fonctionnement d'un cerveau pourrait bien être décrit (et téléporté) sans qu'on ait à se préoccuper des états quantiques de ses composants. Le niveau atomique serait en définitive suffisant. L'argument de Braunstein renforce notre optimisme.

L'esprit algorithmique

Certains chercheurs en intelligence artificielle vont bien plus loin et pensent – sans rien démontrer et en profond désaccord avec d'autres spécialistes des sciences cognitives – que le fonctionnement de l'esprit humain pourrait être simulé sans qu'on ait besoin de descendre au niveau atomique.

L'esprit d'une personne serait équivalent à un ensemble de programmes informatiques, et, une fois qu'on les aurait captés, la téléportation deviendrait facile, puisqu'il y aurait juste à communiquer les programmes et à les replacer dans un ordinateur réceptacle (équipés de moyens de déplacement et d'organes de vision sans doute) pour que l'esprit se remette à fonctionner. Cette fois sans doute, aucun problème de compression ne se poserait, car avec 10^{12} bits de programmes on peut imaginer que l'essentiel d'un esprit humain serait capté.

Ce nombre de 10^{12} apparaît faible à certains. Il me semble pourtant déjà

énorme, car il faut réaliser que cela représente l'équivalent d'une bibliothèque de cent mille livres de deux cents pages : personnellement, je serais content de savoir que ma description algorithmique nécessite dix mille livres de deux cents pages (10^{11} bits d'information), ou même mille livres de deux cents pages (10^{10} bits d'information).

Bien sûr, rien aujourd'hui n'indique que nous réussirons à saisir les définitions algorithmiques des êtres humains pour les téléporter et les dupliquer dans les P.C. du futur. On ne sait même pas, bien sûr, si vraiment il existe quelque chose de cette nature : c'est là un débat philosophique qui risque d'occuper de nombreux philosophes encore durant le troisième millénaire.

Tout reste possible !

Parmi les quatre voies possibles pour construire un système de téléportation : téléportation par raccourcis topologiques ; téléportation par communication de la description atomique ; téléportation par communication de la description quantique ; téléportation par communication de la description algorithmique, aucune ne semble entièrement impossible en l'état actuel des connaissances (même si aucune n'est prouvée réalisable !). Nous pouvons donc rêver prendre dans quelque temps un bain sur une plage des Caraïbes dès la sortie du bureau, le vendredi soir.

S. BRAUNSTEIN, *A Fun Talk on Teleportation*.

<http://www.sees.bangor.ac.uk/~schmuel/tport.html>

C. CRÉPEAU, *Téléportation quantique*.

<http://www.cs.mcgill.ca/~crepeau/tele.html>

C.H. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPEAU, R. JOZSA, A. PERES et W. WOOTTERS, *Teleporting an Unknown Quantum State by Dual Classical and EPR Channels*, in *Physical Review Letter*, n° 70, pp. 1895-1898, 1993.

J.-P. DELAHAYE, *Les lois nouvelles de l'informatique quantique*, in *Pour La Science*, pp. 66-72, août 1998.

L.M. KRAUSS, *La physique de Star Trek ou Comment visiter l'univers en pyjama*, Bayard Éditions, Paris, 1998 (traduction de *The Physics of Star Trek*, Basic Book, 1995).

T. SIEGFRIED, *The Bit and the Pendulum : From Quantum Computing to M Theory, The Physics of Information*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1999.
