

Deuxième partie

De l'importance de la matière

Où le lecteur découvrira les faisceaux magnétiques, la distorsion, les cristaux de dilithium; les moteurs alliant matière et antimatière, et le holodeck.

5 - Bits ou atomes

« Reg, la téléportation est de loin la façon la plus sûre de voyager. »

Geordi LaForge au lieutenant Reginald Barclay, dans « Le domaine de la terreur »

La vie imite l'art. Depuis quelque temps, j'entends ressasser la même question : « Bits ou atomes - de quoi sera fait notre avenir ? » Trente ans plus tôt, Gene Roddenbury affrontait le même débat, mais pour un tout autre impératif. Il avait une magnifique ébauche de vaisseau spatial, qui ne posait qu'un seul problème: comme le pingouin dans l'eau, l'Entreprise glissait sans heurt dans les profondeurs de l'espace, mais comme le pingouin sur la terre ferme, elle avait quelque problème à garder l'équilibre lors d'un atterrissage. Plus important peut-être, le maigre budget d'une série télévisée hebdomadaire interdisait de mettre en scène chaque semaine l'atterrissage d'un immense vaisseau spatial.

Comment résoudre le problème? La solution était simple : il fallait s'assurer que le vaisseau n'aurait jamais à atterrir, et trouver une autre façon de convoier les membres de l'équipage depuis le vaisseau sur le sol d'une planète. À peine aviez-vous dit « Téléportation ! » que le téléporteur était né.

Il n'est peut-être aucune prouesse technique, excepté la vitesse de distorsion, qui marque aussi régulièrement les missions de chaque vaisseau spatial de la Fédération. Et même ceux qui n'ont jamais regardé un épisode de Star Trek

reconnaissent le mot magique qui conclut le paragraphe précédent. Elle a investi notre culture populaire. J'ai entendu parler récemment d'un jeune homme qui, en état d'ivresse, avait brûlé un feu rouge et défoncé une voiture de police qui traversait le carrefour en toute légalité. Lors de son interrogatoire, on lui demanda s'il avait quelque chose à déclarer. Dans un désespoir bien légitime, il répliqua « Oui, Votre Honneur », sortit son portefeuille, l'ouvrit d'un coup de pouce et grommela, le tenant devant sa bouche : « Téléportation, Scotty ! »

Cette histoire est sans doute apocryphe, mais témoigne de l'impact que cette technologie hypothétique a eu sur notre culture - un impact d'autant plus remarquable que, de toutes les prouesses technologiques de science-fiction exhibées à bord de l'Entreprise, c'est la plus improbable. Créer un tel processus soulève plus de problèmes théoriques et pratiques qu'on ne l'imagine. Il joue sur toute la gamme des physiques et des mathématiques, y compris la théorie de l'information, la mécanique quantique, les équations d'Einstein mettant en rapport masse et énergie, la physique des particules élémentaires, etc.

Ce qui me ramène au débat entre atomes et bits. La question principale que la téléportation nous oblige à nous poser est la suivante: lorsqu'il s'agit de déplacer, du vaisseau à la planète, environ 10^{28} (soit 1 suivi de 28 mille zéros) atomes de matière, combinés en une structure complexe afin de composer un individu humain, quel est le processus le plus rapide et le plus efficace ? Cette question vient à point : nous sommes confrontés à la même difficulté lorsque nous cherchons la meilleure façon de décomposer la structure complexe des 10^{26} atomes d'un livre de poche ordinaire. Un concept potentiellement révolutionnaire, ou du moins revendiqué comme tel par divers gourous des médias numériques, est que les atomes eux-mêmes sont souvent secondaires. Ce qui importe, ce sont les bits.

Prenons l'exemple d'un livre de bibliothèque. Une bibliothèque achète un exemplaire (ou plusieurs, si nous avons de la chance) d'un livre qu'elle stocke et prête à un individu, au coup par coup. Dans une bibliothèque numérique, les mêmes données sont stockées sous forme de bits. Un bit est un 0 ou un 1 ; les bits sont combinés par groupes de huit appelés octets, lesquels groupes figurent des mots ou des chiffres. Ces données sont stockées dans les disques mémoriels magnétiques d'ordinateurs, où chaque bit se voit représenté soit par une région magnétisée, à savoir (1), soit par une région non magnétisée, à savoir (0). Un nombre illimité de lecteurs aura accès au même compartiment mémoriel d'un ordinateur à peu près simultanément, si bien que, dans une bibliothèque numérique, tous les individus vivant sur terre, qui devraient sinon acheter ce livre, peuvent le lire et le recevoir d'une source unique. Il est clair que, dans ces conditions, tenir en main les atomes concrets qui composent le livre est moins important, et surtout moins efficace que de stocker les bits (nonobstant les ravages quant aux droits d'auteur).

Et avec les personnes? Si on commence à déplacer les personnes, faut-il déplacer leurs atomes ou leurs données? A priori, on pourrait penser que déplacer les données est beaucoup plus facile, notamment parce qu'elles peuvent voyager à la

vitesse-lumière. Toutefois, avec les personnes, deux problèmes que les livres ne posaient pas apparaissent : d'une part, il faut extraire les données, ce qui n'a rien d'évident; d'autre part, il faut les recombinaison avec la matière. Après tout, les personnes, contrairement aux livres, ont grand besoin de leurs atomes.

Les auteurs de Star Trek sont toujours restés un peu confus quant aux véritables fins de la téléportation. Déplace-t-elle les atomes et les bits, ou simplement les bits ? Vous pouvez vous interroger sur la nécessité de cette distinction, puisque le Manuel technique de la Nouvelle génération décrit le processus en détail. Tout d'abord, le téléporteur est braqué sur sa cible. Il scanne l'image destinée à être transportée, la « dématérialise », la stocke dans un « circuit modélisateur », puis transmet le « flot de matière » par un « rayon de confinement annulaire » jusqu'à sa destination. Le téléporteur convoierait donc la matière en même temps que les données.

Le seul problème de cette description, c'est qu'elle ne colle pas avec certains usages du téléporteur. Dans deux célèbres exemples au moins, il transporte une seule personne et en remonte deux. Dans l'épisode classique intitulé « L'ennemi intérieur », un dysfonctionnement scinde Kirk en deux versions de lui-même, une bonne et une méchante. Un autre dérapage, permanent cette fois, nous apprend, dans l'épisode « Une deuxième chance », épisode de la Nouvelle génération, que le lieutenant Riker a été dédoublé alors qu'il était téléporté de la planète Nervalia IV au vaisseau Potemkin. L'un de ces doubles rentre sain et sauf au Potemkin, l'autre est renvoyé sur la planète, où il vivra seul pendant huit ans.

Si le téléporteur convoie en même temps le flot de matière et le signal de données, de tels dédoublements sont impossibles. Le nombre d'atomes qui vous reconstituent à l'arrivée est forcément le même qu'au départ. Impossible de produire des copies de personnes dans de telles conditions. D'un autre côté, si ce sont les seules données qui sont remontées, on pourrait imaginer de les combiner avec des atomes stockés par ailleurs à bord du vaisseau, pour créer un nombre illimité de doubles d'un même individu.

Un problème similaire concernant le flot de matière apparaît lorsque nous considérons le destin d'objets remontés sous forme d'« énergie pure ». Par exemple, dans l'épisode de la Nouvelle génération intitulé « Seul parmi nous », Picard décide à un moment de se faire téléporter en tant qu'énergie pure, affranchie des contraintes de la matière. Cette expérience s'étant révélée aussi lamentable que dangereuse, il réussit à être remonté, et son enveloppe corporelle lui est rendue, sortie du circuit modélisateur. Mais si le flot de matière avait été dispersé dans l'espace, on n'aurait, en fin de compte, rien pu lui rendre du tout.

Aussi, nonobstant le manuel d'instructions de Star Trek, j'entends adopter une position agnostique sur ce point, et explorer plutôt les milliers de problèmes et de défis associés au transport d'atomes, ou au transport de bits.

Les corps incorporels

La question la plus fascinante en ce qui concerne la téléportation - encore qu'on ne la pose pas souvent - est peut-être la suivante: de quoi est fait exactement l'être humain? Ne sommes-nous constitués que par la somme de nos atomes? Plus précisément, s'il me fallait recréer chaque atome de votre corps, en gardant précisément le même état chimique d'excitation dans lequel vos atomes sont en ce moment, est-ce que je produirais une personne fonctionnant à l'identique, qui serait dotée de vos souvenirs, de vos espoirs, de vos rêves? Il y a toutes les raisons de supposer qu'il en serait ainsi, mais il faut néanmoins noter que cette supposition contredit nombres de croyances spirituelles quant à l'existence d'une «âme» qui se distinguerait d'une façon ou d'une autre du corps. Qu'est-ce qui se produit quand vous mourez, après tout? De nombreuses religions ne soutiennent-elles pas que l'«âme» perdure après la mort? Qu'arrive-t-il donc à l'âme tandis que le corps est téléporté? En ce sens, le téléporteur serait une merveilleuse expérience en matière de spiritualité. Si une personne remontée à bord de l' *Enterprise* demeurerait intacte et manifestement identique, cela serait une preuve frappante qu'une personne humaine n'est rien de plus que la somme de ses parties corporelles, et cette démonstration contredirait immédiatement nombre de croyances spirituelles.

Pour des raisons évidentes, cette question est méticuleusement évincée dans la série. Cependant, en dépit de la nature purement physique de la dématérialisation et du processus de la téléportation, l'idée qu'il existe une sorte de « force vitale» floue au-delà des limites corporelles est un thème qui apparaît constamment dans la série. Les deuxième et troisième films *Star Trek*, *La colère de Khan*, et *A la recherche de M. Spock*, se fondent sur l'idée que Spock, quant à lui, possède un « katra » - un esprit vivant - qui existe indépendamment de son corps. Plus récemment, dans l'épisode du *Voyageur* intitulé « Cathexis », l' « énergie neuronale», équivalent de la force vitale, de Chakotay lui est retirée et erre dans le vaisseau, de personne en personne, dans ses tentatives de réincorporation.

Je ne crois pas que l'on puisse ainsi jouer sur les deux tableaux. Soit «l'âme», le « katra », la «force vitale», quel que soit le nom que vous vouliez lui donner, fait partie intégrante du corps et nous ne sommes rien de plus que notre essence matérielle, soit elle n'en fait pas partie. Ne désirant pas offenser les esprits religieux, même ceux de Vulcain, je préfère rester neutre dans ce débat. Toutefois, il me semblait utile de souligner, avant de poursuivre, que les postulats les plus basiques du téléporteur (à savoir que nous ne sommes constitués que d'atomes et de bits) ne doivent pas être pris à la légère.

Les bits posent problème

Nombre des problèmes que je discuterai un peu plus bas pourraient être évités si l'on pouvait ne pas convoier les atomes avec les données. Après tout, quiconque a eu accès à Internet sait combien il est facile de convoier un flot de données sur une voiture, photographies comprises. Déplacer la véritable voiture, en revanche, s'avère plus ardu. Néanmoins, deux problèmes de taille surgissent lorsqu'il s'agit de convoier

les bits. Le premier conduit ordinairement à une impasse, que durent affronter les dernières personnes qui ont vu Jimmy Hoffa vivant: qu'est-ce qu'on va faire du corps? S'il ne s'agit que de convoier les données, il faudra se débarrasser des atomes au point d'origine et constituer un nouvel ensemble à l'arrivée. Ce problème est vraiment de taille. Si vous voulez vous défaire de 1028 atomes, vous aurez du pain sur la planche. Si, par exemple, vous voulez simplement transformer toute cette matière en énergie pure, quelle quantité d'énergie en résultera? La formule d'Einstein, $E=mc^2$, nous l'apprend. En transformant soudain 50 kilogrammes de matière (un adulte poids plume) en énergie, on dégagera une énergie équivalant à plus de mille bombes à hydrogène d'une mégatonne. Difficile à réaliser sans choquer les écologistes.

Cette procédure pose bien sûr un autre problème. Si elle est possible, la duplication de personnes humaines devient chose aisée. Elle est encore plus simple que la téléportation, puisqu'il est inutile de détruire le sujet d'origine. La duplication d'objets inanimés par de tels moyens est facile à admettre, et de fait les membres d'équipage à bord des vaisseaux spatiaux s'en accommodent fort bien. Toutefois, la duplication de personnes humaines vivantes ne peut que provoquer des catastrophes (voyez Riker dans « Une seconde chance »), Si, de nos jours, les recherches en matière de restructuration d'ADN provoquent une multitude de questions éthiques, l'on ne peut que rester abasourdi en songeant à celles qui seraient soulevées si des individus à part entière, mémoire et personnalité comprises, pouvaient être dupliqués à volonté. Les gens deviendraient des programmes d'ordinateur ou des épreuves de livre stockés sur disquette. Si l'un d'eux s'endommageait ou était contaminé par un virus, il suffirait de recourir à une version de rechange.

Bon, gardons les atomes

Les arguments précédents suggèrent que, pour des raisons à la fois pratiques et éthiques, mieux vaut imaginer un téléporteur qui, comme celui de Star Trek, convoie un flot de matière en même temps que le signal. Le problème devient le suivant : comment transportez-vous les atomes? De nouveau, le défi posé concerne l'énergie, mais de façon un peu plus subtile.

De quoi aurait-on besoin pour « dématérialiser » quelque chose dans le téléporteur? Pour répondre à cette interrogation, il nous faut examiner d'un peu plus près une question simple: qu'est-ce que la matière? Toute matière ordinaire est composée d'atomes, eux-mêmes formés de noyaux centraux de forte densité, entourés d'un nuage d'électrons. Comme vous vous le rappelez peut-être de vos cours de physique ou de chimie au lycée, le volume d'un atome est majoritairement constitué d'espace vide. La région occupée par les électrons extérieurs est environ dix mille fois plus vaste que celle du noyau.

Si les atomes sont principalement constitués d'espace vide, pourquoi la matière ne peut-elle infiltrer une autre matière? La réponse, c'est que ce qui rend un mur

solide, ce n'est pas les particules en elles-mêmes, mais les champs électriques qui les séparent. Ce qui empêche en premier lieu ma main de passer à travers mon bureau, quand je l'abats sur lui, c'est la répulsion électrique ressentie par les électrons contenus dans les atomes de ma main, et provoquée par la présence de ceux du bureau, et non le manque d'espace laissé par les électrons.

Ces champs électriques ne se contentent pas d'assurer la consistance de la matière, dans le sens où ils empêchent les objets de s'interpénétrer, mais l'empêchent également de se désagréger. Pour modifier cette situation normale, il faut éliminer les forces électriques présentes entre les atomes. Ce qui demande du labeur, et donc de l'énergie. La configuration atomique et les liaisons internes entre atomes sont altérées par un échange d'énergie. Par exemple, si on injecte une certaine énergie dans un mélange de nitrate d'ammonium et de pétrole, les énergies de ces deux matières se réorganisent, et au cours de ce processus « l'énergie de liaison » qui donnait leur cohésion aux matériaux originels peut être déchargée. Cette décharge, si elle se produit assez rapidement, provoquera une grosse explosion.

L'énergie qui rattache entre eux les atomes est toutefois minuscule comparée à celle qui unit les particules (protons et neutrons) composant les noyaux incroyablement denses des atomes. Les forces qui maintiennent ensemble ces particules dans un noyau produisent une « énergie de liaison » des millions de fois plus forte que celle des atomes. Les réactions nucléaires, dès lors, déchargent considérablement plus d'énergie que les réactions chimiques, et c'est pourquoi les armes nucléaires sont si dangereuses.

Enfin, l'énergie de liaison qui maintient ensemble les particules élémentaires, ou quarks, qui constituent les protons et neutrons eux-mêmes, est encore plus forte que celle qui maintient ensemble lesdites particules dans le noyau. De fait, on pense en général, en se basant sur tous les calculs qu'on peut faire à partir de la théorie qui décrit les interactions des quarks, qu'il faudrait une somme infinie d'énergie pour séparer entièrement les quarks constituant chacun des neutrons ou protons.

Cette démonstration pourrait vous faire croire qu'il est impossible de décomposer entièrement la matière en quarks, ses ultimes constituants, et c'est le cas dans un espace à température normale. Toutefois, la théorie qui décrit l'interaction des quarks à l'intérieur des protons et neutrons nous apprend que, si nous faisons chauffer le noyau jusqu'à environ 1000 milliards de degrés (pour atteindre une température environ un million de fois plus élevée qu'au centre du Soleil), alors non seulement les quarks qui sont à l'intérieur perdraient leur énergie de liaison, mais ce degré de température ferait perdre à la matière, d'un seul coup, presque toute sa masse. La matière se transformerait en radiation - ou, pour revenir à la téléportation, elle se dématérialiserait.

Il suffit donc, pour venir à bout de l'énergie de liaison de la matière à son niveau le plus fondamental (cité dans le manuel technique de Star Trek), de la faire chauffer jusqu'à concurrence de 1 000 milliards de degrés. Convertie en unités d'énergie, cette température implique qu'il faut fournir environ 10 % de la masse au repos des protons et neutrons ainsi chauffés. Pour effectuer une telle opération sur

un échantillon de taille humaine, il faudrait donc environ 10 % de l'énergie nécessaire pour annihiler la matière, soit l'équivalent de cent bombes à hydrogène d'une mégatonne.

On pourrait suggérer, étant donné ces conditions intimidantes, que le scénario que je viens de décrire est meurtrier. Peut-être n'avons-nous pas besoin de décomposer la matière en quarks? Peut-être la téléportation ne requiert-elle qu'une dématérialisation jusqu'au niveau des neutrons et protons? Certes, l'énergie requise serait bien moindre, encore que formidable. Malheureusement, en tentant d'esquiver le problème, nous ne faisons que l'aggraver. Car une fois que vous disposez du flot de matière, à présent composé de neutrons, de protons et d'électrons individuels, ou peut-être d'atomes entiers, il vous reste à le convoyer, et vraisemblablement à une vitesse représentant une proportion appréciable de la vitesse-lumière.

Pour amener des particules comme les protons et neutrons à se déplacer à une vitesse proche de celle de la lumière, il faut les investir d'une énergie comparable à celle de leur masse au repos. Elle s'avère environ dix fois plus grande que la somme d'énergie nécessaire à chauffer et «dissoudre» les protons en quarks. Néanmoins, même s'il faut plus d'énergie par particule pour accélérer les protons jusqu'à atteindre une vitesse proche de celle de la lumière, cette solution reste plus aisée que la mise en dépôt et le stockage d'une énergie suffisante à l'intérieur des protons, et assez durable pour les chauffer et les dissoudre en quarks. C'est pourquoi, de nos jours, nous pouvons construire (à grand frais, toutefois) d'énormes accélérateurs de particules, comme le Tevatron du Fermilab (à Batavia, en Illinois) qui peut accélérer des protons isolés jusqu'à une vitesse représentant plus de 99,9 % de la vitesse-lumière. En revanche, nous n'avons pas encore réussi à construire un accélérateur qui puisse bombarder les protons avec assez d'énergie pour les « dissoudre» en leurs quarks constitutifs. De fait, l'un des buts des physiciens qui conçoivent la nouvelle génération de grands accélérateurs, dont celui qu'on construit actuellement au Brookhaven National Laboratory, sur Long Island, est de parvenir à cette «dissolution» de la matière.

Et pourtant, une fois de plus, je suis impressionné par la justesse des choix terminologiques des auteurs de Star Trek. La dissolution des protons en quarks représente ce qu'en physique on nomme une transition de phase. Oyez et admirez ! Si l'on cherche dans le Manuel technique de la Nouvelle génération le nom des instruments qui, lors de la téléportation, dématérialisent la matière, l'on découvre qu'ils s'appellent les « bobines de transition de phase».

Les concepteurs à venir de téléporteurs devront faire un choix. Soit il leur faudra trouver une source d'énergie qui produise temporairement une puissance représentant environ dix mille fois la puissance entière consommée sur terre, et ils pourront réaliser un « flot de matière» capable de charrier les données à une vitesse proche de celle de la lumière. Soit ils pourront réduire la somme d'énergie requise par dix, et découvrir un moyen de chauffer un être humain instantanément jusqu'à concurrence d'un million de fois la température au centre du Soleil.

Sur l'autoroute des données, empruntons la voie rapide

Au moment où je tape cette phrase sur mon PC, j'admire la vitesse à laquelle cette technologie s'est développée depuis l'époque où j'ai acheté mon premier Macintosh, il y a un peu plus de dix ans. Je me rappelle que la mémoire interne de cette machine était de 128 kilo-octets, alors que mon ordinateur actuel stocke 16 mégaoctets, et la station de travail que j'ai au bureau, dans le Département de physique de Cave Western Reserve, 128 mégaoctets. Ainsi, en l'espace d'une décennie, les capacités mémorielles de mon ordinateur ont été multipliées par mille! À cet accroissement s'ajoute celui de la capacité mémorielle de mon disque dur. Ma première machine n'en possédait pas, et il me fallait travailler à l'aide de disquettes qui pouvaient contenir 400 kilo-octets de données. Mon ordinateur actuel possède un disque dur de 500 mégaoctets - mes capacités de stockage s'en voient à nouveau multipliées par mille. La vitesse de mon ordinateur personnel a également beaucoup augmenté au cours de la dernière décennie. Lorsqu'il s'agit de faire des calculs numériques détaillés, j'estime que mon ordinateur actuel est presque cent fois plus rapide que mon premier Macintosh. Au bureau, ma station de travail est peut-être encore dix fois plus rapide, et traite près d'un demi-milliard d'instructions par seconde !

Même dans les petits détails, les progrès sont impressionnants. Les ordinateurs les plus rapides à usage général ont multiplié environ par cent leur vitesse et leurs capacités mémorielles au cours de la dernière décennie. Et je ne compte pas dans ce jugement les ordinateurs pour travaux spécialisés : ces petites merveilles peuvent atteindre une vitesse de travail traitant plus de dix milliards d'instructions par seconde. On a démontré qu'en principe on doit pouvoir construire certains dispositifs spécialisés, utilisant un système biologique basé sur l'ADN, qui pourraient atteindre une vitesse bien supérieure.

On peut se demander jusqu'où tout ceci nous mènera, et si nous pouvons supposer que les évolutions dans l'avenir seront aussi rapides que par le passé. Une autre question de bon sens est de savoir si nous pourrions tenir longtemps à une telle allure. Au bout du compte, c'est l'utilisateur qui détermine le rythme de la circulation sur les autoroutes de l'information. Pour commencer, ce qui met un terme au traitement des données, c'est le rythme d'absorption: nous ne pouvons assimiler les données à l'infini. Essayez de surfer sur Internet pendant quelques heures d'affilée, pour prendre un exemple parlant. Je me demande souvent pourquoi, avec la puissance incroyable qui est la mienne, ma productivité personnelle n'a pas connu une expansion aussi considérable que celle de mon ordinateur. Je crois que la réponse est limpide. Je ne suis pas limité par la puissance de mon ordinateur, mais par mes propres capacités. On a affirmé pour cette raison que l'ordinateur représentait la phase suivante de l'évolution humaine. Il est vrai que Data, même s'il ne peut ressentir d'émotions, est de loin supérieur à ses collègues humains dans beaucoup de domaines. Et, comme il a été établi dans l'épisode « Ce qui fait l'homme », il représente une forme de vie authentique.

Mais je m'éloigne du sujet. S'il nous faut souligner l'extension des capacités des ordinateurs au cours de la dernière décennie, c'est pour la comparer avec celle dont nous aurions besoin pour organiser le stockage et la sortie des données dans le cadre du téléporteur. Bien sûr, elles sont sans commune mesure.

Calculons une simple estimation de la somme de données codées dans un corps humain moyen, en supposant toujours que celui-ci contient 1028 atomes. Il nous faut d'abord coder l'emplacement de chaque atome, ce qui requiert trois coordonnées, les repères x, y, z. Puis il nous faut enregistrer la position interne de chaque atome, les niveaux d'énergie des électrons, les éventuelles liaisons entre atomes constitutives de molécules, la vibration ou le déplacement de celles-ci, etc. Restons modestes, et admettons que nous pouvons rassembler et coder toutes les informations nécessaires en un kilo-octet de données. (Ce qui correspond à une page de données tapées en double interligne.) Cela signifie qu'il nous faut à peu près 1028 kilo-octets pour stocker la structure d'un être humain dans le circuit modélisateur. Je vous rappelle que 1028, c'est 1 suivi de 28 zéros.

Comparons avec, mettons, la somme totale de données stockées dans tous les livres jamais écrits. Les bibliothèques les plus grandes contiennent plusieurs millions de volumes. Soyons généreux, et mettons qu'il existe un milliard de livres différents sur terre (un livre pour cinq habitants de la planète en ce moment). Mettons que chaque livre contient l'équivalent de mille pages de caractères (en comptant large), soit environ un mégaoctet. Pour stocker toutes les données contenues dans tous les livres jamais écrits, il faudrait disposer de 1012, soit environ un milliard de milliards de kilo-octets. Cela représente seize fois moins - soit un dix-millionième de milliardième - que la capacité de stockage nécessaire pour enregistrer une seule structure humaine. Un tel ordre de grandeur nous permet difficilement de réaliser l'énormité de la tâche. Recourons alors à une comparaison : le stockage à réaliser pour enregistrer une structure humaine, comparé aux données présentes dans tous les livres jamais écrits, est dix mille fois plus important que les données renfermées dans tous les livres jamais écrits ne le sont au regard des données contenues dans cette page.

Le stockage d'une telle quantité de données n'est pas, pour user d'un euphémisme cher aux physiciens, pas une mince affaire. À présent, les disques durs individuels qu'on trouve sur le marché représentent environ 10 gigaoctets, soit 10 000 mégaoctets de données. En admettant que chaque disque a une épaisseur d'environ dix centimètres, si nous empilons tous les disques nécessaires actuellement au stockage d'une structure humaine, la colonne ainsi créée couvrirait un tiers de la distance d'ici au centre de la galaxie - environ 10 000 années-lumière, ou environ cinq ans de voyage à bord de l'Entreprise, en vitesse de distorsion 9 !

Et pour récupérer ces données en temps réel, l'affaire n'est pas moindre. Actuellement, les mécanismes qui gèrent la transmission des données numériques convoient un peu moins de 100 mégaoctets par seconde. À ce rythme, il faudrait environ 2 000 fois l'âge présent de l'univers (environ 10 milliards d'années) pour transférer les données d'une structure humaine. On voit d'ici le suspens dramatique

qui en résulte : Kirk et McCoy s'échappent de la colonie pénitentiaire de Rura Penthe. Vous ne disposez même pas de la durée de l'univers pour les remonter à bord du vaisseau, mais d'à peine quelques secondes (le temps qu'il faudra au géolier pour charger son arme et la pointer sur eux) pour transférer un million de milliards de milliards de mégaoctets de données.

L'affaire est claire. Cette tâche dépasse de loin le «Projet du génome humain», en cours d'élaboration, qui entend scanner et enregistrer le code génétique que contiennent de minuscules hélices d'ADN humain. Cette entreprise met en jeu des milliards de dollars, prendra au moins une décennie, et exige qu'on lui consacre les ressources des laboratoires dans le monde entier. Vous pourriez imaginer que je ne mentionne cet argument que pour prouver davantage l'impossibilité du téléporteur. Pourtant, bien que le défi soit considérable, je pense que nous avons affaire à un domaine qui pourrait se montrer fructueux au $xxm=$ siècle. Mon optimisme peut sembler relever d'une extrapolation du rythme actuel d'extension de la technologie informatique. En se référant au rythme d'expansion des années passées en matière de vitesse et de stockage, soit un décuplement chaque décennie, et en le divisant par 10 pour rester modeste, c'est-à-dire en admettant que nous sommes 21 fois en dessous de la réalité, on peut s'attendre à ce que dans 210 ans, à l'aube du $xxm=$ siècle, nous ayons acquis la technologie informatique nous permettant, en termes de transfert de données, de résoudre le défi du téléporteur.

Bien sûr, je dis cela sans savoir par quels moyens. Il est clair que, pour réussir à stocker plus de 1025 kilo-octets de données dans un système à échelle humaine, chaque atome du système devra être exploité comme site mémoriel. La notion, en cours de développement, d'ordinateurs biologiques dans lesquels la dynamique moléculaire imite les processus numériques, et où les 1025 particules contenues dans un échantillon macroscopique agissent simultanément, me paraît des plus prometteuses à cet égard.

Un avertissement, cependant: je ne suis pas un spécialiste en informatique. Mon optimisme prudent ne reflète peut-être dès lors que mon ignorance. Cependant, je puise un certain réconfort dans l'exemple du cerveau humain, qui a des annéeslumière d'avance sur tous les systèmes informatiques actuels en matière de complexité et de profondeur. Si la sélection naturelle peut développer un tel système de stockage et de transfert de données, je crois que nous avons encore une grande marge de progression.

Quantique, qu'es aco?

Pour se replonger dans les eaux glacées de la réalité, deux mots suffisent : mécanique quantique. Au niveau microscopique, nécessaire pour scanner et pour recréer la matière dans le téléporteur, les lois de la physique sont gouvernées par les lois étranges, exotiques de la mécanique quantique, dans lesquelles les ondes se comportent comme des particules et les particules comme des ondes. Je ne vais pas vous faire ici un cours sur la mécanique quantique. Toutefois, le fond en est le suivant:

à des échelles microscopiques, l'objet observé et le sujet observateur ne sont plus séparés. Prendre une mesure, c'est altérer un système, généralement pour toujours. Cette loi simple peut donner lieu à bien des théorèmes, mais son expression la plus célèbre est le principe d'incertitude de Heisenberg. Cette loi fondamentale - qui semble faire table rase de la notion classique du déterminisme en physique, mais seulement en apparence - divise le monde physique en deux groupes de quantités observables (un peu comme le yin et le yang): quelle que soit la technologie employée, il est impossible de mesurer certaines combinaisons de quantités observables avec la précision souhaitée. Sur une échelle microscopique, on peut mesurer la position d'une particule plus ou moins précisément. Toutefois, Heisenberg nous apprend que nous ne pouvons alors véritablement connaître sa vitesse de déplacement (ni, par extension, l'endroit où elle se trouvera à l'instant suivant). Nous pouvons nous assurer de l'état énergétique d'un atome avec la précision que nous voulons. Dès lors, nous ne pourrions déterminer exactement la durée pendant laquelle il demeurera dans cet état.

Ces relations sont au cœur de la mécanique quantique, et on ne pourra jamais en faire l'économie. Aussi longtemps que nous travaillerons sur des échelles qui impliquent les lois de mécanique quantique - échelles qui, selon toute apparence, sont plus grandes que l'échelle à laquelle les effets de la gravitation quantique deviennent visibles, à savoir 10⁻³³ centimètres - nous ne pouvons passer outre.

Il existe un argument quelque peu spéculatif, mais fort satisfaisant, qui jette un éclairage heuristique sur le principe d'incertitude. La mécanique quantique dote toutes les particules d'un comportement semblable à celui d'une onde, et les ondes manifestent une étrange caractéristique : elles ne sont perturbées que lorsqu'elles rencontrent des objets de taille supérieure à celle de leur longueur d'onde (la distance entre deux crêtes successives). Il suffit d'observer les vagues sur l'océan pour constater ce comportement. Un simple caillou dépassant à la surface de l'eau n'aura aucun effet sur l'apparence du ressac, mais un gros bloc de pierre laissera une zone d'eau apaisée dans son sillage.

Ainsi donc, si nous voulons «illuminer» un atome - faire rejaillir une source de lumière sur lui pour visualiser sa position-, il nous faudra projeter sur lui une lumière dont la longueur d'onde soit assez réduite pour être perturbée par l'atome. Toutefois, les lois de la mécanique quantique nous apprennent que les ondes de lumière sont constituées de petits assemblages, ou «quanta», que nous appelons des photons (oui, comme les torpilles à photons sur les vaisseaux spatiaux, encore qu'elles n'aient rien à voir avec ces photons-là). Chaque photon qui compose les longueurs d'onde est doté d'une énergie inversement proportionnelle à cette longueur d'onde. Plus la résolution recherchée sera grande, plus nous devons utiliser une longueur d'onde réduite. Plus celle-ci sera réduite, plus l'énergie des photons augmentera. Si nous bombardons un atome avec un photon à haute énergie pour l'observer, nous pouvons nous assurer exactement de la position de l'atome au moment où le photon l'a heurté, mais le processus d'observation lui-même - le choc entre photon et atome - transférera inmanquablement une énergie importante à l'atome, modifiant sa vitesse et sa direction.

C'est pourquoi il est impossible de déterminer la configuration des atomes et de leur énergie avec une précision suffisante pour recréer exactement un schéma humain. Une marge d'incertitude concernant quelques données de l'observation est inévitable. Les conséquences de ce fait quant à la précision du produit humain reconstitué après téléportation est une question biologique ardue sur laquelle je ne peux que spéculer.

Ce problème n'a pas échappé aux auteurs de Star Trek, bien conscients des contraintes inévitables que la mécanique quantique faisait peser sur le téléporteur. Pourtant, ils disposaient d'un atout dont les physiciens ne peuvent habituellement se réclamer, à savoir la liberté artistique, et ils introduisirent des « compensateurs de Heisenberg » permettant une « résolution quantique » des objets. Lorsqu'un journaliste demanda au consultant technique de Star Trek, Michael Okuda, comment marchaient les compensateurs de Heisenberg, Okuda se contenta de répondre : « Très bien, merci ! »

Les compensateurs de Heisenberg ont une autre fonction fort utile dans le déroulement des intrigues. On peut se demander, et je l'ai fait, pourquoi le téléporteur ne duplique pas les formes de vie. Après tout, il existe à bord des vaisseaux des duplicateurs qui, sur simple commande vocale, font surgir comme par magie des verres d'eau ou de vin dans les cabines des membres d'équipage. En fait, il semble que la technologie de duplication ne soit possible que dans des « résolutions d'ordre moléculaire » et non quantique. Voilà qui, supposent-on, explique pourquoi le clonage humain est chose impossible. Cela explique peut-être aussi pourquoi l'équipage se plaint continuellement que la nourriture dupliquée ne soit pas aussi goûteuse que le produit authentique, et pourquoi Riker, notamment, préfère se faire cuire des omelettes et autres petits plats fins à l'ancienne.

Voir, c'est croire

Mais voici le dernier défi posé par la téléportation - comme si on n'en avait pas assez comme cela ! Téléporter un objet n'est pas chose aisée. Le remonter peut se révéler plus ardu encore. Pour ramener un membre d'équipage à bord de l'Entreprise, les senseurs placés sur ce dernier doivent repérer sa position sur la planète située au-dessous du vaisseau. Plus difficile encore, ils doivent scanner l'individu avant de le dématérialiser et de transporter le flot de matière. L'Entreprise doit donc disposer d'un télescope assez puissant pour déterminer la composition atomique des objets sur, et souvent même en dessous de la surface de la planète. De fait, on nous apprend que le champ opératoire normal du téléporteur est approximativement de 40 000 kilomètres, soit trois fois le diamètre de la Terre. Nous nous baserons sur ce nombre pour faire les estimations suivantes.

Tout le monde a vu en photo les dômes des télescopes les plus puissants du monde, comme le télescope Keck à Hawaï, le plus grand du monde, ou le télescope de mont Palomar en Californie. Vous êtes-vous jamais demandé pourquoi on fabriquait des télescopes toujours plus grands ? (Ce n'est pas par simple obsession du gigantisme,

comme certaines personnes, dont nombre de membres du Congrès américain, aiment à en faire reproche à la science.) De même que l'on requiert des accélérateurs toujours plus puissants pour sonder la structure de la matière à des échelles toujours plus réduites, de même l'on requiert des télescopes toujours plus grands si l'on veut distinguer des objets célestes toujours plus éloignés. Ce raisonnement est simple : parce que la lumière est une onde, toutes les fois qu'elle passe à travers une ouverture elle tend à se diffracter, c'est-à-dire s'étaler un peu. Lorsque la lumière émanant d'une source éloignée traverse la lentille du télescope, l'image s'étale un peu, si bien qu'au lieu de voir clairement le point de source on voit un petit disque de lumière brouillé. De même, si deux points de source sont rapprochés sur la ligne de vue, de sorte que la distance entre eux est inférieure à la taille de leurs disques respectifs, il sera impossible de les percevoir comme objets séparés, puisque leurs disques se chevaucheront dans l'image observée. Ces disques, les astronomes les appellent des disques apparents. Plus la lentille est large, plus le disque apparent est petit. Pour observer distinctement des objets de plus en plus petits, il faut des lentilles de plus en plus grandes.

Un autre critère entre en jeu dans l'observation de petits objets par télescope. La longueur d'onde de la lumière, ou de toute radiation utilisée comme sonde, doit être plus petite que la taille de l'objet que vous essayez de scanner. Ainsi, si vous voulez observer la matière à échelle atomique, à savoir quelques milliardièmes de centimètre, il vous faut utiliser une forme de radiation ayant une longueur d'onde inférieure à un milliardième de centimètre. Si vous optez pour des radiations électromagnétiques, il vous faudra faire usage de rayons X ou de rayons gamma. Cela risque de poser problème, parce qu'une telle radiation est nocive, et l'atmosphère de toute planète de catégorie M la filtrera et l'éliminera, comme le fait notre propre atmosphère. Le téléporteur devra dès lors faire usage de sondes non électromagnétiques, comme les neutrinos et les gravitons. Ce qui pose de nouveaux problèmes, mais nous nous en tiendrons là.

Dans tous les cas, on peut faire les calculs suivants : supposons que l'Entreprise utilise une radiation dont la longueur d'onde soit inférieure à un milliardième de centimètre pour scanner un objet éloigné de 40 000 kilomètres par résolution à échelle atomique. Pour y parvenir, le vaisseau aura besoin d'un télescope équipé d'une lentille d'un diamètre supérieur à 50 000 kilomètres ! Avec une lentille de taille inférieure, il sera impossible, même en principe, d'observer distinctement des atomes isolés. Même si l'Entreprise-D est une grande «mère» pour son équipage, il faut admettre qu'elle a ses limites.

Comme promis, notre réflexion sur les téléporteurs nous a conduits à travers la mécanique quantique, la physique des particules, l'informatique, les équations d'Einstein sur masse et énergie, et même l'existence de l'âme humaine. Il ne faut donc pas nous décourager outre mesure devant l'impossibilité apparente d'inventer un stratagème propre à remplir les fonctions requises. Restons positifs: la construction d'un téléporteur exigerait que nous chauffions la matière jusqu'à atteindre une

température valant un million de fois celle qui règne au centre du Soleil, que nous consommons plus d'énergie dans une machine unique que toute l'humanité n'en consomme à l'heure où j'écris, que nous construisions des télescopes plus vastes que le diamètre de la Terre, que nous multiplions par mille milliards de milliards de fois les performances des ordinateurs, et que nous échappions aux lois de la mécanique quantique. Étonnons-nous après cela que le lieutenant Barclay frissonne à l'idée d'être téléporté! Je crois que même Gene Roddenberry, s'il devait affronter cette éventualité dans la vie courante, préférerait investir dans un vaisseau spatial équipé d'un bon train d'atterrissage.

6 - Pour 1 dollar d'énergie

« Il n'existe rien d'irréel. »

*Premier axiome de la métaphysique de Kir-kin-tha
(Star Trek IV: Retour à la maison)*

Si, en quittant Chicago, vous prenez l'Interstate 88 vers l'ouest, vous arriverez à Aurora 50 kilomètres plus loin: c'est alors que le paysage chaotique et tentaculaire de la ville s'efface devant la douce prairie du Midwest, dont l'étendue plane s'étend à l'infini, aussi loin que porte le regard. Un peu au nord de l'Interstate, à cet endroit, se trouve un lopin de terre délimité par ce qui ressemble à un fossé circulaire. À l'intérieur de cette propriété, on peut voir des bisons brouter l'herbe, et maintes espèces de canards et d'oies sur des étangs.

À vingt pieds de profondeur, fini l'atmosphère calme et pastorale qui régnait à la surface du sol. Quatre cent mille fois par seconde, un rayonnement intense d'antiprotons heurte un intense rayonnement de protons de plein fouet, produisant une pluie de cent et de mille particules secondaires : électrons, positrons, pions et autres.

Il s'agit là du Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab, pour abréger), qui dispose de l'accélérateur de particules le plus puissant du monde. En ce qui concerne nos préoccupations, c'est également le plus vaste entrepôt d'antiprotons. Ici, l'antimatière n'est pas simple objet de science fiction. C'est le pain quotidien de milliers de scientifiques qui utilisent pour leurs recherches les installations du Ferrnilab.

C'est en ce sens que le Fermilab et l'uss Entreprise présentent une certaine parenté. L'antimatière est un élément crucial pour le bon fonctionnement d'un astronef, puisqu'elle fournit l'énergie nécessaire à la vitesse de distorsion. Comme je l'ai déjà mentionné, il n'est pas de façon plus efficace d'actionner un système de propulsion (bien que le pilotage en vitesse de distorsion ne repose pas sur la propulsion par réacteur). L'antimatière et la matière, lorsqu'elles entrent en contact, peuvent s'annihiler complètement et produire une pure radiation, laquelle se déplace à la vitesse de la lumière.

Bien évidemment, il faut déployer de grandes précautions pour «conserver»

l'antimatière stockée en grande quantité. Lorsque le système de conservation de l'antimatière tombe en panne à bord des astronefs, par exemple après que l'Entreprise s'est heurté au Bozeman, ou que le système à bord du Yamato a succombé à l'arme informatique des Iconiens, on ne peut s'attendre qu'à une rapide et totale destruction. De fait, la conservation de l'antimatière est un paramètre si fondamental dans les opérations spatiales qu'on ne comprend pas bien comment le lieutenant en chef Deanna Troi peut ignorer les conséquences d'une panne du système de conservation lorsqu'elle prend, pour un bref instant, les commandes de l'Entreprise dans l'épisode de la Nouvelle génération intitulé «Désastre», à la suite d'une collision entre le vaisseau et deux «filaments quantiques». Le fait qu'elle soit psychologue de formation ne saurait tout excuser !

Le système de conservation à bord des vaisseaux est chose plausible, et repose de fait sur le même principe que celui qui permet au Fermilab de stocker des antiprotons sur de longues périodes. Les antiprotons et antiélectrons (ou positrons) sont des particules chargées d'électricité. Mises en présence d'un champ magnétique, ces particules se déplacent en orbite circulaire. Si elles sont accélérées dans des champs magnétiques, et si ensuite un champ magnétique de force appropriée est mis en action, les antiparticules se déplaceront en des cercles de diamètre prédéterminé. Par exemple, elles pourront se déplacer en rond à l'intérieur d'un réservoir en forme de doughnut (beignet en forme d'anneau) sans jamais heurter les parois. Ce principe est également utilisé dans les systèmes dits Tokamak, qui conservent les plasmas à haute température dans les analyses de fusion nucléaire sous contrôle.

La Source d'antiprotons pour le collisionneur du Fermilab comporte un large anneau d'aimants. Une fois que les antiprotons sont produits dans des collisions à moyenne énergie, ils sont détournés vers cet anneau, où ils peuvent être stockés en attendant qu'on en ait besoin pour les collisions à haute énergie, qui ont lieu dans le Tevatron, le collisionneur à haute énergie du Fermilab. Le Tevatron est un anneau aux dimensions bien supérieures, d'environ 6 kilomètres de circonférence. Les protons et les antiprotons y sont introduits et accélérés dans une direction, tandis que les antiprotons sont accélérés dans la direction opposée. Si le champ magnétique est ajusté avec précision, ces deux rayonnements de particules peuvent être tenus séparés sur la plus grande partie de leur trajet dans le tunnel. À des points précis, toutefois, les deux rayonnements convergent et les collisions sont étudiées.

En plus de la conservation, un problème surgit dès que nous voulons faire usage d'un moteur actionné par le mélange matière-antimatière. À ce que nous savons, l'univers est composé principalement de matière et non d'antimatière. Cette idée se confirme si l'on observe le contenu des rayons cosmiques à haute énergie, dont beaucoup naissent à une grande distance de notre galaxie. Certaines antiparticules devraient naître des collisions entre les rayons cosmiques à haute énergie, et si l'on explore les signatures des rayons cosmiques sur de larges bandes d'énergie, le signal d'antimatière est entièrement cohérent avec ce seul phénomène : aucun composant primordial d'antimatière n'est visible.

Un autre signe possible de la présence d'antimatière dans l'univers serait l'indice d'annihilation des collisions entre particules et antiparticules. Chaque fois que les deux se retrouvent ensemble, on pourrait s'attendre à voir les radiations caractéristiques émises au cours du processus d'annihilation. De fait, c'est grâce à ces radiations que l'Entreprise traque l'Entité cristalline après qu'elle eut détruit un nouveau poste avancé de la Fédération. Apparemment, l'Entité laisse derrière elle une piste d'antiprotons. En recherchant la radiation produite par l'annihilation, l'Entreprise suit l'Entité à la trace et la rattrape avant qu'elle n'ait pu attaquer une autre planète.

Si les auteurs de Star Trek ont bien compris le principe, ils se sont trompés dans le détail. Le Dr Marr et Data recherchent un pic de « radiation gamma » de « 10 keV » - à savoir 10 kiloélectronvolts, qui est une unité d'énergie produite par une radiation. Malheureusement, c'est la mauvaise échelle énergétique pour l'annihilation réciproque des protons et antiprotons - et de fait, elle ne correspond à aucun signal d'annihilation connu. La particule qui possède la masse la moins élevée est l'électron. Si les électrons et les positrons s'annihilent, ils produisent un pic de radiation gamma de 511 keV, qui correspond à la masse de l'électron. Les protons et les antiprotons produisent un pic dont l'énergie correspond à l'énergie au repos du proton, soit environ 1 GeV (gigaélectronvolt), c'est-à-dire environ mille fois la somme d'énergie recherchée par le Dr Marr et Data. (Au passage, précisons que la quantité 10 keV relève de la bande de radiation X, et non de la bande de radiation gamma, qui correspond en général à un excès de radiation d'environ 10 keV, mais ne chipotons pas sur ces petits détails.)

Dans tous les cas, les astronomes et les physiciens ont recherché des signaux de fond diffus d'environ 511 keV et de l'ordre du GeV comme signaux de conflagrations importantes entre matière et antimatière, mais sans jamais les trouver. Ces éléments, et les examens des rayons cosmiques indiquent que, même si l'antimatière était copieusement distribuée dans l'univers, elle ne serait pas émaillée de matière ordinaire.

Comme la plupart d'entre nous s'accommodent bien mieux de la matière que de l'antimatière, il peut paraître beaucoup plus naturel que l'univers soit composé de la première et non de la seconde. Pourtant, il n'y a rien de naturel à cela. De fait, si la matière est plus répandue que l'antimatière, c'est à cause de ce qui constitue actuellement l'un des problèmes irrésolus de la physique, et demeure l'objet d'intenses recherches: cela importe beaucoup à notre existence, et par extension à celle de Star Trek, et une pause est ici nécessaire pour passer le problème en revue.

Dès ses débuts, la mécanique quantique a été appliquée avec succès aux phénomènes relevant de la physique atomique: elle a notamment rendu compte à merveille du comportement des électrons dans les atomes. Cependant, l'une des limites de ce champ d'expérimentation est que les électrons ont des vitesses de déplacement en général bien inférieures à celle de la lumière. Il fallut encore deux décennies pour harmoniser les effets de la relativité restreinte avec la mécanique

quantique. Ce délai tient au fait que, contrairement à la relativité restreinte, dont les applications ne posent pas de problèmes, la mécanique quantique ne supposait pas seulement une toute nouvelle perspective sur le monde, mais un vaste déploiement de nouvelles approches mathématiques. Les meilleurs jeunes cerveaux physiciens purent consacrer les trois premières décennies de ce siècle à explorer cette nouvelle vision de l'univers.

L'un de ces cerveaux était Paul Adrien Maurice Dirac. Comme son successeur Stephen Hawking, et par la suite Data, il devait occuper un jour la chaire de l'université de Cambridge. Formé par Lord Rutherford, puis par Niels Bohr, Dirac était mieux préparé que la plupart de ses collègues à étendre la mécanique quantique au royaume des vitesses extrêmes. En 1928, comme Einstein avant lui, il rédigea une équation qui devait changer le monde. L'équation de Dirac décrit correctement l'attitude relative des électrons en termes purement quantiques.

Peu après avoir écrit cette équation, Dirac réalisa que, pour rester cohérentes, les mathématiques devaient présupposer l'existence d'une particule de charge égale, mais inverse à celle de l'électron. Bien sûr, on connaissait déjà une particule répondant à ces critères: le proton. Toutefois, l'équation de Dirac suggérait que cette particule devait avoir la même masse que l'électron, quand le proton est environ deux mille fois plus lourd. Ce décalage entre l'observation et l'interprétation «naïve» des mathématiques resta mystérieuse pendant quatre ans, jusqu'à ce que le physicien Carl Anderson découvre, parmi les rayons cosmiques bombardant la Terre, une nouvelle particule dont la masse était identique à celle de l'électron, mais dont la charge était inverse, c'est-à-dire positive. Cet « anti-électron » fut bientôt connu sous le nom de positron.

Depuis, il a été établi que l'une des conséquences inévitables de cette fusion entre relativité restreinte et mécanique quantique est que toutes les particules présentes dans la nature doivent posséder des antiparticules, dont la charge électrique (si elles en ont une) et les autres propriétés doivent être inverses de celles des particules qui leur correspondent. Si à toute particule correspond une antiparticule, alors les dénominations « particule » et « antiparticule » sont totalement arbitraires, puisque aussi bien aucun processus n'a jusqu'ici fait prévaloir les particules sur les antiparticules. Dans l'univers classique de l'électromagnétisme et de la gravité, un tel processus ne saurait exister.

Voilà qui nous laisse dans l'embarras. Si les particules et les antiparticules sont sur un pied d'égalité, pourquoi les conditions initiales qui déterminèrent l'univers auraient-elles assigné à ce que nous nommons « particules » une place prédominante au sein de la matière? Une condition initiale plus rationnelle ou du moins plus symétrique aurait réparti également particules et antiparticules. Dans ce cas, il nous faut expliquer comment les lois de la physique, qui, apparemment, ne distinguent pas les particules des antiparticules, ont pu d'une façon ou d'une autre contribuer à produire un type plus que l'autre. Soit il existe dans l'univers une quantité originelle déterminant la proportion de particules et d'antiparticules, et à laquelle les lois de la physique ne peuvent en rien déroger, soit nous devons expliquer le paradoxe qu'il y a à

voir la création dynamique d'une matière l'emporter en quantité sur l'antimatière.

Dans les années soixante, le célèbre scientifique et dissident russe André Sakharov avança une modeste suggestion. Il affirma qu'il était possible, si trois conditions physiques étaient remplies au commencement de l'univers, d'expliquer de façon dynamique l'asymétrie entre matière et antimatière, quand bien même elle n'aurait pas existé à l'origine. À l'époque où cette suggestion fut faite, aucune théorie physique ne pouvait remplir les trois conditions posées par Sakharov. Toutefois, dans les années qui suivirent, la physique des particules et la cosmologie firent des pas de géant. À présent, un grand nombre de théories peuvent, en principe, rendre compte directement de la différence quantitative observée dans la nature entre matière et antimatière. Malheureusement, toutes exigent une nouvelle approche de la physique, et de nouvelles particules élémentaires, pour être efficaces. Jusqu'à ce que la nature nous montre la bonne direction, nous ne saurons pas laquelle choisir. Néanmoins, nombre de physiciens, dont moi-même, trouvent un grand réconfort dans l'idée que nous serons un jour à même de démontrer à partir de principes premiers pourquoi la matière qui fonde notre existence prédomine.

Maintenant, à supposer que nous ayons trouvé la bonne théorie, comment calculer la quantité de matière? Au début de l'univers, quel surcroît de protons, par rapport aux antiprotons, aurait-il dû y avoir pour expliquer l'excédent de matière qu'on observe aujourd'hui dans l'univers? Nous en trouverons un indice en comparant la quantité de protons à ce jour à celle des photons, les particules élémentaires qui constituent la lumière. Si l'univers, à son commencement, est parti d'un nombre égal de protons et d'antiprotons, les deux se sont annihilés réciproquement, produisant de la radiation, donc des photons. Chaque annihilation réciproque entre protons et antiprotons a produit environ un couple de photons. Toutefois, si l'on suppose que les protons excédaient légèrement les antiprotons, tous les protons n'ont pas été annihilés. En comptant le nombre de protons épargnés une fois les annihilations achevées, et en comparant ce chiffre avec le nombre de photons produits par ces annihilations (à savoir le nombre de photons présents dans la radiation de fond produite par le Big Bang), nous pouvons nous faire une idée de l'excédent fractionnel de matière par rapport à l'antimatière, au début de l'univers.

Nous découvrons que, aujourd'hui, il faut compter en gros 1 proton pour 10 milliards de photons dans la radiation de fond cosmique. Ce qui signifie qu'à l'origine l'excédent de protons n'était que de 1 pour 10 milliards! Pour 10 milliards d'antiprotons dans l'univers à son commencement, il y avait 10 milliards et 1 protons! Même cet excédent minuscule (accompagné d'un excédent semblable en neutrons et en électrons par rapport à leurs antiparticules correspondantes) aurait suffi à produire toute la matière qu'on observe aujourd'hui dans l'univers - les étoiles, les galaxies, les planètes - tout ce que nous avons appris à connaître et à aimer.

Voilà, pensons-nous, pourquoi l'univers a finalement été composé de matière et non d'antimatière. Indépendamment de son intérêt intrinsèque, la morale de cette histoire, en ce qui concerne Star Trek, est que, pour fabriquer un moteur fonctionnant à base d'un mélange matière-antimatière, on ne saurait tirer

l'antimatière de l'espace, car l'espace n'en contient guère. Il faudra la fabriquer soi-même.

Pour le mode d'emploi, retournons aux bisons qui errent sur la plaine du Midwest, au-dessus de l'accélérateur du Fermilab. Alors que je réfléchissais sur la logistique de ce problème, j'ai décidé de contacter le directeur du Fermilab, John Peoples Jr., qui a dirigé la conception et la construction de la Source d'antiprotons. Je lui ai demandé de m'aider à déterminer combien d'antiprotons on pouvait produire et stocker pour 1 dollar, au cours actuel du dollar. Il accepta gracieusement de m'aider et me fit parvenir par quelques collaborateurs les renseignements utiles à des fins d'estimation raisonnable.

Le Fermilab produit des antiprotons en provoquant des collisions à moyenne énergie entre protons, sur une cible de lithium. De temps à autre, ces collisions produisent un antiproton qui est acheminé dans l'anneau de stockage, juste en dessous du bison. À un rythme ordinaire, le Fermilab produit environ 50 milliards d'antiprotons par heure. Si l'on suppose que la Source d'antiprotons opère pendant les trois quarts de l'année, cela nous fait environ 6 000 heures. Le Fermilab produit donc environ 300 000 milliards d'antiprotons dans une année normale.

Les composants de l'accélérateur du Fermilab qui contribuent directement à la production d'antiprotons coûtent environ 500 millions de dollars (au cours de 1995). Si l'on amortit ce coût sur une durée active de vingt-cinq ans, cela nous donne 20 millions par an. Le coût de fonctionnement du personnel (ingénieurs, scientifiques, employés) et des appareils est d'environ 5 millions par an. Enfin, les coûts administratifs supplémentaires sont d'environ 15 millions par an. Le total s'élève à environ 48 millions de dollars par an pour produire les 300 000 milliards d'antiprotons utilisés chaque année par le Fermilab pour sonder la structure fondamentale de la matière dans l'univers, soit 6 millions d'antiprotons pour 1 dollar!

Ce coût est sans doute supérieur à ce qu'il devrait être. Le Fermilab produit un rayonnement d'antiprotons à haute énergie et, si nous n'avons besoin que des antiprotons et non des hautes énergies, nous pourrions diviser les coûts par deux, voire par quatre. Soyons généreux, et supposons qu'en utilisant la technologie on pourrait obtenir de 10 à 20 millions d'antiprotons pour 1 dollar, en gros.

La question suivante est évidente : pour 1 dollar, combien aurons-nous d'énergie? Si nous convertissons tout à fait la masse d'antiprotons obtenue avec 1 dollar, nous produirons environ 1 millième de joule, ce qui représente la somme d'énergie nécessaire pour chauffer environ 1/4 de gramme d'eau à environ 1 millième de degré Celsius. Pas de quoi crier hurra ...

Peut-être nous représenterons-nous mieux les capacités potentielles de la Source d'antiprotons du Fermilab comme le noyau du distordeur en calculant combien d'énergie pourrait être générée si nous exploitions la somme entière des antiprotons générés par la Source en temps réel. La Source d'antiprotons produit 50 milliards d'antiprotons par heure. Si tous ces antiprotons étaient convertis en énergie, ils fourniraient une puissance d'environ 1 millième de watt! Ou, pour le dire d'une autre façon, il vous faudrait faire tourner environ 100 000 Sources d'antiprotons pour

alimenter une seule ampoule de 100 watts ! Étant donné son coût annuel de 48 milliards de dollars, il faudrait consacrer une somme supérieure au budget annuel du gouvernement américain pour éclairer ainsi sa chambre à coucher.

Le gros problème, c'est que, dans la situation actuelle, il faut beaucoup plus d'énergie pour produire un antiproton qu'on en obtient en reconvertissant sa masse au repos en énergie. L'énergie perdue au cours du processus de production est sans doute supérieure d'au moins un million de fois à l'énergie stockée dans la masse de l'antiproton. Il faudrait recourir à des moyens de production d'antimatière nettement plus efficaces avant de considérer simplement l'exploitation de moteurs fonctionnant par le mélange de matière et d'antimatière.

Il est non moins clair que, si l'Entreprise devait fabriquer sa propre antimatière, il lui faudrait inventer une vaste technologie à grande échelle - pas simplement pour réduire les coûts, mais pour réduire l'espace. Si les techniques d'accélération devaient être utilisées, il faudrait avoir recours à des machines produisant beaucoup plus d'énergie par mètre que celles d'aujourd'hui. J'ajouterai que ce point fait actuellement l'objet d'intenses recherches. Si l'on veut que les accélérateurs de particules, nos seuls instruments pour explorer directement la structure fondamentale de la matière, ne deviennent pas trop coûteux à construire même pour des consortiums internationaux, il faut développer de nouvelles technologies d'accélération des particules élémentaires. (Nous avons déjà vu que notre propre gouvernement a décidé qu'il serait trop cher de construire un accélérateur nouveau modèle dans ce pays, et c'est pourquoi un groupe européen va en construire un à Genève, qui sera opérationnel dès le début du xxr^e siècle.) Les évolutions passées de la production d'énergie par mètre grâce à un accélérateur suggèrent qu'on peut, tous les dix ou vingt ans, multiplier par dix les résultats obtenus. Aussi peut-on raisonnablement supposer l'invention, dans quelques siècles, d'un accélérateur produisant suffisamment d'antimatière pour alimenter un vaisseau spatial. Étant donné les réticences actuelles du gouvernement à financer une recherche fondamentale coûteuse à cette échelle, un tel optimisme n'est peut-être pas de mise, mais d'ici deux siècles nombre de changements politiques peuvent se produire.

Toutefois, même si on devait fabriquer de l'antimatière à bord du vaisseau, il faudrait encore prendre en compte le fait que la production de chaque antiproton consommerait invariablement une énergie bien supérieure à celle que l'on pourrait en tirer par la suite. Qui aurait envie de consacrer cette énergie à produire de l'antimatière, quand on peut la transformer directement en propulsion?

Les auteurs de Star Trek, toujours astucieux, ont examiné le problème. Leur réponse fut simple. L'énergie présente sous d'autres formes pouvait, certes, être utilisée pour la propulsion des moteurs ordinaires, mais seules les réactions produites par l'annihilation réciproque de la matière et de l'antimatière pouvaient alimenter le passage en vitesse de distorsion. Et puisque celle-ci peut seule tirer d'affaire un vaisseau en danger, en le faisant se déplacer bien plus rapidement que la vitesse de

propulsion, il valait la peine de dépenser un peu plus d'énergie pour produire de l'antimatière. Les auteurs contournèrent par ailleurs les problèmes liés à la production d'antimatière par accélération en inventant une nouvelle méthode pour produire de l'antimatière. Ils suggérèrent un hypothétique « système d'inversion quantique » qui se contentait d'inverser les charges des particules élémentaires, si bien qu'on pouvait produire des antiprotons et des neutrons à partir de protons et de neutrons. Selon le Manuel technique de la Nouvelle génération, alors même que ce processus est susceptible de produire une incroyable quantité d'énergie, la perte d'énergie nette est de seulement 24 %, soit un ordre de grandeur inférieur à celui posé ci-dessus au sujet du processus d'accélération.

Tout cela est bien beau, mais il ne suffit malheureusement pas d'inverser la charge électrique d'un proton. Ainsi, neutrons et antineutrons sont tous deux neutres. Les antiparticules ont toutes des « nombres quantiques » (ces nombres sont des étiquettes qui décrivent leurs propriétés) exactement opposés à ceux de leurs correspondants matériels. Puisque les quarks qui constituent les protons ont bien d'autres étiquettes que leur charge, il faudrait instituer bien d'autres « systèmes d'inversion quantiques » pour compléter la transition de matière à antimatière.

Quoi qu'il en soit, on nous apprend dans le manuel technique que, excepté lorsqu'il faut en produire en toute urgence à bord des vaisseaux spatiaux, toute l'antimatière dont se sert la Flotte fédérale est produite sur la base, dans les installations de ravitaillement en combustible. Ici, les antiprotons et les antineutrons sont combinés pour former les noyaux de l'hydrogène a-pesant. Ce qui est particulièrement amusant, c'est que les ingénieurs de la Flotte ajoutent ensuite des antiélectrons (ou positrons) à ces noyaux chargés d'électricité pour faire des atomes d'hydrogène a-pesant neutres, sans doute parce que les atomes antineutres sont, aux yeux des auteurs de la série, plus faciles à manier que des antinoyaux chargés d'électricité. De fait, on n'a encore créé jusqu'ici aucun antiatome dans les laboratoires, bien que des rapports récents venus de Harvard suggèrent que nous sommes, en cette décennie, sur le point de produire un atome d'anti-hydrogène. Malheureusement, cela soulève de gros problèmes en matière de conservation, puisque les champs magnétiques, qui sont absolument essentiels pour manipuler des quantités substantielles d'antimatière sans provoquer de catastrophe, ne fonctionnent qu'avec des objets dotés d'une charge électrique! Bon, retour au tableau noir ...

La capacité totale d'un vaisseau spatial en carburant à base d'antimatière est d'environ 3 000 mètres cubes, contenus dans des fuseaux de stockage (sur le pont 42, en ce qui concerne l'Entreprise-D). Il paraît que c'est suffisant pour une mission de trois ans. Juste pour s'amuser, calculons combien d'énergie on pourrait tirer de cette somme d'antimatière si on la stockait sous forme de noyaux d'hydrogène a-pesant/antihydrogène lourd. Je suppose que les noyaux sont transportés sous forme de plasma gazéifié, ce qui est sans doute plus facile à conserver dans un champ magnétique qu'un liquide ou un solide. Dans ce cas, 3 000 mètres cubes correspondraient à environ 5 millions de grammes de matériau. Si les réactions d'annihilation consommaient un gramme par seconde, l'énergie produite équivaldrait à

la somme totale d'énergie produite actuellement chaque jour par le genre humain. Comme je l'ai indiqué plus haut en analysant le pilotage en vitesse de distorsion, il faut être prêt à produire au moins cette somme d'énergie à bord d'un vaisseau spatial. On pourrait continuer à s'alimenter avec ce carburant spécial à ce rythme pendant 5 millions de secondes, soit environ deux mois. En supposant qu'un vaisseau spatial ait besoin de faire appel au mélange de matière et d'antimatière pendant 5 % du temps que durent ses missions, on pourrait calculer la quantité requise pour un voyage de trois ans.

Notons aussi ce fait significatif quant à la somme d'antimatière requise pour produire de l'énergie: l'annihilation réciproque de la matière et de l'antimatière se produit ou ne se produit pas, mais on ne peut la moduler à son gré. En modifiant la proportion de matière par rapport à l'antimatière pour un pilotage à vitesse de distorsion, on ne change pas le niveau absolu de puissance générée. Le rapport entre puissance relative et carburant ne diminuera que si une partie du carburant est gâchée, c'est-à-dire si quelques particules de matière ne réussissent pas à trouver l'antimatière qui les annihilera, ou si la collision ne provoque pas l'annihilation. Dans plusieurs épisodes («Le temps mis à nu», «L'enfant de la galaxie», «La peau du mal»), on modifie les proportions de matière et d'antimatière, et dans le manuel technique de Star Trek, ces proportions, nous dit-on, varient continuellement de 25 pour 1 à 1 pour 1, lorsqu'il s'agit de déterminer la vitesse de distorsion : la proportion 1 à 1 est utilisée pour atteindre le niveau 8 de distorsion, ou un niveau encore supérieur. Dans ce dernier cas, la quantité des produits soumis à réaction est augmenté, et la proportion reste la même. Cette modification des quantités, et non des proportions, représente la procédure normale dans tous les cas, et même les cadets de la Flotte devraient le savoir. Wesley Crusher a souligné ce fait en notant, dans l'épisode « L'âge de raison », que la question d'examen de la Flotte interstellaire sur le rapport entre matière et antimatière était un piège : il n'y a qu'une réponse, à savoir 1 pour 1.

Enfin les auteurs de Star Trek ont ajouté un élément crucial à la question du pilotage en vitesse de distorsion. Je veux parler du fameux cristal de dilithium (inventé, c'est une coïncidence, par les auteurs bien avant que les ingénieurs du Fermilab ne décident d'utiliser une cible en lithium dans leur Source d'antiprotons). Il serait impensable de ne pas le mentionner, puisqu'il constitue un élément central du pilotage en vitesse de distorsion, et qu'il occupe une place éminente dans l'économie de la Fédération et dans les péripéties de plusieurs épisodes. (Sans l'importance économique du dilithium, l'Entreprise n'aurait jamais été dépêchée dans le système halkan pour y faire reconnaître ses droits miniers, et nous n'aurions jamais eu droit à « l'univers en miroir », où la Fédération est devenue l'empire du mal!)

Quel est leur rôle, à ces remarquables inventions nées de l'imagination des auteurs de Star Trek? Ces cristaux (connus également sous une formule plus développée- $2(5)6$ dilithium $2(:)1$ diallosilicate $1 : 9 : 1$ heptoferranide) peuvent réguler le rythme d'annihilation réciproque de la matière et de l'antimatière, car ils représentent l'unique forme de matière « perméable » à l'antimatière.

Voici, en gros, comment je me figure la situation: les cristaux sont des atomes régulièrement disposés dans un lacis; je considère donc que les atomes d'antihydrogène sont filetés à travers les lacis des cristaux de dilithium, et dès lors restent à une distance fixe, aussi bien des atomes constituant la matière normale que les uns par rapport aux autres. De cette façon, le dilithium peut réguler la densité d'antimatière, et donc le taux de réaction du mélange matière-antimatière.

La raison pour laquelle je me donne la peine d'inventer une explication hypothétique à l'utilité d'un matériel non moins hypothétique est qu'une fois encore je prétends que les auteurs de Star Trek étaient en avance sur leur temps. Un raisonnement similaire, du moins dans l'esprit, fut proposé des années après que Star Trek avait introduit l'annihilation réciproque entre matière et antimatière modulée par le dilithium, pour justifier un processus non moins exotique : la fusion à froid. L'idée d'une fusion à froid connut un succès qui dura environ six mois: on suggérait alors qu'en produisant une alliance chimique entre divers éléments on pouvait d'une façon ou d'une autre provoquer une réaction des noyaux bien plus rapide qu'elle ne le serait dans des conditions normales, et dès lors produire à une température ordinaire les mêmes réactions de fusion que le Soleil, qui requiert, lui, de grandes densités et des températures supérieures à un million de degrés pour faire de même.

L'une des nombreuses impossibilités inhérentes aux raisonnements portant sur la fusion à froid, et qui éveilla la suspicion des physiciens, c'est que les réactions chimiques et la liaison interatomiques ont lieu à des échelles d'ordre atomique, 10 000 fois plus grandes que la taille des noyaux de l'atome. Il était difficile de croire que des réactions se produisant à des échelles tellement supérieures à celle des dimensions atomiques pourraient affecter les taux de réaction nucléaire. Néanmoins, jusqu'à ce qu'on ait réalisé que les résultats prédits ne pouvaient être reproduits par d'autres groupes, beaucoup de gens consacrerent beaucoup de temps à essayer de représenter les modalités d'un tel prodige.

Puisque les auteurs de Star Trek, à l'inverse des partisans de la fusion à froid, n'ont jamais prétendu écrire autre chose que de la science-fiction, je pense qu'il faut accepter de relâcher un peu notre censure à leur égard. Après tout, les réactions modulées par le dilithium ne font que contribuer à ce qui, sans aucun doute, est l'aspect le plus manifestement réaliste de la technologie spatiale : la conduite à base d'un mélange de matière et d'antimatière. Je pourrais ajouter que les cristaux - le tungstène, et non le dilithium - sont bel et bien utilisés pour modérer ou ralentir les rayonnements d'antiélectrons (ou positrons) dans les expériences modernes, au cours desquelles les antiélectrons se dispersent hors du champ électrique et, gagnant le cristal, perdent leur énergie.

L'univers ne nous permettra jamais de récupérer la mise autrement qu'en prenant une particule et en l'annihilant dans une collision avec son antiparticule, afin de produire une énergie de radiation pure. C'est tout ce que nous pouvons obtenir dans les technologies de propulsion par réacteur, et nous y aurons sûrement recours si jamais nous poussons jusqu'à l'extrême la logique de nos réacteurs. Il nous en coûtera un certain nombre de dollars, mais ce problème regarde les politiciens du xx^m siècle.

7 - Holodecks et hologrammes

« Oh, nous sommes nous, monsieur. Eux aussi sont nous. C'est donc que nous sommes tous les deux nous. »

Data à Picard et Riker,
dans l'épisode «Nous aurons toujours Paris»

Lorsque Humphrey Bogart dit à Ingrid Bergman, à l'aéroport de Casablanca: «Nous aurons toujours Paris», il fait bien sûr référence à leur souvenir commun de Paris. Lorsque Picard dit la même chose à Jenice Mannheim au Café des artistes, qu'ils ont recréé sur le holodeck, il le dit de façon bien plus littérale. Grâce au holodeck, des souvenirs peuvent être revécus en direct, des endroits de prédilection revisités, et des amours perdues redécouvertes - ou presque.

Le holodeck est l'une des réalisations technologiques les plus fascinantes qui se trouvent à bord de l'Entreprise. Pour tous ceux qui sont familiers du jeune univers de la «réalité virtuelle», soit grâce aux jeux vidéo, soit par les ordinateurs modernes les plus sophistiqués et les plus rapides, les possibilités offertes par le holodeck sont particulièrement irrésistibles. Qui n'aurait pas envie d'entrer complètement et sans crier gare dans un monde géré uniquement par son imagination?

Cette idée est si séduisante qu'elle aurait, j'en suis certain, un succès encore plus important dans la réalité que dans la série. Nous avons quelques exemples d'accros du holodeck (« holomaniaques ») dans les épisodes intitulés « Vaines poursuites » et « L'enfant de la galaxie ». Dans le premier cas, l'irrésistible lieutenant névrosé Reginald Barclay s'accoutume à sa vision imaginaire des officiers supérieurs de l'Entreprise, au point qu'il préfère avoir affaire à eux sur le holodeck plutôt que partout ailleurs dans le vaisseau. Dans le second, lorsque Geordi LaForge, qui s'est épris du clone virtuel du Dr Leah Brahms - elle a conçu les machines du vaisseau -, rencontre la véritable Dr Brahms, les choses se compliquent.

Étant donné les divertissements plutôt cérébraux auxquels l'équipage s'adonne en général, on peut imaginer que les instincts hormonaux qui régulent l'humanité du xx^e siècle auront quelque peu évolué d'ici le xxm^e siècle (bien sûr, si c'est le cas, Will Riker n'est pas le meilleur représentant de son époque). Si je dois me fier à l'état du monde actuel, je me serais plutôt attendu à voir le sexe dominer presque entièrement les activités du holodeck. (De fait, le holodeck renouvelle la définition du safe sex.) Et là, je ne plaisante pas. Le holodeck incarne ce que les fantasmes, et notamment les fantasmes sexuels, comportent de plus séduisant : des actes sans conséquences, du plaisir sans douleur, et des situations qui peuvent être répétées et améliorées à volonté.

Les plaisirs virtuels cachés du holodeck ne sont que discrètement mentionnés au cours des épisodes. Par exemple, après avoir fait irruption de façon assez brutale sur le holodeck où Reg vivait ses fantasmes, Geordi admet: «J'ai passé quelques heures sur le holodeck, moi aussi. Pour ma part, je considère que vous pouvez y faire

tout ce que vous voulez du moment que ça n'interfère pas avec votre travail.» Si ce n'est pas là une mise en garde très « xxs siècle » contre le danger de se laisser dominer par ses instincts charnels, alors je ne m'y connais plus.

Je suis certain que les explorations tâtonnantes de notre siècle en matière de réalité virtuelle nous mènent plus ou moins vers le holodeck, du moins dans le principe. Peut-être mes préoccupations paraîtront-elles bizarres au XXIII^e siècle, comme les cris d'appréhension qui ont accompagné l'invention de la télévision il y a un demi-siècle. Après tout, bien que ces cris résonnent encore aujourd'hui devant les débordements du sexe et de la violence à la télévision, sans elle nous n'aurions pas Star Trek.

Le danger de devenir une nation de téléspectateurs inertes ne vaudrait pas dans un monde peuplé de holodecks personnels, ou de galeries de holodecks : se lancer dans une aventure du holodeck, ce n'est pas être passif. Toutefois, la perspective de la réalité virtuelle continue à m'embarrasser, notamment parce que cette «réalité» est en fait bien moins effrayante que la réalité. La séduction d'un monde où l'on peut éprouver des expériences sensuelles directes sans se préoccuper des conséquences peut se révéler sans limites.

Toutefois, chaque technologie nouvelle a ses bons et ses mauvais côtés, et nous force à réajuster notre comportement. L'on aura sans doute compris, à me lire, ma foi en la technologie, qui a, dans l'ensemble, amélioré notre vie plus qu'elle ne l'a détériorée. La nécessité de se réajuster n'est qu'une partie du défi général, qui est d'appartenir à une société en constante évolution.

Quoi qu'il en soit, le holodeck comporte un aspect qui le distingue de manière frappante des autres technologies de la réalité virtuelle en cours de développement. Aujourd'hui, grâce à des appareils que l'on fixe sur le corps et qui influencent la vision et les données sensorielles, la réalité virtuelle place la «scène» à l'intérieur du sujet. Le holodeck se montre encore plus inventif: il place le sujet à l'intérieur de la scène, et il y parvient d'une part en exploitant de façon imaginative l'holographie, d'autre part par duplication.

Les principes de base de l'holographie furent posés en 1947 (bien avant l'invention d'une technologie permettant de les exploiter à fond) par le physicien britannique Dennis Gabor, qui reçut par la suite le prix Nobel pour ses travaux. Aujourd'hui, la plupart des gens connaissent l'utilisation des images holographiques à trois dimensions sur les cartes de crédit, et même sur la couverture de certains livres. Le mot « hologramme » vient des mots grecs signifiant «entier» et «écrire». Contrairement aux photographies normales, qui se contentent d'enregistrer des représentations bidimensionnelles d'une réalité tridimensionnelle, les hologrammes représentent cette réalité dans son intégralité. Il est possible, grâce à l'holographie, de recréer une image tridimensionnelle dont on peut faire le tour et contempler tous les angles, comme s'il s'agissait de l'objet d'origine. La différence est sensible seulement si l'on essaie de toucher l'hologramme : on voit alors qu'il n'y a rien à toucher.

Comment un morceau de pellicule bidimensionnel, puisque c'est lui qui

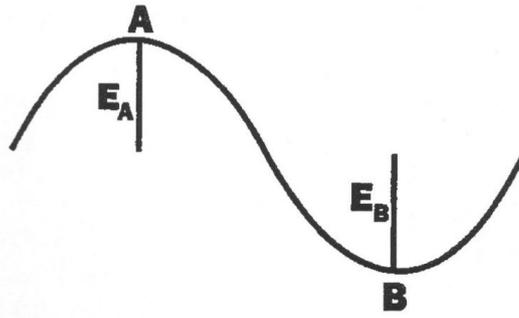
emmagasine l'image holographique, peut-il enregistrer l'ensemble des données qui constituent une image en trois dimensions ? Pour répondre à cette question, il nous faut réfléchir sur la nature exacte de ce que nous voyons lorsque nous voyons quelque chose, et de ce qu'une photographie enregistre exactement.

Nous percevons les objets parce qu'ils émettent ou reflètent la lumière, qui parvient ensuite à nos yeux. Lorsqu'un objet tridimensionnel est illuminé, il renvoie la lumière dans des directions variées, à cause de sa tridimensionnalité. Si nous pouvions d'une façon ou d'une autre reproduire l'exakte structure de la lumière divergente lorsque la lumière se voit ainsi éparpillée autour de l'objet concret, nos yeux seraient incapables de distinguer la différence entre l'objet concret et la structure de lumière divergente créée en l'absence de cet objet. En bougeant la tête, par exemple, nous réussirions à voir des traits qui étaient auparavant obscurcis, cela parce que la structure intégrale de lumière éparpillée depuis toutes les parties de l'objet aurait été recréée.

Comment pouvons-nous emmagasiner, puis recréer toutes ces données? Nous nous en ferons une idée en considérant ce qu'une photographie normale - qui emmagasine, puis recrée une image bidimensionnelle - enregistre pour sa part. Lorsque nous prenons une photo, nous exposons un matériel sensible à la lumière à une lumière venue de l'extérieur et qui pénètre par les lentilles de l'appareil. Ce matériel sensible à la lumière, quand il est exposé à divers produits chimiques, noircira selon l'intensité de la lumière qui l'a contaminé. (Je parle ici des pellicules noir et blanc, mais il n'est pas difficile d'étendre la démonstration à la couleur - il suffit d'enduire la pellicule de trois substances distinctes, dont chacune est sensible à une couleur primaire de la lumière.)

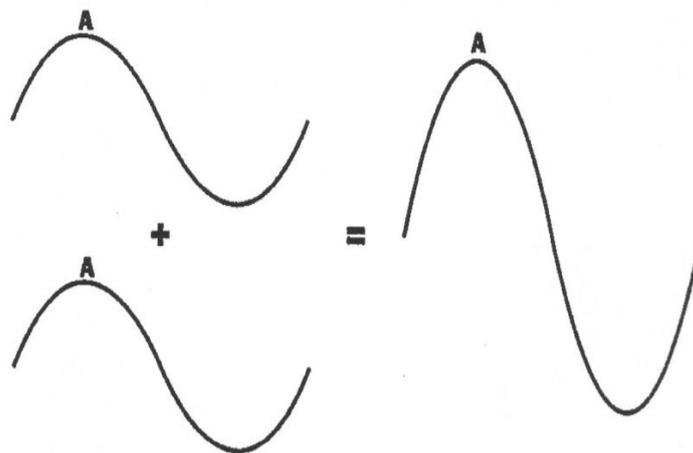
Le contenu total de l'information enregistrée sur une pellicule photographique dépend de l'intensité de la lumière qui frappe telle ou telle zone sur la pellicule. Lorsque nous développons le film, les zones qui ont été exposées à une intensité plus forte de lumière réagiront aux produits chimiques de développement en devenant plus sombres, celles qui ont été moins exposées resteront plus claires. L'image résultante sur la pellicule est une projection «négative» bidimensionnelle du champ de lumière original. Nous projetons de la lumière à travers ce négatif sur une feuille de papier sensible à la lumière pour créer la photographie définitive. Lorsque nous la regardons, la lumière qui frappe les zones les plus claires de la photographie seront reflétées de façon prédominante, tandis que la lumière qui frappe les zones sombres sera absorbée. En observant la lumière reflétée depuis la photographie, nos rétines reçoivent une structure d'intensité bidimensionnelle que nous pouvons ensuite interpréter.

La question est alors de savoir ce qu'il reste à enregistrer de plus que le simple niveau d'intensité de la lumière dans chaque zone. Une fois de plus, nous nous baserons sur le fait que la lumière est une onde. Cela signifie qu'il faut plus que la seule intensité pour caractériser sa configuration. Observons l'onde lumineuse figurée ci-dessous :

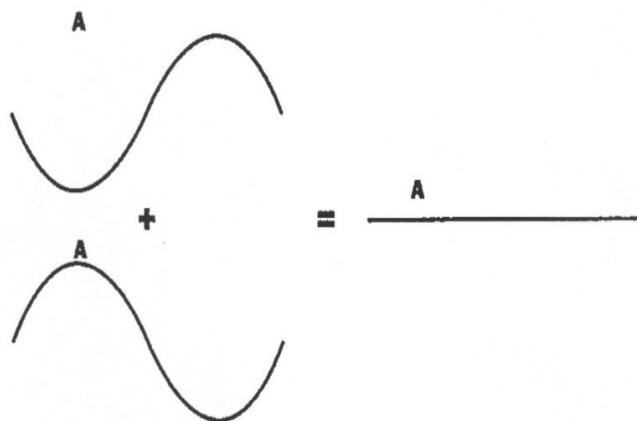


En zone A, l'onde, qui dans notre cas représente la force du champ électrique, atteint sa valeur maximale, qui correspond à un champ électrique de force E_A , lorsqu'elle pointe vers le haut. En zone B, le champ est d'une force égale, mais pointe vers le bas. En termes d'intensité, le champ a la même intensité en A et en B. Toutefois, la zone B constitue une partie de l'onde différant de la zone A. Cette «zone» de l'onde a pour nom la «phase». Or on peut spécifier toutes les données associées à une onde à un point donné en donnant son intensité et sa phase. Pour enregistrer toutes les données des ondes de lumière renvoyées par un objet tridimensionnel, il faut trouver un moyen d'enregistrer sur un morceau de pellicule et l'intensité et la phase de cette lumière.

Ce qui est simple comme bonjour. Si vous divisez en deux un rayonnement de lumière et que vous en projetez une partie directement sur la pellicule en laissant l'autre se répandre autour de l'objet avant d'imprimer la pellicule, il se passera l'une des deux choses suivantes. Si les deux ondes lumineuses sont «en phase», c'est-à-dire si leurs sommets se touchent en un point que nous nommerons A, alors l'amplitude de cette nouvelle onde au point A sera deux fois supérieure à celle de chacune des ondes individuelles, comme le montre le dessin ci-dessous:



D'un autre côté, si les deux ondes ne sont pas en phase au point A, elles s'annuleront réciproquement, et l'onde résultante au point A aura une amplitude de zéro :



Donc, si, au point A, la pellicule est une pellicule photographique, qui n'est sensible qu'au niveau d'intensité, elle fixera un « schéma d'interférence » entre les deux ondes - le rayonnement de référence et le rayonnement de lumière renvoyé par l'objet. Ce schéma ne contient pas seulement les données sur l'intensité de la lumière répandue par l'objet, mais également des données sur ses phases. Avec un peu d'astuce, il est possible d'extraire ces données de façon à recréer une image tridimensionnelle de l'objet qui a renvoyé la lumière.

En fait, il s'avère qu'il n'y a pas besoin de déployer tant de ruse. Si l'on se contente d'imprimer cette pellicule photographique avec une source de lumière dont l'onde équivaut à celle de la lumière d'origine qui a produit le schéma d'interférence, une image de l'objet sera créée à l'endroit précis où l'objet était en rapport avec la pellicule, lorsque vous regardez à travers celle-ci. Si vous tournez la tête d'un côté, vous réussirez à « contourner du regard » les angles de l'objet reproduit. Si vous voilez l'essentiel du morceau de pellicule, et que vous le rapprochez de l'œil pour regarder à travers la partie qui n'est pas voilée, vous verrez encore l'objet tout entier ! Cette expérience est la même que si vous regardez à travers la fenêtre une scène qui se déroule à l'extérieur, sauf que la scène que vous contemplez n'est pas vraiment là. La lumière qui vient frapper votre œil à travers la pellicule est affectée de telle façon que votre œil s'imagine qu'elle se diffuse autour de l'objet. C'est ça, un hologramme.

Normalement, si l'on veut que la lumière de référence et la lumière diffusée autour de l'objet soient sous un contrôle attentif, on construira les hologrammes en utilisant le laser, qui crée une lumière cohérente et bien définie. Cependant il existe des hologrammes de « lumière blanche », comme on les nomme, qui peuvent être imprimés avec de la lumière ordinaire, et qui produisent le même effet.

On peut truquer les choses davantage encore. On peut, par exemple, user de diverses lentilles et manipuler les images des objets de sorte qu'elles apparaissent entre la pellicule et vous, de façon que vous puissiez en faire le tour et les voir sous tous les angles. Ou encore on peut intervenir sur la source de lumière de manière à ce qu'elle soit devant la pellicule plutôt que derrière, comme avec les hologrammes sur les cartes de crédit.

C'est sans doute la première catégorie d'hologrammes qui est utilisée sur le

holodeck, ou pour recréer l'image d'un médecin dans l'infirmierie, comme dans la série du Voyageur. Qui plus est, afin de créer ces hologrammes, on n'a pas besoin d'utiliser les objets d'origine. Les ordinateurs numériques sont désormais assez sophistiqués pour exécuter des « tracés par rayon » - ils peuvent calculer le schéma lumineux que répand tout objet hypothétique que vous souhaitez dessiner sur l'écran, et l'illuminer sous n'importe quel angle. De la même façon, l'ordinateur peut déterminer la configuration du schéma d'interférence provoqué par la fusion entre la lumière issue d'un rayonnement direct et celle diffusée par un objet. Ce schéma d'interférence réalisé par l'ordinateur pourra être projeté sur un écran transparent qui, une fois illuminé par-derrière, produira une image tridimensionnelle d'un objet qui n'a en réalité jamais existé. Si l'ordinateur est assez rapide, il peut projeter un schéma d'interférence en mouvement constant sur l'écran, et produire en conséquence une image tridimensionnelle animée. Aussi l'aspect holographique du holodeck n'a-t-il rien de bien sorcier.

Toutefois, le holodeck ne se limite pas aux hologrammes. Comme on l'a remarqué, ceux-ci n'ont aucune intégrité corporelle. On peut marcher à travers eux, ou les traverser d'une balle, comme l'ont prouvé les merveilleuses figures holographiques inventées par Spock et Data pour abuser les Romuliens dans l'épisode « Unification ». Cette immatérialité ne suffit pourtant pas aux objets qu'on souhaite manier et toucher sur le holodeck. Il faut pour cela des techniques plus ésotériques : les auteurs de Star Trek ont eu recours au téléporteur, ou du moins aux dupicateurs, qui sont des versions moins sophistiquées du téléporteur. C'est sans doute en usant de la technologie qui est à la base du téléporteur qu'on arrive ainsi à reproduire la matière et à l'animer sur le holodeck de façon à imiter exactement des êtres humains, leur voix et leurs mouvements. De même, les dupicateurs reproduisent des objets inanimés, des tables, des chaises, etc. Cette « matière à holodeck » doit sa forme au schéma contenu dans le circuit dupicateur. Lorsque le téléporteur est débranché ou que l'objet est retiré du holodeck, la matière se désagrège aussi facilement que si le circuit modélisateur était débranché au cours du processus de téléportation. Les créatures constituées à base de « matière à holodeck » peuvent être ainsi piégées sur le holodeck, comme les détectives imaginaires, Cyrus Redblock et Felix Leach le découvrent à leur grande consternation dans l'épisode de la Nouvelle génération intitulé « Le grand adieu », et comme l'ennemi intime de Sherlock Holmes, le Pr Moriarty, le déduit avant de chercher à y échapper dans plusieurs épisodes.

Voici donc comment je me représente le holodeck: des hologrammes seront mis en action sur les murs, pour donner l'impression qu'on est dans un environnement tridimensionnel étendu jusqu'à l'horizon, et les dupicateurs basés sur le téléporteur créeront alors les objets «solides» et animés à l'intérieur de ce décor. Puisque l'holographie est une idée réaliste (contrairement au téléporteur, comme je l'ai expliqué plus haut), il faudrait trouver une autre façon de modeler et d'animer la matière afin de réaliser un holodeck opérationnel. Nous possédons une technologie sur deux, ce qui n'est pas si mal.

Avec tout cela, où situer les purs hologrammes, comme le médecin holographique de la série du Voyageur? La réponse est : nulle part. Si nous ne possédons que la lumière répandue et non la matière qui va avec, je crains que ces images ne se prêtent à aucune forme de manipulation. Toutefois, un ton doctoral et quelques conseils murmurés sur un ton profondément compréhensif, car c'est ce qui fait le cœur de l'authentique pratique médicale, peuvent être dispensés par un hologramme aussi bien que par un authentique médecin.