

Le Plaisir de l'imagination

Richard P. Feynman
transcript et traduction par A. Wojdyla

BBC - 1983

Il est amusant de constater que certains trouvent la science si simple, tandis que les autres la trouvent barbante et difficile, les enfants en particulier. Vous savez, il y en a que ça excite et je ne saurais expliquer pourquoi... mais c'est pareil dans d'autres domaines.

Par exemple : certains adorent la musique, alors que je suis incapable d'apprécier une mélodie. C'est dommage et je suis sûr que j'y perds beaucoup mais je pense que ceux qui trouvent la science ennuyante y perdent tout autant !

En ce qui concerne la science, je pense que ce qui la rend en partie si difficile... c'est qu'elle nécessite de faire recours à beaucoup d'imagination. Il est difficile de se rendre compte à quel point les choses sont étranges en vérité !

Les choses ne sont jamais telles qu'elles le laissent à penser !

1 Des atomes qui s'agitent

La chaleur reliée à la vitesse à laquelle les atomes s'agitent ; s'ils gigotent beaucoup, c'est parce que c'est chaud, et si c'est froid, c'est parce qu'ils gigotent moins. Si vous prenez un grand ensemble d'atomes, comme du café dans une tasse posée sur la table, et que les atomes s'agitent beaucoup, ils se cognent à la tasse et la tasse s'agite elle-même ; elle agite à son tour les atomes qui se cognent l'un l'autre, et cette chaleur chauffe la tasse. Les objets chauds transmettent leur chaleur aux autres par simple contact, parce que les atomes des objets chauds qui s'agitent beaucoup secouent les autres atomes qui sont moins agités des objets froids ; c'est comme ça que le chaud (ce qu'on appelle la chaleur) va vers le froid, se diffuse ; mais ce qui se diffuse, c'est n'est que de l'agitation, un mouvement irrégulier, mais ça se comprend bien.

Quand je dis « s'agiter », on peut s'imaginer des balles qui rebondissent, mais vous savez qu'elles finissent par s'amortir d'un certain temps. Mais il faut imaginer que les atomes sont parfaitement élastiques, qu'ils ne perdent jamais d'énergie : que quand ils rebondissent, ils rebondissent indéfiniment : ils sont constamment en mouvement. Et ce qui se passe lorsque l'on dit que quelque chose perd de l'énergie, comme une balle qui tombe et rebondit, c'est qu'elle agite irrégulièrement des atomes du sol, et que quand elle repart, ces derniers conservent cette agitation. Par conséquent, quand la balle rebondit, elle donne de l'énergie qu'elle a en trop aux petits morceaux de sol à chaque fois qu'elle rebondit, et perd peu de chaleur à chaque fois, jusqu'à ce qu'elle se stabilise puis s'arrête de rebondir. Mais les atomes du sol et de la balle sont devenus plus agité qu'avant. Le mouvement bien organisé de l'ensemble des atomes de la balle se dirigeant

tous vers un sol tout calme s'est mué en le spectacle d'une balle gisant sur le sol. Tout le mouvement est encore là pourtant, mais sous forme d'agitation des atomes du sol, qui est lui devenu un peu plus chaud qu'avant (incroyable!). Ceux qui font du bricolage vous confirmeront : quand on tape très fort sur un clou il finit par se réchauffer et on peut sentir la différence de température. Simplement parce que vous avez fait s'agiter les atomes du clou.

Cette image -de l'atome- est très belle, et on peut voir plein de choses sous cet angle.

Dans une goutte d'eau - toute petite - les atomes s'attirent les uns les autres : ils aiment à se coller les uns contre autres, ils veulent avoir autant de compagnons que possible. Seulement voilà, les atomes qui sont à la surface de la goutte n'ont d'amis que d'un côté ; de l'autre côté, il y a de l'air et ils veulent rentrer à l'intérieur de la goutte. Et vous pouvez imaginer que ces atome du bord de la goutte bougent très rapidement et que chacun essaie d'avoir autant d'amis que possible ; les atomes à la surface de la goutte sont tous malheureux et essaient d'aller vers l'intérieur. C'est pour ça que les gouttes ne sont pas plates mais rondes.

C'est ce qu'on appelle la tension de surface, et on s'en aperçoit mieux lorsque qu'une goutte d'eau est déposée à même la table. On commence à comprendre pourquoi la goutte a cette forme : parce que tous ses atomes veulent se diriger vers à l'intérieur de la goutte d'eau.

Et pendant ce temps-là, certains atomes quittent la surface de la goutte d'eau qui disparaît progressivement.

C'est la genre de chose que je me plaît à imaginer en permanence, et j'y prend mon pied ! J'y prends au moins autant mon pied qu'un marathonien prend son pied à courir ! Je m'éclate avec ces choses-là ! Je ne peux pas m'en empêcher. Je pourrais vous parler pendant des heures !

Si on refroidit de l'eau, de telle sorte que ses atomes gigotent de moins en moins, ils finissent par s'agiter tellement lentement qu'ils deviennent figés ; il y a une force d'attraction qui fait qu'ils se tassent les uns contre les autres. Ils ne roulent plus les uns sur les autres, mais ils forment une structure, un peu comme des oranges bien rangées sur un étal de marché. Tous s'agitent sur place, mais pas assez pour s'extirper de leur emplacement et briser la structure globale. Et ce que je décris là, c'est l'état solide -la glace pour l'eau-. Si vous placez un atome à un endroit, tous les autres s'alignent sur lui dans position bien déterminée, et on obtient alors un solide. Mais si vous chauffez plus fort, ils commencent à se disperser et à rouler les uns sur les autres : on a affaire à un liquide. Et si vous chauffez de plus en plus, ils finissent par se cogner encore si fort qu'ils s'éjectent les uns les autres si bien qu'ils ont l'air d'être des atomes isolés. Quand je dis atomes, c'est en fait des groupes d'atomes, des molécules, qui volent, se heurtent et qui ont tendance à s'assembler. Mais s'ils vont trop vite, ils ont à peine le temps de se faire la bise et repartent aussi sec : c'est ce que appelle un gaz, de la vapeur dans le cas de l'eau.

On peut comprendre plein de choses avec ce modèle. Quand j'étais gamin, j'étais fasciné par l'air qui nous entoure. Je me souviens d'un truc dont je me suis rendu compte en gonflant les pneus de mon vélo (on apprend plein chose quand on a un vélo). Quand on gonfle la roue, la pompe se réchauffe, et j'ai

compris que quand on pousse la pompe, les atomes vont vers le haut et rebondissent. Ceux qui vont vers le piston sont plus rapides que ceux qui vont vers le bas, et donc qu'ils accélèrent en changeant de direction à chaque fois qu'ils rebondissent. Par conséquent, ils sont plus chauds quand on compresse le gaz. Et quand on retire le piston, les atomes qui vont plus vite se ralentissent et ressortent avec moins d'énergie. C'est comme aller contre quelque chose... qui va dans la même direction. Quand on retire le piston et que les atomes rebondissent contre celui-ci, ils perdent leur vitesse et se refroidissent : le gaz se refroidit lorsqu'on le détend. Et ce qu'il y a de rigolo, c'est que je suis sûr que vous vous en êtes déjà rendu compte : pomper fait chauffer l'air, et l'air se refroidit quand on le détend, tout comme la vapeur d'eau s'évapore de la casserole quand on ne met pas de couvercle. Et on peut comprendre toutes ces choses avec ce modèle.

Et je trouve que c'est très marrant de se laisser à imaginer ce genre de choses. Je ne veux pas qu'on prenne ces choses trop au sérieux ; je pense qu'on doit seulement prendre du plaisir à se les imaginer, sans trop se prendre la tête. Pour moi, enseigner ça ne sert pas qu'à permettre de réussir un examen... ce serait trop mortel !

2 Les élastiques

La plupart des objets, comme les ressorts métalliques et tout ce qui s'y apparente, ne sont rien d'autre que des éléments électriques dans lesquels les atomes s'éloignent lorsqu'on les étire, et qui tendent de se contracter à nouveau.

Mais les élastiques fonctionnent différemment. Ils sont composés de longues molécules en forme de chaîne. Et les petites chaînes s'agitent en permanence, se heurtant aux autres chaînes. Et toutes ces chaînes sont un peu vicieuses. Quand on tire sur un élastique, les chaînes se raidissent et s'allongent. Mais ces chaînes sont bombardées sur le côté par des atomes qui cherchent à les raccourcir en leur foutant des châtaignes. Alors elles se rétractent, et cette rétraction est simplement due à la chaleur.

Si vous chauffez un élastique, il tirera plus fort. Par exemple, si vous suspendez une petite masse au bout de l'élastique, vous serez surpris de voir qu'il monte au fur et à mesure que vous le chauffez ; il y a une autre façon de d'illustrer par l'expérience cette idée (que c'est la chaleur qui anime l'élastique) : si vous compressez l'élastique (un peu comme si vous appuyiez sur un piston), la contraction des molécules qui les heurtent les fait bouger plus rapidement, et l'élastique est plus chaud. Et si vous le laissez se reposer, les molécules qui le heurtent font comme si elles leur donnaient leur chaleur et perdent leur énergie quand elles atteignent l'élastique maintenant droit. Et ce dernier refroidit de fait.

Il y a une manière de s'en convaincre (on n'y est guère sensible, c'est un effet très fin). Si vous prenez un élastique bien épais, et que vous le mettez entre vos lèvres. En le tirant, vous sentirez qu'il est plus chaud. Laissez-le allongé puis se rétracter, vous vous rendrez compte qu'il est plus froid. Ou du moins qu'il y a une différence de température entre son élongation et sa contraction. Et je trouvais à l'époque que les élastiques étaient un fascinant objet d'étude. Lorsque les élastiques relient une grosse liasse de papier, ils résistent et résistent à l'étirement, et les atomes qui forment ces chaînes continuent de compresser la liasse, années après années (bon d'accord, les élastiques ne résistent pas aussi

longtemps ; disons un certain temps !)

Le monde est joyeux bordel dynamique de choses qui s'agitent, si l'on y regarde de près. Et si vous y regardez d'encore plus près, vous n'y verrez plus ces petites choses, parce que tout s'agite à sa manière et qu'il y a plein de petites billes. On a de la chance d'être si grand pour tout voir, et surtout de ne pas avoir à se soucier en permanence de tous ces petits atomes !

3 Le feu

Les atomes s'apprécient entre eux de différentes manières. Par exemple, l'oxygène de l'air aime être entouré de carbones et ils s'assemblent quand ils se croisent. Mais souvent, s'ils ne sont pas suffisamment proches, ils se repoussent et repartent chacun dans leur direction : ils ne peuvent alors s'assembler.

Ca ressemble à une bille dans une vallée située entre deux volcans. La bille voudrait aller dans le cratère d'un des volcans, mais elle n'y arrive pas parce que quand elle monte le flanc du volcan, elle finit par s'arrêter et repart dans l'autre sens. Mais si on s'arrange pour qu'elle aille suffisamment vite, elle arrivera à franchir le bord du cratère et y restera. C'est la même chose pour le bois et l'oxygène -il y a du carbone dans le bois car il vient d'un arbre- : quand l'oxygène se cogne contre le carbone, mais pas assez fort, il repart comme si de rien était. Il suffit que l'on arrive, n'importe où, n'importe quand, à faire en sorte qu'ils se heurtent suffisamment fort pour que la magie commence.

Quelques atomes d'oxygène arrivent alors suffisamment rapidement pour qu'ils s'assemblent avec les carbones en s'y cognant ; cela libère plein de mouvement d'agitation pour les autres atomes d'oxygène, qui vont pouvoir à leur tour grimper la côte du volcan imaginaire et rencontrer d'autres atomes de carbone. Ces rencontres permettent de libérer à nouveau de l'agitation... et vous avez là un horrible catastrophe, où les atomes les uns après les autres vont de plus en plus vite et pour tous s'assembler... et l'ensemble se transforme. Cette catastrophe, c'est ce qu'on appelle le feu !

Lorsque le feu démarre, il s'entretient. Dès les rencontres commencent, la chaleur qu'elles produisent fait en sorte que les atomes solitaires sont capables d'atteindre le cratère, ce qui libère de l'énergie afin que d'autres atomes atteignent le cratère et ainsi de suite ! Cette rencontre entre l'oxygène et le carbone produit beaucoup d'agitation que je peux mettre à profit en plaçant une cafetière par-dessus. Quel foutoir dans le feu de bois ! Il produit beaucoup d'agitation. Cette agitation, bien sûr, c'est la chaleur.

On se demande bien comment le bois a fait pour résister jusque là, pourquoi il ne s'est pas embrasé avant alors qu'il y avait tant d'oxygène tout ce temps. D'où vient-il ? Pourquoi vient-il des arbres ? Et si la substance dont sont faits les arbres est du carbone, d'où vient-il ? Il doit sûrement provenir du sol, non ? Les gens coupent les arbres en pensant qu'ils viennent du sol. Les plantent poussent dans sol... Si vous vous posiez la question "d'où vient cette substance ?", vous vous rendriez qu'en fin de compte, elle provient de l'air. Ainsi donc, l'arbre tomberait du ciel ?

Mais non !

Il vient du sol !

Eh bien non, il tombe bien du ciel !

Le dioxyde de carbone que l'on trouve dans l'air passe dans l'arbre. Ce dernier le transforme en séparant l'oxygène du carbone, pour le laisser dans l'arbre, entouré d'eau. L'eau vient du sol, on le sait. Sauf qu'elle arrive là en tombant du ciel. Et donc la majeure partie des constituants de l'arbre viennent de l'air et du ciel ! Il y en a quand même un petit peu venant du sol : quelques minéraux etc...

Revenons-en à nos moutons : je vous ai dit que l'oxygène et le carbone s'assemblaient et restaient très fortement liés l'un contre de l'autre. Comment l'arbre peut-il être suffisamment intelligent pour prendre le dioxyde de carbone (qui n'est autre que du carbone et de l'oxygène joliment assemblés) et n'en garder que le carbone ?

Ah !

La vie !

La Nature et ses voies impénétrables !

Pas si vite ! Le soleil brille et ses rayons arrivent sur l'arbre pour l'aider à expulser l'oxygène loin du carbone. Il faut donc un peu de lumière pour que la plante puisse pousser ! Et le soleil, pendant ce temps, se coltine la séparation du carbone et de l'oxygène. L'oxygène n'est un malheureux déchet, rejeté dans l'air en laissant au carbone et à l'eau le soin de constituer l'arbre. Et on prend cette substance, le bois de l'arbre, pour allumer nos cheminées. Tout cet oxygène et ce carbone ne demanderait pas mieux que d'être à nouveau ensemble ! Et dès que la température le permet, il se produit plein d'agitation tandis qu'ils se recombinent. Et toute cette belle lumière sort de la cheminée, c'est tout le processus qui se défait : on se retrouve à nouveau avec du carbone et de l'oxygène, sous la forme de dioxyde de carbone ; cette lumière et cette chaleur qui sort du bois, c'est la lumière et la chaleur du bois qui y sont rentrés.

En quelque sorte, c'est du soleil qui ressort lorsque l'on brûle du bois ! Maintenant, la question suivante : pourquoi le soleil est-il si chaud, si agité ? Mais je dois bien m'arrêter quelque part... Je vous laisse le loisir de l'imaginer !

4 Le miroir

J'ai fait mes études au MIT et là-bas, la première fois que vous mettez les pieds dans une fraternité, ils vous testent en vous posant plein de questions en apparence simple pour voir si... vous êtes malins ; et c'est un excellent exercice pour l'imagination. C'était très amusant et je pensai vous raconter certaines colles dont je me souviens. Je les ai apprises, et quand on les apprend, la prochaine fois qu'une personne vient vous voir avec ces merveilleux puzzles, vous la regardez sereinement, attendez deux, trois, cinq secondes (pour montrer que vous réfléchissez), puis vous donnez alors cette réponse qui abasourdit vos camarades alors qu'il s'agit d'un truc que vous aviez répété un peu plus tôt avec vos amis de la fraternité.

Une de ces colles avait à voir avec un miroir... c'est un vieux classique. Vous regardez dans un miroir et, disons que vous avez une raie sur le côté droit, vous regardez le miroir et l'image de votre front vous donne l'impression que votre raie est passée du côté droit : la droite et la gauche de votre image sont

renversées ! Ce n'est pas le haut et le bas qui sont inversés, car tout ce qui est en bas reste en bas tout ce qui est en haut reste en haut. La question est alors "comment le miroir sait-il qu'il faut inverser la droite et gauche et pas le haut et le bas ?" Vous comprendrez mieux la nature du problème en vous allongeant et en regardant le miroir : vos cheveux sont toujours à gauche et maintenant la droite et la gauche sont le haut et le bas, tandis que le haut et le bas qui sont correct étaient la droite et la gauche juste avant : le miroir réussit en quelque sorte à déterminer ce que vous faites lorsque vous le regardez. Comment décrire alors la symétrie du miroir qui n'a pourtant pas l'air de travers, et qui inverse la droite et la gauche alors mais pas le haut et le bas. Après avoir s'être creusé un peu les méninges, on peut répondre à cette question.

En fait, si vous brandissez en l'air cette main, la main brandie dans le miroir est à l'exact opposé. La main à l'est est la main à l'ouest, et la main à l'ouest est la main à l'est, et la tête qui est en haut et en haut, et vos pieds qui sont en bas sont en bas. Tout est parfaitement correct !

Mais ce qui ne va pas, c'est que si ça c'est le nord, le nez est au nord de l'arrière de votre tête, mais que dans l'image le nez est au sud de l'arrière de votre tête. En réalité, ce qui se passe dans l'image c'est que ni la gauche et la droite, ni le haut et le bas ne sont renversés, mais l'avant et l'arrière. Il faut s'imaginer que c'est que votre nez est du mauvais côté de votre tête en quelque sorte. Mais quand on contemple une image, on s'imagine d'habitude qu'il s'agit d'une autre personne, et l'on pense à la manière façon habituelle qu'aurait une personne de se retrouver en face. C'est psychologique. On ne se met pas en tête que la personne en face est en fait retournée sens-dessus dessous, parce que ce n'est pas qui arrive aux personnes que l'on regarde d'ordinaire. Une personne doit ressembler à ce qui se passerait si on la regardait dans le miroir et qu'elle en faisait le tour pour vous faire face. Et parce que les gens pendant ce demi-tour n'échangent pas leurs têtes et leurs pieds (laissons cela de côté), mais qu'ils inversent leur droite et leur gauche para rapport à vous lorsque qu'ils font volte-face, on dit alors que c'est la droite et la gauche qui s'échangent, mais c'est en fait la symétrie qui se fait selon l'axe du miroir qui effectue ce changement.

Celle-là était simple. Une autre colle, plus compliquée, était "Qu'est-ce qui fait tenir un train sur ses rails".

5 "Qu'est-ce qui fait tenir un train sur ses rails ?"

Et bien sûr la réponse chacun se l'imagine est que c'est le rebord des roues qui l'y fait tenir (vous voyez, les roues ont une sorte un boudin sur le côté). Mais ce n'est pas la bonne réponse.

Parce que ces rebords ne sont que des éléments de sécurité. Le rebord frotte contre le rail juste dans le cas où le véritable mécanisme ne fonctionne pas, et on entend alors un horrible crissement. Tout le monde sait que sur leur voiture, quand on tourne à un croisement, la roue extérieure parcourt une distance plus grande que la roue intérieure. Et si les roues étaient reliées par un axe rigide, ça ne pourrait marcher, car on ne pourrait faire tourner la roue extérieure plus vite que la roue intérieure. C'est pour cela que cet axe est rompu au milieu par mécanisme que l'on appelle un boîtier différentiel. Avez-vous déjà vu un boîtier différentiel sur un train de ligne ?

Non ! Quand on regarde ces roues, on voit qu'elles sont reliées par une tige rigide en acier, qui va d'une roue à l'autre. Il n'y a rien d'autre entre elles – chaque roue tourne à la même vitesse. Mais comment le train parvient-il à tourner, alors que la roue située à l'extérieur du virage devrait tourner plus vite que la roue à l'intérieur ?

La réponse, c'est que les roues ont un rebord... Non ce n'est pas le rebord ! En fait, la roue ressemble à une sorte de cône qui fait qu'elle est un peu plus épaisse vers le centre du train, et un peu moins vers l'extérieur. Si l'on regarde de plus près, on se rend bien compte de cet aspect oblique. Et tout devient très logique ! Quand elles abordent un virage, le train glisse légèrement en dehors du lit des rails, ce qui fait que la roue intérieure tourne sur sa partie épaisse et l'autre sur un diamètre plus petit du rail, et plus les deux tournent durant le virage, plus le train sort du lit des rails. Et c'est par la même occasion ce qui garde le train sur les rails. Supposons que le train roule avec ses roues sur les rails : si les rails sont ici et que les deux roues sont parfaitement équilibrées (et bien symétriques, tout comme il faut) , et qu'un remous du rail ou autre le fait dévier, cette roue est sur une circonférence plus grande que l'autre, mais reliée par un axe rigide, et donc tandis qu'elle tourne, elle amène cette roue vers l'avant par rapport à l'autre et ramène le trains sur ses rails (bien sûr, quand elle va trop loin de l'autre coté) et reste sur les rails parce que la roue est en cône. La bride n'est qu'une sécurité pour les cas extrêmes.

Mais nous avons plein d'autres histoires comme celle-là, et il fallait bien les apprendre pour devenir un membre de plein droit de la fraternité.

6 Les aimants

- *Si l'on prend deux aimants et qu'on les rapproche l'un l'autre, on peut sentir une sorte de répulsion. Si l'on en retourne un, ils s'attirent maintenant. Qu'est que ce c'est que cette sensation que l'on ressent avec les deux aimants ?*

- R. Feynman (qui semble un peu énervé) : Qu'entendez-vous par " Qu'est que ce c'est que cette sensation que l'on ressent avec les deux aimants" ?

- *Je veux dire cette impression qu'il y a quelque chose lorsque l'on rapproche deux aimants.*

- R. Feynman : Répondez à ma question. Qu'entendez-vous lorsque vous dites qu'il y a une sensation ? Évidemment que vous le sentez. Mais que souhaitez-vous savoir ?

- *Je veux savoir ce qu'il se passe entre ces deux morceaux de matière.*

- R. Feynman : Ils se repoussent l'un l'autre.

- *D'accord, mais qu'est-ce que cela veut dire ? Ou si vous voulez, pourquoi font-ils cela ? Comment font-ils cela ? C'est que... c'est une question tout à fait légitime.*

- R. Feynman : Bien sûr que c'est une question legit... une excellente question. D'accord, euh...

Le problème vient de ce que vous me demandez. Vous voyez, quand vous demandez à quelqu'un "pourquoi cela ou cela se produit", comment vous répond-il à cette question ?

Prenons un exemple... Tante Annie est à l'hôpital.

Pourquoi ?

Parce qu'elle a glissé. Parce qu'elle a glissé sur une plaque de verglas et qu'elle

s'est cassée la hanche.

Cette réponse satisfait en général les gens. Elle les satisfait mais elle ne satisfait pas une personne qui viendrait d'une autre planète et qui ne saurait rien de nous. En effet, il pourrait demander "pourquoi lorsque l'on se brise la hanche, on se retrouve à l'hôpital ? Comment va-t-on à l'hôpital avec la hanche brisée ? Parce que... son mari s'est rendu compte qu'elle avait cassé sa hanche, appelé l'hôpital qui a envoyé quelqu'un pour l'y emmener.

Vous voyez, ce sont toutes des détails que les gens ont interprétés. Cependant, quand on explique "pourquoi", il faut se mettre dans un contexte qui permet aux choses d'être vraies.

Sinon, on n'en finit pas de demander pourquoi. Pourquoi son mari a-t-il appelé l'hôpital ? Parce que son mari s'occupe de son bien-être. Les maris ne s'intéressent pas toujours au bien-être de leur femme, parfois ils sont ivrognes et grincheux...

C'est là que devient très intéressante la compréhension du monde, et toute ses complications. Si l'on essaye de suivre toutes les directions, on va de plus en plus au fond des choses, et on part dans toutes les directions. Par exemple : pourquoi a-t-elle glissé sur le verglas ? Eh bien, je sais que ça glisse. Tout le monde sait ça, et ça ne me choque pas.

Maintenant si l'on demande "pourquoi la glace glisse-t-elle ?" ... C'est étrange quand même ! On se demande : "Comment ça marche ?" Comprenez, on peut dire soit "J'accepte votre réponse -la glace est glissante-, cela explique pourquoi" ou alors continuer en demandant "pourquoi la glace glisse-t-elle ?". Et là on s'enfoncé, parce qu'il n'y a pas beaucoup de choses aussi glissantes que la glace. Il y a bien des graisses qui rendent les choses glissantes, mais la glace est dure... Comment un solide peut-il être si glissant ?

Selon certains, c'est parce que lorsque l'on est debout sur glace, pendant un court instant la pression fait fondre la glace, et on a une sorte de flaque d'eau instantanée sur laquelle on glisse.

Pourquoi sur la glace et pas sur les autres solides ? Parce que l'eau se détend lorsqu'elle gèle, et donc la pression s'oppose à cette expansion et ce qui la fait fondre. Elle pourrait se comporter différemment : d'autres substances rétrécissent lorsqu'elles gèlent, et quand on y applique une pression elles renforcent leur état solide. Pourquoi l'eau se détend lorsqu'elle gèle alors que d'autres substances se contractent lorsqu'elles gèlent ?

Vous voyez le problème ? Je ne réponds toujours pas à la question, mais je vous montre à quel point une question du genre "pourquoi" est si délicate à répondre. Vous devez prendre conscience de ce qu'il vous est possible de comprendre, de ce qu'il vous est permis de comprendre, de ce que vous savez déjà et de ce que vous ne savez pas. Vous avez noté dans mon exemple qu'à chaque fois que vous demandez « pourquoi ? », on peut aller encore plus loin et demander par exemple "pourquoi est-elle tombée après avoir glissé ?" Là, ça a avoir avec la gravité, et ça implique les planètes et tout le tintouin, et ça n'en finit jamais ! (après coup en se rend compte que plus l'on va en profondeur, plus les choses deviennent intéressantes !)

Et quand on demande par exemple "Pourquoi deux aimants se repoussent ?", il y a de nombreux niveaux d'interprétation différents, qui dépendent de ce que

vous êtes un étudiant en physique ou une personne ordinaire qui n'y connaît rien à ces choses-là, ou très peu. Si vous est quelqu'un qui n'y connaît rien du tout, tout ce que je peux vous dire c'est que c'est la force magnétique qui les fait se repousser. Et que vous pouvez ressentir cette force. Vous trouvez que c'est très étrange parce qu'on ne ressent pas des forces similaires dans d'autres circonstances. Quand ensuite vous les retournez, ils s'attirent.

Il existe une force très similaire : la force électrique, qui est la même que la force magnétique en question, et tout aussi bizarre. Mais vous n'êtes guère choqué par le fait que quand vous mettez votre bras sur l'accoudoir de la chaise, l'accoudoir la repousse. Mais quand on y regarde de plus près, il s'agit en fait de la même force, la force électrique (pas exactement la force magnétique dans ce cas), et que ce sont les mêmes répulsions électriques qui sont à l'œuvre quand il s'agit de tenir à distance votre doigt de la chaise... c'est la force électrique, au niveau microscopique (il y a également d'autres forces impliquées, mais qui ne sont pas liées à la force électrique). Il s'avère que ces forces magnétiques et électriques avec lesquelles je veux vous expliquer ces choses-là (la répulsion) sont en fin de compte les éléments les plus fondamentaux et que l'on est forcé de s'arrêter là. Mais on peut commencer à expliquer plein d'autres choses que semblent être évidentes, que tout le monde accepte. Vous savez que vous ne pouvez pas passer votre main à travers la chaise : cela vous paraît indiscutable.

A y regarder de plus près vous vous demanderiez "POURQUOI?" vous ne pouvez pas passer votre main à travers la chaise. Pourtant cela met en jeu les mêmes forces répulsives que dans le cas des aimants. Le problème serait alors d'expliquer "pourquoi cette force se ressent à des distances plus grandes dans les aimants que d'habitude?". Cela est relié au fait que dans le fer, tous les électrons tournent dans la même direction et que cet alignement amplifie l'effet de la force, jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment importante pour que vous la ressentiez à distance.

Mais c'est une force qui est présente en permanence et qui est très courante : c'est une force élémentaire (ou presque ; je pourrais en dire un peu plus si je m'attaquais à la théorie). Sans aller dans les détails, l'existence de la répulsion magnétique (ou de l'attraction magnétique) est une des choses qu'il faut considérer comme un principe fondamental du monde.

Je ne peux pas vous expliquer cette attraction avec des concepts qui vous serait plus familier. Par exemple, je pourrais vous dire les aimants s'attirent comme s'ils étaient reliés par un élastique, mais ça sentirait l'arnaque, parce qu'ils ne se comportent pas comme des élastiques. Je serais dans le pétrin : vous me demanderiez tôt au tard de quoi est fait l'élastique. Puis, si vous êtes plus curieux encore, vous me demanderiez "pourquoi les élastiques se rétractent-ils?". Je me retrouverais à devoir vous l'expliquer en terme de forces électriques, qui sont précisément ce que veux vous expliquer avec les élastiques : je vous aurais pris pour un idiot. Par conséquent je ne peux vous répondre à la question "pourquoi les aimants s'attirent-ils", si ce n'est que de vous dire qu'ils le font, et que c'est un des éléments fondamentaux de la Nature, auquel s'ajoutent d'autres forces : il y a les forces électriques, les forces magnétiques et quelques autres.

Si vous étiez étudiant, je pourrais m'étendre un peu et vous dire que les forces magnétiques sont intimement reliées aux forces électriques, que la rela-

tion entre la force gravitationnelle et la force électrique n'est toujours pas établi, et ainsi de suite. Mais je ne peux malheureusement pas faire les choses correctement en vous expliquant les forces magnétiques en fonction de choses qui vous sont plus familières, parce que je ne les comprends pas moi-même en termes de choses qui vous seraient plus familières.

7 Voir les choses

Quand je suis au bord d'une piscine et que quelqu'un plonge dedans (et que cette personne n'est pas trop jolie, pour que je puisse s'intéresser à autre chose !), il m'arrive de réfléchir aux aux vagues qui se forment à la surface de l'eau et aux innombrables qui sont là quand beaucoup de monde y plonge et je me dis qu'il y a peut-être là le moyen d'appréhender ce qui se passe dans la piscine.

Un insecte ou une quelconque autre bestiole suffisamment dotée de sens se trouve en un coin de la piscine, toute remuée par les vagues. En étudiant la nature des irrégularités de l'eau, elle pourrait finir par déterminer qui a sauté çà et là, et à quel moment, comprendre tout ce qui se passe dans la piscine. Et c'est que l'on fait lorsque l'on regarde quelque chose avec nos yeux.

La lumière qui émane des objets est une onde, un peu comme dans la piscine, sauf qu'elle a trois dimensions au lieu de seulement deux, et que nous avons deux petits trous de 5 millimètres dans laquelle elle peut échouer ; ces trous ne sont particulièrement sensible qu'à une partie des ondes arrivant dans des directions particulières (ils ne sont pas très sensibles quand elles viennent de la mauvaise direction ; c'est ce que l'on appelle la vision périphérique). Et quand on veut avoir plus d'information sur ces directions, on bouge nos globes oculaires dans la cavité dans laquelle ils logent. C'est vraiment extraordinaire que nous puissions déterminer si facilement d'où viennent ces ondes lumineuses (c'est facile, parce que les ondes lumineuses sont simples ; les ondes dans l'eau sont un petit peu plus compliquées : cela serait plus difficile pour un insecte que pour nous, mais le principe est le même : déterminer ce que sont les choses revient à les regarder à distance).

Et c'est quelque chose d'incroyable, parce que quand je vous regarde, quelqu'un à ma gauche peut voir les ondes de quelqu'un situé à ma droite et que le reste de lumière peut croiser ces ondes sans encombres. Les ondes constituent une sorte de réseau. On peut les imaginer comme des flèches qui s'entrecroisent, mais ce n'est pas comme ça que cela se passe, parce que tout ça ce n'est que quelque chose qui vibration (de ce que l'on appelle le champ électrique, mais on s'en fout de savoir ce que c'est !). C'est tout comme le niveau de l'eau qui va de bas en haut. Des valeurs qui oscillent, et l'ensemble de ces mouvements est très compliquée mais au final j'arrive quand même à vous voir. Elles ne sont aucunement perturbée les autres oscillations qui représentent la personne qui vous regarde de l'autre côté. Et tout ça forme un merdier pas possible d'ondes, en chaque point de l'espace, tandis que les ondes se réfléchissent dans la pièce, allant d'un endroit à une autre, parce que bien sûr la pièce n'a pas de petits trous de 5 millimètres : elle s'en fout de la lumière, mais la lumière est bien là quoiqu'il arrive : elle rebondit dessus, elle rebondit là-bas, et ainsi de suite, et on arrive pourtant à faire le tri avec ça (Feynman montre son œil). Les vagues dans l'eau peuvent être petites ou grandes, courtes ou longues, et peut-être

que l'animal qui les étudie ne s'intéresse qu'aux vagues d'une certaine taille ; il s'avère que l'œil ne perçoit en fait que les vagues de taille comprise entre telle et telle longueur, sauf que ces deux longueurs ont une taille de l'ordre d'un d'un millième de millimètre.

Les vagues les plus longues sont celles qui transportent la chaleur. On les ressent, mais nos yeux ne s'y sont guère sensibles : on ne les voit pas pour ainsi dire. Les ondes les plus courtes sont celles qui nous apparaissent bleues, celles un peu plus longues apparaissent rouges, mais quand elles sont encore plus longues, on les appelle infrarouge. Ces dernières arrivent en même temps : c'est la chaleur.

Les crotales, des serpents que l'on trouve dans le désert, ont un tout petit appendice qui leur permet de voir ces grandes longueurs d'onde et d'attraper des souris, qui malheureusement pour elles des ondes dans ces grandes longueurs d'onde (car leurs corps chauffent), et c'est pour cela que les crotales arrivent à les voir avec ces sortes d'yeux. Mais nous, humains, ne sommes pas capables de voir ces ondes.

Les ondes peuvent être de plus en plus longues (gardez à l'esprit que tout se produit dans tout l'espace et en même temps) et elles ne transportent pas seulement la vision que j'ai de vous, mais également les informations que mon cerveau émet en ce moment, ainsi que des ondes de quelqu'un qui se situerait au Pérou ! Les ondes radio sont également de ce genre, mais avec des longueurs d'onde encore plus grande. Il y a également les ondes radar, émises par les avions pour scruter ce qu'il se passe au sol, qui arrivent dans la pièce au même instant. Sans compter les rayons X, les rayons cosmiques et toutes sortes d'autres ondes du même genre, EXACTEMENT du même genre, mais plus courtes, plus rapides ou plus longues, plus courtes. Elles sont exactement similaires.

Ainsi donc ces ondes, ce mouvement irrégulier du champ électrique, ces vibrations, contiennent un extraordinaire amas d'information. Ce n'est pas du bluff !

Je sens que cela vous surprend !

Si vous ne me croyez pas, prenez fil métallique et attachez-le à une boîte – une radio. Dans ce fil, les électrons sont secoués d'avant en arrière par des champs électriques, remuant juste à la bonne vitesse, à une certaine longueur d'onde. Et tournez le bouton sur la boîte pour que d'autres secousses soient à la bonne fréquence, et... vous entendez Radio Moscou ! Et vous serez bien obligés de constater qu'ils flottaient déjà dans les airs ! Sinon, comment feraient-ils pour venir jusqu'à vous ? Ils étaient déjà là tout ce temps. Ce n'est que quand vous allumez la radio que vous vous en rendez compte. Mais ils étaient déjà présents dans la pièce pendant que je vous parlais.

Tout le monde sait cela, mais il aura fallu s'y arrêter un moment pour y réfléchir, pour vraiment profiter du plaisir de la complexité, de l'inconcevable nature de la Nature.

8 L'immensité des nombres

Quand nous discutons à propos des atomes, un des problèmes auquel on fait face est qu'ils sont si petits que l'on a vraiment du mal à les imaginer. La taille d'un atome rapportée à la taille d'une pomme est dans la même mesure que

la taille d'une pomme rapportée à la taille de la terre. C'est une chose délicate à appréhender, et les gens qui considèrent ces nombres les trouvent inconcevables, moi y compris. Tout ce que l'on peut faire, c'est de changer l'échelle et imaginer les atomes comme des petites boules, sans jamais vraiment réaliser à quel point elles sont petites. Un peu dingue, non ?

Mais en astronomie, les échelles sont inversées ! Parce que la distance entre les étoiles est tellement gigantesque. On sait que la lumière va très très vite, et qu'il ne lui faut que quelques secondes pour effectuer un aller-retour de la terre à la lune, ou encore à peine plus d'un septième de seconde pour faire le tour de la terre.

Mais il lui faut... un an ?

Non !

Deux ans ?

Non !

Trois ans avant qu'elle n'atteigne l'étoile la plus proche de nous ! Mais toutes les étoiles que nous voyons sont situées dans des grand amas d'étoiles que l'on appelle des galaxies. Mais notre galaxie fait déjà des centaines de milliers d'années lumières. Au delà, il y a encore des ensembles d'étoiles. Il faut des millions d'années à la lumière pour s'y rendre, même à cette vitesse phénoménale. Et ça rendrait cinglé de vouloir toujours trop coller à ces distances. On doit tout faire en proportion. Il est facile, par exemple, d'imaginer qu'une galaxie est un amas d'étoile et qu'il y en a un autre à une distance de dix fois la taille de la galaxie. On arrive bien se représenter la chose. Mais il faut pour cela changer les échelles. Il arrive quand même que l'on doive en revenir aux dimensions terrestres pour parler de celles des galaxies. Mais ça devient fastidieux.

On ne voit qu'environ cinq mille étoiles la nuit à l'œil nu. Mais le nombre d'étoiles dans notre galaxie est bien plus grand, d'après ce que nous montrent les observations à l'aide de télescopes - regardez les étoiles, regardez la galaxie, toute cette lumière que l'on voit, ce tout petit point, provient des étoiles après avoir parcouru des distances phénoménales (trois années-lumière pour l'étoile la plus proche). La lumière qui vient de ces étoiles diminue au fur et à mesure du voyage, car le front d'onde devient de plus en plus grand, de plus en plus faible, à travers tout l'espace pour que finalement une minuscule portion vienne s'abattre sur un trou de quelques millimètres et nous permette de ressentir fait quelque chose qui nous fait savoir qu'elle existe ! Vous savez certainement, il vaut mieux concentrer une plus grande quantité du front d'onde ; c'est là tout l'intérêt des télescopes qui sont des sortes d'entonnoirs à lumière.

La lumière qui vient sur une grande surface (5 mètres de diamètre) est très soigneusement traitée de manière à être concentrée sur notre pupille. En réalité, il vaut mieux la photographier, et de nos jours utiliser les capteurs électroniques ont des performances encore meilleures, mais qu'importe : le principe d'un télescope c'est de concentrer la lumière sur une petite surface à partir d'une plus grande, pour que l'on puisse distinguer des objets moins lumineux, et c'est comme ça que l'on arrive à constater qu'il y a un si grand nombre d'étoiles dans la galaxie. Il y en a tellement que si l'on essayait de nommer, à raison d'une par seconde, toutes les étoiles de notre galaxie (il y a des milliards d'étoiles dans l'univers, on ne parle ici que des étoiles de notre galaxie), cela prendrait trois mille ans ! Et ce n'est pourtant pas un très grand nombre ! Parce que si ces étoiles

devaient pouvoir déposer un billet d'un dollar à la surface de la terre (un dollar par an pour chaque étoile), elle pourrait seulement réduire le déficit du budget américain !¹

Vous vous représentez les nombres desquels on parle ! Et bien que ces nombres posent problèmes, en astronomie on considère que la taille n'est qu'un nombre et que la meilleure chose à faire est de ne pas trop se prendre le chou et de les apprécier !

Que notre taille est ridicule par rapport à celle du reste de l'univers ! Bien entendu, si vous déprime d'être si petit, vous pouvez vous placer dans le rapport inverse et apprécier à quel point vous êtes grands par rapport aux atomes et à leurs différentes parties. Vous êtes pile au milieu et vous pouvez admirer les deux points de vue !

Mais le meilleur dans l'astronomie, c'est les trésors d'imagination qu'il vous faut déployer pour rêver de quels genres de structures, de quels types de phénomènes se déroulent pour produire de la lumière et les effets lumineux des étoiles que l'on observe.

Je vais vous donner un exemple : souvent dans l'histoire des sciences, en utilisant son imagination on en vient à imaginer des choses qui finissent par s'accorder à toutes les connaissances et à toutes les lois. Et c'est très intéressant de voir qu'il y a de l'imagination créatrice (on peut appeler ça imagination, il ne s'agit pas seulement d'imaginer des choses faciles, il y a pas mal de boulot derrière !).

On peut prendre l'exemple d'une étoile, que l'on peut se l'imaginer comme un soleil, ne formant qu'une grosse boule de d'hydrogène (elle brûle l'hydrogène, et ainsi de suite). C'est une énorme masse de gaz qui est maintenue par la gravité (on n'a pas toujours besoin de voir la gravité comme une courbure de l'espace-temps ; on peut dans le cas présent la représenter comme une force fonction du carré inverse de la distance). Quand les objets sont proches, la force est d'autant plus forte. Et elle attire tout ce qui l'entoure.

C'est pour ça que la terre est ronde : parce que la matière terrestre est compactée autant que possible. Si nous avions une très très grande montagne, elle serait tirée par la gravité et deviendrait plus lisse.

Les roches et les pierres sont des aspérités qui ne sont pas plus hautes que quelques kilomètres, et les montagnes sont les aspérités les plus importantes. Mais sur la lune, où la gravité est plus faible, les aspérités sont plus importantes : les montagnes sont plus hautes sur la lune. Peu importe, pour en revenir à notre étoile, elle se maintient par l'action de la gravité, et elle contient un combustible nucléaire, qui n'est autre que l'hydrogène dont l'embrasement produit l'énergie qui lui permet de se maintenir. Après quelque temps, la quantité de combustible se réduit : les scientifiques essaient de comprendre ce qu'il se produit ensuite. Et il est probable qu'il ne restera plus que du gaz, inerte, toujours maintenu par la gravité. Mais il y a une autre possibilité : si je comprime encore l'étoile... la gravité sera encore plus forte ! Restera-t-elle encore compacte ? Parce que si on la comprime encore un peu, la pression aura tendance à augmenter (quand on comprime un gaz, il y a de plus en plus d'atomes qui s'entrechoquent, donc la pression augmente, mais la gravité devient plus forte : l'étoile se comprime à

1. "There are 10^{11} stars in the galaxy. That used to be a huge number. But it's only a hundred billion. It's less than the national deficit! We used to call them astronomical numbers. Now we should call them economical numbers." R.P Feynman

nouveau puis détend encore une fois. Si vous comprimez une étoile comme cela (Feynman montre une oscillation), elle oscille : il y a des étoiles dont la taille oscille) Mais si l'on continue l'analyse et que l'on comprime toujours plus, jusqu'à que tout soit extraordinairement concentré, toute la masse du soleil sera réduite à taille plus petite que celle de la terre ; et alors toute la matière nucléaire, tous les noyaux des atomes seront collés les uns aux autres. Ils seront extraordinairement compacts si bien que tout l'espace dévolu aux électrons deviendra quasiment nul ; quand on en arrive à ce stade, la gravité est suffisamment forte pour à nouveau vaincre la pression ; bien qu'elle soit devenue gigantesque, la gravité est encore plus phénoménale, et l'amas gardera cette taille et ne sera formée de rien d'autre que de neutrons, de la matière nucléaire ; cette possibilité a été étudiée par Oppenheimer et Volkov : c'est ce que l'on appelle une étoile à neutrons.

Les gens ont attendu durant des années de voir si l'on arrivait à observer de telles étoiles à neutrons, jusqu'à ce qu'un jour on découvre les pulsars, qui émettent des flashes d'ondes radio (on trouva plus tard de la lumière également) à un rythme de trente par seconde (pour les plus rapides), parfois dix par seconde, voir un par seconde. Au premier abord, cela semblait mystérieux : on était habitué à ce que les étoiles soient grosses et lentes... Comment quelque chose comme une étoile pourrait bouger en un trentième de seconde ? En fait, ces choses sont de toutes petites étoiles à neutron et tournent très rapidement sur elles-mêmes. Pour des raisons encore inconnues, elles émettent un faisceau d'onde radio, un peu comme un phare, qui fait « bip bip bip » si bien que l'on reçoit des flashes « tick tick tick », à un rythme effréné. Imaginez une étoile de la masse du soleil faire pareil, tourner aussi vite (un trentième de seconde) - encore un autre grand nombre, dur à concevoir, presque imaginaire - et on en arrive à l'idée qu'il puisse y avoir une étoile d'une densité si terrifiante qu'un seule cuillère à café de sa matière pèserait si lourd que si nous la ramenions sur terre, elle plongerait droit vers le centre de la terre à cause de la gravité !

Et pour concevoir ces choses-là, il a fallu beaucoup d'imagination : elles proviennent des mathématiques, et l'analyse permet de s'assurer que l'on ne commet pas d'erreur : il apparut sur le papier que de telles étoiles pouvaient exister, et on vit plus tard que de telles étoiles existaient réellement. C'est là un bon exemple d'où combien l'imagination peut-être féconde et comment elle amène sans cesse de nouvelles questions auxquelles vous pourrez répondre en y ayant recours. De plus, l'un des choses les plus difficiles avec l'imagination, c'est d'imaginer ce qui pourrait être là afin d'expliquer des choses que l'on observe. Et dans le cas de l'astronomie, il reste encore un grand nombre de choses que nous voyons et pour lesquelles nous n'avons pas encore eu assez d'imagination pour les expliquer.

Les quasars sont de très puissantes sources de lumière et d'ondes radios à très grande distance, et c'est justement parce qu'elles sont si brillantes que nous les voyons. L'explication de ces sources est progressivement comprise, à l'aide d'un autre concept saisissant issu de l'imagination des scientifiques : le trou noir, concept auquel on a abouti en poursuivant à fond la logique de la gravité d'Einstein et en étudiant les conséquences dans les cas les plus extrêmes. Supposons que l'on ait un grand amas de matière, entraînant une force de gravité tellement énorme que lorsque de la lumière essaie de s'en échapper, elle retombe dessus. Rien ne peut aller plus vite que la lumière et donc rien ne peut s'échapper. Vous

ne pouvez donc pas le voir ! Comment en arriver là ? Si vous avez un grand amas de matière, il peut s'effondrer et atteindre cet état dans lequel plus aucune lumière n'en ressort. Ainsi, on arrive à quelque chose qui continue d'attirer les autres astres, qui seront happés et n'en ressortiront jamais. C'est pour cela que l'on appelle cet objet un trou noir.

Et vous vous demandez comment un trou noir, qui absorbe tout, peut-il être à l'origine de cette énergie que l'on détecte ? Est-ce une explication aux quasars ? En fait... ce pourrait bien être le cas. Parce que si les choses qui tombent dedans n'y vont pas directement mais en tournant, formant une sorte de spirale, alors cette chute rapide irrégulière produit un tourbillon qui génère énergie immense et de frictions aussi intenses... et pleins d'effet magnétiques et électriques pourraient former des jets de matières comme ceux qu'émettent les quasars et les galaxies radios par des processus qui ne sont pas encore bien établis. Nous ne comprenons pas encore pourquoi il y a des jets de matière émettant des ondes radio. Dans les galaxies (il y a des galaxies qui génèrent de grands jets de matières émettent des ondes radios. Mais nous parlons d'autres sources ici). C'est comme si on les branchait et qu'ils expulsaient ces jets de matière avec une force colossale.

Et l'on s'imagine qu'il se pourrait qu'il s'agisse d'un trou noir, d'une façon ou d'une autre, et il s'agit là d'un défi à l'imagination, et l'on ne connaît pas encore la réponse : personne ne la connaît avec une certitude suffisante.

9 Et encore plus grande encore est l'électricité !

Fantasmer en regardant le monde, essayer d'imaginer le monde tel qu'il est peut être utile en certaines circonstances.

L'autre jour, j'étais chez le dentiste ; il s'apprêtait à me faire des trous dans les dents avec sa fraiseuse, et je me suis dit que j'avais intérêt à rapidement penser à quelque chose d'autre, sinon j'allais déguster. Alors je me suis mis à considérer le petit moteur qui tournait au sein de sa fraiseuse, et je me suis demandé : "qu'est-ce qui le fait tourner ?" Et : "que se passe-t-il ?".

Ce qu'il se passe, c'est qu'il y a un barrage à l'autre bout de la ville qui fait tourner une roue (une très grosse roue) et que cette roue est connectée à un long morceau de cuivre, qui se sépare en d'autres morceaux de cuivre, et se sépare encore et encore tout en s'étendant à travers la ville et qu'il est finalement connecté à un autre instrument et finit par faire tourner la fraise. Et toutes les autres roues de la ville tournent parce que la roue du barrage tourne.

Si la grosse roue s'arrête, toutes les autres roues s'arrêtent.

Si elle redémarre, toutes redémarrent.

Et je vois là une nouvelle merveille de la nature. C'est un phénomène extrêmement curieux.

J'aime à y repenser souvent car, après tout, ce n'est que de du fer et du cuivre. Tenez, parfois l'on pense qu'il s'agit d'un générateur très compliqué fabriqué par l'homme, et que le phénomène que l'on observe au final est le résultat de quelque chose de très élaboré que l'on a mis en œuvre. Mais c'est en fait la nature qui en est la cause, et il ne s'agit que de fer et de cuivre ; si l'on prend une longue boucle de cuivre et que l'on y ajoute du fer à chaque extrémité, l'autre

morceau de fer bouge. Et si l'on ramène tout à ce niveau, on se rend compte que l'on ne fait que bouger un morceau de fer dans une boucle de cuivre et que l'on voit l'autre morceau de fer bouger : on voit de quels fantastiques mystères la nature recèle ! Et encore, on n'a pas besoin de fer : les pompes démarrent en faisant s'agiter des morceaux de cuivre pour qu'ils s'entrechoquent rapidement, et les morceaux de cuivre s'agitent à l'autre extrémité, à grande distance. De quoi s'agit-il ? Seulement de cuivre et de mouvement !

Nous sommes tellement habitués aux cas où les phénomènes électriques s'annulent deux à deux. Tout est neutre en quelque sorte : tout s'attire et de repousse, ce qui est un peut idiot. Mais la Nature recèle un bijou.

Les forces magnétiques et électriques lorsque l'on se peigne les cheveux. Quand vous vous peignez les cheveux, il y a ce phénomène bizarre : si vous placez le peigne à proximité d'un morceau de papier, il se soulève à distance, même relativement grande. C'est quelque chose de plus profond que ce à quoi nous sommes habitués. Nous avons l'habitude de voir des forces qui agissent directement : la lampe, vous appuyez sur l'interrupteur avec votre doigt, qui agit directement. Mais il faut tenter d'imaginer ce qu'il se passe réellement lorsque l'on appuie sur l'interrupteur. Ce doigt est fait de petites boules d'atomes. Et il y a un autre paquet d'atomes qui appuient dessus. Sur ce petit espace entre les atomes. Et cette pression se propage à travers l'espace. Et si cela se produit entre le peigne et le papier, c'est parce que l'on est dans des circonstances dans lesquelles il est possible de voir ces forces agir à une distance bien plus grande que la distance qui sépare les électrons. Ce qu'il se passe, c'est que peigne et le papier comportent des charges (comme les électrons) similaires qui se repoussent les unes les autres avec une certaine force.

Les électrons sont de très petits composants d'un atome qui se repoussent avec une force énorme (qui est inverse de la distance au carré, tout comme la gravité ; cependant la gravité est toujours attractive, tandis que celle-ci est répulsive. Par ailleurs, la gravité est très faible par rapport à l'électricité : l'électricité tellement plus intense que je ne peux l'exprimer, parce que je ne connais pas le nom des nombres en présence : il y a entre les deux un facteur avec un 1 et 38 ou 40 zéros derrière : 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

C'est tellement énorme que si j'étais constitué seulement d'électrons... enfin bref, le nombre est vraiment gigantesque) En revanche, pour ce qui est de l'électricité, il y a des charges opposées, les charges positives, comme les protons qui sont à l'intérieur du noyau des atomes et qui attirent les électrons. Les charges opposées s'attirent, les charges identiques se repoussent. Il faut donc s'imaginer des forces immenses, où les semblables se repoussent et les opposés s'attirent. Que se passe-t-il si l'on a un grand nombre d'entre eux ? Toutes les charges de même signe s'assemblent aux charges opposées, elles s'attirent, et on se retrouve avec un mélange de charges positives et de charges négatives intimement enchevêtrés. Nous n'aurions nulle part d'ensemble de charges négatives, parce qu'ils se repoussent entre elles.

Elles sont toutes compensées par des charges négatives très proches, et l'on obtient des coquilles de formées de charges positives et négatives. La raison pour laquelle ces coquilles ne deviennent pas infiniment petites (les charges ne s'attirent que jusqu'à un certain point) est qu'elles sont formées de particules et que

des effets de mécanique quantique (que nous n'évoquerons pas ici) empêchent les phénomènes d'attraction à une certaine échelle. On se retrouve donc avec ces amas qui forment des boules que l'on appelle atomes. Les atomes sont constitués de charges positives et négatives qui se neutralisent, qui annulent leurs charges autant que possible. Et c'est justement parce que ces forces intimes sont si grandes qu'elles ne mènent à pratiquement aucune charge globale. C'est parce qu'elles sont si grandes qu'il y a toujours exactement le même nombre de charges plus et moins dans tous les matériaux classiques.

On peut dès lors se prendre à imaginer ce mélange d'opposés qui s'attirent si fortement que tous s'annulent et que ce n'est que parfois, quand on est face un léger excès d'une espèce ou d'une autre que l'on observe cette MYSTÉRIEUSE force électrique. Et je les c'est comme ça que je les imagine : des forces immenses et à longue distance qui s'annulent.

Et ce sont en fait les forces électriques et magnétiques qu'il faut accepter comme éléments de base la réalité, grâce auxquels nous pouvons expliquer tout le reste. Une fois de plus, il s'avère que qu'on a du mal à bien l'imaginer.

Il en faut de l'imagination pour considérer que le monde tel qu'on l'observe est régi par une force qui agit à longue distance, qu'il n'y a que peu d'expériences sensibles qui ne font intervenir des forces (sauf quelques phénomènes très particuliers) et que c'est justement ce qui requiert de l'imagination : nous n'avons pas de bonnes images pour les considérer ces forces à distance. Dans l'exemple du générateur, ce qu'il se passe est que les électrons, ces morceaux d'atomes, sont poussés par le mouvement des fils de cuivre et que, c'est là merveilleux, si l'on en pousse un légèrement quelque part, les autres se retrouvent trop proches et se repoussent, cette répulsion se propage de proche en proche sur de grandes distances : ce n'est pas comme l'eau qui se repousse seulement sur contact, mais comme un fluide fantastique qui se repousse à grande distance et dont le mouvement se propage très rapidement à travers le câble : une petite quantité fait ZIINNNGG ! à dans le câble à travers toute la ville en une seule fois. Et l'on peut utiliser ces effets pour créer des signaux : on peut par exemple pousser quelques électrons par-ci en parlant dans le combiné du téléphone, et à l'autre bout de la ligne (un long câble qui parcourt la ville), les électrons répondent grâce à cette rapide interaction sur des longues distances à ce que vous venez de dire dans cette pièce. Certains ont découvert expérimentalement ces forces à longue distance et se sont rendu compte que cela pouvait être très utile pour les humains.

Je pense que la découverte de l'électricité, du magnétisme et des effets électromagnétiques que nous avons finis par comprendre (les équations qui les gouvernent ont été établies par Maxwell en 1873) est certainement la transformation la plus fondamentale, la plus remarquable de toute l'histoire

10 Les façons de penser

Vous me demandez si une personne ordinaire, en y mettant du sien, pourrait devenir capable d'imaginer ces choses, comme moi-même je les imagine. Bien sûr ! Je suis une personne quelqu'un ordinairement, et j'ai beaucoup étu-

dié pour en arriver là ! Il n'y a pas de personnes miraculeusement géniales. Il s'avère quelles se sont intéressées à ces choses-là et qu'elles les ont apprises. Ce sont des personnes normales. Il n'y a pas de talent spécial permettant de comprendre la mécanique quantique, ou de capacités particulières permettant d'imaginer les champs électromagnétiques et qui viendrait sans pratiquer, sans lire, sans apprendre et sans étudier. Si vous prenez une personne ordinaire qui souhaite passer le plus clair de son temps à étudier et travailler et penser en termes mathématiques, alors elle deviendra un scientifique.

Quand je fais mes propres recherches sur les choses profondes ou ésotériques qui m'intéressent, je ne pense pas que je saurai bien décrire comment cela se présente à moi. En fait... c'est un peu comme le problème de l'œuf et la poule, qui vient en premier ? Cela vient d'un coup, et je ne sais quels flashes m'illuminent l'esprit. Mais je peux vous dire que c'est une sorte l'étranger mélange d'équations partielles, de résolutions partielles d'équations, pour ensuite aboutir à une sorte d'image de ce qu'il se passe en fonction à ce que l'équation semble dire qu'il se passe, mais tout n'est pas très clair (pas plus que les mots que j'utilise !) et, ça peut paraître bête, mais c'est très difficile à décrire, et je ne sais même pas si c'est bien utile de le décrire. Il y a cette chose, très curieuse, qui m'a frappée... Je pense que ce qu'il se passe dans le cerveau de chaque personne est très différent. Des images, ou semi-images nous viennent, et lorsque l'on discute avec d'autres à haut niveau, on a l'impression que l'on s'exprime très clairement, que l'on communique, mais ce que l'on fait au final, c'est une sorte de traduction, pour transformer ce qu'un collègue nous dit en nos propres images, qui peuvent être très différentes. Je m'en suis rendu compte parce que même au niveau le plus basique... (je n'entrerai pas dans les détails, mais cela m'a beaucoup intéressé un temps).

Bref, je tentai une expérience avec laquelle j'essayais de comprendre notre perception du temps. Ce que je faisais, c'était de compter une minute. En fait, je comptais jusqu'à 48 pour que cela fasse une minute ; alors je me calibrai je mesurai une minute en 48 tics, et j'en arrivais suffisamment près. Il s'avéra que si je répétais cet exercice, j'arrivais à être très précis : lorsque je comptais à 48 ou 47, ou 49, ou par là, cela faisait une minute.

Puis j'essayai de déterminer ce qui pouvait affecter ma perception du temps, pour voir si j'étais capable de faire autre chose pendant que je comptais. Je découvris que je pouvais faire plein de choses : je pouvais (je cherche pas trop stupide...). Par exemple, je répugnais à faire mes lessive, donc je faisais un liste du nombre de chaussettes (il devait y en avoir 6 ou 8), et je n'arrivais pas à les compter, parce que ma machine à compter était en cours d'utilisation, jusqu'à ce que je me rende compte que si je les organisais selon une disposition particulière, un motif, j'arrivais à en retrouver le nombre. Et j'appris là une manière, après un peu de pratique, de compter le nombre de lignes dans une colonne de journal, en les regroupant par groupes - trois, trois, trois, un : ça en fait dix- sans nommer ce nombre : c'est du groupage. Je pouvais par conséquent compter le nombre de lignes en même temps que je comptais intérieurement les secondes : j'arrivais enfin à faire ce tour de magie que de dire : "quarante-huit, ça fait une minute et, regardez ! Il y a soixante-sept lignes !"

C'était merveilleux ! Et je découvris plein d'autres choses que je pouvais lire pendant que... non, pardon, oui : je pouvais parfaitement lire pendant que je

comptais et comprendre de ce dont ça parlais. Mais j'étais parfaitement incapable de parler en même temps. Parce que bien sûr j'essayais de me parler à moi-même, je me disais "un, deux, trois" ou quelque chose comme ça dans ma tête.

Je me suis rendu à un petit-déjeuner où se trouvait John Tukey, qui était mathématicien à Princeton au pendant la même période, et nous avons de nombreuses conversations. Je lui parlais de mes expériences et de ce que je parvenais à faire. Et il me répondit : "c'est absurde !"

et me dit : "je ne vois pas pourquoi tu as du mal à parler en même temps, et je n'arrive pas à croire que tu arrive à lire en même temps". Je ne le croyais pas et pour se mettre accordée, nous l'avons calibré (il lui fallait compter jusqu'à 62 pour soixante secondes, ou un truc comme ça ; je ne me souviens plus des chiffres !), puis il me dit « Allons-y ! Que veux-tu que je dise ? "Au clair de la lune, mon ami pierrot", j'arrive à dire ce que tu veux, bla bla bla, ... 62 ! ça fait une minute !" C'était donc vrai, et moi j'en étais incapable ! A son tour, il voulait que je lise, car il ne me croyait pas. Et nous avons comparé nos notes ; il s'avéra que quand il comptait, ce qui se passait à l'intérieur de sa tête, c'était qu'il voyait un ruban avec des numéros qui faisaient "click, click, click", et que quand le numéro changeait, il le voyait. C'était donc une sorte de système optique qu'il utilisait, et non vocal.

Il pouvait parler autant qu'il voulait, mais quand il devait lire en même temps, il n'arrivait plus à voir son horloge ! Tandis que j'avais moi le problème inverse.

C'est comme ça que j'ai compris, au moins dans le cas de la simple opération de comptage, la grande différence qu'il y a entre ce qu'il se passe dans la tête des gens quand ils font la même chose. Et ça m'a d'autant plus étonné que cela est vrai même au niveau de plus basique.

Que lorsque l'on apprend les mathématiques et les fonctions de Bessel, et l'exponentielle et les champs électriques et tout le reste, l'imagerie et les méthodes par lesquelles on les retient et on les utilise peuvent être, si l'on change de cerveau, complètement différentes. Et il apparaît que, quand quelqu'un éprouve de grandes difficultés à comprendre une notion que l'on trouve évidente, et réciproquement, c'est seulement parce que c'est un peu plus difficile de traduire ce que l'autre vient de dire et de l'adapter à son propre imaginaire, et je sais que je ne peux rien y faire !

Supposons que les choses petites se comportent différemment de celles qui sont grandes. De toutes les choses auxquelles vous êtes habitués, parce que vous, animal, vous évoluez, et ainsi de suite, et le cerveau évolue et s'habitue à manipuler des choses en s'adaptant aux circonstances ordinaires. Mais si les particules étaient gouvernées par d'autres règles ou par une autre nature, elles se comporteraient différemment de tout ce qui se passe à grande échelle, et on aurait de grosses difficultés à les comprendre et à imaginer la réalité. Et ces difficultés, c'est celles auxquelles nous devons et nous faisons face. Le comportement des choses à petite échelle est si fantastique ! Si merveilleusement différent ! Si différent de tout comportement à grande échelle. Vous pouvez dire : "les électrons se comportent comme des vagues".

Non, pas exactement !

"Ils se comportent comme des particules"

Non, pas exactement !

"Ils se comportent comme un brouillard autour d'un noyau"

Non, pas exactement !

Et si l'on veut se faire une image claire et précise d'un animal, de façon à pouvoir dire exactement comment il se comporte, eh bien je ne saurais pas comment faire. Parce que cette image doit être mathématique : nous avons des expressions mathématiques, des mathématiques étranges que je ne comprends pas vraiment mais qui nous permettent de décrire avec des expressions mathématiques le comportement de l'objet, sans pour autant être capable de se le représenter. C'est un peu comme un ordinateur dans lequel vous introduiriez des nombres et que vous lui donniez une formule calculant l'heure d'arrivée telle voiture : cet ordinateur saura faire l'arithmétique pour vous dire où et à quelle heure la voiture arrivera. Mais que vous n'arriviez pas à imaginer la voiture. L'ordinateur ne sait faire que l'arithmétique.

Et nous savons comment faire les calculs, mais nous n'arrivons à nous figurer la voiture. Ce n'est pas tout à fait vrai, car dans certaines approximations, certaines images approchées font l'affaire : que ce ne soit qu'un nuage autour du noyau qui vous repousse quand vous le touchez (c'est suffisant pour comprendre la raideur de certains matériaux). Que ce ne soit qu'une onde qui fait ça et ça vous permet d'appréhender d'autres phénomènes. Quand vous étudiez certains aspects particuliers du comportement des atomes, comme par exemple lorsque je parlais de la température, l'idée que ce sont des petites boules est suffisamment bonne pour avoir une bonne image de ce qu'est la température, mais si vous me posez des questions plus spécifiques comme "Comment se fait-il que lorsque l'hélium se refroidit, jusqu'au zéro absolu où il ne devrait y avoir aucun mouvement, il constitue un fluide parfait qui ne rencontre aucune résistance et coule parfaitement, sans jamais se solidifier ?" Eh bien si vous voulez une image d'un atome qui fasse out ça à la fois, je ne peux vous aider. Mais je peux vous expliquer pourquoi l'hélium se refroidit ainsi, en prenant mes équations et en montrant quelles prédisent que l'hélium doit se comporter comme les observations le montre.

Nous savons que la théorie est juste, mais nous n'avons pas d'image qui aillent avec la théorie. Et c'est peut-être parce que nous n'avons pas encore trouvé la bonne image, ou simplement parce qu'il n'y a pas de bonne image, parce que les images ne sont que des transpositions de ce à quoi nous sommes habitués.

Justement, supposons que c'est cette dernière raison, qu'il n'y a aucune image issue de ce qui nous est familier. Est-il possible de s'habituer à des choses auxquelles nous ne sommes pas familier de prime abord, en étudiant, en apprenant les propriétés des atomes et de la mécanique quantique, en pratiquant les équations, jusqu'à ce qu'elles deviennent une seconde nature, tout comme cela peut nous paraître normal que quand de balles se cognent l'une l'autre, elles se désintègrent. Vous ne vous dites pas : "lorsque les deux balles se rencontrent, elles deviennent bleues". Vous savez ce qu'elles font. La question est alors de savoir s'il est possible de savoir ce que vont faire les choses sans les calculer, mieux qu'aujourd'hui.

Au fur et à mesure des générations, peut-être inventeront-elles de nouvelles façons d'enseigner les choses de telle manière à ce que les nouveaux élèves comprennent directement les choses en les visualisant, et qu'elles y seront tellement habitués qu'il n'auront plus de problème à s'imaginer un atome.

Il y a encore une école de pensée qui ne peut admettre que les comportements au niveau atomique soient si différents de ceux à grande échelle. Je pense qu'il s'agit là d'un gros préjugé, que c'est un préjugé qui tient à notre expérience des grandes échelles. Les scientifiques de cette école continuent de chercher des données découvertes sous-tendant la mécanique quantique, selon lesquelles il y aurait de banales boules se heurtant ou des particules se mouvant, et ainsi de suite, et je pense qu'ils seront tenus en échec. Je pense que l'imagination de la Nature est tellement plus grande que celle de l'homme, et qu'elle ne nous laissera jamais nous reposer !