

COLLECTION

BULLES DE SCIENCES



FRANK CLOSE

Traduit de l'anglais par Yves Sacquin

Qu'est-ce que le vide ?



Qu'est-ce que le vide

FRANK CLOSE

Traduction d'Yves Sacquin



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtaboeuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A, France

Édition originale :

The Void, first edition was originally published in English in 2007. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Cet ouvrage a été traduit d'après l'œuvre originale *The Void, first edition* éditée en 2007 avec l'accord d'Oxford University Press.

© Frank Close 2007.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0420-7

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2010

SOMMAIRE

Chapitre 1. Beaucoup de bruit pour rien	5
Les premières idées sur le Rien	9
Pourquoi une telle aversion ?	14
L'air	16
Fabriquer du vide	18
Blaise Pascal : l'eau et le vin	21
À quoi ressemble le vide ?	22
La pression de l'air	23
Chapitre 2. Combien de vide dans l'atome ?	29
L'électron	29
Combien de vide dans l'atome ?	34
Champs	38
Grandeur du champ	41
Les champs gravitationnels et la loi en inverse du carré	44
Ondes	47
Chapitre 3. L'espace	51
Création	51
Newton	54
Les concepts d'espace et de mouvement	57
Chapitre 4. Des ondes dans quoi ?	65
Champs électromagnétiques et ondes	65
Des ondes dans quoi ?	69
Le problème de l'éther	72
Chapitre 5. À cheval sur un rayon de lumière	79
L'espace, le temps, et l'espace-temps	82
L'espace-temps	86

Chapitre 6. Le coût de l'espace libre	89
L'espace-temps courbe	89
Gravité et courbure	97
L'Univers en expansion	101
Chapitre 7. La mer infinie	107
Le monde quantique	107
Les ondes et l'indétermination quantique	112
Un vide grouillant	118
La mer infinie	124
Chapitre 8. Le vide de Higgs	131
Phases et organisation	131
Les changements de phase et le vide	136
Forces changeantes dans le vide	140
Le vide de Higgs	144
Chapitre 9. Le nouveau vide	149
Le démarrage de l'Univers	149
Inflation	154
Dimensions supplémentaires	159
À la recherche du Vide	164
Index	169

1

Beaucoup de bruit pour rien

À un stade très précoce de notre vie, la plupart d'entre nous se pose soudainement cette question : « D'où viennent toutes choses ? ». Il nous arrive aussi de nous demander ce qu'il en était de notre moi conscient avant notre naissance. Pouvez-vous identifier votre souvenir le plus ancien ? Quand j'ai commencé d'aller à l'école, j'avais des souvenirs assez clairs des deux ou trois années précédentes, et plus particulièrement de mes vacances d'été au bord de la mer, mais quand j'essayais de me rappeler des événements antérieurs, les images devenaient plus floues, s'estompant dans le néant. J'appris que c'était parce que je n'étais né que cinq ans plus tôt, en 1945. C'était un temps où mes parents me parlaient de la guerre et des choses qui leur étaient arrivées avant la guerre, mais cela n'évoquait pas grand-chose pour moi. Le monde que je connaissais n'existait pas alors et semblait avoir été créé à ma naissance, rempli de parents tout faits ainsi que d'autres adultes. Comment pouvaient-ils exister « avant » mon univers conscient ?

Cet étrange néant en quoi consistait toute chose jusqu'en 1945 continua à me trotter dans la tête ; c'est en 1969 que se produisit un événement qui devait m'inspirer un nouveau point de vue sur ce problème.

Apollo 10 frôlait la surface de la Lune, qui grâce aux merveilles de la communication, apparaissait comme un désert sauvage de rochers et de cailloux. Ce désert de poussière grise s'étirait jusqu'à l'horizon lunaire, qui décrivait un arc sur le noir du vide parsemé sporadiquement d'étoiles, boules d'hydrogène sans vie embrasées de lumière. Soudain, dans cette image aride se leva un magnifique joyau bleu, avec des nuages blancs et des continents verts par leur végétation : pour la première fois, des humains observaient un lever de Terre. Il y a un endroit au moins dans l'Univers où il y a de la vie, des ensembles formés d'un formidable nombre d'atomes qui se trouvent organisés de telle sorte qu'ils sont conscients d'eux-mêmes et peuvent regarder l'Univers avec émerveillement.

Qu'est-ce qui changerait s'il n'y avait pas de vie intelligente ? Qu'est-ce que cela voudrait dire que quelque chose existe s'il n'y avait pas de vie pour s'en rendre compte ? Il y a dix milliards d'années, voici comment on peut s'imaginer ce qu'il y avait : un vide sans vie, parsemé de nuages de plasma et d'arides blocs de rochers en orbite dans l'immensité de l'espace. Bien que cette ère « d'avant toute conscience » fût dépourvue de vie, et dût ainsi se trouver comme une sorte de généralisation de mon univers égocentrique d'avant 1945, où la gravité menait la danse sans que personne ne soit là pour s'en rendre compte, malgré cela les atomes de cette époque sont bien les mêmes que ceux dont nous sommes composés. Autrefois inertes, ces atomes se sont retrouvés organisés en combinaisons complexes qui ont produit ce que nous appelons la conscience, et sont devenus capables de percevoir, venue du fin fond de l'Univers, la lumière échappée de ces temps lointains et sans vie. Dans notre « maintenant », nous pouvons être témoins de cette époque primordiale sans vie, ce qui lui donne après coup une espèce de réalité. Nous n'avons pas été créés du néant, mais

d'une sorte de matière primitive originelle, des atomes fabriqués il y a des milliards d'années, qui, pour un bref instant, sont rassemblés dans un ensemble qui pense qu'il est nous.

Cela me conduit à ma dernière interrogation : qu'en serait-il s'il n'y avait ni vie, ni Terre, ni planètes, Soleil ou étoiles, ni atomes susceptibles de s'organiser un jour en quelque chose ; s'il n'y avait que du vide ? Une fois écartée toute ma représentation mentale de l'Univers, j'ai tenté d'imaginer ce rien qui restait. J'ai alors découvert ce que les philosophes connaissaient depuis des lustres : il est très difficile de penser le vide. Petit enfant, je me demandais où se trouvait l'Univers avant ma naissance, et maintenant j'essayais d'imaginer ce qu'il y aurait si je n'étais même pas né. « C'est nous les chanceux, car nous mourrons un jour ¹ », alors qu'il y a une infinité de formes possibles d'ADN, dont aucune, excepté quelques milliards d'entre elles, ne donnera jamais naissance à une vie consciente. Qu'est-ce que l'Univers pour l'être qui ne naîtra jamais ou pour ceux qui sont morts ? Toutes les cultures ont bâti des mythes autour des défunts, tant il est difficile d'accepter que la conscience puisse simplement disparaître quand la pompe à oxygène n'arrive plus à alimenter le cerveau, mais que signifie la conscience pour ces combinaisons d'ADN qui n'ont jamais été ni ne seront jamais ?

Il est aussi difficile de comprendre l'émergence de la conscience, et sa disparition, qu'il l'est de comprendre comment quelque chose, le contenu de l'Univers, a surgi du néant. Y a-t-il eu une création ou y a-t-il toujours eu quelque chose ? Plus j'essayais de comprendre ce mystère, plus je sentais que j'approchais soit de la véritable illumination, soit de la folie. Des années plus tard, alors que j'ai consacré ma vie à la science pour comprendre l'Univers, je suis revenu à ces questions et me suis mis en route pour trouver les réponses disponibles. Le résultat tient dans ce petit livre. Je suis flatté de constater qu'en me posant de telles questions, je me trouve en bonne compagnie,

1. Commentaire de Richard Dawkins lors d'une interview télévisée, 2005.

puisque d'une manière ou d'une autre elles ont été abordées, au cours des âges, par quelques-uns des plus grands philosophes. En outre, aucune réponse ne fait l'objet d'un consensus. À différentes époques, alors qu'une philosophie prenait le pas sur les autres, les canons de la sagesse ont évolué également. Peut-il y avoir un vide, un état sans rien ? Comme pour les questions sur l'existence de Dieu, les réponses dépendent de ce que l'on met derrière le mot rien.

En appliquant à ces questions la puissance de la logique, les penseurs de la Grèce antique arrivèrent à des conclusions contradictoires. Aristote soutenait qu'il ne pouvait exister un endroit vide. Cela était même érigé en principe : « La nature a horreur du vide » ; le sens de ce principe et pourquoi il a été adopté pendant deux mille ans, voilà une des premières questions que j'aborderai. Brièvement, nous verrons que ce n'est pas avant le dix-septième siècle, avec l'introduction de la méthode expérimentale, que les émules de Galilée montrèrent que la croyance en cette horreur du vide résultait d'une mauvaise interprétation des phénomènes physiques. Cette horreur apparente résultait d'un poids de 10 tonnes que l'atmosphère exerce sur chaque mètre carré de tout ce qui se trouve au sol, forçant l'air à s'infiltrer par tous les orifices possibles.

Comme nous le verrons, il est possible d'éliminer l'air d'un récipient et de faire un vide. Aristote avait tort. C'est du moins ce que l'on peut conclure s'il n'y a que de l'air, et qu'enlever cet air revient à tout enlever. Alors que la science a progressé, et que nous avons étendu nos sens grâce à des instruments de plus en plus sophistiqués, il est devenu clair qu'il y a bien plus que de l'air à enlever pour arriver à un véritable vide. La science moderne suggère qu'il est en principe impossible de faire un vide complet, ce qui fait qu'Aristote n'avait après tout pas totalement tort. Néanmoins les scientifiques modernes sont satisfaits d'utiliser le concept de vide, alors qu'une voie de recherche en physique moderne est complètement axée sur la compréhension de la nature du vide, du temps et de l'espace dans toutes leurs dimensions.

La question que je me posais naïvement est devenue encore plus énigmatique vu ce que l'on sait maintenant : l'Univers est en expansion, et cela dure depuis quelques 14 milliards d'années, depuis cette explosion connue sous le nom de big bang. Mais comme ni le système solaire, ni la Terre, ni les atomes qui nous composent ne sont en expansion, l'opinion la plus répandue est que c'est « l'espace lui-même » qui s'agrandit. Si on laisse pour plus tard la question « dans quoi est-il en expansion ? », nous nous trouvons devant une suite à la question d'origine : si j'ai tout retiré, est-ce que l'espace continue son expansion ? À son tour cela pose la question de savoir ce qui définit l'espace quand tout a été enlevé. Est-ce que l'espace existe indépendamment des objets, en ce sens que si en pensée j'enlève toutes les planètes, étoiles et autres éléments de matière, l'espace continuerait à exister, ou est-ce que l'absence de toute matière entraînerait également celle de l'espace ? Commençons notre recherche en examinant ce que les penseurs d'autrefois ont à nous offrir comme réponses à des questions comme : pouvons-nous vider l'espace de toute chose, et que se passe-t-il alors ? Pourquoi le big bang n'est-il pas apparu plus tôt ? Que faisait Dieu la veille de la création ? Ou : y a-t-il toujours eu ce quelque chose, qui a abouti à ce dont nous sommes faits ?

LES PREMIÈRES IDÉES SUR LE RIEN

Les paradoxes sur la création à partir du vide, sur l'être et le non-être, ont hanté toutes les cultures connues. Déjà en 1700 av. J.-C., l'*Hymne des Origines* du Rigveda proclamait :

« Il n'y avait alors ni le non-être ni l'être.

Il n'y avait ni espace physique ni espace subtil

Qu'est-ce qui voilait Cela, qu'est-ce qui l'abritait ?² »

2. Il y a de nombreuses traductions du Rigveda (principalement en anglais, NdT), comme une simple recherche sur Google le montrera.

De telles questions passionnaient les philosophes de l'Antiquité. Autour de 600 av. J.-C., Thalès refusait l'existence du Rien : pour Thalès, quelque chose ne peut émerger du Rien, et de même des choses ne peuvent disparaître dans le Néant. Il éleva même ce principe à l'Univers tout entier : l'Univers ne peut être issu du Néant.

Le concept du Rien a été confronté aux règles de la logique, Thalès ayant posé la question : le fait de penser le néant en fait-il une chose ? La réponse, apportée par les logiciens grecs, est qu'il ne peut qu'y avoir du Rien, s'il n'y a personne pour le constater. Ma question de savoir si le Rien peut exister sans qu'il n'y ait personne pour le savoir a donc trouvé une réponse positive voici trois mille ans, encore que cela me semble être plus une affirmation de principe que le résultat d'un raisonnement. Mon enquête se poursuivit, mais il se révéla que personne depuis Thalès n'avait trouvé d'autre définition du Rien que « l'absence de quelque chose ».

S'étant débarrassé du Rien, Thalès se tourna vers la nature des choses. Il prédit avec succès l'éclipse du Soleil du 28 mai 585 av. J.-C., ce qui était une prouesse et témoigne de ses capacités. On comprend pourquoi ses avis étaient tenus en très haute estime. Il raisonna que si quelque chose ne peut émerger du Rien, il doit y avoir une substance présente partout, d'où peuvent émerger des choses. La question « d'où viennent toutes choses ? » en a inspiré une autre : supposons que l'on vide une région de l'espace de toute chose, ce qui resterait deviendrait-il le « Rien » primordial ? Thalès proposa aussi une réponse à ce mystère : son suspect principal était l'eau. La glace, la vapeur et le liquide sont trois avatars de l'eau, et Thalès imagina que l'eau pouvait prendre une infinité de formes différentes, se condensant en rochers ou en n'importe quoi. Comme des flaques d'eau semblent disparaître, pour retomber plus tard comme pluie du ciel, la notion d'évaporation se précisa, et avec elle la perception du cycle parcouru par l'eau. Pour Thalès, l'espace est aussi vide que possible lorsque toute la matière qui le

remplis a été convertie en sa forme primordiale, l'eau liquide, comme l'océan. L'eau contient donc toutes les formes de matière³.

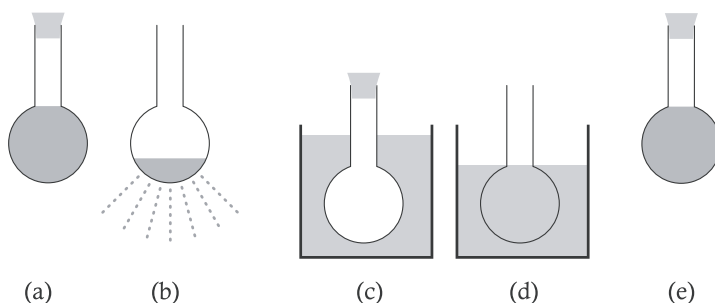


Fig 1.1 | (a) Un flacon percé de trous dans la partie sphérique contient de l'eau. Quand on bouche le goulot d'entrée, l'eau reste dans le flacon, mais si on ouvre le goulot, (b), l'eau s'échappera par les trous. (c) Le flacon vide est bouché, puis immergé dans l'eau ; l'eau ne rentre pas. (d) Si on ouvre le goulot, l'eau entre par les trous de la partie ronde. Si on ferme à nouveau le goulot, le flacon rempli d'eau peut être sorti du récipient sans que l'eau ne s'en échappe par les trous.

Au terme de soixante-dix-huit ans de conscience, Thalès retourna au grand vide éternel en 548 av. J.-C., mais l'idée qu'il existe une substance primitive, ou « élément premier » lui survécut. La nature de cet élément premier, elle, continua cependant à faire débat. Héraclite, pour sa part, insistait pour que ce soit le feu. Mais alors d'où vient le feu ? Réponse : il est éternel, et cette propriété fait qu'il peut être identifié à l'idée d'une divinité, créatrice du monde. Anaximène, au contraire, défend l'idée qu'il s'agit de l'air. On peut concevoir l'air comme infiniment étendu, contrairement à l'eau, et cette véritable ubiquité en fait le candidat de choix pour être la source universelle de toute matière.

Au milieu du cinquième siècle av. J.-C., Empédocle s'attaqua à la question de savoir si l'air était une substance ou de l'espace vide. Les débuts balbutiant de la méthode expérimentale furent mis à contribution

3. 3000 ans plus tard, cette idée est obsolète, mais les idées modernes sur le vide renouent avec cette notion conceptuelle en supposant que le vide contient une « mer » infiniment profonde de particules fondamentales (voir chapitre 7).

avec un dispositif appelé hydra : un tube de verre, ouvert à un bout et terminé à l'autre par un bulbe sphérique, ce bulbe étant percé de trous par où l'eau pouvait s'échapper – du moins tant que l'autre extrémité du tube restait ouverte. Si on bouche cette extrémité avec un doigt, l'eau ne s'écoule plus. Si on vide le récipient de son eau et qu'on le replonge dans l'eau, celle-ci s'y écoulera et le remplira, pourvu que l'extrémité ouverte le reste. Cependant, si cette dernière est bouchée avec le doigt, l'eau n'entre plus, pas plus que l'air ne s'en échappe. Cela démontrait que l'air et l'eau coexistent dans le même espace ; l'eau ne peut entrer à moins que l'air ne sorte ; l'air est donc bien une substance, et pas de l'espace vide. Il faudra attendre le dix-septième siècle pour que Torricelli explique ce qui se passe réellement.

Empédocle étendit le concept d'élément premier à quatre éléments : l'air, l'eau, le feu et la terre. Il introduisit également des idées de base sur les forces : pour lui elles étaient l'amour et la discorde, précurseurs de l'attraction et de la répulsion. Il fut certainement le premier à faire la différence entre matière et forces, mais n'en insistait pas moins pour dénier toute existence au vide.

Beaucoup de formes de matière sont granulaires. Si on empile des sphères, il y a des espaces libres entre elles. Pour qu'il n'y ait pas de possibilité qu'un « vide » s'instaure dans les espaces ainsi libérés, Empédocle fit l'hypothèse de l'éther, plus léger que l'air, pour remplir ces espaces, et de fait tout l'espace. L'éther s'introduit partout, et empêche le vide de se former. Il imagina même que cet éther omniprésent servait à transmettre les influences d'un corps sur un autre. Dans notre mode de pensée moderne, c'est l'équivalent d'un champ gravitationnel.

Anaxagore lui aussi refusait la possibilité qu'un espace soit vide, ainsi que la création de quelque chose à partir de rien. Pour lui, la création se ramenait à l'émergence d'un ordre à partir du chaos, plutôt que l'apparition de quelque chose de matériel à partir du néant. L'ordre à partir du chaos établit que les choses peuvent évoluer et changer,

comme la nourriture qui se transforme en constituant de notre corps. Cette permanence des éléments de base au cours des changements de la structure de leur agencement fut à l'origine de l'idée de graines et de la naissance de l'atomisme. Pour Anaxagore, il n'y avait pas de plus petit atome, pas de limite à la divisibilité de la matière, et donc aucun besoin de s'interroger sur les espaces entre les sphères qui se touchent, ni d'un éther pour en remplir les interstices.

Épicure (341-270 av. J.-C.), de même que Leucippe et Démocrite, continuèrent à nier que quelque chose puisse sortir de rien. Ils sont considérés comme les inventeurs de l'idée de l'atome, petit élément de base indivisible et commun à toutes les formes de matière. De là naquit l'idée qu'il puisse exister du vide, un espace sans rien dans lequel les atomes pouvaient se déplacer. Le raisonnement consistait à dire que s'il existait déjà quelque chose en un point de l'espace, alors un atome ne pouvait s'y placer ; pour que le mouvement soit possible, il faut donc qu'il y ait de l'espace dégagé pour permettre le déplacement des atomes. Ils imaginèrent même un Univers vidé à l'infini, rempli d'atomes en mouvement, trop petits pour être vus individuellement, mais qui s'agrègent en formes macroscopiques visibles. Les atomes sont en mouvement, mais leur ensemble forme une substance qui semble à l'arrêt. C'est l'image de la fourmilière ; vue de loin c'est un monticule immobile, mais vue de près elle se révèle formée du grouillement de millions de minuscules individus qui s'agitent.

Bien que ce soient les idées des atomistes qui s'approchent le plus de notre description moderne de la matière, pendant 2000 ans ce sont les conceptions opposées d'Aristote qui dominèrent. Pour Aristote, ce qui serait le vide devrait être totalement uniforme et symétrique, sans distinction possible entre l'avant et l'arrière, la droite et la gauche, le haut et le bas. Ce concept était déjà présent dans l'*Hymne des Origines* du Rigveda, qui chante :

« Quel était le dessous ?
 Quel était le dessus ? »

Dans une telle vision des choses, un objet ne peut tomber ou se mouvoir, il ne peut qu'exister dans un état de repos, une idée qui en fin de compte sera à la base de la mécanique newtonienne. Pourtant, pour Aristote cela impliquait la non-existence du vide, et il apporta les arguments logiques pour cette absence dans leur forme la plus claire. Si le vide est quelque chose, et si vous mettez un corps dans cet espace vide, alors vous aurez deux « quelque chose » au même endroit et au même instant. Si cela était possible, on pourrait alors généraliser en permettant à n'importe quoi d'être à la même place que quelque chose d'autre, ce qui est absurde. Ainsi pour Aristote la logique semblait exiger que l'espace vide ne puisse être quelque chose, et donc n'existe pas. Il définissait le vide comme l'endroit qui ne contient aucun corps, et comme les éléments premiers de toute chose existent depuis l'éternité, il ne peut exister d'endroit complètement vide.

L'un dans l'autre, la logique aristotélicienne refusait l'existence du vide et conduisit à l'opinion commune que la nature a horreur du vide. C'était considéré comme évident ; néanmoins c'était faux, comme on va le voir maintenant.

POURQUOI UNE TELLE AVERSION ?

L'aphorisme « La nature a horreur du vide », fut considéré comme frappé au coin du bon sens pendant plus de 2000 ans, jusque pendant une grande partie du Moyen Âge, parce qu'il donnait l'explication la plus simple, et en apparence la plus évidente, pour un grand nombre de phénomènes de la vie courante. Essayez d'aspirer l'air contenu dans une paille : l'air rentre par l'autre bout ; autant essayer d'aspirer l'air de la pièce entière. Fermez alors une extrémité en la bouchant avec votre doigt, et aspirez l'air par l'autre bout : il n'y aura pas de vide créé, mais la paille s'écrasera. Ou bien trempez une extrémité de la paille dans un verre de jus de fruit et aspirez : vous finissez par boire le jus. Loin d'avoir créé le vide en aspirant l'air, vous voyez le liquide défier, en apparence, la gravité pour venir remplir l'espace vide. Il est facile, et

même « naturel », de penser que c'est le vide qu'on veut créer qui tire le liquide vers le haut pour empêcher qu'il ne se forme. Beaucoup d'enfants font ce raisonnement ; la vraie réponse est loin d'être évidente. Il fallut attendre Galilée et les esprits les plus subtils du dix-septième siècle pour trouver la bonne explication dans cet embrouillamini.

Il y a d'autres exemples, tous menant apparemment à la même conclusion. Placez deux plaques mouillées l'une sur l'autre. Il est facile de faire doucement glisser l'une par rapport à l'autre, mais si vous essayez de la soulever, cela devient très difficile. L'interprétation naïve consistait à penser qu'en faisant cela on essayait de créer du vide entre les deux plaques, et comme « la nature a horreur du vide », cela devient très difficile de les séparer.

Revenons à notre paille dans la boisson : après avoir siroté pendant quelques secondes, mettez un doigt au bout supérieur de la paille, tout en laissant l'autre extrémité dans le liquide. Une colonne de liquide continue à vous défier dans le tube. Ôtez votre doigt, et le liquide redescend dans le verre : pourquoi ne l'a-t-il pas fait quand votre doigt bouchait l'autre bout ? Toujours cette « aversion du vide ». Pourquoi la colonne de liquide ne s'est-elle pas divisée en deux, la partie inférieure retombant dans le verre et la partie supérieure restant dans la paille ? L'explication consistait à dire que cela continuerait à créer du vide à la séparation dans le liquide, du moins tant que la partie basse ne se serait pas écoulée du tube. La permanence de la colonne de liquide fournissait, de toute évidence, une preuve de plus de cette aversion de la nature envers le vide.

Ces explications tinrent pendant 2000 ans ; mais elles sont fausses. S'y ajoutait un autre argument qui retarda également la découverte de la vérité : pour beaucoup l'horreur du vide était une évidence car Dieu ne peut avoir créé le néant. Si au contraire vous affirmiez que le vide est possible, il vous fallait choisir soigneusement les mots pour le dire, au risque d'être accusé d'hérésie. Une autre façon de s'en sortir se

présentait ainsi : Dieu est tout-puissant et peut donc créer aussi bien quelque chose que rien ; dire que Dieu ne peut avoir créé le rien veut dire que ses pouvoirs sont limités : donc le vide peut exister. Galilée, qui se fourra comme on le sait dans ce type de problèmes ultérieurement, croyait en l'existence du vide, et fut le premier à proposer de vérifier cette idée en faisant des expériences. Cette initiative de soumettre des idées théoriques à la méthode expérimentale était audacieuse, mais également dangereuse : les hérétiques finissaient assez souvent sur le bûcher. Au vu de ces expériences, les raisons de cette horreur apparente devinrent claires, et on commença à comprendre les propriétés du vide. Au passage, et au fur et à mesure de l'avancement des connaissances sur le phénomène, plusieurs instruments qui nous sont maintenant familiers furent inventés.

L'AIR

Enfant, nous découvrons que l'ordre naturel des choses est que les corps en mouvement ralentissent, et que les choses légères, comme le papier, tombent moins vite que les cailloux. Les expériences de Galilée, qui se traduisirent dans la loi de Newton disant que les corps restent dans un état de mouvement uniforme et rectiligne en l'absence de force extérieure, ces expériences établirent ce qu'est vraiment la nature.

Ce fut Galilée qui le premier montra que l'air a du poids. Il se servit du fait que l'air chaud monte, et donc peut s'échapper d'un récipient ouvert lorsqu'il est chauffé. En pesant le récipient avant et après, il découvrit que l'air qui s'était échappé avait emporté avec lui un peu de poids. Cela montrait que l'air avait un poids, mais il ne put en estimer la densité, car il ne savait pas quel volume d'air s'était réellement échappé. En pesant un ballon d'abord rempli d'air, puis d'eau, il arriva à la conclusion que l'air est 400 fois plus léger que l'eau, ce qui, pour une expérience aussi rudimentaire, est remarquable : la valeur précise de nos jours est de près de 800 fois, au niveau de la mer.

Comme quiconque s'est promené par grand vent, il savait aussi que l'air exerce une force, bien qu'il fallut attendre quelques décades avant que Newton fasse le lien entre force, poids et accélération. L'air peut s'opposer au mouvement, comme lorsqu'une plume légère est soulevée par un courant d'air, ou même quand elle tombe lentement dans de l'air calme, alors qu'une pierre tombe très vite. Une pierre et un morceau de plomb, de la même taille mais d'un poids différent, tombent à la même vitesse, et Galilée comprit intuitivement que c'était là l'état naturel des choses : c'est la résistance de l'air qui freine la plume.

Les effets de l'air peuvent être surprenants. C'est sa résistance au mouvement qui fait que nous devons garder un pied sur l'accélérateur pour que la voiture continue à avancer à la même vitesse. L'accélérateur est l'instrument qui permet d'appliquer une force qui propulse la voiture ; s'il n'y avait pas la résistance de l'air, cette force entraînerait une accélération de la voiture, mais plus on va vite, plus cette résistance est grande. Ce n'est que lorsque la force induite par l'accélérateur compense exactement la résistance de l'air que la voiture avance à vitesse constante.

Le déplacement de l'air crée des tourbillons autour de la voiture, laissant un air « plus léger » juste derrière elle. C'est cette différence entre la pression plus forte à l'avant et plus basse à l'arrière qui produit cette force de résistance. Si la forme de la voiture est dessinée pour que l'air revienne rapidement tout contre l'arrière de la voiture, cela diminue cette différence de pression, et donc la résistance de l'air. Le profilage des voitures, ou des casques portés par les coureurs cyclistes et les descendeurs à ski est devenue une importante activité industrielle.

Ce qui est évident pour nous n'était pas connu au dix-septième siècle, et cela montre le génie de Galilée, qui a réduit le problème à ses fondamentaux. Un caillou qui tombe dans la mélasse est très vite arrêté ; dans l'eau la résistance est plus faible, et dans l'air encore moins. Il extrapola ces observations et conjectura que s'il n'y avait pas la résistance de l'air, tous les corps tomberaient à la même vitesse. Bien

que Galilée n'ait pas eu les moyens d'obtenir du vide, il est clair que l'existence d'un tel état ne lui posait pas de problème philosophique ; simplement cet état est très difficile à obtenir. Une démonstration très médiatisée de cette idée eut lieu plus de 300 ans plus tard, quand un astronaute d'une mission Apollo laissa tomber une plume et un caillou sur la surface de la Lune ; la première démonstration connue est due à J. Desaguliers qui la produisit le 24 octobre 1717 à la *London Royal Society* devant Isaac Newton.

FABRIQUER DU VIDE

Galilée savait que les pompes aspirantes ne pouvaient élever de l'eau sur plus de 10 mètres environ. La nature résiste à la formation du vide, mais il semble qu'il y ait une limite : au-delà de 10 mètres d'eau, il semble que le phénomène, quel qu'il soit, qui empêche la formation du vide, soit mis en échec. Galilée se demanda ce qui se passerait si, au lieu d'eau, il utilisait du mercure, le liquide le plus dense qui soit. Un des étudiants de Galilée, Evangelista Torricelli, trouva la réponse en suivant les conseils de Galilée, en 1643. Il en fit la démonstration avec une expérience toute simple utilisant un tube creux en verre d'environ un mètre de long, soudé à un bout, et une cuvette remplie de mercure.

Voici comment un livre scientifique moderne peut décrire l'expérience. On commence par utiliser un tube assez court, de 10 à 20 centimètres de long, et on le remplit de liquide. On bouche le bout ouvert avec le doigt et on retourne le tube tout en l'introduisant avec précaution dans une cuvette remplie du liquide, sans enlever le doigt avant que l'extrémité qu'il bouche soit sous la surface du liquide. Tant que cette extrémité est immergée, le liquide contenu dans le tube reste en place. Torricelli fit l'expérience avec du mercure, dont les propriétés toxiques rendraient de nos jours l'expérience moins populaire. Il comprit que la faculté qu'à la colonne à se maintenir avait un lien avec les poids respectifs du mercure dans le tube et de l'atmosphère immédiatement au-dessus. Plus précisément, pour compenser la

pression exercée par l'atmosphère sur le mercure de la cuvette, le mercure dans le tube devait avoir une certaine hauteur.

Dans l'expérience de Torricelli, cette hauteur se révéla être d'environ 76 centimètres, et c'est là qu'apparaît une énigme : si un tube d'un mètre de long est rempli de mercure, retourné et plongé dans un bain du même liquide, le mercure dans le tube redescend jusqu'à ce que la colonne ne soit plus que de 76 centimètres, puis ne bouge plus. Qu'y a-t-il dans les 24 centimètres au sommet du tube ? Là où il y avait du mercure, il n'y a maintenant, apparemment, plus rien. De l'air n'a pas pu y rentrer ; Torricelli réalisa qu'il avait créé du vide.

Au niveau de la mer, l'atmosphère exerce sur nous une pression d'environ 1 kg sur chaque centimètre carré, ce qui représente 10 tonnes par mètre carré. Une démonstration célèbre de cette pesanteur de l'air fut faite par Otto von Guericke, maire de Magdebourg pendant trente ans et scientifique manifestement doué pour la vulgarisation.

C'est en 1654 qu'il produisit son « spectacle du vide » mettant à contribution seize chevaux, deux hémisphères de bronze d'environ un mètre de diamètre, et l'assistance des pompiers locaux. Les deux hémisphères furent accolés de manière à former une sphère creuse. Von Guericke commença par montrer qu'il était aussi facile de les réunir que de les séparer. Avec le sens de la mise en scène que l'on attend plutôt d'un prestidigitateur, il invita alors des personnes de l'assistance à constater par elles-mêmes qu'il était facile de les séparer. Alors le spectacle proprement dit commença. Une pompe pneumatique, mise à sa disposition par les pompiers de Magdebourg, fut connectée à une valve disposée sur l'un des hémisphères, et commença à en aspirer l'air. Au bout de quelques minutes, il annonça que tout l'air avait été pompé ; on ferma la valve, on enleva la pompe et les spectateurs furent invités à séparer les hémisphères. C'était devenu impossible. Pour rendre l'expérience très spectaculaire, et c'est ce qui la rendit célèbre, deux attelages de huit chevaux furent alors accrochés chacun à un hémisphère. Les livres de cours disent simplement, à ce stade, que les

noyau 33, 36, 42, 43, 107, 114, 115, 141,
142, 150, 151, 153
atomique 34, 35

O

Olbers 63
onde 47, 48, 49, 65, 67, 69, 71, 74, 112,
115–117, 121, 122
au point zéro 121
électromagnétiques 81
radio 49, 68, 108
Opticks 70
organisation 131–133, 136

P

paire 126, 127
Pais 82
paquets d'ondes 113
parallaxe 52
particule 30, 33–38, 43, 44, 55, 58, 70,
84, 109, 112, 113, 116, 118, 119, 121,
122, 125, 126, 128, 129, 131, 133,
139–143, 146, 147, 150, 152, 153,
156, 164
particule fondamentale 11, 30, 146, 159
particules atomiques 111
particules chargées 45
particules nucléaires 139
Pascal 21–23, 25, 26, 27, 44
Paul Dirac 124
Périer 25, 44
phase 129, 131, 133, 134, 136, 143, 145,
154, 155
photon 70, 102, 113, 114, 116, 126, 128,
141, 142, 144, 145, 146, 147
Planck 112, 114, 116, 122
constante 114
positon 124–128, 141, 142
pression 25
pression de l'air 23, 38
principe d'exclusion 124, 125, 128
Principia 107
proton 26, 33, 34, 35, 36, 42, 88, 104,

114, 124, 126, 132, 141, 142, 144,
148, 153
PSR 1913+16 96

Q

quanta 114, 116
quarks 34, 35, 128, 139, 142, 146

R

radioactivité 52
bêta 139, 142
rayon atomique 126
rayon de l'atome 38, 141
rayonnement cosmique 85, 158
rayons infrarouges 68
rayons X 49, 69
relativité 65, 66, 69, 77, 107, 84, 88 89,
90, 95, 97, 100, 111, 141
générale 47, 88, 89, 91, 99, 100, 102,
123, 154, 162
restreinte 49, 82, 86, 87, 89, 97, 98
repère inertiel 55, 56, 57, 58, 59, 66, 84,
87, 88
résistance de l'air 17
Dawkins 7
Rigveda 9, 13, 168
Royal Society 18
Rutherford 36–38, 43

S

Slac 42
Soleil 7, 10, 40, 41, 44–46, 47, 52, 54–56,
59, 62, 63, 73, 75, 88, 89, 91, 95, 96,
99, 100, 139, 151, 161
son 48, 69, 71, 80
Steinhardt 154
stoïciens 69
Stokes 75
Straton 58
supraconductibilité 109, 132, 144, 145,
147
symétrie 79, 134–140, 143, 154
système solaire 9, 95, 99, 103, 151

T

Taylor 97
 température de Curie 146
 temps 49, 51–53, 55, 57, 58, 60, 63, 65, 74, 77, 82–88, 91, 95, 97–101, 112–114, 123, 124, 140, 152, 156, 157, 159, 161–168
 temps imaginaire 165–167
 Terre 6, 7, 9, 25, 26, 33, 34, 38, 43–48, 52, 55, 56, 57, 59–63, 66, 72–76, 79, 83, 88, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 151, 160, 162, 165
 Thalès 10, 11, 168
 Théophraste 57
 théorème de Pythagore 86, 93, 94, 95
 théorie de la lumière de Newton 70
 Thomson 29, 32
 Torricelli 12, 18, 19, 21–23, 43, 58, 110
 transformation de Lorentz-Fitzgerald 77
 transitions de phase 109, 143, 153, 154
 trou noir 100–103

U

ultraviolets 68
 Univers 6, 7, 9, 10, 13, 45, 47, 51–53, 57, 63, 71, 89, 102, 103, 104, 123, 124,

129, 136, 138, 139, 140, 143, 144, 147, 149, 150–168

V

vent 39, 40
 vide de Higgs 144
 vitesse 54–57, 59, 60, 63, 66, 72–77, 80–90, 92, 97, 100, 104, 111, 114, 118, 123, 146, 147, 150, 151
 vitesse de la lumière 42, 48, 61, 67, 68, 69, 73, 76, 77, 79, 80–83, 85, 87–89, 97, 98, 102, 123, 140, 146
 vitesse de libération 151
 Voie lactée 63
 voltage 41
 von Guericke 19, 20

W

W 142, 144–147
 William Thomson 107
 WMAP 157, 158

Y

Young 70, 71

Z

Z 142, 144, 146, 147