

Pour une histoire du vide ¹

Pierre Marage
 Physique des Particules élémentaires
 Université Libre de Bruxelles – CP 230
 B –1050 Bruxelles
 pmarage@ulb.ac.be

“*L’être est, le non-être n’est pas*”, proclame Parménide, “saisi par le frisson glacial de l’abstraction” (Nietzsche). Avec cette imprécation mémorable, il impose à la philosophie un programme deux fois millénaire.

“*L’être est*” et, selon la voie droite, Parménide énonce ses propriétés : il est incréé, impérissable, complet, immobile, éternel; il est indivisible et entièrement continu, fini et sphérique. Mais ici se termine la voie de la Certitude. Restent à comprendre la diversité du monde, le mouvement, le multiple : tâche des philosophes, tâche des physiologues.

“*Le non-être n’est pas*”, et Parménide n’a rien d’autre à en dire : “*il n’est rien*”. Leucippe, Démocrite relèvent le défi, et proclament l’existence de ce vide au sein duquel dérivent les atomes incréés, indivisibles, éternels. Mais telle était l’audace de ces impies, que la censure du temps et celle des hommes devaient nous priver de leur leçon sur le vide. Et même si des mystiques prônèrent l’atomisme pour mieux reconnaître dans le monde la présence de Dieu, pour les hommes de raison le monde restera plein et fini, et l’horreur du vide sera élevée au rang de principe. Dans un mouvement paradoxal, c’est une réaction épiscopale soucieuse de réaffirmer la toute-puissance de Dieu qui autorisera, au cœur même de l’Église médiévale, les plus audacieux des scolastiques à penser à nouveau le vide et à discuter la possibilité – au moins “imaginaire” – de son existence : préoccupation des philosophes et des théologiens. Ce fut la première étape de l’histoire du vide, celle du vide philosophique.

Avec le siècle de Galilée et de Newton, le vide échappe à la philosophie pour se poser comme objet de mesure, comme objet d’*expérience*. Ce faisant, il se fait sujet, et contribue à créer la science moderne, dans ses pratiques et dans ses concepts. Et, suivant la leçon du baromètre, la mécanique pourra développer ses équations dans un espace que les successeurs de Newton achèvent de débarrasser des derniers vestiges de présence divine. C’est l’époque du vide expérimental, celle qui nous retiendra surtout ici.

Dès lors, le vide n’est plus un enjeu, mais un instrument. Il permet les machines à feu et la naissance de la thermodynamique, la découverte des rayons cathodiques et celle de l’électron. Le *Système du Monde* se déploie dans l’espace vide, et même lorsque celui-ci se remplit d’éther, il n’en est guère affecté, et reste le réceptacle impassible de la matière. C’est l’époque du vide technique.

¹ Publié dans : « Le vide, Univers du tout et du rien », éd. par E. Gunzig et S. Diner, Revue de l’Université de Bruxelles, Complexes, Bruxelles 1999.

Bientôt, avec la relativité restreinte d'Einstein, l'éther s'évanouit – hypothèse inutile et invérifiable. Mais aussitôt le vide se charge de propriétés inattendues : l'espace de la relativité générale se courbe et l'énergie–impulsion se noue à sa métrique; le vide quantique se remplit d'une mer de particules et d'antiparticules, pour se peupler bientôt de bosons virtuels. Le vide cesse d'être réceptacle pour devenir acteur. A lui est renvoyée la gestion des symétries de nos équations. A lui est renvoyée la dynamique même de notre univers, celle de son évolution comme celle de sa structure microscopique. Nous vivons l'époque de la construction du vide comme objet théorique.

Ainsi, l'histoire du vide accompagne-t-elle si bien l'histoire de la physique, que l'on pourrait sans doute raconter celle-ci en suivant celle-là : on ne peut saisir globalement l'être dans sa multiplicité sans complexifier le non-être.

Mais l'histoire du vide n'est pas seulement celle des idées sur le vide. Raconter l'histoire du vide, c'est aussi raconter l'histoire des pratiques scientifiques, et caractériser la physique elle-même comme science. C'est donc comprendre comment les objets de la physique sont le fruit d'une construction théorique, expérimentale, technique, et sociale.

1. Le vide philosophique, – ou le monde et sa cohérence

Ce qui fait la grandeur et l'irrésistible puissance de conviction du système d'Aristote, c'est sa merveilleuse cohérence. Et celle-ci ne cesse de croiser la question du vide, où se nouent les fils de la construction.

Aristote a su articuler avec une extraordinaire force logique une cosmologie qu'il a héritée de la tradition, sur une théorie du mouvement qui s'appuie elle-même sur sa logique et sur sa théorie des causes. Dans le *De Caelo*,² il reconnaît que deux mouvements naturels seulement caractérisent le monde sublunaire : le mouvement du feu vers le haut et celui de la terre vers le bas, c'est-à-dire le centre du monde. Il déduit encore de son analyse l'existence nécessaire d'êtres, les astres, peuplant le monde supralunaire et animés du seul mouvement parfait, éternel, le mouvement circulaire. L'univers est donc fini, puisqu'il possède un centre – celui vers lequel tendent les corps graves –, et qu'il est sphérique, ainsi que le montrent l'analyse du mouvement et l'observation de la voûte céleste. Remarquable construction, qui déduit la cosmologie de l'étude du mouvement – oserait-on dire : de la dynamique ? –, première réalisation peut-être du programme moderne. Il n'est pas surprenant qu'elle ait séduit les meilleurs esprits pendant deux mille ans.

Quant au mouvement forcé, au mouvement violent, il est cantonné au monde sublunaire, celui du changement, de la corruption, le monde des quatre éléments (au contraire du monde supralunaire, parfait, immuable, celui de la quintessence). De même que le mouvement naturel, le mouvement violent ne dure que tant qu'agissent les forces qui s'exercent sur le mobile : là, l'appétence à rejoindre le lieu naturel, ici le moteur extérieur, – car en l'absence de moteur, le mouvement cesse, ainsi que le confirme l'expérience. Et si la pierre qui a quitté la main du lanceur poursuit quelque temps son mouvement, c'est parce que l'air qu'elle a déplacé vient se glisser derrière elle et la

²Aristote, *De Caelo*, Coll. des Univ. de France, Les Belles Lettres, Paris 1965.

propulse : la présence du milieu est nécessaire au mouvement. Comme l'indique encore l'expérience commune, le mouvement est d'autant plus rapide que la force exercée est grande et que la résistance du milieu est faible. En particulier, le mouvement naturel vers le bas est proportionné au poids des corps, le mouvement vers le haut à leur légèreté, car c'est sa gravité (ou sa légèreté) qui permet à un mobile de se glisser plus ou moins rapidement à travers le milieu.

Contre les atomistes, Aristote proclame avec constance l'impossibilité du vide. Pour lui, tout espace doué de dimensions constitue un corps; un espace vide constituerait donc lui aussi un corps. Qu'un objet matériel vienne à occuper cet espace, et deux corps se trouveront au même endroit, ce qui est absurde. Mais au-delà de ces raisons "formelles", c'est la cohérence même de tout le système qui prohibe l'idée de vide. Accepter en effet l'existence d'un espace vide, ce serait inévitablement faire éclater sphéricité et centralité, et ouvrir l'univers vers l'infini. (*A contrario*, les scolastiques ne qualifieront-ils pas Dieu de sphère infinie dont le centre est partout et la circonférence nulle part ?) Mais c'est sans doute la théorie du mouvement qui fournit les arguments les plus décisifs contre l'existence du vide. D'abord, le mouvement naturel est impossible dans le vide, où n'existent ni haut ni bas. Un mobile ne saurait non plus venir au repos dans le vide, car il n'aurait aucune raison de s'arrêter ici plutôt que là. Pour sa part, le mouvement violent y serait impossible, car on a vu que le milieu lui-même joue le rôle de moteur pour assurer la continuation du mouvement. Enfin, argument particulièrement important, le vide n'opposant au mouvement aucune résistance, celui-ci s'y effectuerait instantanément, de manière infiniment rapide, ce qui est évidemment absurde puisque l'infini *en acte* ne peut exister.

Il est donc remarquable que non seulement la théorie du mouvement fonde la cosmologie d'Aristote, mais encore qu'elle assure fermement la cohérence du système, en interdisant ce qui ferait sa ruine : l'existence du vide. Et il n'est pas étonnant, comme on le verra plus loin, que l'oeuvre de construction de la physique moderne ait dû détruire d'un même mouvement la cosmologie d'Aristote, sa cinématique et sa condamnation du vide.

Mais en attendant la grande révolution du XVII^{ème} siècle, un tel système, appuyé sur l'encyclopédisme d'Aristote, sur sa logique, sur sa métaphysique, et enrichi par toute l'astronomie hellénistique, d'Eudoxe à Ptolémée, ne pouvait qu'emporter d'enthousiasme la conviction des savants. Les Arabes s'en emparèrent, si bien qu'il constitua un danger pour la pureté de la religion. Pour mieux le combattre, la secte des Ach'arites choisit d'en appeler à l'ennemi irréconciliable du système aristotélicien, et se proclama atomiste. Et comme un monde d'atomes disjoints, dans le vide, ne peut subsister sans l'intervention constante de Dieu, ces mystiques y trouvaient la preuve de l'omniprésence divine.³ Invoquer la nécessité du miracle permanent afin d'assurer la survie du monde atomistique : est-il plus bel hommage rendu à la plénitude ?

Le Moyen-âge latin à son tour, dès le début du XIII^{ème} siècle, s'enthousiasme pour Aristote et sa physique, qui fournit enfin une explication cohérente du monde. On adhère à la condamnation du vide, – aussi bien le vide cosmique, au-delà du monde, que le vide au sein du monde sublunaire.⁴ Sous la forme positive : "*natura abhorret*

³E. Gilson, *La philosophie au Moyen Age, des origines patristiques à la fin du XIV^e siècle*, Payot, Paris 1947.

⁴E. Grant, *Much Ado About Nothing, Theories of space and vacuum from the Middle Ages to the Scientific Revolution*, Cambridge University Press, Cambridge 1981.

vacuum”, Roger Bacon énonce un principe universel s’imposant à tous les corps : contrairement à sa nature, l’eau ne s’écoule pas d’un vase fermé, percé seulement d’un petit trou dans le bas; de même elle s’élève dans un vase retourné dans un bassin rempli d’eau, lorsqu’une chandelle brûle à l’intérieur du vase. L’horreur du vide est à l’oeuvre encore quand, l’eau se contractant à cause du gel dans un vase fermé (car l’on “sait” au Moyen-âge que l’eau, comme tous les corps, se contracte au froid!), la nature brise le vase plutôt que de laisser se former un vide; l’horreur du vide empêche également de séparer les parois parfaitement accolées d’un soufflet bouché ou d’une outre vide; elle permet le fonctionnement des siphons; elle assure enfin la cohésion de deux plaques de marbres parfaitement lisses appliquées l’une sur l’autre. Comment celles-ci peuvent-elles cependant se séparer ? On peut supposer que, quand elles s’écartent, elles se courbent progressivement, faute de quoi le mouvement de l’air remplissant le vide qui se formerait entre elles devrait être instantané. Mais cette question est controversée, de même que l’on s’interroge, après le Byzantin Jean Philopon, sur la cause du mouvement du projectile ayant échappé au lanceur : si, selon Aristote, il est mû par l’air expulsé à l’avant du projectile, et qui vient remplir le vide laissé à l’arrière, pourquoi alors la lance est-elle animée du même mouvement, que son extrémité arrière soit droite ou effilée ? Menant d’autres expériences de pensée, on s’interroge également sur l’objection formée par Aristote contre le mouvement dans le vide : est-il vrai qu’il serait instantané, c’est-à-dire non successif, le point antérieur ne précédant pas le point postérieur ? Ne conviendrait-il pas plutôt, afin d’éviter cette difficulté, de penser le mouvement dans le vide comme fini, – ce qui du reste ferait tomber une objection contre l’existence même du vide ?

Quant à la cosmologie d’Aristote, on sait l’écho qu’elle reçut parmi les clercs, particulièrement à l’Université de Paris. Mais cette doctrine était dangereuse, non seulement parce qu’elle donnait aux maîtres de la Faculté des Arts une assurance qui portait ombrage aux théologiens, mais parce que, sous la forme averroïste que lui donnait un Siger de Brabant, elle glissait vers la redoutable doctrine de la double vérité. Il convenait de restaurer la suprématie de la théologie, et de réaffirmer que les raisons d’Aristote ne peuvent rien contre la Doctrine Sainte et les enseignements de l’Écriture et des Pères. En 1272, Étienne Tempier, évêque de Paris, condamne 219 articles imputés à l’école averroïste. La toute-puissance de Dieu est réaffirmée contre les raisons tirées de la philosophie naturelle : “*Que ce qui est absolument impossible ne peut pas être fait par Dieu ni par un autre agent. – Erreur, si impossible est entendu selon la nature*” (art. 147). Sont explicitement condamnées deux opinions qui nous intéressent directement : “*Que la Cause Première (Dieu) ne pourrait pas faire plusieurs mondes*” (art. 34) et “*Que Dieu ne pourrait mouvoir les cieux d’un mouvement rectiligne. La raison est qu’alors un vide subsisterait*” (art. 49).⁵

On sait l’impact qu’eut la condamnation de 1272 sur les penseurs de Paris et d’Oxford, d’Ockam et Bradwardine à Buridan et Oresme. S’il est absurde de prétendre que la censure cléricale pût libérer les esprits et servir de base à la science moderne, la toute-puissance prêtée à Dieu autorisa les imaginations les plus créatrices à se déployer. Le paradoxe stoïcien fut à nouveau discuté : qu’y a-t-il au-delà de l’univers, comment penser un homme tendant le bras par-delà ses limites ? La perfection et l’infinitude de Dieu n’impliquent-ils pas un espace infini, incréé, et coexistant à Dieu ? Quelle est la nature du vide laissé derrière lui par un monde en mouvement rectiligne ? S’il est coexistant à Dieu, cet espace peut-il comporter des dimensions ? – car Dieu étant

⁵E. Grant, *La physique au Moyen Age, VIème-XVème siècle*, Presses Universitaires de France, Paris 1995, p. 37.

indivisible, il ne peut être dimensionné. Ces spéculations préparèrent certains des débats des XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles, qui accompagnèrent la mise en place de l'espace newtonien.⁶

2. Le vide expérimental, de Galilée à Torricelli ...

Galilée a construit la science moderne contre le système d'Aristote et, en la fondant, il le mit à bas : pas de construction sans destruction, pas de véritable destruction sans construction.

Équipé de la lunette qu'il a construite "après avoir été illuminé de la grâce divine" (*Le messager céleste*), il entreprend en 1610 la campagne copernicienne. Il ruine la perfection immuable du monde des astres : la surface de la lune est creusée de cratères et hérissée de montagnes, le soleil est couvert de taches sombres et tourne sur lui-même, Tycho Brahe lui-même a démontré que l'astre nouveau qui s'est mis à briller intensément en 1572 et a décliné depuis était situé au-delà de la sphère de la lune. La lunette abat la muraille qui sépare notre monde imparfait du monde supralunaire : comme notre Lune, Vénus reçoit sa lumière du soleil; comme la Terre, Jupiter possède des satellites, et est le centre de leur mouvement. La Terre devient un astre comme les autres, tournant sur lui-même et autour du Soleil, dont le rôle est magnifié dans la tradition néoplatonicienne : "prunelle du monde" (Copernic), "fontaine de lumière, coeur du monde" (Kepler). Révélant le caractère innombrable des astres, résolvant la Voie Lactée en une poussière d'étoiles, Galilée ouvre enfin l'Univers, allant à la rencontre de celui qu'on appelle "le martyr" depuis que l'Inquisition l'a fait brûler vif en février 1600 : Giordano Bruno.

Encore faut-il, pour appuyer le mouvement de la terre, réfuter l'argument d'Aristote et Ptolémée, qui objectent que ce mouvement devrait s'observer. Galilée leur rétorque qu'il ne peut l'être, parce que nous l'accompagnons, de même que le passager dans la cabine du navire ne peut déterminer si celui-ci est au repos ou en mouvement. Faisant du mouvement une question relative, Galilée brise avec toute la théorie aristotélicienne du mouvement et des lieux. Peut-être sa leçon remonte-t-elle, par son maître Benedetti, aux "artistes" de Paris et d'Oxford. Mais l'approche est toute différente, car elle intègre en une conception cohérente des éléments épars qui n'avaient pas dépassé le stade de la spéculation ou d'un scepticisme à finalité apologétique. Galilée a conquis la notion de vitesse instantanée, qu'Oresme a approchée mais n'a pas su clarifier; il a transformé en inertie, qui appartient aux corps, l'*impetus* de Buridan, communiqué au projectile par le lanceur et qui s'épuise peu à peu au cours du mouvement; il a remplacé les spéculations abstraites des oxoniens sur le mouvement uniformément difforme par l'énoncé de la loi de la chute des corps. Et si le *Dialogue sur les deux principaux systèmes du Monde* (1632) a précédé chez l'éditeur les *Discours sur deux sciences nouvelles* (1638), ce sont les découvertes de jeunesse présentées dans ceux-ci qui ont donné à Galilée la certitude de son savoir et qui, en fin de compte, font la force de l'argumentation. Si Galilée s'est rallié à Copernic, c'est parce que, par ses travaux de Padoue, il avait rejeté la théorie du mouvement d'Aristote.

Il était sans doute inévitable que, dans cet affrontement titanesque avec le vieux cosmos, Galilée se heurtât à l'Église. Car, pour fonder la science moderne, il fallait

⁶A. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Coll. Idées, Gallimard, Paris 1973.

aussi que le savant définît la méthode d'une connaissance certaine, mais qui n'appartient pas à la théologie : c'est la méthode des mathématiques et de l'expérimentation. Et cette connaissance, Galilée a l'audace d'affirmer qu'elle ne saurait plier devant aucune autorité : “*Personne ne doute que le Souverain Pontife garde toujours le pouvoir absolu d'admettre ou de condamner (les propositions de philosophie naturelle). Mais il n'est de fait au pouvoir d'aucune créature de les faire être vraies ou fausses autrement qu'elles se trouvent être par leur nature et de facto.*”⁷

Il était inévitable également que Galilée rencontrât la question du vide. Dans la première journée des *Discours*, il l'aborde dans sa présentation de chacune des deux “*sciences nouvelles*”. Mais alors qu'elle joue chez Aristote un rôle central, elle a ici complètement perdu cette place. Ainsi se reconnaît encore le formidable renversement de perspective qui caractérise la révolution scientifique : le vide cesse d'être un enjeu philosophique, pour devenir une question expérimentale.

On l'a vu, Aristote ne s'intéresse au mouvement dans le vide que dans le but de démontrer l'impossibilité de ce dernier. Par contre, l'objet de Galilée n'est pas l'existence ou non du vide, mais les lois du mouvement lui-même. Dans les *Discours*, il discute donc le mouvement dans un vide supposé afin de pouvoir *faire abstraction* des frottements et de la poussée d'Archimède qui, dans un milieu dense, viennent contrarier le mouvement. Pour Galilée, le résultat important est que, dans le cas d'une chute dans le vide – que celui-ci se rencontre ou non dans la nature –, tous les corps sont animés de la même vitesse, quel que soit leur poids. Il pratique donc une véritable expérience de pensée, le vide étant utilisé comme cas limite pour étudier les propriétés du mouvement. Ce processus d'abstraction, d'idéalisation du réel est la condition de toute science quantitative, et le recours au mouvement dans le vide joue désormais à ce propos un rôle archétypal.

Galilée discute également la question du vide à propos de l'autre *science nouvelle*, la science de la résistance des matériaux. Tout en se référant à l'“horreur du vide”, il opère ici aussi un retournement sensationnel. En effet, il transforme le principe absolu des scolastiques en une question expérimentale, quantifiée. Il a, dit-il, appris des fontainiers de Florence qu'aucune pompe, quelle que soit l'ingéniosité des ingénieurs, ne peut faire monter l'eau “*un cheveu plus haut que dix-huit brasses*”.⁸ Eh bien, la nature aura horreur du vide ... à raison de 18 brasses ! Au-delà, la colonne d'eau se brise sous son propre poids. Quoi de plus étranger à la pensée scolastique, de plus contraire à l'*horror vacui* médiévale, de plus moderne que cette *quantification* d'un “principe” ? L'“horreur du vide” est devenue une “théorie effective”...

En fait, la démarche de Galilée est ici complexe. Il est à la recherche de l'explication de la cohésion des matériaux, question évidemment hors de portée de la science de l'époque. Il commence par reconnaître le rôle de l'“horreur du vide” pour expliquer la cohésion des deux plaques lisses accolées – encore qu'il formule des doutes à propos de cette explication : comment un vide qui ne s'est pas encore créé pourrait-il empêcher la séparation des deux plaques, comment un effet positif pourrait-il suivre d'une cause négative ? Quoi qu'il en soit, loin de s'en tenir à une discussion qualitative, il présente un dispositif expérimental permettant de *mesurer* cet effet par la résistance opposée au mouvement d'un piston devant réaliser le vide dans un récipient,

⁷G. Galilée, *Lettre à Christine de Lorraine*, in *Après Galilée, Science et foi : un nouveau dialogue*, sous la dir. de P. Poupard, Desclée de Brouwer, Paris 1994, p. 77.

⁸G. Galilée, *Discours sur deux sciences nouvelles*, A. Colin, Paris 1970, p. 19.

et il conclut de ces *mesures* que la source de la cohésion des matériaux doit être cherchée ailleurs. Il élabore alors une théorie fondée sur la présence au sein des matériaux d'une infinité de vides sans dimension – qu'il assimile à des "indivisibles" –, ce qui lui donne du reste l'occasion de présenter une discussion fameuse sur les propriétés paradoxales de l'infini.

Les observations de Galilée dans les *Discours* incitèrent bientôt un groupe de savants romains à étudier plus avant le problème de la hauteur maximale atteinte par l'eau. Vers 1640, on installa le long de la façade de l'un d'entre eux un tuyau de plomb vertical de onze mètres plongeant dans un bassin plein d'eau et fermé dans le bas par une vanne. Une fois le tuyau complètement rempli de liquide, l'extrémité haute fut scellée et on ouvrit la vanne empêchant l'écoulement par le bas. Chacun put alors le constater : la hauteur de la colonne d'eau diminua d'abord, pour se stabiliser à la valeur annoncée par Galilée ! Restait à décider ce qui se passait dans le volume libéré dans le haut du tube par l'écoulement partiel de l'eau : s'y trouvait-il de l'air, ou quelque autre substance inconnue, ou au contraire y régnait-il le vide ? Afin d'étudier si le son s'y propage, le tube fut surmonté d'une boule de verre et une cloche y fut placée, actionnée de l'extérieur par un aimant. Mais l'expérience fut peu concluante, car les vibrations de la cloche se transmettaient au tube.

La véritable avancée fut réalisée par Torricelli, brillant mathématicien et disciple de Galilée, qui partagea les derniers mois du savant. Informé de l'expérience romaine, Torricelli eut l'idée, en 1644, de remplacer l'eau par du mercure, ce qui la rendait beaucoup plus commode à réaliser – encore que souvent le tube de verre cassât quand on le retournait. L'expérience fut réalisée pour la première fois par Viviani, autre disciple de Galilée et son secrétaire pendant les dernières années de sa vie, quand le vieillard était devenu aveugle. Que le vide se fasse au sommet du tube, Torricelli le montre de la manière suivante : ayant recouvert d'eau le mercure du bassin inférieur, et remontant progressivement le pied du tube, il observe que, au moment où celui-ci atteint le niveau de l'eau, le mercure se vide d'un coup et l'eau se précipite dans le tube "*avec une force terrible*". Torricelli observe aussi que la source du phénomène est extérieure au tube, car la forme de la partie supérieure de celui-ci n'influe pas sur la hauteur du mercure. Le premier (à l'exception peut-être de Baliani, qui suggéra en 1630 à Galilée que le poids de l'air pourrait expliquer la hauteur limite de pompage), Torricelli suggéra que le phénomène trouvait sa source dans la pression atmosphérique : "*Bien des gens ont dit que le vide n'était pas possible, d'autres qu'il était possible mais avec une répugnance de la Nature, et avec difficulté; personne n'a dit, que je sache, que le vide était possible sans difficulté ni répugnance de la nature. (...) Je trouve par des calculs très faciles que la cause que je suppose (à savoir le poids de l'air), devrait à elle seule créer une résistance supérieure à celle qu'on rencontre à faire le vide.*"⁹ Torricelli suggéra encore la possibilité d'utiliser le niveau de mercure dans le tube pour indiquer les changements atmosphériques.

Avec l' "expérience barométrique" commençait la nouvelle histoire du vide : celle du vide expérimental. N'est-ce pas comme un symbole de la science nouvelle, que ce fussent précisément deux proches disciples de Galilée qui en furent les auteurs ?

⁹Lettre à Ricci, in *L'oeuvre de Torricelli : science galiléenne et nouvelle géométrie*, F. De Gandt éd., Les Belles Lettres, Paris 1989, p. 225.

... à Pascal et à Boyle ...

L'expérience de Torricelli, diligemment communiquée à l'Europe savante par l'infatigable Mersenne, fut reproduite en 1646 par les Pascal. Blaise multiplia alors les expériences, faisant fabriquer d'immenses tubes de verre de formes variées, remplis tantôt d'eau, tantôt de vin, réfutant l'une après l'autre les objections. Ainsi, montrait-il par exemple que l'espace en haut du tube n'était pas rempli de vapeurs : quand deux tubes identiques sont remplis, l'un d'eau, l'autre de vin, le niveau du liquide est plus élevé dans le second que dans le premier, alors que l'inverse devrait se produire si les vapeurs remplissaient l'espace supérieur, en raison de la volatilité plus grande du vin.

Pascal était d'opinion que, probablement, le phénomène, de même que tous ceux attribués à l'horreur du vide, était dû à la pression de l'air atmosphérique sur le mercure du bassin. Pour le vérifier, il mena bientôt l'extraordinaire expérience du "vide dans le vide". Un tube étroit, long de trois pieds, rempli de mercure et fermé par une membrane, est accroché à l'intérieur d'un tube plus large, long de six pieds et également rempli de mercure. L'expérience a été calculée de manière telle que, le grand tube ayant été renversé sur un bassin et le mercure s'y étant stabilisé à la hauteur attendue, le pied du petit tube plonge dans le liquide. Au moment où la membrane qui ferme le petit tube est percée, tout le mercure qui s'y trouvait s'écoule d'un coup, – ce qui s'explique par l'absence d'air dans le haut du grand tube pour équilibrer la pression. Enfin, Pascal organisa, sans rien laisser au hasard, "*la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*" du 19 septembre 1648, qui démontra l'effet de la pression atmosphérique : au cours de cette journée, son beau-frère observa la diminution de la hauteur de mercure à différentes altitudes sur les flancs du Puy de Dôme, ayant pris la précaution de laisser au bas de la montagne un tube témoin. "*Est-ce que la nature abhorre plus le vide sur les montagnes que dans les vallons ?*" s'exclama Pascal. Il conclut : "*Du premier de ces trois principes, que la nature a pour le vide une horreur invincible, j'ai passé à ce second, qu'elle en a horreur, mais pas invincible; et de là je suis enfin arrivé à la croyance du troisième, que la nature n'a aucune horreur pour le vide.*"¹⁰ Et l'instrument de ce cheminement, ce sont les expériences, qui "*sont les véritables maîtres qu'il faut suivre dans la physique*", expériences qu'il a menées "*avec beaucoup de frais, de peine et de temps*". Dans tout ce travail expérimental, le jeune Pascal fit preuve d'une rigueur et d'une inventivité remarquables. Quel contraste avec les quelques pauvres expériences menées par les savants du Moyen-âge ! Mais ce succès doit autant aux progrès des techniques et à la dextérité des artisans qu'à l'imagination du savant.

Malgré sa prudence quant à l'interprétation de ses premières expériences, Pascal fut entraîné dès 1647 dans une polémique célèbre avec le Père Noël, de la Société de Jésus, tenant de l'orthodoxie aristotélicienne comme tout son ordre. Ce fut pour Pascal l'occasion de formuler avec une remarquable clarté les règles de la méthode expérimentale. Lors de cette polémique, il définit l'espace vide : "*Ce que nous appelons espace vide, est un espace ayant longueur, largeur et profondeur, et immobile, et capable de recevoir et de contenir un corps de pareille longueur et figure; et c'est ce qu'on appelle solide en géométrie, où l'on ne considère que les choses abstraites et immatérielles.*" Au Père qui, imprégné des concepts de l'impénétrabilité aristotélicienne des corps, ne peut "*distinguer les dimensions d'avec la matière, ni l'immatérialité d'avec le néant*", Pascal explique encore que "*la chose que nous concevons et que nous exprimons par le mot d'espace vide, tient le milieu entre la matière et le néant, sans*

¹⁰B. Pascal, *Oeuvres complètes*, Bibl. de la Pléiade, Paris 1980, p. 401.

participer ni à l'un ni à l'autre; qu'il diffère du néant par ses dimensions; et que son irrésistance et son immobilité le distinguent de la matière."¹¹ Ce texte limpide illustre combien les meilleurs esprits, sans aucun doute éclairés par les nouvelles découvertes expérimentales, s'étaient affranchis des définitions aristotéliennes, – même si le dogmatisme cartésien s'obstinait à remplir l'univers des tourbillons d'une "matière subtile" mal définie. Notons en passant que, dans la polémique avec le Père Noël, fut abordée la question du mouvement dans le vide : selon le jésuite, le fait que le mouvement des corps ne soit pas instantané dans l'espace du haut du tube prouverait que n'y règne pas le vide; Pascal pour sa part contestait cet *a priori* aristotélien, et adoptait résolument le point de vue galiléen.

Otto von Guericke, ingénieur des fortifications et bourgmestre de Magdebourg, donna à l'étude du vide les prolongements spectaculaires que l'on sait.¹² Copernicien convaincu, il méditait depuis sa jeunesse sur les questions de l'espace, du vide et de l'infini. Informé des expériences de Torricelli, il imagina vers 1647 un dispositif plus simple et plus maniable que le tube de mercure pour étudier le vide : il entreprit de pomper l'air d'un ballon à l'aide d'une sorte de grande seringue. Constatant que l'air restant dans le ballon ne s'accumulait pas dans le fond, comme l'aurait fait un liquide, il mit en évidence l'élasticité de l'air. Ayant progressivement perfectionné sa pompe, il put se livrer à de nombreuses expériences dans l'espace vide qu'il s'était ménagé : sur la propagation de la lumière, du son, sur les réactions de différents animaux (insectes, poissons). Ayant démontré que la nature n'a pas réellement horreur du vide, Guericke se fit le propagandiste efficace du rôle de la pression atmosphérique avec la fameuse expérience des hémisphères, réalisée à Magdebourg en 1657 (et non devant la diète de Ratisbonne, comme on le croit souvent) : deux attelages de quatre chevaux ne purent séparer deux hémisphères de cuivre accolées de 80 cm de diamètre, après qu'elles eussent été vidées de leur air.

Les préoccupations philosophiques de Guericke, souvent présenté simplement comme "un habile expérimentateur", confirment bien que c'est le cerveau qui guide la main de l'expérimentateur, et illustrent une fois de plus la supercherie des discours sur l'expérience "pure" et le fait "brut". C'est d'ailleurs encore guidé par des considérations théoriques concernant les forces d'attraction planétaires que Guericke conçut le dispositif qui le conduisit à la réalisation de sa machine électrostatique et aux fameuses expériences qu'elle permit de réaliser.

La pompe de Guericke fut bientôt perfectionnée par Boyle et Hooke, et par Huygens. Le tour d'Europe qu'effectua la conquête du vide, d'Italie en France et en Allemagne, puis aux Pays-Bas et en Angleterre, illustre bien l'internationalisme de la science du XVII^e siècle, et les relations suivies qu'entretiennent les savants.

En fait, la question du vide est maintenant réglée pour l'essentiel. Le principe médiéval se trouve expliqué par la pression atmosphérique, et les perfectionnements des pompes ouvrent la voie aux applications qui vont bientôt se multiplier. Mais le vide *expérimental* a encore un rôle à jouer, de nature différente cependant. En Angleterre particulièrement, la question du vide va servir aux tenants de la méthode expérimentale, pour *illustrer* les mérites de celle-ci. Boyle et ses collègues seront les artisans de cette vaste "mise en scène" du vide.

¹¹*ibid.*, p. 376, 380, 381.

¹²O. von Guericke, *The new (so-called) Magdeburg experiments of Otto von Guericke*, Arch. Int. d'Hist. des Idées **137**, Kluwer, Dordrecht 1994.

Boyle publia en 1660, les résultats de ses expériences avec la pompe dans ses *“New Experiments Physico-Mechanicall, Touching the Spring of the Air and its Effects”*, rééditées et étendues en 1662 pour comprendre notamment les résultats concernant l'élasticité des gaz exprimés quantitativement sous la forme de la loi qui porte son nom. Pourtant *“Boyle n'était pas “vacuiste” (...) Il n'était pas non plus “pléniste” (...) Ce qu'il s'efforçait de créer, c'était un discours philosophique de la nature, dans lequel de telles questions n'avaient pas à être posées. La pompe à air ne permettait pas de décider si un vide “métaphysique” existait ou non. Ce n'était pas là un défaut de la pompe; c'était au contraire une de ses forces.”*¹³ En effet, Boyle entendait limiter les débats entre savants aux faits “positifs” et donnait une définition opérationnelle du vide, n'impliquant pas de prise de position sur l'existence ou non d'un “vrai” vide, mais permettant aux savants de se mettre d'accord sur l'expérience et sur ce qu'ils avaient véritablement observé – d'où l'importance du témoignage, et le grand soin pris par Boyle pour rapporter avec exactitude les détails expérimentaux, y compris pour les expériences qui ont “échoué”.

A travers la question du vide, chargée pendant si longtemps de métaphysique, l'enjeu pour Boyle était donc de définir *“une nouvelle manière de travailler, de parler, de nouer des relations sociales entre philosophes de la nature. Aux yeux de Boyle et de ses collègues, (...) les divergences étaient sans conséquences, voire même fécondes et nécessaires (à l'intérieur) d'une frontière essentielle construite autour des pratiques de la nouvelle forme de vie expérimentale . Les dissensions impliquant une violation de cette frontière (...) étaient quant à elles jugées fatales.”*¹⁴ C'est précisément cette approche que contestait vivement Hobbes. Celui-ci était attaché au plénisme cartésien et contestait la validité des résultats expérimentaux de Boyle. Mais surtout, dans sa vision politique absolutiste, il réclamait un parfait accord entre toutes les positions exprimées, ne laissant pas de place au désordre des opinions. Particulièrement inacceptable à ses yeux était la prétention de Boyle et de ses partisans de ménager une zone de compétence exclusive des expérimentateurs, hors du contrôle du Souverain.

Ainsi le projet porté par les "expérimentalistes" peut-il être lu également dans une perspective plus proprement politique : à un moment où *“les autorités religieuses et politiques voyaient dans les convictions individuelles la principale source de danger pour la monarchie rétablie, (les) expérimentateurs proposèrent (...) leur communauté comme une société idéale où les querelles pouvaient avoir lieu sans danger et où les erreurs dangereuses étaient rapidement corrigées.”*¹⁵ Cette société modèle se réalisait concrètement au sein du groupe de savants se réunissant à *Gresham College*, puis rassemblés à partir de 1666 au sein de la *Royal Society*, où siégeaient Boyle, Wallis, Wren, et dont l'assistant de Boyle, Robert Hooke était l'expérimentateur en titre. L'esprit qui régnait dans ce groupe était proche de celui qui anima à Florence, de 1657 à 1667, les travaux de l'*Accademia del Cimento* : celle-ci, qui fut la première à consacrer ses séances à des travaux collectifs, s'interdisait toute discussion philosophique ou théorique, mais récolta une belle moisson de résultats expérimentaux dans tous les domaines d'étude de l'époque.¹⁶

¹³S. Shapin et S. Schaffer, *Leviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, La Découverte, Paris 1993, p. 49.

¹⁴*ibid.*, p. 81.

¹⁵*ibid.*, p. 294-5.

¹⁶M. Dumas, *Esquisse d'une histoire de la vie scientifique*, in *Histoire de la science*, sous la dir. de M. Dumas, Encycl. de La Pléiade, Gallimard, Paris 1957, p. 80 sq.

Désormais, les pompes à air, dont la représentation ornait le frontispice des publications de Boyle et jusqu'à ses portraits, allaient se multiplier, propageant à travers toute l'Europe les observations de Boyle comme des *faits*. Bientôt, on en trouverait dans tous les cabinets de physique, dont la mode se répandait rapidement, et la détention d'une machine puissante serait la marque d'un laboratoire bien équipé.

... et à Newton

Mais rien n'illustre mieux sans doute le succès du programme de Boyle, que la référence faite à "son" vide par Newton dans le fameux *Scolie général* qu'il ajouta à la deuxième édition (1713) des *Principia*, et où il expose avec force ses conceptions scientifiques, philosophiques et religieuses : "*Les projectiles n'éprouvent ici-bas d'autre résistance que celle de l'air, et dans le vide de M. Boyle la résistance cesse, en sorte qu'une plume et de l'or y tombent avec une égale vitesse. Il en est de même des espaces célestes au-dessus de l'atmosphère de la terre, lesquels sont vides d'air.*"¹⁷ Le "vide de M. Boyle" est ainsi invoqué explicitement dans le cadre de l'étude du mouvement des objets terrestres et célestes, c'est-à-dire de la mécanique.

Le "vide expérimental" du tube barométrique et de la pompe a donc contribué à construire l'espace vide qui sert de cadre à la mécanique newtonienne, cet "*espace absolu, (qui) est, de par sa nature même, sans relation avec aucune chose externe, toujours semblable et immobile*", l'espace homogène, isotrope, dépourvu de matière que Newton a défini aux premières pages des *Principia*.¹⁸ Mais il faut souligner que cet espace où la mécanique newtonienne déploie ses équations est, lui aussi, défini ici de manière "opérationnelle", en quelque sorte expérimentale, c'est-à-dire se révélant efficace pour le calcul. En effet, cet espace ne peut être un "pur" réceptacle, il ne peut pas être *réellement* dépourvu de propriétés. Car alors, il faudrait admettre que, à travers cet espace vide, se transmettent à *distance* les forces de la gravitation, et ceci évoque fâcheusement les qualités occultes des scolastiques. (On se rappellera que c'est dans le souci d'écartier le recours aux forces occultes que Galilée avait rejeté le rôle de la lune dans l'explication des marées, trouvant plutôt la cause de celles-ci dans les mouvements diurne et annuel combinés de la terre, et voyant dans ce mécanisme – comme ses contradicteurs du reste, à commencer par le pape Urbain VIII – la *preuve* du mouvement de la terre). "La langue va où la dent fait mal", et Newton continue, dans le *Scolie* : "*J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de la gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation. (...) Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité, et je ne feins pas d'hypothèses. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes, est une hypothèse : et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celles des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale.*"¹⁹ Ce qui deviendra, sorti de son contexte, mal compris, le programme mécaniste et positiviste, est chez Newton un cri d'impuissance : "*Je ne feins pas d'hypothèses*", car je n'en ai – hélas ! – pas à proposer...

Mais la tentation est telle que les intuitions de l'*Optique* (Questions 18, 22, 31)²⁰ sont reprises en conclusion du *Scolie* : "*Ce serait ici le lieu d'ajouter quelque chose sur*

¹⁷I. Newton, *Mathematical Principles of natural philosophy*, F. Cajori éd., Univ. of California Press, Berkeley 1946, p. 543; traduction française in A. Koyré, *op. cit.*, p. 269.

¹⁸*ibid.*, p. 6.

¹⁹*ibid.* p. 545-7; p. 272-273.

²⁰I. Newton, *Optique*, Christian Bourgeois, Paris 1989.

cette espèce d'esprit très subtil qui pénètre à travers tous les corps solides, et qui est caché dans leur substance; c'est par la force et par l'action de cet esprit que les particules des corps s'attirent mutuellement aux plus petites distances, et qu'elles cohèrent dès qu'elles sont contiguës; c'est par lui que les corps électriques agissent à de plus grandes distances, tant pour attirer que pour repousser les corpuscules voisins; et c'est encore par le moyen de cet esprit que la lumière émane, se réfléchit, s'infléchit, se rétracte, et échauffe les corps; toutes les sensations sont excitées, et les membres des animaux sont mus, quand leur volonté l'ordonne, par les vibrations de cette substance spiritueuse qui se propage des organes extérieurs des sens, par les filets solides des nerfs, jusqu'au cerveau; et ensuite du cerveau dans les muscles. Mais ces choses ne peuvent s'expliquer en peu de mots; et on n'a pas fait encore un nombre suffisant d'expériences pour pouvoir déterminer exactement les lois selon lesquelles agit cet esprit électrique."²¹ Que de tels propos suivent les déclarations de foi en un Dieu omniprésent, "*non seulement virtuellement, mais en substance*", un Dieu qui existe "*toujours et partout*", suggère que cet "esprit universel" n'est pas loin d'être de quelque manière de nature divine : Leibniz relèvera les relents spinozistes d'un espace conçu comme une sorte de "*sensorium*" de Dieu.

3. Le vide technique

Machines à feu, rayons cathodiques et ampoules électriques

De la leçon de Newton et de celle de Boyle, le XVIIIème siècle retiendra un double message : l'espace vide newtonien est le bon support technique (mathématique) de la mécanique; le vide de la pompe ouvre la perspective de nouveaux développements techniques.

Au premier rang de ceux-ci, les "machines à feu". Déjà au XVIème siècle, l'"éolipile" et les *Pneumatiques* de Héron d'Alexandrie avaient inspiré des tentatives sans lendemain d'utilisation de la force de la vapeur. Mais ce n'est pas avant la fin du XVIIème siècle que la découverte de la pression atmosphérique devait mener à des réalisations concrètes. Vers 1680, à une époque où les performances de la chaudronnerie et de la métallurgie ne permettaient pas d'utiliser de hautes pressions, Huygens et son assistant D. Papin avaient procédé sans grand succès à des expériences visant à employer la poudre à canon pour produire, dans un cylindre muni d'un piston, des gaz chauds dont le refroidissement ultérieur devait provoquer le mouvement du piston, avec l'aide de la pression atmosphérique agissant sur celui-ci. Papin – qui est connu pour avoir inventé également le "digesteur", ou marmite à pression, et la valve de sécurité l'accompagnant – pensa en 1690 à utiliser plutôt les propriétés de condensation de la vapeur : "*Puisque c'est une propriété de l'eau, qu'une petite quantité de celle-ci, transformée en vapeur par la chaleur, a une force élastique semblable à celle de l'air, mais se résout de nouveau en eau lors d'un refroidissement, de ceci je conclus que des machines pourraient être construites dans lesquelles l'eau, à l'aide d'une chaleur peu intense, et à faible coût, pourrait produire ce vide parfait qui ne pouvait en aucun cas être obtenu avec la poudre à canon.*"²²

²¹*op. cit.*, p. 547; p. 280 (texte légèrement modifié à partir de la traduction anglaise).

²²cité in C. Singer et al., *A History of Technology*, Oxford University Press, Oxford 1958, p. 171.

Au tournant du siècle furent mises au point, par Thomas Savery et, indépendamment, par Thomas Newcomen, des machines qui furent effectivement utilisées pour pomper l'eau des mines. La machine de Newcomen se composait d'une chaudière produisant de la vapeur à la pression atmosphérique et d'un cylindre muni d'un piston, directement en contact avec l'atmosphère (d'où le nom de "machines atmosphériques") et accroché à un balancier muni d'un contrepoids. La vapeur était admise dans le cylindre au moment où le contrepoids faisait monter le piston. Lorsque celui-ci atteignait le sommet du cylindre, l'admission de vapeur était interrompue, et elle était condensée par la projection d'eau froide sur le cylindre. L'action conjuguée du vide provoqué par la condensation de la vapeur et de la pression atmosphérique rappelait le piston et soulevait le contrepoids. Les machines de Newcomen se répandirent rapidement dans les mines de Cornouailles, dans toute l'Angleterre et sur le continent. A partir de 1769, James Watt leur apporta une série d'améliorations décisives, visant systématiquement à augmenter le rendement. Sa première innovation majeure consista à séparer le cylindre et le condenseur, de manière à éviter les pertes dues au refroidissement et au réchauffement du cylindre à chaque cycle. Les économies de combustible étaient telles que Watt assura sa fortune et celle de son associé en proposant aux utilisateurs de leur livrer et d'installer gratuitement les machines, moyennant une redevance correspondant au tiers des économies réalisées grâce au nouveau procédé. Watt remplaça également l'effort de la pression atmosphérique sur la face supérieure du piston par une action de la vapeur alternativement sur les deux faces, et le mouvement de va-et-vient du piston fut transformé en mouvement rotatif par un système bielle-manivelle. Désormais, la machine à vapeur pouvait se prêter à tous les usages, et la vague de la révolution industrielle submerger l'Europe : *"la trilogie fer, houille et vapeur sert de base à un nouveau système qui sera celui de tout le XIXème siècle."*²³

Ces développements illustrent les relations complexes de l'histoire de la physique et de l'histoire des techniques. Il est vrai que le développement de la machine à vapeur fut largement empirique, et que nombre des inventeurs, Newcomen par exemple, étaient dépourvus de connaissances scientifiques systématiques. Mais, comme l'indique clairement Papin lui-même, on ne saurait sous-estimer le rôle des conceptions nouvelles sur le vide et la pression atmosphérique : sans ces nouvelles conceptions, les machines à vapeur ne pouvaient probablement pas voir le jour. Watt lui-même a commencé sa carrière comme "constructeur d'instruments mathématiques" à l'université de Glasgow, où il se lia d'amitié avec le chimiste J. Black, qui découvrit le gaz carbonique; il devint également membre de la fameuse "Lunar Society" de Birmingham, société de savants et d'hommes d'affaire modernistes dont faisait partie Priestley. Il y a peu de doute que les travaux de Black sur la chaleur latente (il est l'inventeur de la calorimétrie quantitative) aient influencé Watt. A l'inverse, bien entendu, c'est le développement des machines qui a éveillé en 1824 la réflexion de Sadi Carnot sur la question des rendements, lui permettant de jeter les bases de la science qui allait devenir par excellence celle du XIXème siècle, la thermodynamique, au carrefour de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée et des développements industriels, tant en chimie qu'en physique.

Quant aux techniques du vide proprement dites, leur développement ultérieur conduisit, grâce à l'étude des décharges dans les gaz raréfiés, à une série de découvertes fondamentales quant à la structure microscopique de la matière. Et si ces recherches aboutirent il y a juste un siècle à la découverte de l'électron, il est fascinant de constater qu'elles remontent aux premiers temps des travaux sur le vide et sur les phénomènes

²³B. Gille, *Histoire des Techniques*, Encycl. de la Pléiade, Gallimard, Paris 1978, p. 705.

électriques. Dès 1675, on avait en effet remarqué une lueur bleuâtre émanant des tubes barométriques lorsqu'ils étaient transportés de nuit. F. Hawksbee, un élève de Boyle montra que l'électrification du mercure par frottement sur le verre était la cause du phénomène. Il construisit une machine rappelant la machine électrostatique de Guericke, consistant en un globe de verre raccordé à une pompe, tournant sur un axe et qu'il électrisait en le frottant de la main. Une fois un vide suffisant réalisé, il en pouvait en tirer des lueurs et même des étincelles; il put également observer des lueurs induites dans un globe vidé de son air, lorsqu'on l'approchait d'un globe électrisé. Faraday reprit ces recherches, mais ne put les mener très loin, en raison de l'insuffisance du vide qu'il pouvait obtenir. Mais il nota : *“Les résultats relatifs aux différentes conditions de la décharge positive et négative auront sur la philosophie de la science électrique une influence bien plus grande que nous ne l'imaginons à présent.”*²⁴ Un tournant eut lieu quand Geissler obtint en 1855, grâce à la pompe à mercure, des pressions de l'ordre de 0.1 torr (1 torr = 1 mm Hg) dans des tubes auxquels étaient soudées des électrodes de platine. En une quinzaine d'années, Plücker, Hittorf, Goldstein, Crookes purent alors étudier systématiquement ces phénomènes, déceler l'émission des “rayons cathodiques”, ainsi que de “rayons canaux” qui sont en fait des ions positifs, et analyser leurs propriétés en vue de déterminer leur nature, soit ondulatoire, soit corpusculaire. Si le nom de Crookes est spécialement attaché à ces recherches, c'est qu'il construisit des tubes de forme bien adaptée, et où étaient réalisés des vides particulièrement poussés. On sait comment ces travaux, poursuivis par J. Perrin et J.J. Thomson, menèrent à l'identification de l'électron, la première particule subatomique connue, en 1897. Ce n'est pas le lieu ici de relater en détail ces événements mais, on le constate, c'est encore un épisode crucial de l'histoire de la physique qui peut se raconter à partir de celle du vide...

La fin du XIX^{ème} siècle est aussi l'époque de la diffusion de l'éclairage électrique au moyen des lampes à incandescence fabriquées à partir de 1880-81 en Grande-Bretagne par J. Swan et aux États-Unis par T. Edison. Si l'idée du filament à incandescence avait été proposée depuis longtemps, il fallut attendre les développements de la pompe à mercure pour que puisse être réalisé dans les ampoules un vide suffisant pour assurer au filament un temps de vie raisonnable. Il est amusant de savoir que c'est la publication des travaux de Crookes qui attira en 1877 l'attention de Swan sur ces nouveaux développements, l'incitant à reprendre ses travaux sur la lampe à incandescence. Et dès 1884, parmi les premiers édifices à être équipés de l'éclairage électrique figura le respectable collège Peterhouse de Cambridge, à l'initiative de Lord Kelvin.

Il est inutile d'insister sur les nouveaux développements des pompes à vide, qui permirent bientôt d'atteindre les vides de 10^{-5} torr nécessaires pour la fabrication des tubes électroniques, ouvrant ainsi une nouvelle ère à la technologie. Aujourd'hui, l'ultravide règne dans de nombreux domaines scientifiques, techniques et industriels, de la fabrication des composants électroniques aux technologies des surfaces, et aux tubes à vide des accélérateurs de particules.

²⁴cité in E. Bauer, *Electricité et magnétisme*, in *La science contemporaine. I/ Le XIX^{ème} siècle*, sous la dir. de R. Taton, Coll. Quadriga, Presses Universitaires de France, Paris 1995, p. 253.

Espace, vide et éther

Qu'en est-il, pendant tout ce temps, de l' "autre" vide, non plus celui de Boyle, mais celui de Newton ? A. Koyré le dit excellemment : *"L'introduction du vide – avec son corrélatif, l'attraction – dans la conception du monde de Newton fut, malgré les formidables difficultés physiques et métaphysiques qu'elle implique (action à distance, existence du rien), un trait de génie et un pas d'une importance décisive. C'est ce pas qui permit à Newton d'imposer et d'unir en même temps (...) la discontinuité de la matière et la continuité de l'espace. La structure atomique de la matière, vigoureusement affirmée, offrait une base ferme à l'application à la nature d'une dynamique mathématique."*²⁵ Et Newton ayant démontré par la pratique, de manière en quelque sorte expérimentale, la puissance de ses définitions de l'espace et du vide, elles devinrent pour ses successeurs comme des données "techniques", sur lesquelles il est vain de spéculer, et qu'il convient de prendre comme point de départ pour de nouveaux développements.

Certes, si Newton fut honoré de son vivant encore comme un prophète en Grande-Bretagne, où il régna sans partage sur les esprits (ce qui ne fut pas sans dommage dans plusieurs domaines), il n'en fut pas immédiatement de même sur le continent. En France particulièrement, la philosophie de Descartes régnait maintenant dans ces mêmes institutions qui l'avaient condamné à la génération précédente. Voltaire, converti au newtonianisme par Maupertuis et qui accueillait favorablement tout ce qui venait d'Angleterre, s'en fit le propagandiste : *"Un Français qui arrive à Londres trouve les choses bien changées en philosophie comme dans tout le reste. Il a laissé le monde plein; il le trouve vide. A Paris, on voit l'univers composé de tourbillons de matière subtile; à Londres on ne voit rien de cela. Chez nous, c'est la pression de la lune qui cause les marées; chez les Anglais, c'est la mer qui gravite vers la lune. (...) Chez vos cartésiens, tout se fait par une impulsion qu'on ne comprend guère; chez M. Newton, c'est par une attraction dont on ne connaît pas mieux la cause."*²⁶

Mais, on l'a dit, foin des spéculations : *techniquement*, l'espace de Newton fonctionne à merveille. Les expéditions de Clairaut et Maupertuis en Laponie en 1736-1737, celle de La Condamine au Pérou de 1735 à 1744 confirment la forme ellipsoïdale de la terre. En 1758, Clairaut avait prédit le retour de la comète reconnue par Halley, l'ami de Newton, avec une période augmentée de 618 jours (518 jours à cause de l'action de Jupiter, 100 à cause de Saturne). *"Jamais question astronomique n'excita une curiosité plus vive, plus légitime. Toutes les classes de la société attendaient avec un égal intérêt la réapparition annoncée. Un laboureur saxon, Palitzsch, l'aperçut le premier. A partir de ce moment, d'une extrémité de l'Europe à l'autre, mille télescopes marquèrent chaque nuit des points de la route de l'astre à travers les Constellations. La route fut toujours, dans les limites de la précision du calcul, celle que Clairaut avait assignée à l'avance."*²⁷ Les foules d'amateurs sont conquises – ce qui ne manque pas d'être favorable au progrès de la science, comme l'ont compris Galilée, Lavoisier, ... et nos contemporains. Quant aux savants, d'Alembert, Euler, Lagrange, ils démontrent par la pratique, au rythme des développements mêmes qu'ils apportent à l'édifice, la puissance du cadre théorique newtonien. Pour sa part, Laplace applique systématiquement et rigoureusement, dans son *Système du Monde*, le programme newtonien à l'ensemble du système solaire, alors que la prédiction par Adams et Le

²⁵A. Koyré, *Etudes newtoniennes*, Gallimard, Paris 1980, p. 34.

²⁶Voltaire, *Lettres philosophiques* (XIV^e lettre), Flammarion, Paris 1992, p. 90.

²⁷Arago, notice biographique de Laplace.

Verrier de la trajectoire de Neptune, déduite des perturbations de celle d'Uranus, apparaîtra comme un nouveau triomphe.

Dans ce contexte, il est clair que la mesure par Gauss des angles du triangle formé par les sommets de trois montagnes, afin de déterminer si leur somme formait ou non deux droits, était certes justifiée par la curiosité du géomètre qui a longuement médité la possibilité de géométries non-euclidiennes, mais n'était en rien une remise en cause de la mécanique newtonienne : celle-ci peut s'accommoder d'un espace affecté d'une métrique non-euclidienne, et rien ne conduisait à remettre en question sa validité générale.

Pourtant, au début du XIX^{ème} siècle, la physique se complique. L'étude des franges d'interférence par Young, qui montre que "*la lumière ajoutée à la lumière peut produire de l'obscurité*" (Arago), l'analyse de la polarisation par Malus et Arago, les travaux de Fresnel conduisent à renouer, contre l'atomisme de Newton, avec la théorie ondulatoire de Huygens. Le coup décisif est porté par Fizeau, en 1849, avec la mesure d'une vitesse de la lumière plus faible dans l'eau que dans l'air, contrairement aux prédictions de Newton. Il faut se rendre à l'évidence : l'espace apparemment vide est le siège d'ondulations. A celles-ci, il faut un support, que l'on baptisera *éther*, – ce qui n'engage à rien. Mais cet éther semble doué, si on veut lui assigner un modèle mécanique, de propriétés contradictoires qui ont fait hésiter Fresnel lui-même : si les ondes lumineuses sont transversales, comme le suggère l'étude de la polarisation, alors l'éther doit être parfaitement élastique et donc extrêmement rigide, alors qu'il se laisse traverser librement par les corps célestes sans leur offrir de résistance. Une autre difficulté sérieuse semble surgir : on n'observe pas d'effet du déplacement des corps par rapport à l'éther, ni dans le phénomène de l'aberration des étoiles, ni dans la transmission de la lumière dans un fluide en mouvement. Mais Fresnel propose une explication : l'éther est partiellement entraîné, et il fournit la loi de cet entraînement.

Jusqu'ici, le vide *technique* de Newton résiste. L'espace est rempli d'éther, – soit. Mais l'espace comme réceptacle n'est pas affecté. Après tout, ce sont les propriétés *de l'éther* qui apparaissent paradoxales, mais à l'espace on demande seulement de *contenir* l'éther. Pour preuve, l'entraînement partiel de l'éther proposé par Fresnel : si l'éther est "partiellement entraîné", c'est bien par rapport à un repère fixe, l'espace.

Cependant, la physique se complique encore. Coulomb, Ampère avaient proposé pour les phénomènes électriques et magnétiques une approche newtonienne basée sur l'action à distance. Faraday, lui, insiste sur le rôle de la polarisation des milieux pour expliquer l'effet des forces agissant de proche en proche. Étendant son intuition au vide, il est conduit à y supposer l'existence de champs, matérialisés par les fameuses lignes de force qu'il visualise avec la limaille de fer. Méditant ces travaux, s'appuyant sur le concept de champ, Maxwell formule bientôt mathématiquement les lois entrecroisées de l'électricité et du magnétisme et, surtout, réussit la grande union de la lumière et de l'électromagnétisme qui avait été pressentie par de nombreux savants, dont Faraday lui-même, et qui devait se trouver confirmée de manière éclatante par la production et la réception d'ondes électromagnétiques par Hertz en 1885. Avec la théorie de Maxwell, la relation de l'éther avec l'espace de la mécanique devient un problème sérieux, car l'éther électromagnétique de Maxwell est autrement riche que le simple support des ondulations de Fresnel : l'éther doit maintenant emmagasiner une énergie potentielle, liée au champ électrique, et une énergie cinétique, liée au champ magnétique.

Mais bientôt, Lorentz formule la théorie microscopique de l'électricité et du magnétisme, dont les équations de Maxwell sont la traduction macroscopique. Et à ce moment, tout change. Car l'éther de Lorentz est *immobile*, comme l'espace absolu de Newton. Il n'y a même plus d'entraînement partiel de l'éther par les corps en mouvement, car Lorentz démontre que cet entraînement macroscopique apparent peut s'expliquer par des effets microscopiques dans l'éther immobile. Mais si l'éther est immobile comme l'espace, l'éther ne *remplit* plus l'espace, il le *remplace* ! *Exit* donc le vide ! La fiction du pur réceptacle n'est plus tenable : se substituant au pseudo-vide "opérateur", "effectif" de l'espace absolu, l'éther sera doté de propriétés *dynamiques*, comme celles qui étaient implicites et refoulées chez Newton, oubliées chez ses successeurs.

Pourtant la difficulté reste : tout déplacement par rapport à cet éther immobile devrait se révéler par un "vent d'éther". En première approximation, on peut se tirer d'affaire grâce à l'hypothèse de l'"entraînement partiel" effectif. Mais, sauf à invoquer d'autres explications *ad hoc*, le vent d'éther devrait se manifester au deuxième ordre. Or il n'en est rien, ainsi que l'indiquent les résultats négatifs de l'expérience de Michelson et Morley. Sur un plan de principe, il *doit* d'ailleurs en être ainsi, si l'on veut affirmer dans toute sa généralité le principe de relativité.

Deux voies vont alors s'ouvrir, mathématiquement équivalentes. Toutes deux s'appuient sur le principe de relativité et sur l'indépassabilité de la vitesse de la lumière; la différence entre elles forme "*la structure fine de la théorie de la relativité*".²⁸ Poincaré conserve l'éther, et pose en postulat que les équations de la mécanique sont invariantes pour le groupe correspondant aux transformations de Lorentz; son propos est dynamique, il est à la recherche d'une "*mécanique nouvelle*". Einstein, lui, se débarrasse de l'éther, postule l'identité des unités de mesure dans tous les référentiels inertiels, et définit une manière originale de "synchroniser les horloges". Il en déduit les transformations de Lorentz, conçues comme l'expression d'une nouvelle cinématique, et transforme notre approche de l'espace et du temps, mais il ne cherche pas ici à élaborer une nouvelle dynamique.

L'histoire de la physique a choisi de suivre la voie d'Einstein. *Exit* l'éther, retour du vide !

4. Le vide théorique

Mais à peine Einstein a-t-il fait disparaître l'éther, pour laisser la place à l'espace vide, qu'il annonce, avec sa théorie de la relativité générale, que le vide lui-même n'existe pas. Car "*selon la Théorie de la relativité générale (...) l'espace ne jouit pas d'une existence indépendante vis-à-vis de "ce qui remplit l'espace" et dépend des coordonnées. Soit donné, par exemple, un champ de gravitation pur décrit par les g_{ik} (comme fonctions de coordonnées) en résolvant les équations de la gravitation. Si l'on suppose le champ de gravitation, c'est-à-dire les g_{ik} , éliminé, il ne reste pas un espace du type (minkowskien) mais absolument rien, pas même un "espace topologique". Car les fonctions g_{ik} ne décrivent pas seulement le champ, mais aussi simultanément les propriétés de structure, topologiques et métriques, de la multiplicité. (...) Un espace*

²⁸Y. Pierseaux, *La structure fine de la Relativité restreinte*, L'Harmattan, Paris 1999.

vide, c'est-à-dire un espace sans champ n'existe donc pas. Descartes n'avait donc pas tellement tort quand il se croyait obligé de nier l'existence d'un espace vide."²⁹

L'histoire du vide, telle que la construiront la relativité générale et la théorie quantique des champs, de la mer de Dirac aux particules virtuelles et aux brisures spontanées de symétrie, est trop connue, et trop excellemment illustrée par de nombreuses contributions au présent ouvrage, pour qu'on veuille s'y arrêter ici. Qu'il suffise de souligner qu'il s'agit désormais d'un vide qui n'a plus rien à voir avec le *donné* d'une intuition, quelle qu'elle soit. Le vide, ou plutôt *les vides*, sont devenus un pur "construit" théorique.

Paradoxalement, le mouvement de la physique moderne consiste à attribuer au vide, à *rejeter* sur lui, les propriétés de symétrie des équations appelées à décrire ... la matière. Et plus particulièrement, à inventer un nouveau vide à chaque nouveau pas dans la description des forces. Comme si les progrès dans la compréhension unifiée de l'être devait se payer d'une complexification du non-être. Avec ce renvoi au "*vide*" des symétries des équations censées décrire la matière, sommes-nous victimes d'un glissement de sens, d'un abus de langage ? Ou le vide et la matière se sont-ils "vraiment" noués indissociablement ? Cette question renvoie à la sempiternelle interrogation sur la "réalité" du monde physique et sur le statut des lois de la physique...

Au-delà de la conquête des concepts, l'histoire du vide met en scène, de manière souvent paradoxale, le fonctionnement même de la physique et la construction de ses objets. Elle adosse aussi, comme le souligne I. Stengers, le débat philosophique et scientifique à des rapports sociaux à la fois prosaïques et redoutablement chargés de pouvoirs : "*Quiconque ouvre un paquet de café et entend "pshhht" sait qu'il a affaire à un emballage "sous vide" et, qu'il le veuille ou non, témoigne contre Hobbes du pouvoir de la pompe de Boyle.*"³⁰

²⁹A. Einstein, *La relativité*, Petite Bibliothèque Payot, Paris 1969, p. 177.

Cet hommage mi-figue mi-raisin à Descartes s'adresse aussi aux scolastiques, qui convenaient qu'un espace doté de dimension ne peut pas être réellement vide, et qu'aucune distance ne peut être mesurée dans le vide; les plus audacieux cependant argumentèrent que si une mesure *en soi* est effectivement impossible, une mesure *par accident* peut être réalisée – voir E. Grant, *op. cit.*, p. 123 sq. et notes.

³⁰I. Stengers, *L'invention des sciences modernes*, La Découverte, Paris 1993, p. 119.