



Le vide matériel, ou la matière crée l'espace

Michel Paty

► To cite this version:

Michel Paty. Le vide matériel, ou la matière crée l'espace. Simon Diner et Edgard Gunzig. Univers du tout et du rien, Editions de l'Université Libre de Bruxelles/Complexe, p. 22-44, 1998. halshs-00177356

HAL Id: halshs-00177356

<https://shs.hal.science/halshs-00177356>

Submitted on 7 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in Simon Diner et Edgard Gunzig (éds.), *Univers du tout et du rien*, Editions de l'Université Libre de Bruxelles/Complexe, Bruxelles, 1998, p. 22-44.

Le vide matériel, ou la matière crée l'espace

Michel PATY

Introduction. - Le vide entre non-être et lieu du mouvement des corps. - 2. La pensée physique de l'existence du vide.- 3. Le vide et la pensée de l'espace.- 4. L'éther ou la matière du vide. - 5. L'espace vide, forme de la matière.- 6. Où la matière crée l'espace.

INTRODUCTION

Nos connaissances actuelles sur le vide font appel à l'ensemble des théories classiques de la physique (requis, par exemple, par l'obtention de vides poussés), aussi bien qu'aux théories relativistes et quantiques et à la cosmologie. Elles interpellent l'intuition commune, habituée depuis à peu près trois cents cinquante ans à le “voir” dans le thermomètre à mercure et à se le représenter dans les espaces interstellaires, en invitant à trouver sous ce qui nous paraît aujourd'hui trop tranquillement évident des réalités plus complexes, comme, par exemple, l'idée que le vide est matériel, et à nous interroger sur leurs fondements conceptuels, pour tenter de les comprendre. A cet égard, il est utile de nous demander comment, aux différentes étapes de l'histoire de la pensée, cette même notion de vide, ou plutôt ce que l'on entend aujourd'hui par le même mot, a été comprise ou constituée, au travers de questionnements de nature aussi bien physique que philosophique.

On peut distinguer, en fonction des significations que nous attribuons rétrospectivement à la nature des connaissances et des questions sur le vide, quatre phases dans cette histoire. Les deux premières caractérisent la conception “classique” des débats sur le vide, qui s'achèvent avec son “invention” ou sa mise en évidence “physique”. Elles sont suivies d'une période intermédiaire où le vide coexiste avec la matière tout en posant la question du “vide physique” (ou matériel), avant la période contemporaine où le vide n'est plus qu'un état de la matière. Nous résumerons en quelques mots chacune de ces périodes, avant de les examiner plus en détail - mais sans exhaustivité.

La première période est celle du débat traditionnel, portant

essentiellement sur des arguments ontologiques, mais invoquant aussi des raisonnements de nature physique, sur l'existence du vide, depuis l'Antiquité grecque (sans oublier les conceptions développées dans d'autres cultures comme celle de l'Inde, où la notion de vide fut également importante¹), jusqu'à la fin de la Renaissance, où se trouvent préparées les conditions (conceptuelles et techniques) de la mise en évidence de l'*existence physique* du vide. Cette période voit la notion de vide passer du non-être à la possibilité, et se mettre en place corrélativement les conditions conceptuelles qui rendent possible l'étude quantitative du mouvement des corps.

La seconde période est celle de la pensée positive de l'existence du vide dans l'univers physique, de sa mise en évidence expérimentale et de son intégration dans l'édification de la mécanique et de la théorie de la gravitation, qui occupe à peu près tout le dix-septième siècle, de Galilée à Newton. Cette intégration fut, en réalité, une re-fondation, puisque l'existence physique du vide (c'est-à-dire le vide, mais non pas le rien) fut nécessaire à la conceptualisation même de cette physique et, d'abord, de la mécanique, comme le *contenant* nécessaire des corps dont la physique pouvait dès lors s'attacher à élucider les propriétés. La préoccupation pour le vide céda la place à la constitution d'un *espace absolu* qui en intégrait la notion mais qui, pour être affirmé avec force, ne laissait pas pour autant de poser à la pensée physique des difficultés qui portent, précisément, sur le caractère physique singulier d'un tel espace vide, non matériel et co-existant avec les corps matériels.

La question de la difficulté de penser physiquement un espace vide, sur laquelle avait insisté Descartes, c'est-à-dire, en fait, de penser que le vide (l'espace vide) a des propriétés physiques, devait être par la suite provisoirement éludée avec l'introduction de l'éther, suscitée par les divers domaines de la physique dans le processus de leur théorisation, des premières théories de la chaleur à l'optique et à l'électromagnétisme. Dans cette troisième période de notre histoire du concept de vide, l'éther, pensé comme une étendue continue de matière physique différente de la matière ordinaire et occupant tout l'espace, constituait un substitut *physique* pour le vide, un vide qui avait toujours été pensé, malgré tout, comme *a-physique*. La théorie des électrons en mouvement de Lorentz dépouilla ensuite de fait l'éther de ses propriétés physiques, le ramenant à n'être que le référentiel de l'espace absolu, en suite de quoi la théorie de la relativité restreinte, en rejetant l'espace absolu, et tout en admettant un espace-temps absolu et vide (indépendant des corps matériels), paraissait laisser entière la difficulté initiale de concevoir séparément un contenant (spatio-temporel) vide de matière et la matière de la dynamique.

Elle indiquait cependant une voie de sortie, qui ouvrait une nouvelle phase de la conceptualisation du vide (quatrième période), en faisant de l'espace et du temps l'objet même de la dynamique (avec la théorie de la relativité générale), ou en les envisageant à partir de la dynamique qui leur impose des propriétés (avec la théorie quantique). L'espace de la théorie relativiste de la gravitation (relativité générale) étant structuré par les champs engendrés par les masses des corps, n'était

¹ Il existe probablement une relation conceptuelle entre le vide et l'invention du zéro (vers le Vème siècle), que les Indiens représentaient au moyen du caractère même qui désignait le vide (appelé *çunya*, cf. Filliozat [1970]).

plus pensable en l'absence de corps physiques. On pourrait dire, en quelque sorte, que l'espace vide est constitué par les propriétés des corps en dehors du lieu de leur localisation, qu'il est le lieu matériel de l'influence des corps sans les corps. Quant à la physique quantique, elle en fait un substrat matériel à l'état latent qui peut se manifester en chacun de ses points sous une forme physique tangible (particules et champs) dès qu'un certain degré d'excitation est appliqué en ce point (polarisation du vide et création de paires). Ces deux directions privilégiées de la physique du vingtième siècle, chacune à sa façon, s'accompagnèrent d'une nouvelle acception du vide qui le fit passer du stade d'un simple constat d'*existence* ("vide", pour ainsi dire) à celui d'un *contenu* (muni explicitement de propriétés).

En même temps, la cosmologie contemporaine, s'appuyant sur ces deux théories pour rendre compte de la dynamique de l'Univers physique et de ses objets, révélait la nature évolutive de ce dernier. Celle-ci laisse à entendre que l'espace (plein ou vide) et le temps sont des formes de la matière, qui se déploient avec elle, et peuvent difficilement être pensées comme préexistant à elle. Selon ces vues, c'est la matière qui crée l'espace, dans le déploiement de l'espace-temps: entendons que dans le déroulement de l'Univers en expansion, l'espace est engendré avec le temps, au long du temps, par ce qui advient à la matière. Dans cette représentation, la matière, l'espace et le temps sont réunis en une seule entité, la matière-espace-temps, dont le vide (entendons désormais: *l'espace physique vide*) n'est qu'un état particulier.

Nous devinons déjà que l'histoire de la notion de vide est étroitement liée à celle des conceptions de la physique dans son ensemble. Le vide comme notion est, en effet, pour ainsi dire, rempli par les autres concepts de la physique et de l'astronomie, et cela depuis les origines. Les débats qui, au Moyen-âge, ont préparé la formation des concepts de la mécanique moderne du dix-septième siècle présentent à cet égard un intérêt remarquable, bien qu'ils soient longtemps restés dans l'ombre : le statut de la notion de vide y occupe une place déterminante².

1.

LE VIDE ENTRE NON-ETRE ET LIEU DU MOUVEMENT DES CORPS

Vue rétrospectivement, la longue histoire des débats "traditionnels" sur la possibilité de l'existence du vide apparaît comme celle d'un déblocage: ces débats, en effet, ont préparé, par la rationalisation de leurs termes, puis la libération progressive des impossibilités traditionnelles, l'élaboration des concepts qui devaient être essentiels pour l'étude du mouvement des corps.

² Voir, en particulier, Duhem [1913-1959].

Les atomistes grecs puis latins, Leucippe, Démocrite, Epicure, Lucrèce et les autres épicuriens³, concevaient un espace vide où se mouvaient les atomes : le vide était à leurs yeux la condition du mouvement⁴. Contre eux, Aristote “démontra” par le raisonnement l'impossibilité du vide. Sa démonstration se fondait sur sa théorie de l'espace comme le lieu naturel des corps, du mouvement dû à un moteur et non séparé de la chose mue, et dont la loi dépendait fondamentalement du milieu. Si un corps est en mouvement dans le vide, pourquoi s'arrêterait-il ici plutôt que là? Il devrait donc poursuivre indéfiniment son mouvement, ce qui, dans le système de pensée d'Aristote, était absurde. Le mouvement dans le vide était donc impossible. (La matière des cieux, dont les objets sont des substances sensibles éternelles, est éther, en mouvement circulaire éternel)⁵.

Quant aux stoïciens, s'ils n'allaient pas, comme les atomistes, jusqu'à admettre l'existence du vide dans le monde physique, ils le concevaient cependant pour la région située au-delà de la sphère qui enveloppe l'Univers. Par ailleurs, alors qu'Aristote et ses commentateurs grecs n'avaient eu recours qu'au raisonnement, les mécaniciens comme Philon de Byzance ou Héron d'Alexandrie⁶, prenaient argument de l'expérience de la clepsydre (par laquelle Anaxagore⁷ avait démontré que l'air est un corps), ainsi que d'autres observations, pour induire de ces faits l'impossibilité du vide. Du moins, la non existence de grands espaces vides, car ils laissaient ouverte à la possibilité de petites pores entre les molécules.

Les conceptions d'Aristote ne furent pas suivies très longtemps dans l'Antiquité. Elles revinrent en force avec les philosophes et les savants d'expression arabe du Moyen-âge, d'où elles passèrent en Occident chrétien⁸. En adoptant et en développant la physique aristotélicienne, les savants et philosophes du monde islamique, notamment Avicenne, al-Gazâli et Maïmonide⁹, firent leur également la conception du Stagyrte sur l'impossibilité du vide au niveau des corps physiques comme à celui des régions situées au-delà de la sphère extérieure de l'Univers. Ils y ajoutaient la preuve expérimentale reprise des mécaniciens grecs, et expliquaient à partir de l'absence du vide le mécanisme des appareils hydrauliques. Quant aux théologiens musulmans, hostiles, au contraire des philosophes, à la doctrine d'Aristote, ils étaient atomistes et concevaient le vide.

Ibn Bâjjâ (Avempace), reprenant l'argumentation de Jean Philopon¹⁰,

³ Leucippe (Vè s. av. J.C.), Démocrite d'Abdère (Vè s. av. J.C.), Epicure (341-271 av. J.C.), Lucrèce (vers 95-vers 55 av. J.C.). Voir, en part., Lucrèce (*De Rerum Natura*), Cornford [1936], Lloyd [1974].

⁴ Avec les anciens atomistes, le vide était un genre d'être, et non absence d'être ou néant.

⁵ Aristote (384-322 av. J.C.). Aristote [Phys.], IV ; [Ciel], I, 2; 9; II, 4..

⁶ Philon de Byzance (IIIè s. av. J.C.), Héron d'Alexandrie (Ier s. ap. J.C.). Voir Duhem [1913-1959], vol. 1 ; Gilles [1978].

⁷ Anaxagore de Clazomènes (Vè s.: vers 500-428 av. J.C.).

⁸ Voir, sur la philosophie au Moyen-âge, Gilson [1944], Libera [1993] et, sur les conceptions du vide, Grant [1981]..

⁹ Ibn Sînâ, ou Avicenne (980-1037), philosophe et savant persan ; Moïse Ben Maimoun, ou Maïmonide (vers 1135-1204), philosophe et médecin juif de l'Espagne islamique et du Maghreb.

¹⁰ Jean Philopon (fin du Vè s., seconde moitié du VIè s. ap. J.C.), philosophe à Alexandrie, fut le premier à donner une critique systématique de la physique et de la cosmologie d'Aristote. Ibn Bâjjâ

niait, contre Aristote, dont il critiqua la démonstration, que la chute dans le vide dût être instantanée, sans pour autant affirmer formellement l'existence du vide. En exposant longuement, pour la réfuter, l'argumentation d'Ibn Bâdjâ, Ibn Roshd (Averroès), qui fut, comme on le sait, très lu et apprécié des auteurs scolastiques, offrit à l'Occident chrétien l'occasion de la connaître en détail. Par là furent posés les germes d'une conception de la dynamique où la loi du mouvement dépend du moteur et du mobile, et non du milieu.

Les penseurs scolastiques du treizième siècle reprirent les conclusions d'Aristote sur l'impossibilité du vide. Certains d'entre eux, comme Roger Bacon¹¹, s'appuyaient également sur la preuve expérimentale avancée par les mécaniciens grecs et les savants arabes (tout en se contentant, en ce qui les concernait, d'expériences seulement imaginées). Ils invoquaient en particulier les expériences de l'eau montant dans un vase fermé où une chandelle se consume, de la clepsydre, de la ventouse, du syphon, de la pipette, des disques accolés, expériences auxquelles Jean Buridan¹², au quatorzième siècle, devait également se référer.

Les dominicains Albert le Grand et Thomas d'Aquin¹³ s'intéressaient à l'objection d'Avempace. En distinguant la force motrice, pour la gravité, et le corps, qu'il caractérisait par une forme et une quantité (ce qui préparait en quelque façon la notion de masse), Thomas dépassait la physique péripatéticienne et s'inscrivait contre la démonstration d'Aristote sur l'impossibilité du vide. D'une manière générale, les penseurs scolastiques ajoutaient aux arguments d'Aristote que l'impossibilité du vide entraîne, par l'absence d'espace entre les convexités de sphères contiguës, l'inexistence d'une pluralité de mondes. Proposé pour la première fois par Michel Scot, l'argument fut repris, entre autres, par Guillaume d'Auvergne¹⁴ et Roger Bacon. De la non-existence du vide il s'ensuivait une autre conséquence : Dieu ne pourrait donner à l'Univers entier un mouvement de translation, car le Monde devrait alors laisser du vide derrière lui et pénétrer du vide devant lui.

La conception de l'horreur du vide, esquissée par Albert le Grand, fut constituée par Roger Bacon en une théorie au sens propre, qui représentait le complément requis par la dynamique d'Aristote (tendance des corps vers leurs lieux, séparation du grave et du léger) pour comprendre les expériences de Philon et de Héron. Dans cette théorie, les causes relatives aux natures particulières étaient subordonnées à l'ordre de la nature universelle et pouvaient, dès lors, être contredites, comme l'eau montant dans le vase contre son poids le montre. La cause

(Avempace) (fin du XI^e s.-vers 1138), Ibn Roshd (Averroès) (1126-1198), philosophes et savants de l'Espagne islamique et du Maghreb.

¹¹ Roger Bacon (entre 1212 et 1220-1294), philosophe et savant des Universités de Paris et d'Oxford.

¹² Jean Buridan (1300-1358), l'un des plus grands maîtres de l'Université de Paris (XIV^e siècle).

¹³ Albert le Grand (vers 1200-1280), Père dominicain allemand, maître de théologie de l'Université de Paris et canonisé, est connu comme le "Docteur universel". Thomas d'Aquin (1225-1274), Père dominicain italien, enseigna à l'Université de Paris et fut canonisé. Il est considéré comme l'un des trois plus grands philosophes scolastiques, avec Jean Duns Scot et Guillaume d'Ockham.

¹⁴ Michel Scot (mort en 1235), traducteur d'Aristote à Tolède et d'Averroès à Palerme, fut astrologue de Frédéric II. Guillaume d'Auvergne (vers 1190-1249), philosophe, fut évêque de Paris.

finale relative à cet ordre supérieur assurait la continuité universelle des corps : ceux-ci se suivaient dans la nature en ne laissant aucun vide entre eux. Le vide n'était pas une cause efficiente : n'étant rien, ce n'était pas lui qui pouvait attirer l'eau, mais la cause finale agissant par les causes efficientes, c'est-à-dire par les causes en présence, dont l'ordre était réglé par elle. Par ailleurs, examinant la question de savoir si (bien qu'il n'ât le vide) un mouvement dans le vide serait instantané ou se ferait en un temps fini, Bacon conclut que ce serait en un temps fini. Par ailleurs, selon sa théorie de la gravité, la chute des corps pesants était déterminée par la gravité, engendrée par influence céleste, et non par la forme substantielle¹⁵. On sait l'influence considérable exercée par les conceptions de Roger Bacon aux universités d'Oxford et de Paris.

L'archevêque de Paris Etienne Tempier condamna, en 1277, les deux propositions de la philosophie scolastique sur l'impossibilité de l'existence du vide et de celle de plusieurs mondes, au motif qu'elles limitaient la toute-puissance divine (surtout la seconde, mais les penseurs scolastiques l'avaient tellement liée à la première qu'elle en était devenue indissociable). Cette condamnation eut, paradoxalement, une influence libératrice, en obligeant les maîtres de l'université de Paris et des écoles sous son influence, tels Henri de Gand ou Jean Duns Scot¹⁶, à penser la possibilité de l'existence du vide aussi bien que celle de plusieurs mondes.

Pour Duns Scot, l'existence du vide signifiait, non pas celle d'un corps véritable, mais des dimensions potentielles, c'est-à-dire la possibilité de recevoir un corps de forme et de dimensions déterminées. La décision du magistère engendra cependant un conflit entre le dogme révélé (objet de la théologie) et la philosophie (aristotélicienne). Walter Burley¹⁷, puis Jean Buridan et ses disciples, au quatorzième siècle, en approfondissant les termes d'un débat qui les préoccupait intimement, rendirent explicite cette contradiction. Mais ils ne se prononçaient pas sur l'existence du vide en dehors du monde. Par contre, Nicolas Oresme¹⁸ l'affirma, au nom de la possibilité d'une pluralité des mondes, qui constituait à vrai dire une première décentration par rapport à un univers conçu jusqu'alors comme géocentrique et anthropocentrique.

Par ailleurs, le temps mis par les corps à se mouvoir dans le vide était encore matière de débat. Alors que, pour les maîtres séculiers de Paris, fidèles à Aristote et à Averroes, ce mouvement était instantané, Duns Scot, Guillaume d'Ockham¹⁹ et l'école franciscaine le concevaient s'effectuant en un temps fini. Sur la question de savoir si tous les corps tombaient dans le vide à la même vitesse ou à

¹⁵ Sur Roger Bacon, voir Duhem [1914].

¹⁶ Henri de Gand (mort en 1293), qui enseigna la théologie à l'Université de Paris de 1276 à 1292, fut conseiller d'Etienne Tempier dans la condamnation de l'averroïsme. Jean Duns Scot (1266-1308), moine franciscain écossais, fut l'un des grands philosophes scolastiques des universités de Paris et Oxford.

¹⁷ Walter Burley (1275-vers 1345), philosophe, membre du Merton College à Oxford, fréquenta diverses universités de France et d'Italie.

¹⁸ Nicolas Oresme (1325-1382), d'origine allemande, enseigna au Collège de Navarre et à l'Université de Paris.

¹⁹ Guillaume d'Ockham (vers 1285-1349), franciscain anglais, l'un des grands philosophes scolastiques, enseigna à l'Université d'Oxford. Sa philosophie est connue comme le nominalisme.

des vitesses différentes, les avis étaient partagés : ceux qui, reprenant la réponse des atomistes grecs, optaient pour une vitesse unique, pressentaient en fait la notion de masse. La doctrine de “l'horreur du vide” de Roger Bacon était encore en vigueur, étant admis que seul Dieu pouvait produire le vide, mais non les êtres créés ou la nature, et elle devait perdurer jusqu'à la découverte de la pression atmosphérique.

Ce bref rappel de la longue histoire (près de vingt siècles) des conceptions sur le vide, d'Aristote aux prédécesseurs de Galilée, dominée par des arguments métaphysiques, nous aura montré la lente mise en place des conditions intellectuelles d'une pensée physique du vide, qui sont en même temps celles d'une pensée de la physique, portant d'abord sur le mouvement. Il aura fallu la transformation de catégories initialement exclusives, parce qu'ontologiques, comme l'identification de la matière à l'*être* et du vide (comme absence de matière) au *non-être* (ou négation de la matière), en d'autres, qui faisaient place à des relations de concepts correspondant à des propriétés comprises comme des grandeurs plutôt que comme des qualités, pour penser la possibilité d'une existence du vide en même temps que celle de la matière, c'est-à dire la coexistence du vide et de la matière.

2.

LA PENSEE PHYSIQUE DE L'EXISTENCE DU VIDE

Galilée et Descartes²⁰, au dix-septième siècle, se posaient la question du vide à propos de la condensation et de la raréfaction. Galilée, qui admettait encore le principe de l'horreur du vide dans la nature tout en récusant l'impossibilité aristotélicienne, expliquait la cohésion des corps par la crainte que la nature a du vide et par une sorte de colle entre les parties des corps, due à la présence de petits vides. Il considérait le mouvement des corps (et notamment leur chute) dans le vide, pensé par passage à la limite pour une résistance de l'air ou une densité du milieu nulle²¹. Quant à la limitation de la hauteur de l'eau élevée par une pompe, il était encore, vers 1630, tributaire d'une distinction entre les mouvements vers le haut et vers le bas et ne voyait pas que le phénomène était dû à la pression. Dans ses *Discours sur deux sciences nouvelles*, publiés en 1638, Galilée imagina une expérience pour contrebalancer la force de cohésion par le vide en lui faisant équilibre avec un poids. Mais le vide ne fut pas de sa part l'objet d'une expérimentation, sinon mentale : la préoccupation en revint à ses disciples, Baliani et Toricelli notamment.

Descartes critiqua l'explication galiléenne de la cohésion des corps par

²⁰ Galilée (Galileo Galilei, 1564-1642), René Descartes (1596-1650).

²¹ Galilei [1638], Première journée.

le vide, estimant pour sa part que “ce qu'il [Galilée] attribue au vide ne se doit attribuer qu'à la pesanteur de l'air...”. Son objection contre l'argument métaphysique et qualitatif de l'horreur du vide paraît tout à fait adéquate : “... et il est certain que, si c'était la crainte du vide qui empêchait que deux corps ne se séparassent, il n'y aurait aucune force qui fût capable de les séparer”²².

La position de Descartes, qui s'inscrit dans son système de l'étendue comme attribut principal ou essence des corps, était à vrai dire plus pénétrante et nuancée qu'un refus pur et simple du vide et contribua à clarifier le sens de la notion. Dans ses *Principes de la philosophie*, Descartes fait une distinction, qui apparaît fondamentale au regard tous les débats antérieurs, entre le vide *au sens des philosophes* et le vide *au sens du langage courant*²³. Du premier, entendu ontologiquement comme négation de la substance matérielle et donc “néant”²⁴, il affirme l'impossibilité a-priori. L'extension de l'espace est la même que celle du corps (qui vient occuper cet espace); quelque chose qui est étendu est donc une substance, et l'on ne peut concevoir “que *ce qui n'est rien* ait de l'extension”. Ainsi “l'espace qu'on suppose vide”, ayant “en lui de l'extension”, a-t-il “nécessairement aussi de la substance”²⁵. On serait tenté de traduire: ‘l'espace vide est physique’ et, à vrai dire, la physique de l'éther développée par la suite, d'abord momentanément avec Huygens et sa théorie des ondulations lumineuses, puis durablement avec l'éther optique de Fresnel et ensuite l'éther électromagnétique, de Maxwell à Lorentz, correspond assez à une vue de cet ordre, que la relativité générale et la théorie quantique des champs exprimeraient ensuite chacune à leur manière (voir, d'ailleurs, ce qu'Einstein lui-même en dira²⁶).

Quand au vide dans le second sens du mot, “le vide selon l'usage ordinaire”, qui signifie “un espace ne contenant rien qui nous soit sensible”, Descartes l'admet, bien évidemment, tout en l'analysant dans les termes de sa doctrine de l'étendue comme nature même des corps. Le vide, dans ce dernier sens, “n'exclut point toute sorte de corps”: l'espace vide contient “une matière créée et une substance étendue”, quoique celle-ci ne soit pas sensible. L'identification cartésienne de la matière et de l'espace ne laissait pas de place au vide au sens strict (comme absence totale de matière dans l'espace). Descartes devait substituer au vide, dans l'espace selon lui substantiel (c'est-à-dire physique ou matériel), sa substance même, conçue comme “matière subtile” se combinant aux corps et que l'analogie de l'éponge lui permettait d'imaginer visuellement : lorsqu'un corps se

²² Descartes, lettre à Mersenne du 11 octobre 1638, in Descartes [1964-1974], vol. 2, p. 382. Sa critique de l'explication par le vide de la limitation de la hauteur maximale de l'eau évoque la possibilité que “la pesanteur de l'eau (...) contrebalance celle de l'air”, rejoignant ainsi les vues de Baliani (voir plus bas).

²³ Descartes [1644], Seconde partie, articles 16 à 19, in Descartes [1964-1974], vol. 9, p. 71-73. C'est indépendamment de la question du vide que Descartes critique l'existence des atomes, mais pour cette même raison que la nature des corps est l'étendue: comme elle, ils doivent être divisibles à l'infini (*ibidem*, article 20, p. 74).

²⁴ Descartes emploie précisément ce terme: *ibid*, art. 18, p. 73.

²⁵ *Ibid*. Dans une lettre à Arnaud du 29 juillet 1648, Descartes écrit : “Quia ubicunque extensio est, ibi etiam necessari est corpus” (in Descartes [1964-1974], vol. 5, p. 224). Littéralement : “Partout où il y a de l'extension, il est nécessaire qu'il y ait aussi du corps”.

²⁶ Einstein [1954].

condense, ce sont en réalité ses pores qui se rétrécissent en laissant sortir une partie de la matière subtile qui les remplissait (et inversement pour la dilatation)²⁷. Si, lorsqu'il est vidé (dans l'acception commune), un vase n'était pas rempli d'une telle matière subtile, ses parois en viendraient à se toucher en un contact étroit²⁸. Cela impliquerait une "contradiction dans ma conception", écrivait-il, "de dire d'un espace qu'il est totalement vide, ou d'un néant qu'il est étendu, et de l'univers des choses qu'il est borné"²⁹.

Il semble que l'on doive donc distinguer, dans la pensée de Descartes, le vide au sens strict (ontologique, identifié au néant) et une sorte de 'quasi-vide', correspondant à de l'étendue (donc corporelle ou matérielle) où la matière sensible est raréfiée à l'extrême, mais qui reste physique. Par homogénéité 'ontologique', Descartes identifiait ce 'quasi-vide' à une 'matière-limite', non sensible directement, dont la fonction est de porter les propriétés physiques de l'espace (celles, essentiellement, qui ont trait au mouvement).

Dans la physique de Descartes, les actions sur les corps étaient ramenées à des actions de contact, et il développa une théorie des tourbillons de la matière subtile enserrée entre les corps pour expliquer aussi bien la gravité que les mouvements des planètes. Sa théorie fut perfectionnée par Christiaan Huygens³⁰ qui en donna une version quantitative en y intégrant la forme de la force centrifuge (qu'il trouva en même temps que Newton, indépendamment de celui-ci). La théorie des tourbillons fut réfutée en grande pompe par Newton au livre 3 de ses *Principia*³¹.

La mise en évidence de l'existence du vide aboutit en fait à déplacer la question du vide, *du débat ontologique* où il était resté situé pour une grande part, à la considération de sa réalité *du point de vue physique*. Celle-ci s'imposa à partir d'expériences qui portaient indissociablement sur le vide (l'espace vide de corps matériels) et sur la pression atmosphérique, dont la notion vit le jour en même temps, et qui avait été entrevue par Galilée et Descartes.

Les fontainiers de la ville de Florence avaient remarqué que l'eau ne peut être élevée par une pompe aspirante, au-dessus d'une certaine hauteur (32 pieds). Galilée en voyait la raison dans la succion du vide. Son disciple Baliani³², à qui l'on doit, semble-t-il, l'idée même de pression atmosphérique, pensait que cette succion était contrebalancée dans le phénomène naturel par le poids d'une colonne d'air. Il suggéra à Galilée une expérience dans laquelle, au lieu d'une colonne d'air, on utiliserait une colonne d'eau pour équilibrer par son poids la succion du vide (en vérité, Baliani, comme d'ailleurs Descartes, pensait en termes de pression, et non d'attraction ou succion par le vide).

²⁷ Descartes [1637b].

²⁸ Descartes [1644], *ibidem*, art. 18, p. 73. Dans son traité du *Monde*, Descartes avança des arguments physiques contre le vide qu'il ne reprit pas par la suite (Descartes [1633]). Dans les *Principes*, il considère que les expériences sont insuffisantes pour prouver l'inexistence du vide, qui relève de l'argumentation philosophique, pour les raisons évoquées.

²⁹ Descartes, lettre à Arnaud, 29 juillet 1648, in Descartes [1964-1974], vol. 5, p. 224.

³⁰ Christiaan Huygens (1629-1695).

³¹ Isaac Newton (1642-1727). Voir Newton [1687].

³² Giovanni Battista Baliani (1582-1666). Voir Moscovici [1970].

Ce fut un autre disciple de Galilée, le mathématicien Evangelista Toricelli³³ qui réalisa, en 1644, l'expérience demeurée célèbre sur la pression atmosphérique, par laquelle le vide fut mis en évidence par sa descente dans le tube à mercure. Refaisant après Mersenne avec succès l'expérience de Toricelli, Baliani en énonça l'interprétation la plus exacte, qui convainquit définitivement Mersenne (encore incertain non pas du fait, mais de l'explication) de l'existence du vide : “Du reste, que dans le tube de verre avec du mercure il y a un espace entièrement vide, je le tiens pour certain, de même que je tiens pour certain que ceci dépend du poids de l'air”³⁴.

La nouvelle du résultat de l'expérience de Toricelli et son interprétation se répandirent dans l'Europe savante comme une traînée de poudre, notamment par l'intermédiaire de Mersenne³⁵ qui la communiqua à Pascal³⁶. Pascal refit au Puy de Dome, en 1647, l'expérience sur la pression atmosphérique, à laquelle Descartes marqua un vif intérêt³⁷. Prenant en compte, avec les siens propres, des résultats et des remarques éparses de Stevin, Benedetti, Galilée, Toricelli, Descartes et Mersenne, Pascal les ordonna en une théorie cohérente et énonça les principes de l'hydrostatique³⁸.

La théorie de Roger Bacon (l'horreur du vide) était désormais caduque, et le vide ne devait plus susciter de problème, après les démonstrations probantes de son existence, sinon par le biais du concept d'*espace* vide. Par ailleurs, Gassendi, puis Boyle, Newton³⁹ et d'autres reprirent l'hypothèse atomiste des anciens Grecs, à laquelle les alchimistes avaient été les seuls, durant tout le Moyen-âge et jusqu'à la période moderne, à se référer (Newton lui-même, ne l'oublions pas, était également alchimiste⁴⁰). L'obtention du vide ne serait plus, désormais, qu'une affaire de développement technique et de technologie : comment enlever, d'un volume spatial donné, les particules matérielles (les atomes) qui le remplissent, de la pompe à vide de Robert Boyle (et des hémisphères d'Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg⁴¹, que seule la force d'un attelage parvint à séparer) jusqu'aux vides extrêmes obtenus de nos jours⁴². Sans compter l'accès, plus récent, à l'espace vide du cosmos (la question du rayonnement qui l'emplit ne serait, elle aussi, posée qu'au vingtième siècle).

³³ Evangelista Toricelli (1608-1647). Voir Toricelli [1919].

³⁴ G. Baliani, lettre à Mersenne, 23 février 1648, in Moscovici [1977], p. 127. Voir aussi p. 136. Voir également sa lettre du 26 septembre 1648 au P. Oratio Grassi (qui avait lui-même effectué des expériences contre le vide), in Moscovici [1977], p. 243.

³⁵ Le Père Marin Mersenne (1588-1648), de l'ordre des Minimes.

³⁶ Blaise Pascal (1623-1662).

³⁷ Pascal [1647]. Voir également la correspondance de Pascal sur ces expériences, in Pascal [1963], p. 199-221. Sur Pascal et Descartes, voir Nourisson [1885].

³⁸ Pascal [1663]: *Traité de l'équilibre des liqueurs*.

³⁹ Pierre Gassendi (1592-1655), Robert Boyle (1627-1691), Isaac Newton (1642-1727).

⁴⁰ Voir Dobbs [1991].

⁴¹ Otto von Guericke (1602-1686).

⁴² Par exemple, dans les tubes des accélérateurs où circulent les faisceaux de particules élémentaires, ou les vides réalisés en physique atomique, ou celui actuellement envisagé pour le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo, construit pour être prêt vers l'an 2000.

Le concept de vide permet notamment de penser le concept d'espace indépendamment de la matière, c'est-à-dire des corps qui se trouvent dans l'espace. Pour Galilée et Descartes, l'espace était pensé en rapport aux corps qui s'y trouvent, et c'est pourquoi, comme le mouvement, il était relatif.

La formulation du principe d'inertie, que l'on doit à Galilée, Descartes, Gassendi et Newton, eut partie liée à la pensée de l'espace et du vide. Galilée, encore tributaire d'une idée de la gravité dans la direction verticale comme inhérente aux corps, faisait une différence entre les directions de l'espace et le formula pour la direction horizontale seul, le vide correspondant à l'absence de résistance de l'air. Gassendi le formula de manière plus complète⁴³, en se donnant une représentation de l'espace concordante avec lui (l'espace complètement vide, et l'Univers vide, avant la création) : comme il n'y a pas de centre, toutes les parties de l'espace sont semblables, d'où il s'ensuit qu'un corps immobile restera immobile, et qu'un corps en mouvement le continuera de la même façon⁴⁴. Mais l'espace matériel et géométrique de Descartes l'admettait pareillement. Quant à Newton, il le lia à sa dynamique, fondée sur l'espace (vide) et sur la masse qui caractérise la matière à laquelle s'appliquent ou non les forces.

Passé de la possibilité à l'existence, le vide, comme absence de matière ou de corps, se posait en même temps comme une nécessité, coexistant avec la matière, et retrouvant, de Gassendi à Newton et jusqu'au début du vingtième siècle, la fonction que lui avaient autrefois octroyée les atomistes grecs, d'être la condition et le lieu du mouvement des corps. Ce vide était conçu comme antagonique ou privatif de la réalité physique, dont il apparaissait comme le complément nécessaire, (ce qui s'inscrivait encore dans une pensée de l'être). Mais il allait entraîner un renouvellement de la pensée des rapports du vide à l'espace, en suscitant l'idée de l'espace absolu de Newton, qui permettrait à ce dernier de fonder la dynamique. Toutefois, dans une autre direction, la conception d'un 'quasi-vide' ou vide matériel, illustrée par la matière subtile de Descartes, reprendrait de la vigueur avec les théories de l'éther et la nécessité de reconnaître à l'espace des propriétés physiques.

3.

LE VIDE ET LA PENSEE DE L'ESPACE

Newton, qui acceptait (comme Galilée et au contraire de Descartes) le vide, qui concevait (contre Galilée et avec Descartes) la cause du mouvement comme extérieure aux corps, et qui admettait (avec Galilée et Descartes) le

⁴³ Sur Galilée, voir Koyré [1939]; sur Gassendi : Gassendi [1641], Centre National de Synthèse [1955]; sur Newton, cf. notamment Koyré [1965].

⁴⁴ Voir Gassendi [1641] et Marejko [1983].

mouvement d'inertie, développa une conception nouvelle de l'espace "absolu et mathématique", défini sans référence à la matière, et que l'existence du vide rendait possible. Et cependant, Newton définit, dans les *Principia*, la matière et le mouvement sans faire mention du vide. "Je ne considère pas ici de milieu, quel qu'il soit, qui pénétrerait librement les interstices entre les parties des corps", écrit-il tout au début de son ouvrage, en explicitant la notion de quantité de matière ou masse, marquant ainsi la différence de sa conception de la matière et de l'espace par rapport à celle de Descartes⁴⁵. Un peu plus loin, l'espace "absolu, vrai et mathématique" (en opposition à "relatif, apparent et ordinaire") est donné à concevoir comme une réalité (au sens de la physique) : "par sa nature propre, sans relation à rien d'extérieur, [il] demeure toujours semblable et immobile"⁴⁶.

Pour montrer la réalité de l'espace absolu, Newton envisage, à la fin du scholie de ses définitions, le mouvement de deux globes sphériques, joints par une corde, en révolution autour d'un axe perpendiculaire à la ligne qui les joint passant par leur centre. Il serait possible de déterminer les grandeurs caractéristiques de ce mouvement circulaire (à partir de la tension de la corde), même en l'absence de corps environnants par rapport auxquels repérer le mouvement ("même dans *un vide immense*, dans lequel il ne se trouverait *rien d'externe et de sensible* à quoi elles puissent être comparées")⁴⁷.

L'espace absolu de Newton est une théorisation du vide, qui garantit le respect rigoureux des lois mathématiques, et donc permet une idéalisation qui reste réaliste: en l'absence de matière, par exemple d'air, l'espace n'offre pas de résistance au mouvement des corps. Dans les phénomènes de la vie courante, ces situations parfaites sont modifiées : "les projectiles continuent leur mouvement en ligne droite, *à moins* qu'ils ne soient retardés par la résistance de l'air ou soumis à la force de gravité...", "les toupies poursuivraient leur mouvement de rotation si leur mouvement n'était *retardé par le frottement de l'air...*", tandis que "les planètes et les comètes continuent leurs mouvements beaucoup plus longtemps parce qu'elles éprouvent moins de résistance dans *des espaces plus libres...*"⁴⁸

Par nature, selon la définition donnée par Newton, l'espace (absolu et physique, mais aussi mathématique), ne contient aucun corps, aussi ténu fût-il : cet espace est vide. Mais ce qui intéresse d'abord Newton, c'est le caractère "mathématique et absolu" de l'espace, réceptacle ou contenant des corps et distincts d'eux. Le vide n'est pas appelé dans cette définition, mais il en découle directement parce qu'il y est implicite. Ayant rendu possible cette conception, et la théorie édifée sur elle, le vide ne faisait plus, dès lors, problème... du moins en principe... Car Newton apparaît, malgré tout, souvent préoccupé par l'éventualité d'une présence, dans ce vide, de quelque contenu matériel...

C'est d'abord, bien entendu, pour réfuter la théorie concurrente de la sienne, celles des tourbillons de Descartes et Huygens. Au Livre 2 des *Principia*, sur le mouvement des corps, Newton prolonge ses expériences sur la résistance de

⁴⁵ Newton [1687], in vol. 1, p. 1. Voir Koyré [1965].

⁴⁶ Newton [1687], Définitions, in vol 1, p. 6.

⁴⁷ Newton [1687], Scolie des Définitions, in vol. 1, p. 12. Souligné par moi, M. P.

⁴⁸ Newton [1687], Axiomes ou lois du mouvement, Loi 1, in vol. 1, p. 13.

divers fluides par une étude de la résistance qu'opposerait au mouvement “un certain milieu éthéré, extrêmement rare et subtil, qui pénétrerait librement les pores de tous les corps”, en exerçant sa résistance sur les parties internes du corps⁴⁹. D'une expérience réalisée avec un pendule fait d'une boîte suspendue à un fil, d'abord emplie de morceaux de métaux lourds, puis vide, il conclut qu'une telle résistance interne serait moins de 5000 fois plus petite que celle rencontrée par la surface du corps en mouvement, c'est-à-dire négligeable. Libre au lecteur d'en inférer qu'un tel éther ne pourrait avoir l'action physique invoquée par les cartésiens sous la forme des tourbillons.

Le même livre 2, où “l'espace vide de corps” est ainsi évoqué, avec d'autres questions de nature générale sur lesquelles “la philosophie semble être principalement fondée”⁵⁰, se termine par la condamnation sans rémission de la théorie proposée par Descartes pour expliquer la pesanteur, la gravitation des planètes et le mouvement des comètes : “L'hypothèse des tourbillons est totalement irréconciliable avec les observations astronomiques, et sert à embarrasser plutôt qu'à expliquer les mouvements célestes”. Cette conclusion est amplifiée dans le Scholie général du Livre 3, en possession de tous les éléments du “système du monde” newtonien. Les mouvements des corps célestes peuvent suivre exactement les lois calculées puisqu'ils ne rencontrent pas de résistance : il n'y a pas d'air dans ces régions célestes, et l'on sait, par les expériences de Boyle sur la pompe à vide, que la loi de la gravité est exactement suivie par les corps terrestres qui tombent lorsque le vide a été réalisé par extraction de l'air⁵¹.

L'insistance de Newton à souligner les difficultés de la théorie de Descartes et Huygens est assurément significative de l'intérêt que cette dernière suscitait à l'époque. Il semble, cependant, que l'espace vide ne satisfaisait pas totalement Newton lui-même qui, tout en ayant été amené à concevoir un espace absolu (inobservable) pour support des accélérations (manière de rétablir le caractère physique de l'espace⁵²), et à imaginer la propagation instantanée de l'attraction de gravitation à travers cet espace, se rendait compte des difficultés conceptuelles que cela impliquait (difficultés d'ailleurs largement exploitées par les adversaires de sa théorie). Dans ses “Questions” de l'*Optique*⁵³, il réintroduisit, près de vingt ans après les *Principia*, l'idée d'un milieu éthéré. De ce fluide subtil “qui reste dans le vase après qu'on a pompé l'air”, qui serait le milieu de l'action de la lumière et du transport de la chaleur, il se demandait “s'il [ne serait pas] incomparablement plus rare, plus subtil, plus élastique et plus actif que l'air”, s'il

⁴⁹ Newton [1687], Livre 2, in vol. 3, p. 325-326.

⁵⁰ Comme Newton le rappelle au début du Livre 3, portant sur “Le Système du monde traité mathématiquement” : cf. Newton [1687], vol. 2, p. 397.

⁵¹ Newton [1687], Livre 3, in vol. 2, p. 543. Newton évoque, dans le texte “Le système du monde” (in édition Cajori, p. 549-626), la conception d'Anaximandre et de Démocrite, prévalente avant la “fiction” grecque des sphères célestes solides, selon laquelle “les mouvements des corps célestes avaient lieu dans des espaces qui étaient en même temps libres et dénués de résistance”, doctrine qu'il fait remonter aux anciens Egyptiens (dont il étudiait, par ailleurs, les doctrines hermétiques. Cf., p. ex., Westfall [1980], Dobbs [1991]).

⁵² Einstein [1927] ; cf. Paty [1987].

⁵³ Newton [1704].

“ne pénétre[rait] pas promptement tous les corps” et si, en vertu de son élasticité, il ne serait pas “répandu dans la vaste étendue des cieux”. Peut-être, d'ailleurs, ce fluide (qui évoque tant l’“éther subtil” de Descartes) serait-il responsable de la gravitation, non par des mouvements tourbillonnaires, que Newton avait réfutés, mais par des propriétés particulières (telles qu'une variation de densité avec l'éloignement des corps). Voici donc que Newton, en quête d'une plus grande intelligibilité des phénomènes physiques, trouvant l'espace absolu de sa mécanique insuffisant, emplit ce dernier d'un éther : “Cet éther, car c'est ainsi que je le nomme⁵⁴”...

Telle qu'elle fut reçue ensuite, la doctrine newtonienne ne fut pas attachée à ces doutes, qui affectaient peu la mécanique et la théorie de la gravitation. Et cependant, les philosophes et les physiciens, même en admettant le plus souvent l'espace absolu⁵⁵, tentèrent pendant plus de deux siècles de s'affranchir de la difficulté conceptuelle à penser la dualité de l'espace et de la matière. Difficulté dont un d'Alembert⁵⁶ se faisait, sur le mode neutre, l'écho : “L'espace a-t-il une existence indépendante de la matière ? (...) Y aurait-il un espace s'il n'y avait point de corps ?” (de même pour le temps). Mais on ne se posait, selon lui, ces questions que parce qu’“on suppose à l'espace et au temps plus de réalité qu'ils n'en ont” : d'ailleurs le concept d'impénétrabilité permet de distinguer la matière de l'espace, et l'espace n'est alors qu’“une simple capacité propre à recevoir l'étendue impénétrable”. Tout le reste était métaphysique : “Les enfants qui disent que le vide n'est rien ont raison, parce qu'ils s'en tiennent aux simples notions du sens commun; et les philosophes qui veulent réaliser le vide, se perdent dans leurs spéculations”⁵⁷. Il reste que d'Alembert laissait ouverte la question d'une meilleure intelligibilité de l'espace vide, c'est-à-dire de sa nature (sous-entendu physique): il ne prenait pas parti sur la nature du milieu où les planètes se meuvent, tout en évoquant cependant la question : “Les planètes étant supposées se mouvoir, ou dans le vide, ou dans un espace non résistant...”, il s'ensuit que leurs lois mathématiques s'appliquent exactement⁵⁸, et c'est cela qui importe.

4.

⁵⁴ Question n° 22.

⁵⁵ Par exemple, Leonhard Euler (1707-1783). Il y eut de notables exceptions, comme George Berkeley (1685-1783), qui refusait l'espace absolu de Newton pour être un *rien* (pensé comme annihilation des corps) qui ne pouvait être lui-même annihilé (Berkeley [1720], § 52-65). Au contraire de John Locke (1632-1704), pour qui l'existence du vide était démontrée aussi bien par la philosophie que par la physique, et qui laissait à chacun de juger si l'espace n'est qu'une relation, ou si c'est “le lieu de Dieu” : il suffit que l'on distingue les idées d'espace et de solidité (Locke [1690], Livre 2, chap. 13).

⁵⁶ Jean d'Alembert (1717-1783).

⁵⁷ D'Alembert [1765], p. 402-403.

⁵⁸ D'Alembert [1765], p. 414-416. Sur la réfutation du système cartésien des tourbillons, voir p. 413.

L'ETHER OU LA MATIERE DU VIDE

L'espace absolu de Newton était à la fois physique et non physique. Non physique, par sa distinction radicale d'avec la matière, qui en faisait le théâtre des événements survenant aux corps matériels. Et physique, par son rôle de support des actions à distance comme les forces de gravitation (pensées comme se transmettant instantanément) : il ne possédait pas d'autres propriétés et son rôle était purement latent, ce qui comptait étant seulement la forme de la loi de l'action à distance. Du point de vue ontologique, il était pour son inventeur une sorte d'émanation divine ("*sensorium Dei*"), qualité qui ne fut pas retenue par les successeurs continentaux de Newton, au dix-huitième siècle rationnel. Son rôle simplement latent suffisait encore au parachèvement de la mathématisation de la mécanique et à son unification, de la dynamique des corps solides à l'hydrodynamique et à la mécanique céleste, comme on le voit à la *Mécanique analytique* de Lagrange⁵⁹.

Mais ce rôle n'allait plus suffire à mesure que les différents domaines de la physique allaient être à leur tour mathématisés dans des théories spécifiques. L'espace vide, qui servait de support ou de milieu des propagations et des actions, demandait dans chaque cas d'être conçu comme une autre sorte de matière. La physique mathématique avait besoin, pour son traitement général des phénomènes physiques par les équations aux dérivées partielles, de considérer l'espace vide comme un solide élastique ou un fluide mais sans autres caractères physiques et n'affectant pas les mouvements des corps matériels, qu'il s'agisse de la chaleur ou de la lumière (voir les travaux de Laplace, Fourier, Poisson⁶⁰). La physique théorique, soucieuse de la spécificité de chaque champ de phénomènes, demandait un milieu ou éther propre à chacun d'eux : Fresnel reprit pour sa théorie ondulatoire de la lumière celui autrefois proposé par Huygens avant que le règne de la théorie corpusculaire de Newton ne l'emportât, en munissant son éther lumineux de propriétés quelque peu différentes (sa quasi-rigidité pour permettre des ébranlements transversaux).

On imagina également des éthers électrique et magnétique ; et Maxwell, reprenant la notion de champ électrique et magnétique introduits par Faraday, et les incorporant dans sa théorie, réunifia les trois éthers en un seul : l'éther électromagnétique, que les théories de Hertz, de Lorentz et d'autres s'efforcèrent ensuite de qualifier par rapport à la question du mouvement⁶¹. L'éther, superposé à l'espace - vide ou occupé par les corps -, permettait de raccorder l'optique, d'abord, puis l'électromagnétisme, à la mécanique. Mais ces interprétations mécaniques de la lumière puis de l'électromagnétisme n'allaient pas sans poser

⁵⁹ Joseph Louis Lagrange (1736-1813).

⁶⁰ Pierre Simon Laplace (1749-1827), Joseph Louis Fourier (1768-1830), Siméon Denis Poisson (1781-1840).

⁶¹ Augustin Jean Fresnel (1788-1827), James Clerk Maxwell (1831-1879), Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), Hendryk Antoon Lorentz (1853-1928).

quelques difficultés. D'une part, comme le remarquait Hertz, il fallait admettre, à côté des concepts de la mécanique, d'autres notions qui lui échappent, les champs de force électriques et magnétiques, et donc admettre un dualisme. L'éther, substrat du champ électromagnétique, devait être mis sur le même plan que la matière pondérable (la matière et l'éther étaient le lieu des champs, l'éther de Hertz était totalement entraîné par le mouvement des corps dans leur voisinage : mais cela était contraire à l'expérience de Fizeau⁶² sur la vitesse de la propagation de la lumière dans les fluides en mouvement.

Du point de vue épistémologique, la critique de l'espace vide absolu de Newton reprit de la vigueur avec ces développements. Selon Mach, elle devint nécessaire quand la physique dut prendre en compte les actions de voisinage et les actions à distance transmises de proche en proche, de Faraday⁶³ à Maxwell, et avec les progrès réalisés dans la connaissance expérimentale du vide, qui lui reconnaissaient des propriétés physiques : le vide n'empêche pas les actions physiques (Boyle le montra avec l'optique et l'aimant) ; il propage les états physiques (la lumière, les forces électriques et magnétiques). "Donc, en aucune façon le vide n'est un *rien* ; il a au contraire des propriétés physiques très importantes", "variables et dépendant les unes des autres, qui lui sont attachées comme aux corps", qu'on le conçoive ou non comme un corps (éther)⁶⁴. Les critiques formulées par Mach dans *La mécanique* eurent un effet important sur la pensée des physiciens de l'époque et notamment sur Einstein.

Lorentz, pour rendre compte des phénomènes électromagnétiques des corps en mouvement, ne parut pas modifier en substance la conception de l'éther, sinon en en faisant le seul lieu des champs (rôle qu'il enlevait à la matière), et en lui octroyant l'immobilité absolue : mais il le dépouillait, en fait, de ses propriétés mécaniques, le ramenant à une 'matérialisation' de l'espace absolu, comme référentiel de coordonnées privilégié. La théorie de Lorentz devait supposer que les corps physiques (et notamment les électrons dont ils sont constitués) se contractent dans la direction du mouvement, propriété dynamique qui permettait de retrouver le principe de relativité pour les mouvements d'inertie malgré le référentiel absolu de l'éther électromagnétique (sa théorie fut perfectionnée par Poincaré en même temps qu'Einstein proposait sa propre théorie de la relativité restreinte)⁶⁵.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein, en redéfinissant l'espace et le temps à partir du principe de relativité (pour les mouvements d'inertie) et de la constance de la vitesse de lumière dans le vide, dépouilla l'éther de la seule propriété que Lorentz lui avait laissé, l'immobilité absolue. En raison de l'équivalence de *tous* les repères d'inertie, celui de l'éther en repos n'était plus privilégié par les lois de l'électromagnétisme. Il s'ensuivait que l'éther était inutile, "les champs électromagnétiques ne représent[a]nt pas l'état d'un milieu mais [étant] des réalités indépendantes, qui ne peuvent être réduites à rien d'autre et qui ne sont

⁶² Armand Louis Hyppolite Fizeau (1819-1896). Il obtint son résultat pour le coefficient d'entraînement de Fresnel en 1851.

⁶³ Michael Faraday (1791-1867).

⁶⁴ Ernst Mach (1838-1916). Cf. Mach [1883], trad. fr., p. 360-364.

⁶⁵ Henri Poincaré (1854-1912), Albert Einstein (1879-1955). Cf. Paty [1993].

liées à aucun substrat”⁶⁶. L'éther perdait son existence même et, en se dépouillant de l'éther, l'espace vide purement relatif perdait ses propriétés physiques, sinon celle, pour Einstein, d'être un espace géométrique conçu comme “espace de référence” pour des corps, et constitué à partir de principes physiques.

L'espace vide, désormais purement relatif, gardait quelque chose de son caractère absolu dans sa relation au temps, étant rapporté à un nouvel absolu, l'espace-temps : ce dernier était indépendant des corps, en ce sens que ses propriétés (sa “rigidité”, par sa métrique invariante) restaient les mêmes quels qu'ils soient et quoi qu'il leur arrive, qu'elles n'étaient pas affectées par eux. D'autres interprétaient différemment les nouvelles conceptions, en concevant (par exemple, comme Lorentz, qui gardait l'éther) les formes de l'espace et du temps relativistes comme étant un effet dynamique, ou en accordant (avec Minkowski⁶⁷) à la structure même de l'espace-temps d'être électromagnétique et rapportée, donc, à des propriétés physiques.

La contrepartie de cette dé-réalisation de l'espace vide (et du temps) fut la “matérialisation” du rayonnement électromagnétique, qui transportait désormais, comme la matière pondérable, impulsion et énergie, et les seules réalités étaient les particules matérielles et les champs électromagnétiques. Cependant, cet état de chose paraissait contre-intuitif : si le vide est l'espace sans corps ni rayonnement, et si cet espace est relatif, comment concevoir le vide ? N'est-il, comme l'espace des coordonnées, qu'une pure relation ? La théorie de la relativité restreinte d'Einstein, ne répond pas à une telle question, mais, à la vérité, elle ne la pose pas non plus. Elle établit seulement que l'espace vide n'est pas simultané. Mais la pensée physique (et notamment celle du vide) suppose une dynamique, et la relativité restreinte reste en-deçà de la dynamique.

5.

L'ESPACE VIDE, FORME DE LA MATIERE

L'étape suivante est celle où, avec la théorie de la relativité générale, d'une part, et avec la physique quantique, d'autre part, l'espace vide reçoit pleinement la qualification d'être *physique*, au même titre que la matière elle-même, dissipant la dualité de la matière et du vide, et faisant pour ainsi dire du vide un simple état de la matière.

La théorie de la relativité générale lie la structure de l'espace à la matière (masse, énergie) qu'il contient. Dans ce sens, l'espace vide, dénué de toute matière

⁶⁶ Einstein [1920].

⁶⁷ Hermann Minkowski (1864-1909).

et de tout rayonnement, serait l'espace dont la géométrie est strictement euclidienne. Mais un tel espace n'est-il pas une idéalisation, une pure vue de l'esprit ? Dans sa conférence prononcée à Leyde en 1920 sur "L'éther et la théorie de la relativité"⁶⁸, Einstein revient sur l'idée de la disparition de l'éther qu'il avait lui-même proposée en 1905 en réfutant définitivement l'espace absolu.

Dans ce texte significatif, il émet l'idée, qui pourrait sembler paradoxale à première vue, que la disparition de l'éther n'est pas exigée par la relativité restreinte : on peut supposer un éther, mais qui ne serait pas immobile (il n'aurait pas de mouvement déterminé). La relativité générale demande, quant à elle, quelque chose comme un éther, par rapport à quoi déterminer les accélérations et les rotations (ce qui est nécessaire, si elles correspondent à des effets réels). S'agit-il d'une réalité inaccessible à l'observation ? Mach, explique Einstein, avait résolu cette question avec son principe : au lieu d'accélération par rapport à l'espace absolu, il imaginait l'accélération moyenne par rapport à l'ensemble des masses de l'Univers. La force d'inertie résulterait ainsi d'actions à distance sans milieu intermédiaire, à moins de revenir à l'éther pour transmettre les forces d'inertie. L'"éther de Mach", comme le dénomme Einstein, est ainsi déterminé par l'état des masses inertes qu'il détermine en retour.

La relativité générale, explique Einstein, implique également un éther, mais selon une conception différente. L'état de cet "éther" est représenté par le tenseur de gravitation, et l'espace vide n'est ni homogène ni isotrope : il est doué de propriétés physiques, quoi qu'il soit sans mouvement (il n'est pas "constitué de parties pouvant être suivies dans l'espace"). En effet, "l'éther de la relativité générale est un milieu privé de toutes les propriétés mécaniques et cinématiques, mais qui détermine les phénomènes mécaniques et électromagnétiques"⁶⁹. L'espace est défini par les potentiels de gravitation, sans lesquels il ne saurait être conçu et d'où il tient ses propriétés métriques. Ainsi le champ de gravitation, selon la relativité générale, est-il, au contraire du champ électromagnétique, intimement lié à l'existence de l'espace, à l'éther gravifique. Weyl⁷⁰ et Einstein tentèrent de relier ce qui est désormais pensé séparément, l'espace (l'éther gravifique) et la matière (le champ électromagnétique), c'est-à-dire de faire s'évanouir l'opposition éther-matière. Einstein résume l'idée de son texte de 1920 en parlant du vide physique comme le nouveau refuge de l'idée d'éther.

Ainsi, avec la relativité générale, qui établit un lien de nécessité entre l'espace et la matière (et avec le temps), le vide retrouve-t-il des propriétés physiques, dans la direction de l'intuition du principe de Mach, et selon la fonction plus rigoureuse de la covariance générale. L'espace vide est la forme de la matière et, d'ailleurs, les rides gravitationnelles prévues par la théorie de la relativité générale (propagation d'ondes de gravitation) expriment que le vide a une forme qui peut être modifiée.

D'un autre côté, les phénomènes atomiques et nucléaires et, avec eux la mécanique quantique et la théorie quantique des champs, posaient à nouveau et

⁶⁸ Einstein [1920].

⁶⁹ Einstein [1920].

⁷⁰ Hermann Weyl [1885-1955]. cf. Weyl [1918].

d'une autre manière le caractère physique de l'espace vide et, à plus long terme, celui de l'unification des champs. D'abord, au niveau sensible, visible, de la matière organisée, composée d'atomes séparés les uns des autres par des vides intersticiels et contenant du vide dans leurs régions internes, entre leurs constituants : ces atomes étant eux-mêmes constitués d'électrons circulant dans un vaste espace vide et d'un noyau concentré dans un volume réduit à l'intérieur (comme on le sait depuis l'atome nucléaire de Rutherford⁷¹), on peut considérer que la matière est constituée surtout de vide.

La notion de corpuscule (entendu comme région étendue ou comme point singulier) va de pair avec celle d'espace vide. Mais le vide physique (polarisation du vide) correspond à une représentation en termes de champ, non de corpuscule. Et le champ est présent en un point (il se propage de point à point), non attaché à un point. C'est le champ qui fait les propriétés de l'espace : l'espace relatif qui appartient à la variété du continuum spatio-temporel, qui se confond avec le champ de gravitation (ou plutôt à celui-ci celui-ci muni d'une fibre, correspondant aux propriétés de la matière autres que la gravité, c'est-à-dire aux autres champs, qui sont le champ électromagnétique et les champs de jauge).

Mais ce vide est astreint à plusieurs restrictions : celle du vide physique évoquée précédemment, et le fait que la probabilité de présence d'un électron orbital en un point donné de l'espace interatomique - ou entre le noyau et les orbites - n'est pas nulle, aussi petite soit-elle. La situation est identique pour ce qui est de l'espace vide entre les différents niveaux de structuration de la matière - atomique, nucléaire, subnucléaire (nucléons et quarks). La physique des champs quantifiés qui décrit ces états de la matière implique un vide physique qui n'est plus absence de matière, et dont le caractère intersticiel n'est plus qu'approximatif et relatif. Lieu d'application des champs, il possède la virtualité de tout champ. Il est 'matière en puissance', champ sans énergie ni impulsion.

Que le champ soit non nul en tout point de l'espace et puisse y produire des effets implique que le vide physique n'est plus le vide au sens étymologique, et qu'il faut l'entendre autrement que le vide de l'atomisme ancien ou classique. Pour comprendre exactement ce que signifie le vide dans un sens géométrique (comme volume d'espace dénué de matière et de rayonnement), il faudrait comprendre les relations exactes de l'espace et de la matière dans la physique quantique relativiste. L'espace au sens des quanta est soumis à des restrictions⁷² ; ces restrictions demeurent en théorie quantique des champs, où interviennent les conditions de la relativité restreinte. Quant à l'espace de la relativité générale, il a résisté jusqu'ici à l'approche de la théorie quantique.

Le vide physique est plein de matière virtuelle. La théorie quantique des champs⁷³ donne à cette idée une légitimation et une précision plus grandes: l'espace vide est comme un océan qui peut être agité par des tempêtes de matière: polarisation du vide, paires de particules-antiparticules virtuelles.... Du moins, ce sont là des manières de s'exprimer, que l'on peut interroger quant à leur

⁷¹ Ernest Rutherford (1871-1937).

⁷² Voir, p. ex., Paty [1988].

⁷³ Cf., p. ex., Schwinger [1949, 1979].

signification littérale, quand la théorie qui appréhende ces réalités se contente d'entités plus formelles, moins intuitives, comme le champ. Ces transformations de sens peuvent être illustrées par la notion de "particule virtuelle", qui accompagne une transformation radicale de la notion de particule.

Faisons ici une remarque sur l'impénétrabilité. Pour la physique classique (de Newton à d'Alembert, Lagrange, etc.), ce qui faisait pour l'essentiel la différence entre l'espace (contenant) et la matière (contenu), au contraire des conceptions cartésiennes, c'était l'impénétrabilité, conçue comme une propriété de la matière. La physique quantique considère, désormais, avec le principe d'exclusion de Pauli, que l'impénétrabilité n'est qu'une des propriétés de la matière dans certaines conditions (deux électrons ou, plus généralement, deux fermions, ne peuvent occuper le même état). D'autres particules matérielles n'ont pas cette propriété : les bosons (photon, mésons, etc.) Cette remarque a à voir avec les conditions d'occupation, par des particules matérielles, de l'« espace vide ».

Le vide intersticiel, tout relatif qu'il soit, entre les différents niveaux de structuration de la matière dans son état "naturel" observé sur Terre (atome-noyau, noyau-nucléons, nucléon-quarks) voit son importance encore diminuée si l'on considère qu'il existe dans la nature des états extrêmement denses de matière où l'espace intersticiel est considérablement réduit. Les *étoiles à neutrons*, les *trous noirs* et les *plasmas de quarks et de gluons* sont des exemples de tels états, dans lesquels la séparation de niveaux se trouve abolie, respectivement au niveau de l'atome et du noyau, au niveau noyau-nucléons, au niveau nucléon-quarks.

Les étoiles à neutrons consistent en un gaz dégénéré de neutrons résultant de la transformation radioactive par capture électronique $p + e \rightarrow n + \nu_e$, ces neutrons pressés l'un sur l'autre ne connaissant plus les structures atomique et nucléaires de l'état initial de la matière de l'étoile. La densité des trous noirs est plus grande encore, et les particules nucléaires (protons et neutrons) y ont elles-mêmes perdu leur identité. Les plasmas de quarks et de gluons sont des états de matière nucléaire de densité extrêmement élevée qui peuvent être produits artificiellement au cours de collisions de particules de très haute énergie (noyaux relativistes du rayonnement cosmique ou ions lourds accélérés) : les nucléons perdent leur identité, et leurs constituants (les quarks et les gluons) forment un *plasma*, nouvel état de la matière produit par transition de phase. Le confinement local des constituants des nucléons à l'intérieur de ces derniers est momentanément aboli et les quarks et les gluons y circulent, libres dans un espace dont on ne saurait plus dire qu'il est vide, agité qu'il est par des paires quark-antiquark de l'« océan virtuel » portées à de hauts degrés d'excitation.

La matière qui est répartie aujourd'hui dans tout l'espace du cosmos se trouvait, dans les premières fractions de seconde de l'évolution de l'Univers (dans l'hypothèse admise du 'Big bang' ou explosion de l'« atome primitif », selon un vocabulaire en vigueur mais aux images trompeuses), dans un état de densité plus élevé encore (quasi infinie), où toutes les particules possibles du champ de matière unifié étaient présentes dans un volume spatial quasi nul. Au commencement, le vide n'était pas (à moins qu'il ne fût partout, sauf en ce point ?). La cosmologie contemporaine repose à sa façon le vieux problème de l'espace et du vide.

6.

OU LA MATIERE CREE L'ESPACE

Au vingtième siècle, les théories relativistes et quantiques impliquent des modifications conceptuelles considérables de l'éther et du vide physique. Il n'y a plus d'un côté le vide, de l'autre la matière, et la notion de vide est déplacée par rapport aux catégories antérieures. Comme la notion de matière, elle est relationnelle et non plus substantielle (ou encore, la substance est donnée dans la relation).

Dans cette représentation, si le vide est physique, il est nécessairement matière : où l'on retrouve l'intuition profonde de Descartes, non plus formulée en termes ontologiques, mais dans les termes relationnels de la physique actuelle. Selon celle-ci, la matière, l'espace et le temps sont réunis en une seule entité, la matière-espace-temps, dont le vide n'est qu'un état particulier. C'est un état localisé (qui peut être produit artificiellement avec une approximation très poussée), ou, du point de vue global qui considère le cosmos tout entier, un état-limite qui n'est pas atteint au temps présent de l'histoire de l'Univers (à cause du rayonnement résiduel de 2,7 K).

La cosmologie pose d'une autre manière - par le biais de l'histoire de l'Univers et de son extension dans l'espace - le problème du vide, c'est-à-dire de l'espace absolument dénué de matière. L'astrophysique et la cosmologie contemporaines⁷⁴ montrent comment nos conceptions fondamentales sur la structure de l'univers physique se trouvent impliquées dans les modifications et les nouvelles formulations de la question du vide.

Considérons l'astrophysique. L'espace entre les corps célestes, où ceux-ci se déplacent (quasars, sources intenses de radiations, galaxies, trous noirs, pulsars, étoiles, comètes, planètes et leurs satellites, astéroïdes), dans lequel règne un vide presque absolu, n'est cependant pas dénué de matière et d'énergie. En dehors des grands objets mentionnés, on y rencontre les vent solaires, les gaz intersidéraux et intergalactiques, mais également les rayons cosmiques faits de particules chargées (noyaux, protons) ou neutres (rayonnement électromagnétique hertzien, lumineux, X ou gamma, et encore les neutrinos sous trois espèces) et provenant de combustions ou d'explosions d'étoiles ou d'autres événements violents de l'Univers. Dans certaines régions, règnent des champs électromagnétiques intenses qui accélèrent les particules chargées. De plus, le "fond du ciel", c'est-à-dire l'espace ou le vide cosmique, est baigné par un rayonnement isotrope de densité relativement grande et de température très basse (le rayonnement de 2,7 K, reste fossile de la période radiative de la jeunesse de l'univers), auquel s'ajoute un égal bain invisible de neutrinos d'énergies comparables. Ainsi, le vide du cosmos est-il en fait peuplé surtout d'"objets" quasiment insaisissables⁷⁵.

⁷⁴ Voir, p. ex., Sciama [1961], Peebles [1971], Audouze, Musset, Paty [1990].

⁷⁵ Le nombre de photons du rayonnement isotrope est estimé un milliard de fois plus élevé que le nombre de protons et neutrons contenus dans l'Univers.

Et maintenant, la cosmologie. Les valeurs limites des états de grande densité au début de l'Univers que nous avons évoqués plus haut posent, plus profondément, la question de la nature non pas tant du vide que de l'espace lui-même. Lorsqu'on remonte à 'contre-temps' le cours de l'expansion cosmique, tout le volume de l'espace occupé par la matière (particules et radiations) se rétrécit jusqu'à une région de très petites dimensions contenant toute l'énergie de l'Univers. Cette limite presque ponctuelle (longueur de Planck), résultant d'une extrapolation, ne pourra jamais apparaître à l'observation qui, en se fixant sur les galaxies à grandes vitesses de récession, les plus éloignées de nous, remontent aux temps perceptibles les plus lointains. Entre le voisinage de l'origine et ce temps précoce, les processus physiques ont été 'lessivés' par les phases successives des interactions dominantes, et les avis diffèrent sur la nature de l'Univers à quelques mini-fractions de seconde de sa 'naissance'.

Certains parlent de singularité, comme un point mathématique : et qu'y avait-il à l'instant zéro (voire aux instants négatifs) ? La matière a-t-elle surgi du ... vide ou du néant ? On dit (sans y avoir été) que la situation est analogue au centre d'un trou noir de Schwarzschild... Mais, pour une densité de matière infinie, les équations d'Einstein sont impuissantes à décrire la situation, et d'ailleurs, avant de parvenir à cette limite, qui correspond à un volume de l'Univers ne dépassant pas celui d'un atome (vers le temps $t = 10^{-43}$ s), la théorie de la relativité générale doit être modifiée et remplacée par une théorie quantique de la gravitation, qui reste encore à venir. De sorte que nous ne savons rien de la signification du temps et de l'espace en-dessous de cette valeur, puisqu'il n'existe pas de théorie physique pour les définir⁷⁶.

Même dans l'hypothèse purement mathématique d'une singularité, on ne peut imaginer de retour en arrière au-delà de la singularité : le temps et l'espace n'ont plus de sens au-delà de la limite - et déjà, sans doute, quelque peu avant. Il n'est donc pas possible, sauf abus de langage, de parler de création de l'Univers. Il semble également difficile de concevoir la production de l'Univers dans un espace vide préexistant, puisque, en ces temps les plus reculés, et en ces espaces les plus minces, la description de la matière ne concerne que les temps et les espaces infimes déroulés jusque-là. A moins de prétendre que l'espace vide et le temps éternel aient toujours préexisté à toute matière, ce qui nous renverrait à l'espace et au temps absolus de Newton et à des débats du genre de ceux qu'affectionnait la scolastique. De cette espèce me semblent être les suppositions qui imaginent des univers avant le temps (notre temps), ou des re-crétions après l'implosion finale, s'il en est, qui marquerait la fin, non pas du temps, mais de la définition du temps (par un effet inverse des premiers instants).

La question d'un vide préexistant à l'Univers rappelle les arguments relatifs à l'éventualité d'une translation de l'Univers si le vide existait, d'Aristote et des scolastiques. La diversité des géométries possibles pour l'espace du monde physique permet d'ailleurs de répondre aux questions sur les limites de l'Univers

⁷⁶ Le temps et l'espace nous sont connus à travers les phénomènes physiques et donc, en fait, par les théories qui les représentent : cf. Paty [1994].

ou sur ce que serait un 'extérieur' de l'Univers : la géométrie de l'Univers change avec le temps (elle est donnée, par exemple, par sa courbure globale, sans parler des variations locales), et à chaque instant on peut concevoir un Univers fermé mais sans limites, pour parler comme Riemann, Poincaré et Einstein.

La cosmologie évolutionniste, en faisant la matière s'épandre dans l'espace, suscite plutôt l'idée que l'espace naît de cette expansion même, c'est-à-dire de la matière : où l'on retrouve cependant quelque chose des anciennes intuitions, puisque le vide ne peut être pensé comme négation de la matière. (Il en va de même du temps, qui n'est pas dicible en dehors des phénomènes, c'est-à-dire de la matière).

C'est la matière qui crée l'espace (le déploiement de l'espace-temps). L'espace et le temps sont des formes de la matière, et ne peuvent être pensés comme préexistant à la matière : dans le déroulement de l'Univers en expansion, l'espace est engendré avec le temps, au long du temps, par ce qui advient à la matière.

Il est intéressant de noter que, sous toutes ces transformations que le concept de vide a connues, de l'antiquité grecque aux conceptions de la physique et de la cosmologie contemporaines, le même nom de "vide" est resté, de même que les mots d'espace et de matière continuent de désigner des notions (ou des catégories) dont les contenus se sont profondément modifiés - tous structurellement marqués, à chaque étape, par des interrelations de sens, physique et philosophique. De sorte que l'on peut parler, pour chaque époque ou chaque conception, du *système* où se donnent mutuellement sens des concepts précis comme le vide, l'espace, la matière, le temps, dans un ensemble d'idées portant sur l'intelligibilité rationnelle, les formes de la connaissance et la vision du monde. Peut-être la persistance d'un même mot tient-elle à ce que les concepts physiques sont toujours solidaires de catégories plus générales de la pensée, qui exigent un raccord entre eux et un lien (fût-ce celui de la mémoire historique) à l'expérience commune, quotidienne, qui, même critiquée, continue d'informer malgré tout ce que nous concevons comme intelligibilité. Ce sont, pour ainsi dire, les *pesanteurs de la pensée du vide*, mais ce qu'il nous reste du vide n'aurait pu, et ne pourrait être, pensé sans elles.

BIBLIOGRAPHIE

d'ALEMBERT, Jean le Rond, et DIDEROT, Denis (éd.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780.

d'ALEMBERT, Jean le Rond (1758). *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines*, Paris, 1758. Ré-éd. in d'Alembert [1821].

- [1765]. *Eclaircissemens aux éléments de philosophie* (1767). Ré-éd. in d'Alembert [1821].

- [1821]. *Essai sur les éléments de philosophie ou sur les principes des connaissances humaines, avec les Eclaircissements*, in Belin, Paris, vol. 1, p. 115-348 ; Slatkine reprints, Genève, 1967.

ARISTOTE [Phys.]. *La Physique*, Trad. et notes par ?, Vrin, Paris,

- [Ciel]. *Traité du Ciel*, Trad. et notes par J. Tricot, Vrin, Paris, 1949

AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul, PATY, Michel (éds.) [1990]. *Les Particules et l'Univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.

BERKELEY, George [1720]. *De Motu* (1720), in *The Works of G. B.*, ed. A.A. Luce et T.E. Jeasop, Edinburg and London, 9 vols., 1948-1957.

CENTRE NATIONAL DE SYNTHÈSE [1955]. *Pierre Gassendi. Sa vie et son œuvre, 1592-1655*, Albin Michel, Paris, 1955.

CORNFORD, F. M. [1936]. The invention of space, in *Essays in honour of Gilbert Murray*, Allen and Unwin, London, 1936, p. 215-235.

CROMBIE, A. C., *Augustine to Galileo. The history of science. A.D. 400-1650*, Falcon Press, London, 1952; tr. fr. J. d'Hermies, *Histoire des sciences, de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*, Paris, PUF, 1958, 2 vols.

DESCARTES, René [vers 1633]. *Le monde, ou Traité de la lumière*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 11, p. 1-118.

- [1637a]. *La Dioptrique*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 6, p. 79-228.

- [1637b]. *Les Météores*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 6, p. 229-366.

- [1644]. *Principia philosophiæ*, 1ère éd. princeps, Louis Elzevier, Amsterdam, 1644 ; in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 8, p. 1-353. Trad. fr. (1647), *Principes de la philosophie*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 9, p. 1-362.

- [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1ère éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, 1964-1974; ré-éd., 1996. [Edition indiquée AT dans les notes].

DOBBS, Betty Jo Teeter (1991). *The Janus faces of genius: the role of alchemy in Newton's thought*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

DUHEM, Pierre [1913-1959]. *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, Hermann, Paris, 10 vols., 1913-1959.

- [1914]. Roger Bacon et l'horreur du vide, in A. G. Little (ed.), *Roger Bacon. Commemoration Essays, seventeenth century of his birth*, Clarendon Press, Oxford, 1914.

EINSTEIN, Albert [1920]. L'éther et la théorie de la relativité (1920), trad. fr. in Einstein [1989-1993], vol. 5, p.81-88.

- [1927]. La mécanique de Newton et son influence sur le développement de la théorie physique (1927), trad. fr. in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 235-241.

- [1954]. Relativity and the problem of space, in *Ideas and opinions*, New translations revised by Sonja Bargmann, Crown, New York, 1954; Laurel edition, 1981.

- [1989]. *Collected papers, vol. 2: the Swiss years, 1900-1909*, ed. J. Stachel et al., Princeton, Princeton University Press, 1989.

- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, éd. par F. Balibar et al., Paris, Seuil, 6 vols., 1989-1993.

FILLIOZAT, Jean [1970]. *Les philosophies de l'Inde*, Presses Universitaires de France, Paris, 1970 ; 4ème éd., 1995.

- GALILEI, Galileo [1638]. *Discorsi e dimostrazione in torno di due nuove scienze*, Leyde, 1638. *Discours et démonstrations concernant deux sciences nouvelles*, trad. fr. par Maurice Clavelin, Armand Colin, Paris, 19??.
- GASSENDI, Pierre [1641]. *De motu impresso a corpore translato*, Paris, 1642; in P. G., *Opera omnia*, Lyon, 1658 (6 tomes), t. 3.
- GILLES, Bertrand [1978]. *Les mécaniciens grecs*, Seuil, Paris, 1978.
- GILSON, Etienne [1944]. *La philosophie au Moyen Âge, des origines patristiques à la fin du XV^e siècle*, Payot, Paris, 1944; 2^e éd. rev. et augm., 1952.
- GRANT, Edward [1981]. *Much ado about nothing. Theories of space and vacuum from the Middle Ages to the scientific revolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.
- KOYRE, Alexandre [1939]. *Etudes galiléennes (1935-1939)*, Hermann, Paris, 1966.
- [1965]. *Newtonian Studies*, Cambridge (Ma), 1965. Trad. fr., *Etudes newtoniennes*, Gallimard, Paris, 1968.
- LIBERA, Alain de [1993]. *La philosophie médiévale*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993 ; 2^e éd. mise à jour, 1995.
- LLOYD, Geoffrey E. R. [1974]. *Les débuts de la science grecque, de Thalès à Aristote*, Trad. de l'Anglais par Jacques Brunschwig, Maspero, Paris 1974.
- LOCKE, John [1690], *An Essay concerning human understanding*, London, 1690 ; enlarged., 1694, 1700.
- LUCRECE (Titus Lucretius Carus). *De Rerum Natura*. Texte établi et trad. par Alfred Ernout, *De la nature*, 2 vols., Les belles Lettres, Paris, 1924.
- MACH, Ernst [1883]. *La mécanique*. (1883), trad. fr., Hermann, Paris, 1904 ; ré-éd., 1923.
- MAREJKO, Jan [1983]. Les conséquences philosophiques de la formulation du principe d'inertie. Espace euclidien et espace absolu, *Diogène*, n° 123, 1983, 3-30.
- MOSCOVICI, Serge [1967]. *L'expérience du mouvement. Jean-Baptiste Baliani, disciple et critique de Galilée*, Hermann, Paris, 1967.
- NEWTON, Isaac [1687]. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Société Royale, Londres, 1687; 2^eme éd., 1713; 3^eme éd., 1926; éditée avec des variantes par Alexandre Koyré et I.B. Cohen, Cambridge University Press, Cambridge, 1972. Trad. en Anglais par Andrew Motte en 1729, *Mathematica Principles of Natural Philosophy*; révis. et éd. par Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1934; ré-impr., 1962, 2 vols.
- [1704]. *Opticks, or a Treatise of the reflexions, refractions, inflections and colours of light*, Londres, 1704. Vers. augm., Londres, 1717; 4^eme éd. angl., 1730. Nouv. trad. fr. par Jean-Paul Marat sur la 4^eme éd. angl., *Optique de Newton*, Paris, 1787; ré-éd., Bourgois, Paris, 1989.
- NOURISSON [1885]. *Pascal, physicien et philosophe*, Emile Perrin, Paris, 1885.
- PASCAL, Blaise [1647]. *Expériences nouvelles touchant le vide*, Margat, Paris. In Pascal [1963], p. 195-198.
- [1663]. *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air*, G. Desprez, Paris, 1663. In Pascal [1963], p. 233-263.
- [1963]. *Oeuvres complètes*, Préface d'Henri Gouhier, Présentation et Notes de Louis Lafuma, Seuil, Paris, 1963.

- PATY, Michel [1987]. Einstein et la pensée de Newton, *La Pensée*, n° 259, 1987, 17-37.
- [1988]. *La matière dérobée*, Archives contemporaines, Paris, 1988.
- [1993]. *Einstein philosophe*, Paris, PUF, 1993.
- [1994]. Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes, in Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58; 3è éd., Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.
- PEEBLES, P. J. E. [1971]. *Physical cosmology*, Princeton University Press, 1971.
- POINCARÉ, Henri [1902]. *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902; 1970.
- SCHWINGER, Julian [1949]. Quantum electrodynamics II. Vacuum polarization and self energy, *Physical Review* 75, 1949, 651 et suiv.
- [1979]. *Selected papers (1937-1976)*, ed. by M. Flato, C. Fronsdal and K.A. Milton, Reidel, Dordrecht, 1979.
- SCIAMA, D. W. [1961]. *Modern cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1961; 1975.
- TORICELLI, Evangelista [1919]. *Opere*, Firenze, 1919, ? vols.
- WESTFALL, Richard S. [1980]. *Never at rest. A biography of Isaac Newton*, Cambridge University Press, Cambridge, 1980.
- WEYL, Hermann [1918]. *Raum, Zeit, Materie*. [1ère éd, 1917; 4è éd., augm., 1921. Trad. fr. sur la quatrième édition allemande, par Gustave Juvet et Robert Leroy, *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale*, Blanchard, Paris, 1922. ré-éd., Blanchard, Paris, 1958; 1979.
- ZOUCKERMANN, R. [1981]. Air weight and atomic pressure from Galileo to Toricelli, *Fundamenta scientiæ* 2, 1981, 185-204.

Remarque: titre pour la traduction en anglais :

Material void, or : matter creates space