

L'histoire du vide

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

Le vide n'étant *rien*, il ne peut avoir d'histoire. Comment ce qui n'existe pas pourrait-il avoir une histoire ?

Et pourtant, l'histoire du vide, telle qu'elle s'est développée depuis 2 500 ans et s'est incroyablement accélérée en ce siècle, est d'une extrême richesse. Car ce n'est qu'en apparence que « *le vide* » serait simple, parce qu'il ne serait « *rien* ». En fait, les vides sont multiples, compliqués, structurés et diversifiés. Le vide définit la matière, comme il est défini par elle : tout nouveau progrès dans la connaissance du monde matériel s'est accompagné d'une nouvelle connaissance du vide, et sans redéfinition du vide, il n'y a pas de nouvelle théorie de la matière.

C'est la succession, la superposition et l'entremêlement de tous ces vides que peut essayer de raconter une histoire du vide. Et à travers elle, c'est un peu toute l'histoire de la physique qui se déroule : l'histoire de ses concepts, de ses pratiques, de sa spécificité même comme science, et aussi l'histoire de ses relations avec les domaines voisins que sont la technique et la philosophie. C'est de ce point de vue que nous parcourrons cette histoire à grand pas, tâchant d'en marquer les étapes principales : le vide philosophique, le vide expérimental, le vide instrumental, et enfin le vide théorique.

Le vide philosophique

Dans la culture occidentale, la question du vide fut d'abord une question philosophique, durant toute la période qui s'étend des débuts de la pensée grecque à la révolution scientifique du XVII^{ème} siècle. L'existence du vide est farouchement niée par Aristote, dont le système grandiose fut accueilli avec enthousiasme aussi bien par les savants arabes que par les universitaires d'Occident aux XII^{ème} et XIII^{ème} siècles. La force de séduction de la pensée d'Aristote réside dans sa merveilleuse cohérence : il articule sa conception d'un univers plein, sphérique, fini et immobile sur sa théorie du mouvement des corps et sur sa théorie des causes elle-même. Que l'on tente de modifier l'un des éléments du système, et l'absurdité éclate de toutes parts. Ainsi, admettez le vide, et le monde pourra s'étendre à l'infini; il ne sera plus sphérique, ni immobile; il n'y aura plus de haut ni de bas; vous abolirez la différence entre repos et mouvement, celui-ci pourra être infiniment rapide, et vous devrez même admettre le mouvement sans cause.

De surcroît, l'expérience quotidienne vient confirmer, si c'est encore nécessaire, la justesse des vues du Philosophe (comme on appelait Aristote dans l'Université

médiévale). Un principe universel s'impose en effet à tous les corps : « *natura abhorret vacuum* », – la nature a horreur du vide. En effet, 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 un vase fermé rempli d'eau se brise quand il gèle : en effet, l'eau se contracte à cause du gel (car l'on « sait » au Moyen-Age que l'eau, comme tous les corps, se contracte au froid !), et 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.

Cette soumission excessive à la pensée d'Aristote conduisait à limiter la toute-puissance de Dieu, qui se trouvait ainsi contrainte par les lois de la nature. Elle fut de ce chef condamnée en 1277 par l'évêque de Paris, Etienne Tempier. Paradoxalement, cette censure cléricale put aider 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 son bras par-delà ses limites ? La perfection et de 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 qu'il plairait à Dieu de mettre en mouvement rectiligne ? Ces spéculations préparèrent certains des débats qui accompagnèrent la mise en place progressive de l'espace newtonien. Mais dans l'ensemble, la doctrine d'Aristote, amendée par les théologiens et reprise par l'Eglise, régnera en maître absolu jusqu'à la révolution galiléenne.

Le vide expérimental

Toucher à un seul des éléments du système d'Aristote, c'était donc s'attaquer au système tout entier, – et en plus se heurter à l'Eglise ! Il fallait accepter le cosmos d'Aristote et de Thomas d'Aquin tel quel, ou entreprendre de le ruiner entièrement, et de construire dans le même mouvement une nouvelle vision du monde : pas de construction sans destruction, pas de véritable destruction sans construction. Ce fut l'oeuvre Galilée, ce fut l'invention de la science moderne.

Galilée et la naissance de la science moderne

Armé de la lunette qu'il vient de construire, Galilée (1564-1642) lance en 1610 la campagne en faveur du système héliocentrique de Copernic : évidences à l'appui, il réfute le dogme de la perfection immuable des cieux, montre que Jupiter, comme la Terre, possède des satellites, et détrône celle-ci de sa place unique au centre de l'univers, pour en faire un astre comme les autres, tournant sur lui-même et autour du Soleil. Il réfute l'argument d'Aristote selon lequel nous devrions ressentir ce mouvement, en rétorquant que nous sommes comme le passager enfermé dans la cabine du navire, qui ne peut déterminer si celui-ci est au repos ou en mouvement. Faisant ainsi du mouvement une question relative, supprimant la distinction absolue entre mouvement et repos, Galilée s'en prend aux fondements du système d'Aristote, et pose du même coup les bases de la physique moderne.

Il était inévitable que dans cet affrontement titanesque avec le vieux monde Galilée rencontrât la question du vide. Et il procède ici aussi à un formidable renversement de perspective, dont l'audace est peut-être difficile à mesurer pleinement aujourd'hui, tellement nous y sommes habitués : le vide cesse d'être un enjeu philosophique pour devenir une question *expérimentale*.

Alors qu'Aristote ne s'intéressait au mouvement dans le vide que pour démontrer que ce dernier ne peut exister, Galilée, lui, se sert du vide pour étudier les *lois mathématiques* du mouvement. Dans ses *Discours sur Deux Sciences Nouvelles*, rédigés après sa condamnation par l'Inquisition en 1632, il discute 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 le contrarier. Le résultat qui intéresse Galilée est que, dans le cas d'une chute dans le vide – que celui-ci se rencontre ou non dans la nature, Galilée ne se prononce pas vraiment – tous les corps sont animés de la même vitesse, quel que soit leur poids. Il mène donc ici une véritable expérience de pensée, et utilise le vide 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 cas du mouvement dans le vide joue désormais à ce propos un rôle exemplaire.

Galilée procède encore à un autre retournement sensationnel. Dans sa discussion sur la résistance des matériaux (l'autre *science nouvelle*), il semble se référer à l'« horreur du vide » médiévale. Il a en effet appris, dit-il, 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* » (un peu plus de dix mètres). Eh bien, c'est donc que la nature a « horreur du vide » ... à raison de dix-huit brasses ! Au-delà, la colonne d'eau se brise sous son propre poids. Quoi de plus étranger à la pensée médiévale, de plus moderne que cette *quantification* d'un « principe » ? L'« horreur du vide » est devenue une « théorie effective », mesurable, quantifiable...

D'Italie en Angleterre, en passant par la France, l'Allemagne et les Pays-Bas

Les observations de Galilée 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'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 rempli de liquide, l'extrémité haute fut scellée, et on ouvrit la vanne du bas. La hauteur de la colonne d'eau diminua d'abord, pour se stabiliser à la hauteur annoncée par Galilée ! Encore fallait-il déterminer ce qui se passait dans le haut du tube...

La véritable avancée expérimentale fut réalisée par Evangelista Torricelli (1608-1647), brillant mathématicien et disciple de Galilée, qui partagea les derniers mois du savant placé en résidence surveillée. Torricelli eut l'idée, en 1644, de remplacer l'eau par du mercure, ce qui rendait l'expérience plus facile à réaliser puisque la longueur du tube pouvait être fortement ramenée à moins d'un mètre. Elle le fut pour la première fois par Vincenzo Viviani, autre disciple de Galilée et son secrétaire pendant les dernières années de sa vie, quand le vieillard était devenu aveugle : il suffisait de remplir de mercure un tube de verre et de le boucher du doigt avant de le retourner dans un bassin rempli du même liquide.

Toricelli montra que c'était bien le vide qui régnait au sommet du tube : ayant recouvert d'eau le mercure du bassin inférieur, il remonta progressivement le pied du

tube et observa 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 montra 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. Il suggéra enfin que le phénomène trouve sa source dans la pression atmosphérique, et proposa 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 *experimental*. 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 ?

L'expérience de Torricelli fut diligemment communiquée à l'Europe savante par l'infatigable père Marin Mersenne, dont la correspondance jouait à elle seule le rôle de revue scientifique. Elle fut reproduite en 1646 par les Pascal, père et fils, et Blaise multiplia bientôt les expériences. Faisant fabriquer d'immenses tubes de verre de formes variées, il montra par exemple que l'espace au haut du tube n'est 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. Surtout, il réalisa deux expériences décisives, celle du « vide dans le vide », et celle du Puy de Dôme (voir encadré).

En Allemagne, un ingénieur des fortifications féru de philosophie, Otto von Guericke, bourgmestre de Magdebourg, fabriqua à la même époque une pompe qui lui permit de réaliser de nombreuses expériences spectaculaires (voir encadré).

La pompe de Guericke fut bientôt perfectionnée par Christian Huygens aux Pays-Bas et par Robert Boyle et Robert Hooke, à la toute jeune *Royal Society* de Londres. Par une expérimentation rigoureuse, Boyle allait démontrer que le principe médiéval d'« horreur du vide » se trouve bien expliqué par la pression atmosphérique, et les perfectionnements des pompes allaient ouvrir la voie à de nombreuses applications nouvelles. Bientôt, les pompes à air allaient se multiplier, propageant à travers toute l'Europe les observations de Boyle comme des *faits*.

La question du vide était donc maintenant réglée pour l'essentiel. Mais le vide *experimental* avait joué également un rôle de nature toute différente : la « mise en scène » du vide avait servi à Boyle et aux tenants de la méthode expérimentale à démontrer les mérites de celle-ci sur la spéculation métaphysique (voir encadré).

Newton et « le vide de M. Boyle »

Rien n'illustre mieux sans doute le succès du programme de Boyle que la référence faite à « son » vide par Isaac Newton dans le fameux *Scolie général* qu'il ajouta à la deuxième édition des *Principia* en 1713, où il expose l'essence de 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.* »

En rendant ainsi hommage au « vide de M. Boyle », Newton reconnaît le rôle joué par l'évidence expérimentale pour sortir des débats métaphysique, et aider à définir

l'espace vide qui sert de cadre à sa mécanique, 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 qu'il a introduit aux premières pages des *Principia*.

L'histoire de l'espace immobile et infini de Newton remonte par ailleurs aux spéculations des plus hardis des scolastiques, et aux intuitions d'un Nicolas de Cuse et d'un Giordano Bruno.

Le vide instrumental

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

Machine à vapeur et ampoules électriques

Au premier rang des développements techniques, les « machines à feu ». Vers 1680 déjà, Christian Huygens et son assistant Denis Papin – l'inventeur du « digesteur », ou marmite à pression, et de la valve de sécurité – avaient procédé sans grand succès à des expériences visant à produire dans un cylindre muni d'un piston des gaz chauds, dont le refroidissement ultérieur, avec l'aide de la pression atmosphérique agissant sur le piston, devait provoquer le mouvement de celui-ci.

Au tournant du siècle, Thomas Savery et, indépendamment, Thomas Newcomen mirent au point en Angleterre des machines utilisant les propriétés de contraction de la vapeur et la pression atmosphérique, qui furent bientôt utilisées pour pomper l'eau des mines (voir encadré). Avec les améliorations radicales apportées par James Watt, la machine à vapeur put se prêter à tous les usages, et la vague de la révolution industrielle submerger l'Europe.

Quant aux techniques du vide proprement dites, leur développement conduisit à une série de découvertes fondamentales pour la physique.

Dès 1675, on avait observé que des lueurs apparaissaient dans les gaz raréfiés électrisés. Au XIXème siècle, Michael Faraday reprit ces études et pressentit leur importance, mais il ne disposait pas de vides suffisamment poussés pour les faire vraiment progresser. Un tournant eut lieu quand Heinrich Geissler obtint en 1855, grâce à l'invention de la pompe à mercure, des pressions de l'ordre de 0,1 torr (1 torr est la pression correspondant à 1 mm de mercure). En réalisant ces vides poussés dans des tubes auxquels étaient soudées des électrodes de platine placées à des potentiels différents, Julius Plücker, Johann Hittorf, Eugen Goldstein, William Crookes purent étudier systématiquement ces phénomènes lumineux, déceler l'émission de « rayons cathodiques » et analyser leurs propriétés. Le nom de Crookes reste particulièrement attaché à ces tubes, en raison du vide poussé qu'il parvenait à y réaliser et de la qualité de ses observations. Jean Perrin montra en 1895 que ce rayonnement était formé de corpuscules chargés électriquement, et ces travaux menèrent deux ans plus tard Joseph John Thomson à l'identification de l'électron, la première particule subatomique connue.

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 par Joseph Swan en Grande Bretagne et par Thomas Edison aux États-Unis. Si l'idée du filament à incandescence avait été proposée depuis longtemps, il fallut attendre les développements de la pompe à vide à mercure pour que puisse être réalisé dans les ampoules un vide de 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.

Les nouveaux développements des pompes à vide 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 particule.

Ether ou pas ?

Qu'en est-il pendant ce temps de l'«autre » vide, non plus le vide expérimental de Boyle, mais celui de l'espace de Newton ? En fait, ce dernier était très conscient des difficultés soulevées par l'action à distance impliquée par sa théorie d'une force de gravitation se propageant à travers le vide, et il n'était pas loin d'imaginer un Dieu omniprésent remplissant l'espace et contribuant à assurer l'ordre du monde. Mais il avait aussi démontré, par la pratique, la puissance de ses définitions de l'espace et du vide, et elles devinrent pour ses successeurs des données en quelque sorte « techniques », qu'il est vain de remettre en question et qu'il suffit de prendre comme point de départ pour le calcul. C'est ainsi que Pierre-Simon Laplace parvint à décrire avec une merveilleuse précision, dans sa *Mécanique céleste* (1796) tout l'agencement du système solaire.

A mesure que le XIX^{ème} siècle avance, cependant, la physique se complique. L'étude des franges d'interférence lumineuses 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 avec la théorie ondulatoire proposée par Huygens, lui-même inspiré par l'approche cartésienne, contre la description corpusculaire de la lumière proposée par Newton,. Le coup fatal est asséné par Fizeau, en 1849, avec la mesure d'une vitesse de la lumière plus faible dans l'eau que dans l'air, en contradiction absolue avec la théorie newtonienne.

Il faut se rendre à l'évidence : l'espace apparemment vide est le siège d'ondulations. A ces ondulations, il faut un support, que l'on baptisera *ether*. Ce baptême n'engage à rien mais, si l'on veut lui donner un modèle mécanique, l'éther devra être doté de propriétés contradictoires qui ont longuement arrêté Fresnel lui-même. En effet, si les ondes lumineuses sont transversales comme le suggère l'étude de la polarisation, alors l'éther doit être à la fois extrêmement rigide et élastique, et se laisser traverser librement par les corps célestes sans leur offrir de résistance, pour rendre compte de la mécanique céleste.

Cependant, le vide *technique* de Newton, l'espace de la mécanique, résiste. L'espace est rempli d'éther, – soit. Mais l'espace comme réceptacle, le vide lui-même

peuvent survivre. Après tout, ce sont les propriétés *de l'éther* qui apparaissent paradoxales, mais l'espace-contenant n'est pas lui-même affecté. On ne demande pas *au vide* de propager les ondes lumineuses, – on demande à l'espace de *contenir* l'éther. Pour preuve, l'entraînement partiel de l'éther : l'aberration des étoiles, la transmission de la lumière dans un fluide en mouvement indiquent, selon Fresnel, que l'éther est « partiellement entraîné » – partiellement par rapport à l'espace immobile.

Cependant, les intuitions de Faraday viennent troubler le paysage. Car Faraday refuse les effets à distance, et insiste sur le rôle de la polarisation du milieu pour la transmission des effets électriques et magnétiques, de proche en proche. Ceci le conduit à imaginer, dans le vide également, l'existence de champs de force porteurs des effets physiques. Méditant les travaux de Faraday et s'appuyant sur le concept de champ, James Maxwell formula mathématiquement la synthèse de ces résultats. Il réussit en 1864 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 Heinrich Hertz en 1885.

Avec la théorie de Maxwell, la compatibilité de l'éther et de 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 rendre compte à la fois d'une énergie potentielle, liée au champ électrique, et d'une énergie cinétique, liée au champ magnétique. Vers 1895, Hendrik Lorentz parvient à formuler une théorie microscopique de l'électricité et du magnétisme, dont les équations de Maxwell sont la traduction macroscopique. Mais dès lors, pour l'éther, tout change. Car l'éther de Lorentz est immobile, comme l'espace absolu de Newton (l'entraînement partiel apparent de l'éther invoqué par Fresnel est la traduction macroscopique d'effets microscopiques). Et si l'éther est immobile comme l'espace, l'éther ne *remplit* plus l'espace, il le *remplace*, il *est* l'espace ! Exit donc le vide ! La fiction de l'espace newtonien comme pur réceptacle n'est plus tenable, et l'éther doté de propriétés dynamiques se substitue au pseudo-vide opératoire, « effectif » de l'espace absolu de la mécanique.

Le vide théorique

Une difficulté colossale subsiste : aucune expérience, pas même celle de Michelson et Morley, ne parvient à détecter un mouvement par rapport à cet éther immobile (voir encadré). Un « principe de relativité » semble interdire à l'observateur de déterminer s'il est au repos ou en mouvement par rapport à l'éther. Alors, par un nouvel arrachement radical rappelant ceux de Galilée, Albert Einstein se débarrasse de cet éther inutile et inobservable, et il retravaille en profondeur toute notre conception de l'espace et du temps.

Exit donc l'éther, et retour du vide ! Mais d'un vide capable d'être le siège des ondes électromagnétiques, au sein d'un espace qui a perdu le caractère absolu et immobile de celui de Newton.

Pourtant, à peine Einstein a-t-il fait disparaître l'éther pour laisser la place à l'espace vide, qu'il annonce lui-même, avec sa théorie de la relativité générale, que le

vide en fin de compte n'existe pas. Car, dit-il, « *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.* »

Avec la relativité générale et la théorie quantique des champs, de la mer de Dirac aux particules virtuelles et aux brisures spontanées de symétrie, le vide n'a plus rien à voir avec le donné d'une intuition, quelle qu'elle soit. Le vide, ou plutôt *les vides*, sont devenus de pures constructions théoriques.

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 pas franchi dans la description des forces, qu'il s'agisse de l'électrodynamique, de la chromodynamique quantique ou de la supersymétrie. Comme si tout 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 noués indissociablement ? Cette question renvoie à la sempiternelle interrogation sur la « *réalité* » du monde physique et sur le statut des lois de la physique...

Quelques repères...

Pascal et les expériences sur le vide

Pascal (1623-1662) était d'opinion que, probablement, le phénomène observé par Torricelli et tous ceux attribués à l'horreur du vide étaient dus à la pression de l'air atmosphérique sur le mercure du bassin.

Pour le vérifier, il mena l'extraordinaire expérience du « vide dans le vide ». Un tube étroit, long de trois pieds (près d'un mètre), 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.

C'est également Pascal qui organisa, sans rien laisser au hasard, « *la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* » du 19 septembre 1648, démontrant ainsi l'effet de la pression atmosphérique. Au cours de cette journée, son beau-frère Perrier observa la diminution de la hauteur de mercure à différentes altitudes sur les flancs du Puy de Dôme, après avoir 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.* » 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-Age ! Mais il faut souligner que le progrès des techniques et la dextérité des artisans ont été pour ce succès aussi indispensables que les qualités du savant.

Otto von Guericke

Otto von Guericke (1602-1686), ingénieur des fortifications et bourgmestre de Magdebourg, était un copernicien convaincu, qui méditait depuis sa jeunesse sur les questions de l'espace, du vide et de l'infini.

Informé des expériences barométriques, il imagina vers 1647 un dispositif plus simple et plus maniable que le tube de mercure pour étudier la question du vide : il entreprit de vider l'air d'un ballon à l'aide d'une pompe, 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, notamment sur la propagation dans le vide de la lumière et du son, ou encore sur les réactions de différents animaux, insectes et 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 accolés de 80 cm de diamètre, après qu'ils eurent été vidés de leur air.

Guidé par ses préoccupations philosophiques, Otto von Guericke, souvent présenté simplement comme « un habile expérimentateur », a confirmé que c'est bien le cerveau qui guide la main de l'expérimentateur, illustrant ainsi la supercherie des discours sur l'expérience « pure » et le fait « brut ».

Boyle, la pompe à vide et l'expérimentation

Expérimentateur remarquable issu de la haute noblesse britannique, Robert Boyle (1627-1691) publia en 1660 et 1662 les résultats des expériences qu'il avait menées avec sa pompe, et notamment la fameuse loi qui porte son nom.

Critiqué par le philosophe Thomas Hobbes qui, comme Descartes, rejetait l'existence du vide, Boyle refusa de se laisser engager sur le terrain métaphysique. Il 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 direct 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, l'enjeu pour Boyle était particulièrement 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. » Hobbes, quant à lui, critiquait particulièrement cette libre discussion et réclamait un parfait accord entre toutes les positions exprimées, ne laissant pas de place au désordre des opinions.

Le projet porté par les expérimentalistes peut-il être lu également dans une perspective plus proprement politique ? Au moment où l'Angleterre sortait d'une période particulièrement troublée sur le plan politique et religieux, « 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. »

Cette société modèle se réalisa à partir de 1666 au sein de la *Royal Society*. L'esprit qui y régnait 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, et récolta une belle moisson de résultats expérimentaux dans tous les domaines d'étude de l'époque.

Le vide et les « machines à feu »

La machine à feu mise au point par Thomas Newcomen (1663-1729) se composait d'une chaudière produisant de la vapeur à la pression atmosphérique et d'un cylindre muni d'un piston en contact direct avec l'atmosphère (d'où son nom de « machine atmosphérique »), accroché à un balancier muni d'un contrepoids. La vapeur était admise dans le bas du cylindre au moment où le contrepoids faisait monter le piston, et son admission était interrompue lorsque le piston atteignait le sommet du cylindre. Elle était alors 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 faisait redescendre le piston et soulevait le contrepoids. Les machines de Newcomen se répandirent rapidement dans les mines de Cornouailles, puis dans toute l'Angleterre et sur le continent.

A partir de 1769, James Watt (1736-1819) leur apporta une série d'améliorations décisives, visant systématiquement à augmenter leur 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 combustibles étaient telles que Watt assura sa fortune et celle de son associé en livrant et en installant 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.

Ces développements illustrent les relations complexes de l'histoire de la physique et de l'histoire des techniques. Le développement de la machine à vapeur fut largement empirique, et beaucoup des inventeurs dans ce domaine, dont Newcomen, étaient dépourvus de connaissances scientifiques systématiques. Mais on ne saurait pourtant sous-estimer le rôle des conceptions nouvelles sur le vide et la pression atmosphérique, sans lesquelles les machines à vapeur ne pouvaient probablement pas voir le jour.

A l'inverse, 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 XIX^{ème} siècle, la thermodynamique, au carrefour de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée et des développements industriels, tant en chimie qu'en physique.

L'éther et la Relativité

Plusieurs expériences ont tenté, au XIX^{ème} siècle, de mettre en évidence les effets du mouvement des corps à travers l'éther. La plus célèbre fut réalisée par Albert Michelson et Edward Morley, en 1881 et 1887. Ils construisirent un interféromètre consistant en deux bras perpendiculaires, supporté par une table en marbre déposée sur un bain de mercure. Une source lumineuse dirigeait ses rayons vers un miroir semi-transparent placé au centre de l'appareil, et les rayons parcouraient l'un ou l'autre bras selon qu'ils étaient réfléchis ou transmis par ce miroir. Les rayons réfléchis par des miroirs disposés à l'extrémité des bras produisaient des franges d'interférences, observées au microscope. Lors de la rotation de l'appareil, une modification des franges devait révéler une différence de vitesse de la lumière selon que le trajet parcouru dans l'un ou l'autre des bras était parallèle ou perpendiculaire au mouvement de la terre.

Mais on ne décelait la présence d'aucun « vent d'éther », comme si quelque mécanisme subtil assurait la validité absolue du principe de relativité, selon lequel il est impossible de déterminer si un observateur est en mouvement ou au repos absolu. George FitzGerald et Hendrik Lorentz émirent alors une hypothèse radicale : les bras de l'interféromètre se contracteraient au cours du mouvement, de manière à compenser l'effet du vent d'éther, et Lorentz proposa (à peu de chose près) les fameuses formules qui portent aujourd'hui son nom.

L'hypothèse de FitzGerald et Lorentz fut reprise par Henri Poincaré, avec pour postulats le principe de relativité, l'indépassabilité de la vitesse de la lumière dans le vide et les formules de Lorentz, tout en conservant l'hypothèse de la présence « réelle » d'un éther immobile. Son propos était dynamique, et il construisait ainsi une « *mécanique nouvelle* », mathématiquement équivalente à la théorie de la relativité d'Einstein, mais conceptuellement très différente.

Le jeune Albert Einstein prit une position encore plus radicale. Puisque la présence de l'éther n'était pas mesurable, il s'en débarrassa purement et simplement ! S'appuyant lui aussi sur le principe de relativité et la constance de la vitesse de la lumière dans le vide, il redéfini profondément notre image de l'espace et du temps, en basant toute son approche exclusivement sur les relations mesurables entre les observateurs. Et, sur cette base, il retrouva les formules de Lorentz.

Les articles d'Einstein et de Poincaré furent publiés presque simultanément, en 1905. De leurs deux approches, mathématiquement équivalentes, l'histoire a choisi de suivre celle d'Albert Einstein. Notre compréhension de la physique et la perception du monde de beaucoup de nos contemporains en furent profondément bouleversées.

Appuis bibliographiques

- Aristote, *De Caelo*, Coll. des Univ. de France, Les Belles Lettres, Paris 1965.
- E. Bauer, *Electricité et magnétisme*, in *La science contemporaine. I/ Le XIXème siècle*, sous la dir. de R. Taton, Coll. Quadrige, Presses Universitaires de France, Paris 1995.
- M. Daumas, *Esquisse d'une histoire de la vie scientifique*, in *Histoire de la science*, sous la dir. de M. Daumas, Encycl. de La Pléiade, Gallimard, Paris 1957.
- A. Einstein, *La relativité*, Petite Bibliothèque Payot, Paris 1969 ; p. 177.
- G. Galilée, *Discours sur deux sciences nouvelles*, A. Colin, Paris 1970 ; p. 19.
- B. Gille, *Histoire des Techniques*, Encycl. de la Pléiade, Gallimard, Paris 1978.
- E. Gilson, *La philosophie au Moyen Age, des origines patristiques à la fin du XIV^e siècle*, Payot, Paris 1947.
- E. Grant, *Much Ado About Nothing, Theories of space and vacuum from the Middle Ages to the Scientific Revolution*, Cambridge University Press, Cambridge 1981.
- E. Grant, *La physique au Moyen Age, VIème-XVème siècle*, Presses Universitaires de France, Paris 1995 ; p. 37.
- O. von Guericke, *The new (so-called) Magdeburg experiments of Otto von Guericke*, Arch. Int. d'Hist. des Idées **137**, Kluwer, Dordrecht 1994.
- A. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Coll. Idées, Gallimard, Paris 1973.
- A. Koyré, *Etudes newtoniennes*, Gallimard, Paris 1980.
- L'oeuvre de Torricelli : science galiléenne et nouvelle géométrie*, F. De Gandt éd., Les Belles Lettres, Paris 1989.
- I. Newton, *Mathematical Principles of natural philosophy*, F. Cajori éd., Univ. of California Press, Berkeley 1946 ; p. 543.
- I. Newton, *Optique*, Christian Bourgois, Paris 1989.
- B. Pascal, *Oeuvres complètes*, Bibl. de la Pléiade, Paris 1980 ; p. 401.
- Y. PIERSEUX, *La structure fine de la Relativité restreinte*, L'Harmattan, Paris 1999.
- S. Shapin et S. Schaffer, *Leviathan et la pompe à air, Hobbes et Boyle entre science et politique*, La Découverte, Paris 1993 ; pp. 81, 294-5.
- C. Singer et al., *A History of Technology*, Oxford University Press, Oxford 1958.

Ce texte est adapté de P. Marage, « Pour une histoire du vide », dans *Le vide, Univers du tout et du rien*, éd. par E. Gunzig et S. Diner, Revue de l'Université de Bruxelles, Complexes, Bruxelles 1997 ; voir aussi P. Marage, « L'invention du vide », dans *Les énigmes du vide*, numéro hors-série, Sciences et Avenir 112, nov.-déc. 1997
