

## Les physiciens face au vide.

Jusqu'au XVII<sup>ième</sup> siècle, on pensait que la nature avait horreur du vide. Torricelli et Pascal ont montré le contraire. Depuis, le vide s'est peuplé de particules dont certaines nous traversent sans cesse.

Par Isabelle Desit-Ricard

Dès l'antiquité, les physiciens grecs n'étaient pas tous d'accord quant à l'existence du vide dans notre univers. Pour les atomistes, tels Leucippe ou Démocrite, la matière était composée d'atomes et ... de vide. Aristote, quant à lui, considérait que le vide n'existait pas dans notre monde, et que la nature avait « horreur du vide ».

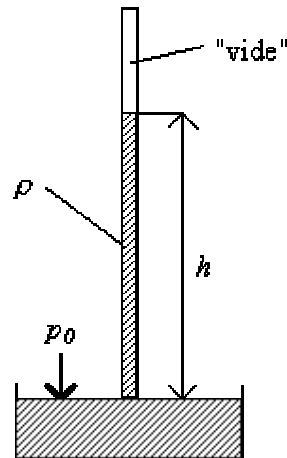
### La nature et l'horreur du vide

Jusqu'au XVII<sup>ième</sup> siècle, la pensée d'Aristote prédomine en occident. La théorie de « l'horreur du vide » permet, il est vrai, d'expliquer facilement de nombreuses observations courantes. Ainsi chacun a constaté que, lorsque l'on aspire dans un tube plongé dans de l'eau - c'est à dire lorsque l'on « fait le vide » à l'intérieur de celui-ci – l'eau monte à l'intérieur du tube. Certains ont cru pouvoir expliquer ce phénomène en affirmant que l'eau cherchait à combler le vide qui se trouvait à l'intérieur du tube. Mais ces derniers ne s'étaient probablement pas intéressés au problème de l'aspiration de l'eau d'un puits. Car si la méthode de pompage par aspiration est efficace pour de faibles profondeurs, elle ne fonctionne pas lorsqu'il s'agit d'aspirer de l'eau située à plus de dix mètres en contrebas. Au XVII<sup>ième</sup> siècle, les puisatiers connaissaient tous cette limite, mais les physiciens ne pouvaient l'expliquer.

Le premier à mettre cette théorie en défaut est l'Italien Torricelli. Il prouve deux choses :

- d'une part le vide existe,
- d'autre part l'air ambiant exerce une force de pression.

Il est ainsi le premier à parler de « pression atmosphérique ». Torricelli est convaincu que ce n'est pas le vide qui attire l'eau du puits mais que c'est l'atmosphère qui exerce une force de pression sur celle-ci. Pour que l'eau monte dans le tuyau, il faut que cette force soit supérieure au poids de l'eau qui se trouve dans le tube d'aspiration. Ainsi, au delà de 10 mètres, l'ascension de l'eau n'est plus possible. Dès 1643, Torricelli met en œuvre une expérience confortant sa théorie : il envisage d'utiliser un liquide beaucoup plus dense que l'eau et de mesurer son ascension maximale dans un tube. Il choisit le mercure (dont la masse volumique est 13,6 fois supérieure à celle de l'eau), et réalise la célèbre expérience barométrique désormais attachée à son nom. Il retourne un tube plein de mercure au dessus d'une cuve remplie du même liquide. La hauteur de mercure dans le tube se stabilise à 76 cm (la force de pression atmosphérique compense alors le poids de mercure emprisonné dans le tube).



La chambre barométrique (zone située au sommet du tube) n'est pas tout à fait vide comme l'affirmait Torricelli : elle est en effet le siège d'un équilibre liquide-vapeur pour le mercure : la pression à l'intérieur de celle-ci est donc égale à la pression de vapeur saturante du mercure à la température à laquelle l'expérience est réalisée. A 20°C, la pression de vapeur saturante de mercure vaut 0,15 Pa ; elle est très inférieure à la pression atmosphérique au niveau de la mer ( $P_{atm} = 101300 \text{ Pa}$ ).

En 1646, Blaise Pascal (1623-1662) entreprend de répéter l'expérience barométrique de Torricelli en refaisant l'expérience à différentes altitudes (au sommet de la tour Saint Jacques puis sur le Puy de Dôme). Il écrit lui-même en 1648 dans le *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs* que la nature « n'a aucune répugnance pour le vide ».



En 1648, à la suite de l'expérience de Pascal, le père Noël (un jésuite) s'indignait :  
« La nature est aujourd'hui accusée de vide ».

Pascal a donné son nom à l'unité de pression du système international d'unité (un pascal correspond à la pression qu'une force de un newton exerce sur un mètre carré). Le torr (unité ayant pour origine le nom de Torricelli), qui correspond à une dénivellation de un millimètre de mercure, est néanmoins encore utilisé aujourd'hui.

## Elaboration, mesure et applications

Une fois l'existence du vide admise, les physiciens se sont efforcés de disposer d'un vide optimal. On parle de vide moyen lorsque la pression est comprise entre 0,1 Pa et 100 Pa, de vide poussé entre  $10^{-5}$  Pa et  $10^{-1}$  Pa et enfin d'ultra-vide en dessous de  $10^{-5}$  Pa. La trompe à eau que l'on utilise en chimie, est un des exemples les plus simples de pompe à vide. Elle permet d'obtenir un vide moyen. Mais aujourd'hui, de nombreuses applications industrielles et de nombreuses expériences de recherche fondamentale nécessitent un vide compris entre  $10^{-2}$  Pa et  $10^{-8}$  Pa. Aussi, depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle, les techniques du vide ont-elles été perfectionnées. On utilise désormais très souvent des pompes ioniques et des pompes cryogéniques. Dans les premières, les molécules et atomes de l'atmosphère préalablement ionisée sont accélérés vers les cathodes et sont piégés dans le réseau cristallin de celles-ci. Dans les secondes, le gaz est condensé sur une paroi maintenue à très basse température par de l'hélium liquide. Ces deux types de pompe permettent d'obtenir un vide poussé de quelques millièmes de pascal.

Simultanément, les méthodes de mesure de pression ont évolué. Rappelons en effet que le baromètre de Torricelli, ne permettrait pas de prendre en compte des pressions inférieures à une centaine de Pascals. Aujourd'hui, les pressions en ultravide sont mesurées grâce à des manomètres plus performants, comme, par exemple le manomètre à ionisation. Ce type de manomètre comporte un filament incandescent qui émet des électrons. Le vide n'étant pas parfait dans l'enceinte du manomètre, les quelques molécules de gaz restantes sont ionisées par les électrons qui les rencontrent. Le principe de cet appareil repose donc sur la mesure d'un courant proportionnel au nombre de molécules ionisées, mesure qui permet, indirectement, d'accéder à la pression du gaz.

Obtenir, un vide poussé, et plus précisément un ultravide, est quelque chose de fondamental en physique des particules. A l'intérieur des accélérateurs de particules, on doit en effet s'affranchir de toute collision parasite. Il est donc nécessaire que la pression y soit inférieure à  $10^{-5}$  Pa.

Mais les techniques du vide n'ont pas servi que la recherche fondamentale. Leurs applications sont nombreuses : l'élaboration de semi-conducteurs, la déshydratation des produits alimentaires sont des exemples parmi d'autres d'utilisation du vide à des fins industrielles.

## Le zéro en physique

Dans les paragraphes précédents, nous avons implicitement relié les notions de vide en physique classique à celle de valeur « zéro » de la pression. Nous sommes donc amenés à évoquer toute la problématique qui entoure la notion de nullité dans le domaine de la physique. Dans un premier temps, il est fondamental de distinguer la nullité d'une grandeur de son inobservabilité : si le physicien obtient une valeur non nulle lorsqu'il mesure une grandeur donnée, (par exemple un temps de propagation, ou bien la masse d'une particule ou encore sa dimension) il peut conclure que la valeur de cette grandeur est différente de zéro. Il en va tout autrement si, avec les outils dont il dispose, il obtient une valeur nulle : dans ce cas, la question sera de savoir si la grandeur observée est trop petite pour être mesurée (il s'agira alors de vaincre cette limitation de mesure), ou bien si elle est fondamentalement nulle. L'histoire de la physique regorge, à toutes ses époques, d'exemples en la matière, et montre comment les notions de zéro et l'infini sont étroitement liées :

Evoquons la question de la célérité de la lumière : Descartes (1596-1650) estimait que la propagation lumineuse s'effectuait instantanément. Or, un temps de propagation nul impliquait une célérité de la lumière qui fût infinie. Fermat (1601-1665), avait un avis

contraire. Mais il fallut que le Danois Römer (1644-1710), en observant l'éclipse des satellites de Jupiter, mesurât une valeur finie pour celle-ci pour que la théorie de la célérité infinie de la lumière – et donc du temps de propagation nul - fût abandonnée.

Plus récemment, les physiciens modernes ont été confrontés à des particules dont la masse semblait être nulle. Au XX<sup>ième</sup> siècle, ils ont ainsi pensé que les neutrinos électroniques étaient dépourvus de masse (à l'instar du photon). Les neutrinos ont toujours été très difficiles à étudier dans la mesure où ils interagissent très peu avec la matière (nous sommes traversés par des milliards de neutrinos chaque seconde). Ce n'est qu'en 1998 que la première estimation de la masse du neutrino put être fournie. Celle-ci est comprise entre 0,03 à 0,11 eV (ce qui correspond à  $10^{-37}$  kg). Un neutrino serait donc dix millions de fois moins lourd que l'électron. Pour autant, sa masse n'est pas nulle !

Plus généralement, en physique, le zéro est vu, soit comme une propriété intrinsèque de l'objet étudié (c'est le cas lorsque l'on parle de la valeur nulle de la masse, de la charge électrique, du spin ou de l'isospin d'une particule) soit comme une limite (ce qu'illustre l'utilisation fréquente des échelles logarithmiques dans cette discipline). Ainsi le « zéro absolu » de Température (zéro de l'échelle Kelvin), correspond-il à une agitation thermique minimale, c'est à dire à une immobilité parfaite. On n'a jamais réussi à l'atteindre, même si on se rapproche de plus en plus de la limite qu'il représente (voir l'encadré « le zéro Kelvin »).

## **Le vide en physique quantique**

La conception du vide en physique jusqu'au XX<sup>ième</sup> siècle était relativement simple : était vide, ce qui ne contenait aucune particule... Les travaux de la physique moderne, notamment sur les couples particule-antiparticule, ont montré qu'une définition aussi simpliste ne saurait convenir. Rappelons que chaque particule possède une antiparticule de charge opposée à celle-ci. Ainsi, le positron, est-il l'antiparticule de l'électron, l'antineutrino électronique, celle du neutrino électronique... Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, il y a annihilation de matière et de l'énergie est libérée. Réciproquement, on peut concevoir que de l'énergie puisse se matérialiser sous la forme d'un couple particule -antiparticule. A partir de là, le vide en physique quantique doit être défini comme l' état d'énergie la plus faible..Mais cette dernière définition pose encore quelques problèmes. En effet, la physique quantique, et notamment la deuxième relation d'incertitude de Heisenberg, nous apprend qu'il peut se produire des fluctuations dans l'énergie, pourvu que ces dernières soient suffisamment brèves. Les fluctuations d'énergie  $\Delta E$  du vide donnent donc lieu à l'apparition, pendant un temps très court  $\Delta t$ , de particules subatomiques. Ce vide quantique, tel que nous venons de le définir, serait ainsi un milieu très actif. Une énergie minimale ne suffirait donc pas pour décrire ce que peut être le vide... Dans leurs toutes dernières théories, les physiciens décrivent le vide total comme l' état minimal du système de champs qui constitue le monde. Ils supposent notamment que le vide quantique contient un champ quantique, qui permet à la matière d' acquérir sa masse par interaction avec des particules baptisées « bosons de Higgs ». L'histoire du vide se poursuit donc...

## **Encadré : Le zéro Kelvin ( -273,15 ° C)**

L'agitation thermique augmente avec la température. A 300 Kelvin ( 26,85 °C) les atomes se déplacent à quelques 4000 km/s. A une température de 3 Kelvin (-270,15 °C), leur vitesse est encore de 400 km/s. L'immobilité absolue correspondrait à une température de 0 Kelvin. Refroidir un gaz, c'est donc freiner ses particules.

Les Américains Steven Chu et William Phillips et le Français Claude Cohen-Tannoudji, ont été lauréats du prix Nobel de physique 1997 pour leurs travaux sur le refroidissement et le piégeage d'atomes par lumière laser. L'idée était de bombarder les atomes du gaz avec les photons d'une lumière laser et d'utiliser ainsi, pour ralentir un atome, la pression de radiation exercée par la lumière. Six faisceaux laser tiraient ainsi dans les trois directions de l'espace. La vitesse obtenue fut de quelques dizaines de centimètres par seconde (ce qui correspond à une centaine de microKelvin).