



Le vide

UN CONCEPT CONTROVERSÉ

Dans la vie courante, un récipient que nous qualifions de vide est en fait rempli d'air. Nous oublions qu'il contient un très grand nombre de molécules animées de mouvements incessants et désordonnés. Déjà, dans l'Antiquité, certains penseurs grecs avaient pressenti cette vision moderne. L'air est, disaient-ils, constitué de petites sphères insécables (les atomes) en perpétuelle agitation, séparées les unes des autres par un espace vide.

Pourtant, **Aristote**, maître à penser du monde occidental pendant près de deux mille ans, montre avec des arguments très convaincants qu'il ne peut y avoir de vide dans la nature : « La nature a horreur du vide » disait-il. C'est ce que l'on admet jusqu'au milieu du **xvii^e** siècle où tout commence à changer : tout d'abord, on réussit à obtenir un espace vide « barométrique », ensuite on invente

la **pompe à vide** ou « machine pneumatique ». Avec cette pompe, sans cesse perfectionnée par la suite, on réalise une foule d'expériences avec des « vides » plus ou moins parfaits. Ainsi naît la science du vide, alors que pendant près de 2000 ans on avait pensé que le vide ne pouvait exister. Parallèlement aux études théoriques, les techniques du vide sont de plus en plus employées dans l'industrie. Au début du **xx^e** siècle on se rend compte que la matière elle-même est essentiellement vide. De nos jours, la physique moderne nous enseigne que le vide, partout présent, n'est pas le néant : il s'y passe des choses à l'échelle subatomique. Le vide apparaît finalement comme une chose tout à fait complexe.

LA DÉCOUVERTE DU VIDE

C'est à l'aide de la formule « la nature a horreur du vide » que l'on explique jusqu'au **xvii^e** siècle pourquoi l'eau monte dans une seringue ou une pompe lorsqu'on tire sur le piston. C'est, dit-on, pour éviter l'apparition d'un espace vide entre le piston et la surface de l'eau que le niveau de celle-ci s'élève.

Mais au **xvi^e** siècle, certains commencent à douter de cette explication.



L'Italien **Torricelli** est le premier à comprendre que l'eau n'est pas tirée par le haut, mais

poussée par en-dessous : l'air pesant extérieur, en appuyant sur l'eau au fond du puits, la pousse de bas en haut et la fait monter jusqu'à 10,30 mètres, hauteur limite à laquelle la colonne d'eau devient trop lourde, le poids de l'air ne pouvant plus la supporter. S'il en est bien ainsi, raisonne Torricelli, alors si l'on remplace l'eau par du mercure, 13,6 fois plus dense que l'eau, la hauteur maximale de la colonne de mercure devrait être 13,6 fois inférieure à celle de l'eau, soit



760 millimètres. C'est son compatriote **Viviani** qui fait l'expérience en 1643 : il prend un tube d'environ un mètre de long,

fermé à un bout, et le remplit avec du mercure. Puis il retourne le tube et plonge l'extrémité ouverte dans une bassine contenant également du mercure. Comme Torricelli l'avait prévu, il observe le niveau dans le tube s'abaisser et s'arrêter à 760 mm au-dessus de celui dans la bassine. Les deux hommes venaient non seulement d'inventer le



baromètre à mercure, mais ils venaient de produire pour la première fois dans l'histoire de l'humanité un espace où le vide était très poussé : dans le tube, au-dessus du mercure ! Le vide n'était donc pas chose impossible. Ce fait établi, on oriente les efforts vers la fabrication de « machines pneumatiques » capables de produire des espaces vides plus grands que ceux obtenus dans les baromètres. **La première** est



construite en 1647 par le bourgmestre de Magdeburg, **Otto von Guericke** (1602-1686), un passionné de physique. Aussitôt, on expérimente avec le vide : la lumière traverse-t-elle le

vide ? Oui ! Et le son ? Non ! Comment se comporte une flamme dans le vide ? Et les animaux ? Bref, le vide devient pour les scientifiques un nouveau champ d'investigation. Très tôt, l'expérimentation avec le vide permet de faire des découvertes inattendues.

LE VIDE ET L'ÉLECTRICITÉ

Certaines personnes rapportent par exemple avoir aperçu la nuit, en déplaçant un baromètre, des lueurs bleutées dans l'espace vide au-dessus du mercure ! Afin d'élucider ce fait étrange, vers 1705 **Francis Hauksbee** vide partiellement un récipient en verre de son air et observe une émission de lumière lorsque le verre est frotté avec un chiffon (En 1710 il crée même un **générateur électrostatique**) !



On comprend vite qu'il s'agit d'un phénomène électrostatique : les frottements du chiffon ou du mercure contre le verre électrisent ce dernier et provoquent des décharges électriques... Il s'agissait des premières expériences relatives à l'électricité dans les gaz à basse pression : elles allaient conduire à la mise au point des tubes au néon et des tubes fluorescents plus de deux siècles plus tard.

LA « FORCE » DU VIDE

Une autre découverte tout à fait fondamentale a été la mise en évidence de ce que l'on appelait à l'époque « la force du vide » : deux hémisphères creux s'appliquent exactement l'un à l'autre pour former une sphère. Un joint assurant l'étanchéité, on pompe l'air de la sphère. Employant des hémisphères de 119 cm de diamètre, **Otto von Guericke** montre que **16 chevaux attelés à la sphère** (8 de chaque

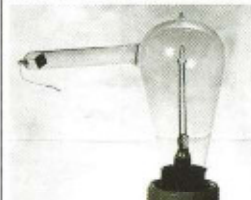


côté) ne réussissaient pas à les séparer. Il fallut en atteler 24 (12 de chaque côté) pour y parvenir. Tout se passait comme si le vide dans la sphère maintenait les deux hémisphères ensemble. Mais on

comprend vite que le vide n'a pas d'action et qu'en fait, c'est l'air extérieur qui les plaque fortement l'un contre l'autre. Puisque l'air exerce manifestement une force, pourquoi ne pas l'employer et obtenir ainsi un moteur ? C'est ainsi que naissent les « machines atmosphériques », dont la transformation progressive conduit à la machine à vapeur.

LE VIDE ET L'ÉLECTRONIQUE

Au **xx^e** siècle, les pompes permettaient d'obtenir des vides assez poussés. En plaçant deux électrodes distantes l'une de l'autre dans une ampoule partiellement vidée de son air, on obtient un faisceau cathodique, ce qui permet de découvrir l'électron ! En 1896, **Röntgen** montre que l'impact de ces électrons sur l'anode produit des rayons X ! Quelques années plus tard, **Fleming** montre que si on place une plaque métallique à proximité du filament chaud d'une **lampe d'Edison** vidée de son air et si on



le relie à un générateur électrique alternatif, le dispositif « redresse » le courant, c'est-à-dire ne le laisse passer que dans un sens (lorsque le filament est négatif et la plaque positive). La « diode » électronique venait de naître. Peu de temps après, l'Américain de **Forest** invente



la **triode** en plaçant une troisième électrode (trouée) entre les deux électrodes de la diode. Ce nouveau

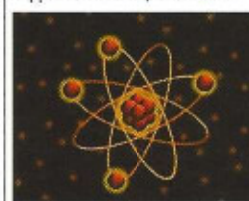
dispositif, appelé « triode », allait se révéler un fabuleux composant électronique capable de redresser un courant, mais aussi de l'amplifier ; de plus, grâce à la triode, il devient facile de produire un courant alternatif (notamment de haute fréquence) et donc une onde électromagnétique ! Toutes ces découvertes n'auraient pas été possibles sans la maîtrise du vide sans quoi ni radio, ni télévision n'auraient vu le jour !

LA MATIÈRE ET LE VIDE

Vers 1910, en bombardant une feuille en or de quelques dixièmes de microns d'épaisseur avec des particules alpha (noyau d'hélium)



émises par une source radioactive (**un réacteur**), on observe un étrange résultat : la plupart des particules alpha traversent la feuille ; une seule sur 8000 en moyenne rebondit ! Le physicien **Rutherford** rend compte de ce résultat dans le cadre d'une théorie où il représente l'atome de manière similaire au système solaire : une sphère essentiellement vide avec en son centre un noyau dense autour duquel tournent des électrons. Rapporté à l'échelle, **l'atome** est



plus vide que le système solaire. Sans le vide qui sépare l'électron du proton dans un atome d'hydrogène, ce dernier aurait un rayon 100 000 fois plus petit, et un volume un million de milliard de fois plus faible ! Ainsi, sans le vide atomique, le diamètre de la Terre serait de 130 mètres. Le Soleil quant à lui ne ferait que 15 km de diamètre !

Le vide dans tous ses états

1 atome/cm³



Composition atomique du vide intergalactique.

2,5.10¹⁹ molécules/cm³

Composition de l'air au niveau de la mer.

80 nanomètres

Distance parcourue par une molécule dans l'atmosphère terrestre avant la collision avec une autre molécule.

20 milliards de kilomètres

Distance parcourue par une molécule dans l'espace avant la collision avec une autre molécule.

10⁻¹¹ torr



Pression atmosphérique sur la Lune.

300 000 km/s

Vitesse de la lumière dans le vide.

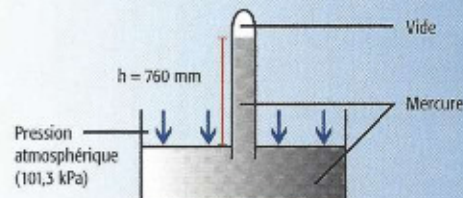
L'ENIAC



18 000 tubes à vide

Le 1^{er} ordinateur composé de tubes à vide

L'expérience de Torricelli



Signalons à ce propos qu'il s'agit là justement de la taille d'une étoile à neutrons...

LE VIDE ET LE BIG-BANG

La physique moderne, dite aussi quantique, est née vers la fin des années 1920. L'une des nouveautés qu'elle apporte par rapport à la physique classique est le fait que le principe de conservation de l'énergie peut être violé, à condition toutefois que cela ne dure pas longtemps. Plus précisément, la durée pendant laquelle ce principe est violé doit être d'autant plus courte que l'énergie mise en jeu est importante. À titre d'exemple, si cette énergie vaut 10^{25} joules, la durée ne peut dépasser un milliardième de seconde ; et si l'énergie est de l'ordre de celle d'un photon visible, elle ne pourra dépasser 10^{-16} secondes. Autrement dit, des photons visibles peuvent naître du vide et disparaître presque aussitôt.

Ainsi, selon la physique quantique, le vide est un lieu dont l'énergie fluctue et où des particules apparaissent et disparaissent sans cesse. Le vide n'est donc pas rien, et à ce titre, il n'est pas identifiable au néant des philosophes. On pense que ce sont les fluctuations du vide qui sont responsables de la désintégration d'un atome qui se trouve dans un état excité. Si le vide était le néant, un atome excité ne se désintégrerait pas. Puisque le vide n'est pas rien, cela implique qu'il puisse changer, de même que la matière change. Les physiciens parlent de « changement de phase ». C'est consécutivement à un tel changement de phase du vide que le Big-Bang aurait donné naissance à notre Univers. Ce dernier ne serait ainsi pas né de rien, mais de presque rien !

CASIMIR ET LE VIDE

L'une des conséquences des fluctuations dont il a été question plus haut est un phénomène tout à fait spectaculaire que l'on appelle l'« effet Casimir », du nom du physicien qui l'a

étudié et expérimenté. On montre qu'entre deux petites plaques métalliques placées l'une en face de l'autre et séparées d'une très faible distance (de l'ordre du micromètre), le nombre de photons issus des fluctuations du vide est plus faible que dans une région non limitée par des plaques. Autrement dit, le vide entre les plaques est davantage vide que celui à l'extérieur, de l'autre côté des plaques. Cela signifie que l'énergie du vide est plus faible dans une telle cavité qu'à l'extérieur. La pression (quantique) est donc plus faible entre les plaques. Par conséquent, les plaques doivent se rapprocher. C'est effectivement ce que l'on observe expérimentalement.

PRODUCTION DU VIDE

Il existe une grande variété de pompes permettant de produire du vide, dont il ne sera possible ici que de décrire quelques unes. Ce qu'il faut savoir cependant, c'est qu'aucune pompe ne permet de passer de la pression atmosphérique à un vide très poussé. En effet, chaque pompe fonctionne dans une certaine gamme de pressions limitée par une pression d'amorçage et une pression minimale produite. Certaines pompes permettent d'obtenir des vides primaires seulement, et celles qui permettent la production de vides plus poussés n'y parviennent qu'à partir de vides primaires... « Vide primaire », signifie un vide obtenu à partir de la pression atmosphérique. Il existe trois grandes classes de pompes. Les pompes mécaniques ; les pompes hydrodynamiques encore appelées machines à jets ; les pompes à fixation ou condensation.

LES POMPES MÉCANIQUES

Les pompes mécaniques fonctionnent toutes par le jeu de mouvements de pièces : le gaz est aspiré à un endroit et refoulé à un autre. La pompe à palettes est la pompe primaire la plus couramment employée. La rotation du système à palettes dans une enceinte cylindrique déplace le gaz. Ce dernier pénètre d'abord dans une chambre qui se dilate. La rotation entraîne

l'isolement de ce volume puis le refoulement du gaz qu'il enferme. Avec les pompes à palettes on obtient des pressions de l'ordre de 10^{-1} Torr, soit de l'ordre de un million de fois plus faible que la pression atmosphérique. Signalons que chaque centimètre cube d'air autour de nous contient plus de 10^{23} molécules. Avec une pompe primaire, cette densité atteint donc $10^{22}/\text{cm}^3$. La limitation des pompes à palettes à 10^{-1} Torr provient du fait qu'elles mettent en jeu de l'huile et que celle-ci, comme tout liquide, se volatilise sous vide.

LES POMPES HYDRODYNAMIQUES

Une fois le vide primaire obtenu, on améliore le degré de vide souvent en employant une « pompe à diffusion d'huile ». Le principe ici consiste à porter d'abord une huile à ébullition. Les vapeurs émises sont canalisées vers un éjecteur qui les projette à grande vitesse, entraînant les molécules de gaz rencontrées sur son passage. L'huile atteint ensuite une paroi refroidie par une canalisation d'eau : elle s'y condense avant de retourner vers le chauffage. Les pompes à diffusion permettent d'abaisser la pression d'un facteur 1 million encore. On atteint ainsi 10^7 molécules par centimètre cube.

LES POMPES À FIXATION

Contrairement aux pompes mécaniques et hydrodynamiques qui évacuent le gaz à l'extérieur, les pompes à fixation retiennent les gaz sur une surface grâce à la cryogénie par exemple. Avec ces pompes, on abaisse la pression d'un facteur 1 000 encore atteignant ainsi 10 000 molécules par centimètre cube. Il s'agit du vide le plus poussé que l'on puisse obtenir.

QUELQUES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU VIDE

Les procédés industriels mettant en jeu le vide sont très nombreux et variés allant de la production de café à la fabrication de tubes cathodiques des téléviseurs.

DÉPÔT MINCE

Il est parfois nécessaire de déposer sur un objet une fine couche d'une autre substance, comme par exemple dans le cas du dépôt antireflet sur les verres de lunette. Cela se fait souvent en évaporant la substance sous basse pression, puis en la faisant se condenser sur le substrat. L'épaisseur de la couche déposée est facilement contrôlable.

LE VIDE COMME ISOLANT THERMIQUE

Le vide s'opposant à la transmission de la chaleur par diffusion et convection, il constitue un bon isolant thermique. C'est la raison pour laquelle les bonnes bouteilles Thermos sont constituées de deux récipients emboîtés l'un dans l'autre, séparés par un bon vide.

INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Dans l'industrie alimentaire, on cherche à faire le vide principalement pour améliorer la conservation en éliminant l'oxygène qui a tendance à réagir chimiquement : café, jambon, beurre, produits frais, cacahuètes... sont



produits et scellés sous vide. Mais la conservation n'est pas l'unique raison. Il y en a d'autres... Par exemple, le remplissage d'une bouteille à l'air libre se fait relativement lentement, car le liquide doit chasser l'air hors de la bouteille pour prendre sa place. Cela se fait beaucoup plus rapidement dans le vide. La lyophilisation est une



technique qui met en jeu également le vide : on congèle, puis on abaisse la pression, ce qui a pour effet de faire sublimer l'eau (passage de l'état solide à l'état gazeux).

L'AÉROSPATIAL

Les installations de simulation spatiale

Les installations de simulation spatiale sont de taille très variable mais lorsqu'il s'agit de faire des essais afin d'étudier le comportement des moteurs à très basse pression, on est obligé de créer des

chambres où le vide est très poussé. Le grand simulateur du CNES qui fait environ 600 m³ en est un bon exemple.

LA MÉTALLURGIE ET LE PLASTIQUE

Certains métaux imposent une élaboration en atmosphère neutre. Or le vide est l'atmosphère neutre par excellence... Cette métallurgie est notamment mise en œuvre pour la production de certains aciers.

Dans l'industrie des matières plastiques, notamment pour la fabrication des moulages, le vide permet d'éviter la présence de bulles : on obtient ainsi des surfaces parfaitement lisses.

L'INDUSTRIE DU FROID

L'évaporation d'un liquide absorbe de la chaleur. On s'en rend compte lorsque l'eau sur notre peau s'évapore : on a froid. Si l'on place un verre d'eau sous une cloche à vide, son évaporation forcée se traduit par un important refroidissement. Actuellement les très basses températures produites pour la recherche fondamentale sont notamment obtenues grâce à cette technique dite de « refroidissement par évaporation ». Signalons aussi que certains distributeurs de glaçons fonctionnent sur ce principe : le vide est fait au-dessus de l'eau ; celle-ci entre en ébullition en puisant l'énergie nécessaire en elle-même (énergie interne). Ce faisant, sa température chute et l'eau finit par geler, donnant des glaçons.

LE VIDE DANS LES GRANDS INSTRUMENTS

Les Tokamaks, dont le futur ITER (réacteur thermonucléaire expérimental international) est un exemple, sont des dispositifs qui exigent l'obtention de vides poussés dans des volumes très importants ; 800 m³ dans le cas d'ITER. De même, les accélérateurs de particules, comme le LEP ou le futur



LHC, mettent en jeu également des vides très poussés : un milliardième de la pression atmosphérique. En effet, les particules étudiées doivent voyager librement sans contact avec aucun atome étranger.

UNE APPLICATION

AMUSANTE DU XIX^e SIÈCLE

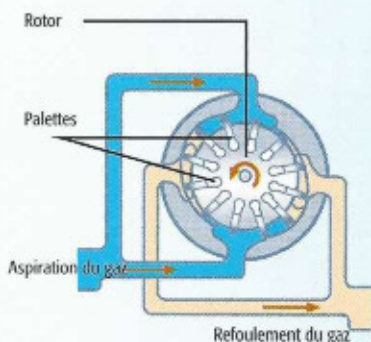
Au début du XIX^e siècle un ingénieur danois propose de mettre des lettres et des colis dans un chariot, de placer ce dernier dans un tube puis de faire le vide à une des extrémités du tube



de sorte qu'il voyage, poussé par la pression atmosphérique. C'est la « poste pneumatique ». Elle a été mise en place en 1866 à Paris. En 1888 on dénombra près de 200 kilomètres de tuyaux, à cela près qu'on injecte de l'air comprimé dans le tuyau (au lieu de faire le vide) et le cylindre est envoyé à destination à près de 30 km/h. Le service a été exploité jusqu'en 1984. Le XIX^e siècle a également inventé le « chemin de fer atmosphérique ». En France, une telle installation est terminée en 1847 : deux pompes mues chacune par une machine à vapeur de 200 cv avaient un débit de 4 000 litres à la seconde ! Mais le bilan financier de l'opération est catastrophique et on abandonne vite l'exploitation de la ligne...

Principe de fonctionnement des pompes à vide

La pompe à palettes



La pompe à diffusion d'huile

