



Un vide plus ou moins... vide

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Raréfiés, les gaz ont des comportements différents selon la taille de l'enceinte où ils sont confinés.

Une pression faible suffit-elle à définir le vide ? Pas pour un physicien, pour qui le vide se mesure en termes de collisions moléculaires. Pour créer le vide, on doit pomper le gaz contenu dans l'enceinte à vider afin que le nombre de molécules qu'elle contient diminue. Toutefois, en raison des mécanismes physiques qui s'installent quand les collisions moléculaires sont peu nombreuses, le pompage est d'autant plus difficile que le nombre de molécules présentes dans l'enceinte diminue. La pression cesse alors d'être un paramètre pertinent, et doit être remplacée par le « libre parcours moyen », c'est-à-dire par la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux collisions. Tentons de comprendre comment s'opère ce basculement entre la notion de pression faible et celle de libre parcours moyen dans un gaz raréfié, en examinant de près comment... on fait le vide.

Pour le physicien ou pour l'ingénieur, cette expression signifie avant tout retirer les gaz de l'enceinte. Dans un liquide et encore plus dans un solide, les forces d'attraction sont assez grandes pour maintenir les atomes et les molécules à des distances du même ordre de grandeur que la taille des molécules ou des atomes eux-

mêmes. Il en va autrement dans les gaz, car l'agitation thermique l'emporte sur l'attraction : les molécules d'un gaz sont séparées par des distances bien supérieures à leur taille ; elles interagissent essentiellement lors de brèves collisions. Puisque ses molécules sont libres de se déplacer, un gaz tend à occuper spontanément tout le volume disponible.

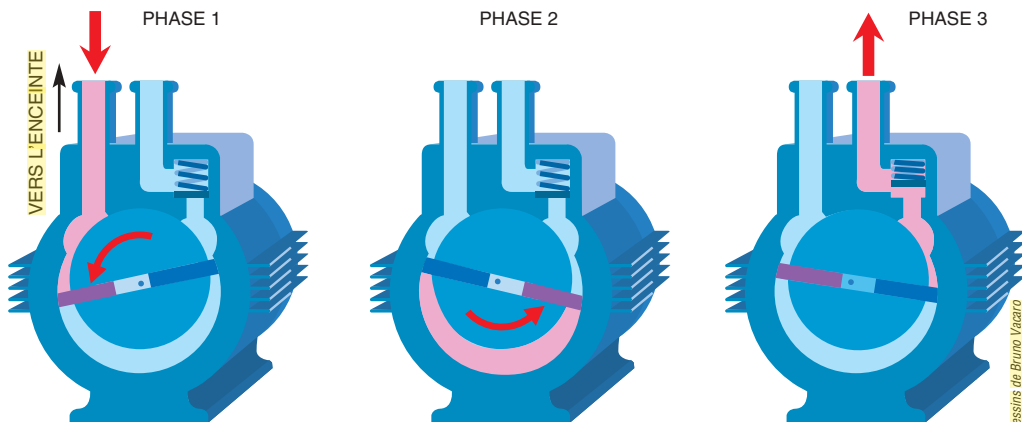
LA POMPE À PALETTES

Pratiquement, tous les systèmes à faire le vide exploitent cette propriété, notamment les pompes à palettes, l'un des systèmes les plus utilisés pour créer des vides industriels. La rotation de palettes solidaires d'un tambour permet d'abord au gaz de l'enceinte que l'on veut vider d'occuper un volume supérieur au volume de l'enceinte elle-même. Ce gaz (*en rose sur la figure*) est entraîné par le mouvements des palettes (phase 1), isolé de l'enceinte et de l'extérieur (phase 2), puis repoussé vers l'extérieur (phase 3). La rotation se poursuivant, l'enceinte est à nouveau isolée pendant que le volume aspiré est évacué. Avec les pompes à palettes, on atteint des pressions inférieures à un pascal, soit un dix millième de la pression atmosphérique. Pour aller au-delà, il faut

disposer d'autres dispositifs de pompage, qui prennent le relais une fois que la pompe à palettes n'est plus efficace.

Voyons pourquoi, dans la plupart des cas, la pression caractérise la qualité du vide. Cette grandeur macroscopique mesure la force exercée par le gaz sur les parois de l'enceinte. Elle résulte des chocs incessants des molécules sur les parois. Par conséquent, la pression d'un gaz est d'autant plus élevée que les chocs sont plus nombreux (la densité de molécules dans le gaz est élevée) ou que les chocs sont plus violents (l'agitation thermique est forte). Cette pression est proportionnelle au produit de la densité du gaz par sa température. Elle ne peut être faible que dans deux situations : quand le gaz est très froid ou quand l'enceinte contient peu de molécules. Le vide est souvent créé à température constante (celle du récipient), de sorte que la pression mesure directement le nombre de particules par unité de volume.

Il existe toutefois des situations où la pression cesse d'être le paramètre pertinent pour caractériser le vide. Les physiciens préfèrent alors s'intéresser au « libre parcours moyen » défini précédemment. Contrairement à la pression, le libre parcours moyen est une grandeur microscopique, applicable dans toutes les situations. Un raisonnement simple suffit à déterminer sa valeur à un facteur près. Lorsqu'une molécule se déplace, elle balaye au cours de son mouvement un cylindre dont la section est égale à celle de la molécule et la longueur est la distance parcourue. Elle subit autant de chocs qu'il y a de molécules dans ce volume. La longueur correspondant à un seul choc, c'est-à-dire au libre parcours moyen, est d'autant plus grande que le nombre de molécules rencontrées est faible et que la molécule est petite. Ainsi le libre parcours moyen est inversement proportionnel au produit du nombre de molécules par unité de volume par la valeur de la section géométrique d'une molécule. Celle-ci est en général de l'ordre de 0,5 nanomètre carré. À température ambiante (25 °C) et sous une pression



Une pompe à palettes est reliée à l'enceinte où l'on veut faire le vide. Les palettes, solidaires d'un tambour qui tourne, entraînent l'air (*en rose*) contenu dans l'enceinte (phase 1) ; elles isolent ce gaz soustrait à l'enceinte (phase 2), puis le mettent en communication avec le milieu extérieur (phase 3), où il s'échappe. Au fil des cycles, l'air est aspiré de l'enceinte où l'on fait le vide.

Dessins de Bruno Vacaro

égale à la pression atmosphérique normale, la densité volumique des molécules vaut environ $2,4 \times 10^{25}$ molécules par mètre cube. Une molécule parcourt alors en moyenne 0,08 micromètre entre deux chocs, soit 200 fois son diamètre. Leur vitesse moyenne étant d'environ 300 mètres par seconde, les molécules du gaz subissent environ quatre milliards de chocs par seconde!

RÉGIME HYDRODYNAMIQUE ET RÉGIME MOLÉCULAIRE

Ainsi, le comportement d'un gaz raréfié dépend de la «place» dont disposent ses molécules, de leur libre parcours moyen. Si ce dernier est très petit devant la taille de l'enceinte, une molécule interagit souvent avec ses congénères. Dans ce cas, les collisions uniformisent les propriétés du gaz. Ce dernier est alors dans un régime dit «hydrodynamique», car il se comporte comme un fluide homogène. Les collisions entre molécules (résultant de l'agitation thermique) l'emportent sur les autres phénomènes et confèrent au gaz une vitesse moyenne égale à la vitesse moyenne des molécules, comme dans un fluide. Les collisions intermoléculaires microscopiques engendrent la viscosité macroscopique du gaz, c'est-à-dire sa tendance à résister à l'écoulement, et à dissiper de l'énergie. Les interactions avec les parois, qui ne jouent qu'un rôle de confinement des molécules, sont peu nombreuses.

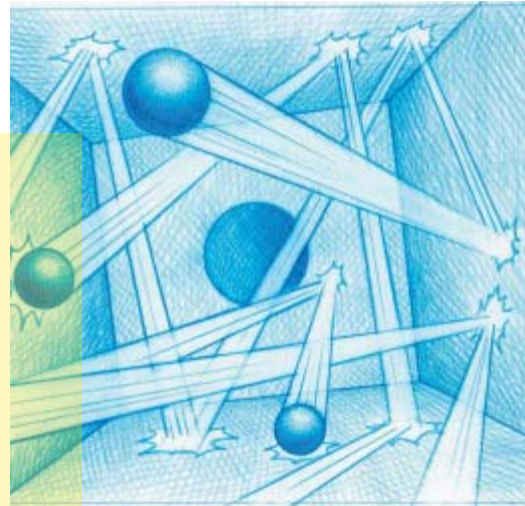
En revanche, quand le libre parcours moyen est supérieur à la taille de l'enceinte, une molécule rencontre peu ses semblables. Les molécules se déplacent

alors de paroi en paroi sans interagir entre elles et le gaz adopte un nouveau comportement : il est en «régime moléculaire». La pression où apparaît ce régime dépend de la taille de l'enceinte considérée. Ainsi, à température ambiante, le régime moléculaire survient dans un tube capillaire dont le diamètre intérieur vaut 10 micromètres et pour une pression de 100 pascals. Cette valeur, 1 000 fois inférieure à la pression atmosphérique normale, est facile à atteindre avec une pompe à palettes. En revanche, dans une enceinte de 10 centimètres de largeur, le régime moléculaire est atteint pour une pression égale à 0,08 pascal, qu'une pompe à palettes ne permet pas d'atteindre. La densité est alors d'environ 2×10^{19} molécules par mètre cube.

Cette valeur, ainsi que celles de la densité des molécules dans le meilleur des vides que l'on obtient en laboratoire restent énormes par rapport à celles qui règnent dans le milieu interstellaire. Ce dernier est plus vide que le meilleur vide que nous sachions réaliser. Dans un nuage interstellaire, le libre parcours moyen d'une molécule est proportionnel à l'inverse de la densité. Cette dernière varie beaucoup selon la température du nuage. Dans les nuages interstellaires froids (100 kelvins) au sein desquels les étoiles se forment, la densité est par exemple de 40 molécules par centimètre cube. Paradoxe apparent, les astrophysiciens considèrent qu'un tel nuage est en régime hydrodynamique! En effet, bien que les libres parcours moyens y soient gigantesques – quelques centaines de millions de kilomètres – ils restent très inférieurs aux tailles courantes des nuages interstellaires : elles se mesurent en millions de milliards de kilomètres.

LES LIMITES DU VIDE

Pourquoi le vide obtenu sur Terre est-il limité? D'abord en raison de diverses contraintes mécaniques, notamment des fuites aux joints (de l'air pénètre dans l'enceinte de la pompe, où la pression est inférieure à la pression atmosphérique) ou encore d'une étanchéité médiocre de ces joints qui s'«usent». En régime hydrodynamique, les molécules s'écoulent dans le tuyau. En revanche, quand les molécules se réfléchissent sur les parois, la situation change : au lieu de rebondir comme une balle sur un mur, une molécule qui rencontre une paroi, y adhère un instant, puis repart dans une direction quelconque. Dû aux forces attractives de Van der Waals, ce phénomène a des consé-



En régime moléculaire, le libre parcours moyen des molécules est supérieur à la taille de l'enceinte. Dans un tel régime, les seules interactions ont lieu avec les parois.

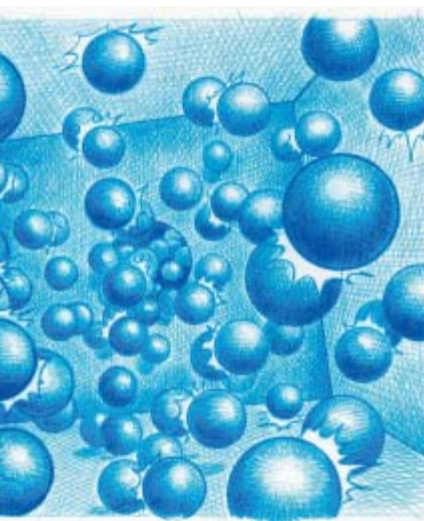
quences étonnantes. Une molécule qui arrive sur une paroi avec une incidence de 30 degrés peut repartir vers l'avant en rasant la paroi, dans la direction perpendiculaire, ou encore vers l'arrière! Pour qu'elle sorte de l'enceinte, une molécule doit avoir une vitesse dirigée dans l'axe du tuyau. Toutefois, même quand elle a atteint le tuyau, elle peut y stagner, car sa direction change après chaque choc sur la paroi. Elle peut même repartir vers l'enceinte à vider! C'est pour cette raison que l'on doit impérativement utiliser des tuyaux courts et de gros diamètre pour réaliser des vides moléculaires. Les effets pernicioeux des rebonds sur les parois du tuyau sont alors réduits au maximum.

Toutefois, ces effets de parois ne sont pas rédhibitoires. Ils peuvent même favoriser la réalisation du vide, si l'on sait les exploiter. Plus la température de la paroi est faible et plus les molécules y restent collées longtemps. Elles peuvent même y rester quasi indéfiniment quand cette température est inférieure à la température de liquéfaction du gaz, voire à celle de sa solidification. Dans ce cas, c'est la paroi elle-même qui sert de pompe (de piège) pour améliorer le vide une fois que l'essentiel des molécules a été enlevé : aucune des molécules qui la frappe ne retourne dans l'enceinte. Un écran refroidi à la température de l'hélium liquide (4 kelvins) collecte ainsi toutes les molécules d'air contenues dans une enceinte. Une habile façon de tirer parti d'un inconvénient!

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURTY** est chargé de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire Kastler-Brossel (CNRS, ENS, IPMC).

Aimé RICHARDT et **Isabelle RICHARDT**, *La Technique du vide*, Éditions IN FINE, 1998.

Guy ROMMEL, *Notions de base en technique du vide*, Éditions SFV, 1995.



En régime hydrodynamique, le libre parcours moyen, c'est-à-dire la distance parcourue par une molécule entre deux chocs avec ses semblables, est inférieur à la taille de l'enceinte. Dans un tel régime, le gaz se comporte comme un fluide et s'écoule sans interagir (ou quasiment) avec les parois.

Biologie

La symbiose. Structures et fonctions. Rôle écologique et évolutif

Marc-André Selosse, Vuibert, 2000
(154 pages, 139 francs)

La vie harmonieuse à deux (précisons : deux individus d'espèces différentes) a complètement changé de statut au cours des dernières années. Dans un passé proche, les mots «symbiose» ou «mutualisme» évoquaient des associations, telle celle du bernard-l'hermite et de son anémone de mer, pittoresques certes et qui posaient des problèmes d'évolution et de comportements passionnants, mais de peu de conséquences sur le monde vivant pris dans son ensemble. Les choses ont bien changé depuis qu'une vieille hypothèse, presque abandonnée dans les années 1950, a été remise au goût du jour, sous l'impulsion de l'Américaine Lynn Margulis, et s'est révélée exacte : la cellule eucaryote moderne, pierre d'angle de l'évolution des orga-

nismes pluricellulaires, est le résultat d'une symbiose. Chacune de nos cellules est un être double (voire multiple), qui résulte d'un mariage contracté il y a quelque deux milliards d'années entre deux cellules pour former l'ancêtre commun à la quasi-totalité des végétaux, champignons et animaux.

Peu de biologistes doutent aujourd'hui que les mitochondries, mais également les plastides des végétaux et probablement aussi d'autres «organites», tels les peroxysomes (des vésicules qui contiennent des peroxydases intervenant dans l'oxydation de certains substrats) et les flagelles, résultent de ce que l'on nomme des endosymbioses. Les premières cellules eucaryotes (c'est-à-dire possédant un vrai noyau abritant les molécules d'ADN) se seraient associées avec des procaryotes. Les conséquences de ce mariage ont été immenses ! Mariage ne signifie d'ailleurs pas que cette vie à deux ait été totalement harmonieuse, car le vieux couple cellule eucaryote/mitochondries n'est pas exempt de conflits qui font les délices des généticiens. De bon gré ou non, les mitochondries et les plastides ont cédé une part importante de leur information génétique de base au noyau, tandis qu'une autre partie, de plus grandes dimensions encore, était perdue. L'association a été cependant bénéfique pour tout le monde. Par exemple, la cellule moderne ne «respire» de manière efficace que grâce à ses mitochondries, et les mitochondries semblent s'être fort bien accommodées de leur prison.

Le livre de Marc-André Selosse nous parle des symbioses. Il en dresse un panorama très vaste, qu'il s'agisse des lichens, des mycorhizes (des associations entre des champignons et des arbres ou arbustes) qui entourent les racines des plantes, des nodosités fixatrices d'azote, des algues intracellulaires qui nourrissent les coraux, ou encore des plasmides qui confèrent d'étonnantes propriétés aux bactéries. Il insiste moins sur d'autres types de symbioses comme le transport du pollen par les insectes. Principalement destiné, par son niveau et sa précision, à des étudiants en biologie, cet ouvrage est écrit dans un style clair qui le rend tout de même abordable à des lecteurs moins avertis.

Ce qui ne gâte rien, il est remarquablement à jour. Comme l'indique le sous-titre «Structures et fonctions. Rôle écologique et évolutif», il dépasse largement les aspects descriptifs des associations symbiotiques pour exposer leur mode de fonctionnement, expliquer en quoi consistent les «bénéfices réciproques», montrer comment la sélection naturelle opère sur les êtres doubles ou multiples, et surtout quel rôle la symbiose a joué dans l'évolution. La présentation du livre est quelquefois un peu déroutante (il y a 38 encadrés qui occupent presque le tiers de l'ouvrage), mais cette remarque est mineure.

Jusqu'à ce jour, le public français n'avait à sa disposition sur la symbiose dans son ensemble que des ouvrages en langue anglaise, comme *Symbiotic Interactions* d'A. Douglas et *The biology of Symbiosis* de D. Smith et A. Douglas. Le livre de Marc-André Selosse comble cette lacune.

Claude COMBES,
Laboratoire de biologie animale (CNRS,
Université de Perpignan).

Exploration

Chercheurs de météorites

Françoise et Michel Franco.
Cherche-Midi éditeur, 2001 (238 pages,
120 francs).

Chercheurs de météorites est un véritable roman d'aventures dans lequel les auteurs, Françoise et Michel Franco, nous montrent combien la quête de ces objets extraterrestres reste difficile. Un jour, par exemple, dans une zone du désert où il ne pleut, paraît-il, qu'une fois tous les 15 ans, ils sont restés bloqués plusieurs jours par la pluie, sans tente, ni couverture... Au-delà des anecdotes des expéditions, les auteurs décrivent avec précision leur technique de prospection. Ils roulent très lentement avec leur 4 × 4 archaïque, et scrutent les paléosols par la fenêtre, ou carrément sur le toit, pour repérer «LA» pierre qui dépasse dans l'océan minéral. Ils prospectent aussi avec des aimants (prélevés sur des placards de cuisine), qui représentent pour le chasseur de météorites, ce que le stylo est pour l'écrivain.

Il tombe environ 100 000 tonnes de météorites chaque année. Malheureusement, 90 pour cent d'entre elles ne seront jamais découvertes, car leur masse



H. Spencer, Photo Researchers, Inc.

Cette plante (pois) nourrit des bactéries, qui s'abritent dans ses racines (dans les nodosités). En échange, les bactéries convertissent l'azote atmosphérique en une forme utilisable par la plante.