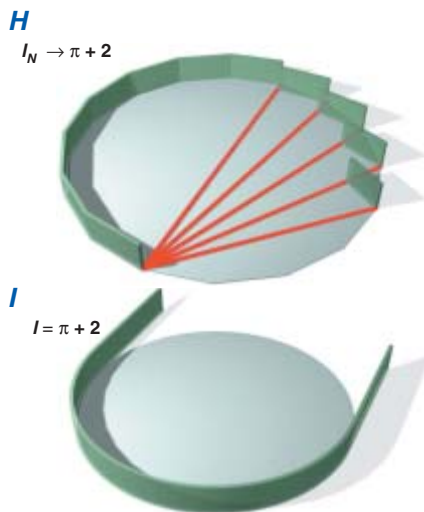




2. Un polygone régulier ayant un nombre pair et élevé de côtés a une clôture opaque constituée de plusieurs éléments (H). Quand le nombre N de côtés du polygone croît, la longueur I_N de cette clôture s'approche de celle de la clôture opaque minimale d'un cercle (I), soit un demi-cercle prolongé de deux rayons.

Plus encore, les mathématiciens ignorent s'il existe une clôture opaque encore plus courte. Peut-être est-il possible de raccourcir indéfiniment ces clôtures en les compliquant à volonté. On a prouvé l'existence d'une clôture minimale pour un nombre donné de constituants. On ignore encore si la longueur minimale d'une clôture continue à décroître lorsque le nombre de constituants tend vers l'infini. Ou encore, si une clôture qui a une infinité de composants peut être plus courte que toutes celles qui ont un nombre fini d'éléments. Tout cela semble peu vraisemblable, mais personne n'a encore prouvé que c'est impossible.

B. Kawohl a prouvé que la clôture illustrée sur la figure 1D est la plus courte de celles à deux éléments. Il a montré qu'un composant doit relier trois des sommets du carré et que l'autre doit contenir le quatrième. Le premier composant doit alors être l'arbre de Steiner le plus court joignant trois sommets. La plus petite région convexe qui contient ce morceau de clôture, c'est-à-dire la partie protégée du terrain, est un demi-carré limité par une diagonale. Le second élément doit être la plus courte courbe qui joint ce triangle au quatrième sommet, soit le segment de diagonale entre ce sommet et le centre du carré.

Vous avez convaincu votre supérieur et vos services sont requis pour d'autres ambassades. Comment faire pour d'autres formes de terrain ? Quand le terrain est un triangle équilatéral, la clôture opaque la plus courte est l'arbre de Steiner composé de trois segments qui relient chaque sommet au centre (voir la figure 1E). Pour un pentagone régulier, la clôture opaque la plus courte la plus souvent proposée a

trois éléments (voir la figure 1F). L'un d'eux est un arbre de Steiner qui relie trois sommets consécutifs du pentagone. Un autre est le plus court segment de droite qui relie le quatrième sommet à la région protégée par l'arbre de Steiner précédent. Enfin, le dernier élément est le plus court segment qui joint le cinquième sommet à la région protégée par les deux précédents. Personne n'a prouvé que cette clôture est optimale, mais on n'en connaît pas de plus courte.

CLÔTURES ET TRANCHÉES

Nouveau défi pour vos talents d'architecte : l'hexagone (voir la figure 1F). Puisque les angles d'un hexagone sont égaux à 120 degrés, l'arbre de Steiner est composé de trois côtés consécutifs qui relient quatre sommets consécutifs. Le deuxième composant est le plus court chemin du cinquième sommet à la région protégée par l'arbre de Steiner, et le troisième, le plus court chemin du dernier sommet à la région protégée par les autres éléments. De nouveau, on ignore si cette clôture est la plus courte.

Par analogie, vous pouvez clôturer tout polygone régulier convexe dont le nombre de côtés est pair (voir la figure 2H). Après la division du polygone en deux par un diamètre, le premier élément de la clôture est formé des côtés du polygone inscrit dans ce demi-cercle. Le deuxième élément est le plus court chemin qui joint le sommet suivant à la région protégée par le premier constituant, le troisième est le plus court chemin entre le sommet suivant et la région des deux précédents, et ainsi de suite...

Puisqu'un polygone régulier qui a un grand nombre de côtés est proche d'un cercle, quelle est la plus courte clôture opaque d'un terrain circulaire ? Pour simplifier, supposons que le rayon de ce terrain circulaire soit égal à un kilomètre. L'idée la plus simple est une clôture qui suit la circonférence du cercle, soit 2π (environ 6,283) kilomètres. Vous pouvez faire mieux en érigeant une partie de la

clôture à l'extérieur du terrain : une demi-circonférence prolongée à chaque extrémité par une partie de tangente égale au rayon (voir la figure 2I). La forme en U obtenue est bien une clôture opaque pour le cercle, et sa longueur est égale à $\pi + 2$ (environ 5,142) kilomètres.

On peut prouver que ce motif est bien de longueur minimale parmi les clôtures opaques d'un cercle qui sont des courbes simples (d'un seul tenant et sans ramification). Pour ce faire, énonçons le problème en termes de tranchées plutôt que de clôtures. Imaginons qu'un tuyau souterrain rectiligne passe à un kilomètre d'un point donné. Quelle est la tranchée la plus courte qui rencontrera à coup sûr le tuyau ? Nous savons que ce dernier rencontrera tangentiellement le cercle centré au point donné et d'un rayon de un kilomètre, et donc aussi toute clôture opaque de ce cercle. Dès lors, il suffit de tracer une tranchée qui a la forme d'une clôture opaque de ce cercle.

Dans cette version terrassière du problème, il est normal d'accepter que les tranchées sortent du terrain, mais les clôtures sont généralement érigées par un propriétaire sur sa propriété plutôt que chez le voisin. B. Kawohl montre que la clôture opaque minimale tout entière située à l'intérieur du cercle ne saurait mesurer plus de $(\pi + 2)$ kilomètres de longueur. Il obtient ce résultat en utilisant la clôture d'un polygone dont le nombre de sommets est pair et très grand (qui s'approche alors d'un cercle). Un calcul trigonométrique montre que la longueur de la clôture de la figure H tend vers $\pi + 2$ kilomètres lorsque le nombre de côtés tend vers l'infini.

Ces clôtures sont-elles vraiment minimales ? Peut-on en trouver de plus courtes ? Et que dire d'autres formes, tels des polygones irréguliers, convexes ou non, des ellipses, des demi-cercles ? Que se passe-t-il à trois dimensions, avec des murs opaques créés pour un cube ou pour une sphère ? La protection des secrets d'État est source de problèmes pour les mathématiciens des jeux.

Réactions

Plusieurs lecteurs ont critiqué un calcul exposé dans l'article *Un guide fractal du jeu de ticktacktoe* (voir *Pour la Science*, octobre 2000). J'indiquais que le nombre de parties possibles au morpion est 362 880. J'aurais dû préciser que ce calcul tient compte de l'hypothèse selon laquelle le jeu continue jusqu'à ce que toutes les cases de la grille soient remplies plutôt que de s'arrêter dès que l'un des joueurs gagne. Le nombre total de séquences qui remplissent toute la grille est $9 \times 8 \times 7 \times \dots \times 3 \times 2$ (noté 9!), soit bien 362 880.

Quel est le nombre de jeux réels ? John Stewart, de l'Université de Rockedge, indique que ce nombre est donné par :

$$9! - 24M - 6N - 2P - Q + (M + N + P + Q),$$

où M, N, P et Q sont les nombres de jeux terminés après le cinquième, sixième, septième et huitième mouvements. Leurs valeurs exactes restent à calculer. À vos calculatrices ! Selon J. Stewart, ce nombre serait 1440.



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.

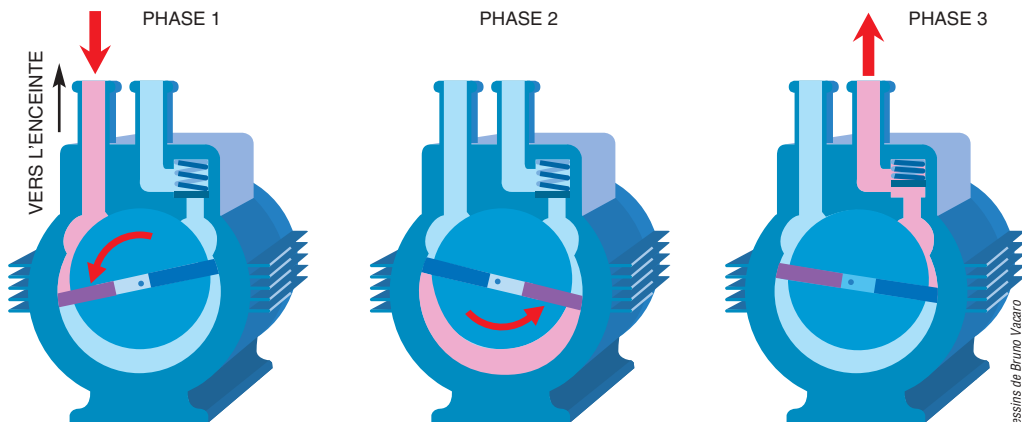
LA POMPE À PALETTES

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.

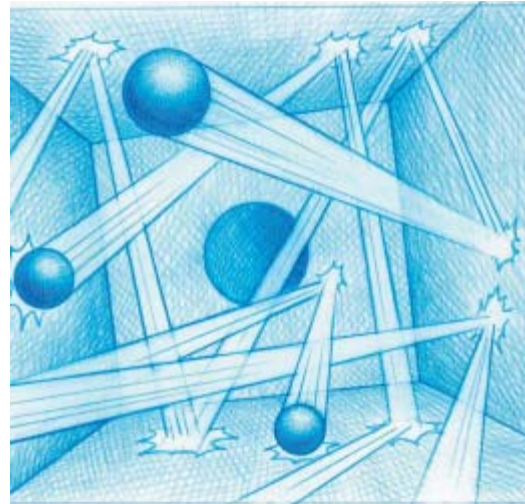
En revanche, quand le libre parcours moyen est supérieur à la taille de l'enceinte, une molécule rencontre peu ses semblables. Les molécules se déplacent

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.

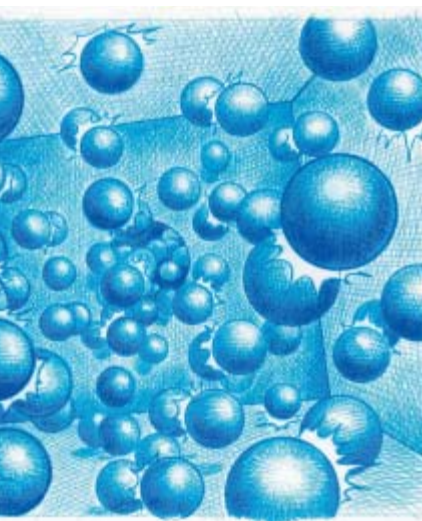
quences étonnantes. Une molécule qui arrive sur une paroi avec une incidence de 30 degrés peut repartir vers l'avant en rasant la paroi, dans la direction perpendiculaire, ou encore vers l'arrière! Pour qu'elle sorte de l'enceinte, une molécule doit avoir une vitesse dirigée dans l'axe du tuyau. Toutefois, 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 COURT** 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.

