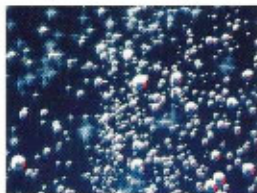




Les gaz

INDISPENSABLES À LA VIE



Constituants essentiels de l'Univers, les gaz sont omniprésents sans que nous en ayons conscience. Mieux, nous vivons en permanence entourés de gaz sans même pouvoir les voir ou les toucher ! Pourtant, sans l'oxygène ou la couche d'ozone, la vie serait tout simplement impossible sur la Terre. C'est dire toute l'importance que revêtent les gaz dans le cycle de la vie, mais aussi dans nos vies quotidiennes : en effet les hommes, en étudiant leurs propriétés, ont su les mettre à profit dans de multiples domaines. La connaissance de leur comportement permet d'expliquer de nombreux phénomènes et grâce à l'étude des gaz, les scientifiques sont en mesure de comprendre les mécanismes de formation de l'Univers. Aujourd'hui encore ils constituent un sujet inépuisable de recherches.

QU'EST-CE QU'UN GAZ ?

La matière qui nous entoure, constituée de molécules (assemblages d'atomes), existe sous trois états fondamentaux : les solides, comme une pièce de monnaie, possèdent une forme et un volume fixes ; les liquides, comme l'eau, possèdent un volume donné, mais s'adaptent à la forme du récipient qui les contient ; enfin les gaz n'ont ni volume propre, ni forme propre : très fugaces, ils tendent à occuper tout l'espace qui leur est disponible, comme par exemple dans un ballon rempli d'hélium. À l'état solide (et dans une moindre mesure à l'état liquide), les molécules sont fortement liées entre elles, ce qui explique la rigidité des solides. À l'état gazeux, au contraire, elles deviennent indépendantes et s'éloignent beaucoup les unes des autres. Ainsi la densité des gaz est environ 1 000 fois moindre que celle des liquides et des solides ; autrement dit, un nombre donné de molécules occupera un volume 1 000 fois plus grand à l'état gazeux qu'à l'état solide ou liquide ! Même si nous ne les sentons pas, les gaz sont pesants : un ballon de baudruche gonflé pèse plus lourd que le même ballon vide, car il contient de la matière. Ce poids de l'atmosphère n'est rien d'autre

que la pression atmosphérique : lorsqu'on monte en altitude, la couche d'air qui nous surplombe s'amincit et devient donc plus légère, c'est pourquoi la pression diminue avec l'altitude. Au niveau de la mer, la pression normale est de 1 013 hPa, ce qui correspond au poids d'une colonne de 76 cm de mercure (selon le principe de Torricelli). Nous ne ressentons pas ce poids, car une pression équivalente existe à l'intérieur de notre corps.

ÉTUDE DES GAZ : LA THÉORIE CINÉTIQUE



En 1733, le suisse **Bernoulli** émet l'hypothèse que les gaz sont constitués de minuscules particules qui se déplacent à grande vitesse, dans toutes les directions, en « volant » et en s'entrechoquant : leur trajectoire est totalement erratique. Le physicien se livre alors à des calculs dont les résultats sont conformes à l'expérience : sans le vouloir, Bernoulli a mis le doigt sur les molécules qui composent les gaz, avant même l'existence de la notion d'atome !

La théorie cinétique des gaz (cinétique est dérivé d'un mot grec qui veut dire mouvement) sert à expliquer les propriétés macroscopiques des gaz, c'est-à-dire celles que nous pouvons observer, par le mouvement de particules à l'échelle microscopique :

- le volume dépend de l'écart moyen entre les particules ;
- la température est une mesure de la vitesse des particules, et plus cette vitesse est grande, plus la température est élevée ;
- la pression exercée sur une paroi résulte du bombardement des particules contre cette paroi.

Si ces propriétés – volume, température et pression – s'expliquent par le mouvement des particules, alors grâce aux équations de la mécanique (connues grâce à



Newton depuis le XVI^e siècle) on devrait être en mesure de trouver une équation décrivant l'état du gaz à un instant quelconque. Malheureusement, un double problème intervient : le nombre d'équations à écrire (une

par molécule) est trop grand pour espérer résoudre le problème ; la direction prise par une particule après un choc est aléatoire et ne peut donc être prévue par aucune équation ! Les seuls calculs possibles sont des statistiques portant sur la vitesse. Ainsi il faudra attendre la théorie statistique de Maxwell-Boltzmann, vers 1870, pour poursuivre l'étude théorique des gaz.

LE MODÈLE DU GAZ PARFAIT

En 1811, le physicien italien Avogadro constate que tous les gaz, quelle que soit leur nature, tendent vers le même comportement lorsque la pression est suffisamment basse. Bâti sur cette découverte (connue sous le nom de loi d'Avogadro), le modèle du gaz parfait explique le comportement des gaz à basse pression. Il reprend les hypothèses de la théorie cinétique : les molécules, très petites par rapport à la distance qui les sépare, sont assimilables à des particules ponctuelles qui n'interagissent pas entre elles (excepté lors des chocs, tout se passe comme si les molécules ne se « voyaient » pas).

Sur le plan macroscopique, un gaz parfait obéit simultanément à deux lois :

- la loi de Boyle-Mariotte (1662) : à température constante, la pression est inversement proportionnelle au volume ;
- la loi d'Avogadro, évoquée plus haut : tous les gaz, pris en quantités identiques, occupent le même volume.

Des calculs permettent, à partir de ces hypothèses, d'obtenir une équation fondamentale pour l'étude des gaz : l'équation d'état du gaz parfait, $PV = nRT$ où P représente la pression du gaz (en Pascal), V son volume (en m³), n le nombre de moles de gaz (une mole est le nombre d'atomes de carbone présents dans 12 grammes de carbone ¹²C, proportionnel au nombre de molécules), R la constante des gaz parfaits et enfin T la température (en Kelvin). Le gaz parfait est un modèle très pratique et très simple, c'est pourquoi il est si connu et utilisé. Cependant, si la pression augmente trop, les distances moyennes entre molécules diminuent et on ne peut plus négliger leur taille ou leurs interactions. Dans ce cas d'autres modèles plus complexes, comme le gaz de Van Der Waals, prennent le relais. Quelques petites expériences permettent de comprendre la loi d'état et d'illustrer les relations entre température, pression, volume et

quantité de gaz. Si le volume et la quantité de gaz sont fixes, une hausse de température entraîne une hausse de pression. Par exemple une bombe aérosol laissée au soleil risque d'exploser car les particules de gaz sont accélérées et accroissent leur pression sur les parois. Réciproquement, une forte pression entraîne un échauffement : dans une pompe à vélo, les molécules d'air comprimées, percutent plus rapidement les parois qui s'échauffent. À température constante, si la pression diminue, le volume augmente (loi de Boyle-Mariotte). Les bulles d'air émises par un plongeur grossissent à mesure qu'elles remontent à la surface, car la pression de l'eau qui diminue autorise les bulles à se dilater. C'est aussi pour cela qu'un plongeur doit expirer en remontant, pour éviter qu'une surpression endommage ses poumons. Inversement, on peut réduire le volume d'un gaz en augmentant la pression (par exemple, en bouchant l'extrémité d'une pompe à vélo et en appuyant sur le piston). À pression constante, si la température diminue, le volume diminue : c'est la loi de Charles. Un ballon de baudruche plongé dans de l'azote liquide (à -200 °C environ) se rétracte, car les molécules ralentissent et se rapprochent les unes des autres.

LES CHANGEMENTS DE PHASE

Nous avons vu plus haut que l'état gazeux n'était qu'un des trois états possibles de la matière, qui peut aussi être solide et liquide. Bien entendu, des transitions sont possibles entre ces différents états. Le diagramme de phase d'une espèce permet de visualiser les conditions d'existence des différents états en fonction de la température et de la pression. En outre, il nous indique les changements d'états possibles (correspondant au passage de la frontière séparant deux domaines). Un gaz peut subir deux transformations, appelées changements de phase :

- lors de la condensation, les molécules du gaz ralentissent et donnent naissance au liquide.



Ce phénomène intervient lors de l'apparition de la **rosée** le matin ou

de la formation de buée sur les vitres ;

- la solidification désigne le passage direct de l'état gazeux à l'état solide ; elle a lieu à haute altitude lorsque la vapeur d'eau contenue dans l'air donne naissance à des cristaux de glace. À l'inverse, les gaz peuvent apparaître à la suite de deux transformations :

- lors de la vaporisation (à ne pas confondre avec l'évaporation), les particules de liquide, en accélérant, se séparent pour former un gaz ; transformation courante,



elle intervient lorsqu'on fait **chauffer de l'eau** ;

- la sublimation, moins intuitive, désigne le passage direct de l'état solide à l'état gazeux, sans passage par le liquide ; elle intervient notamment lors de la formation de brouillard sur les scènes des concerts, à partir de gaz carbonique solide.

APPLICATIONS

Les changements de phase possèdent de multiples applications. Pour vaporiser de l'eau (la faire passer à l'état de vapeur), il faut lui fournir de l'énergie sous forme de chaleur, ce que l'on fait en chauffant la casserole. À l'inverse, l'eau qui se condense libère de l'énergie au milieu extérieur et le « réchauffe ». Ces échanges d'énergie sont à la base du fonctionnement des réfrigérateurs :



un **compresseur** fait tourner un liquide dans un circuit, qui rencontre une portion plus étroite ; pour maintenir le débit, le

liquide est obligé de se vaporiser en puisant de la chaleur dans la cuve du réfrigérateur et dans les aliments. Puis le liquide continue son chemin et se condense dans le serpentin qui se trouve derrière le réfrigérateur, en cédant sa chaleur au milieu extérieur (ce qui explique que cette partie de l'appareil soit toujours chaude). En somme, les transitions liquide-gaz permettent de transférer de la chaleur d'un milieu froid à un milieu chaud. Un processus identique est à l'œuvre dans les pompes à chaleur, qui puisent de l'énergie dans l'air extérieur pour la restituer dans votre maison.

Les gaz à effet de serre

Le dioxyde de carbone (CO₂)

C'est le principal gaz à effet de serre.

Le méthane (CH₄)

Depuis le début de la révolution industrielle, sa concentration atmosphérique a augmenté de 51 %.

Le HFC-23

Cet hydrocarbure fluoré possède un potentiel de réchauffement 11 700 fois supérieur à celui du CO₂.

40 à 150

Durée pendant laquelle les gaz à effet de serre peuvent persister dans l'atmosphère.

3,7 t

Quantité de CO₂ produite par chaque tonne de carbone brûlé.

22 milliards de tonnes

Quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère chaque année par la consommation de carburants fossiles.

L'oxyde nitreux (N₂O)

Son effet sur la couche d'ozone est environ 300 fois plus grand que celui du CO₂.

L'azote (N₂)



78 % des gaz de l'atmosphère

Le gaz atmosphérique le plus abondant

QUELQUES AUTRES PROPRIÉTÉS DES GAZ

LA CONDUCTIVITÉ

Les gaz conduisent très peu l'électricité, à l'exception des plasmas, et il faut de très fortes tensions, comme lors d'un orage, pour qu'ils deviennent conducteurs. Les gaz sont également mauvais conducteurs de chaleur : on remplit par exemple l'intérieur des double-vitrages avec de l'argon pour améliorer l'isolation thermique.

LA MISCIBILITÉ

Ceux qui ont déjà essayé de mélanger de l'eau et de l'huile savent par expérience que tous les liquides ne se mélangent pas facilement entre eux. Les gaz, au contraire, se mélangent tous quelle que soit leur nature. Cette propriété résulte de ce que nous avons dit sur les gaz parfaits. Puisque les molécules ne se « voient » pas, il importe peu à une molécule donnée de « savoir » à quoi ressemble sa voisine. Ces molécules se déplaçant très rapidement, tous les gaz se répandent dans le volume disponible en cohabitant pour donner un mélange, l'atmosphère en étant un parfait exemple.

LA DISSOLUTION DANS

L'EAU ET LES SOLIDES

Les molécules qui composent les gaz, puisqu'elles sont petites et éloignées, pénètrent et se déplacent relativement facilement à l'intérieur des liquides mais aussi des solides. Cette facilité à se dissoudre a plusieurs conséquences, souhaitables ou non. Énumérons-en quelques-unes :

- les sodas, l'eau gazeuse ou encore le champagne sont des liquides qui contiennent, naturellement ou non, du gaz carbonique. Lorsque la bouteille est au repos le gaz est dissous, mais en secouant la bouteille on le force à s'échapper du liquide ; le gaz provoque alors une surpression qui a les conséquences que l'on connaît en ouvrant la bouteille.

De même, en versant la boisson dans un verre, on peut voir des bulles de gaz initialement emprisonné qui s'échappent vers le haut.

- dans les poumons, l'oxygène traverse les parois des vaisseaux capillaires pour se dissoudre dans le sang et venir se fixer sur des molécules d'hémoglobine qui l'achemineront vers les différents organes. En retour celles-ci transporteront du gaz carbonique vers les poumons pour qu'il soit expulsé.
- le dihydrogène peut se stocker en étant absorbé dans un alliage de fer et de titane : on dissout ainsi 120 kg de

dihydrogène par m³ d'alliage.

- enfin, les gaz acides rejetés par l'industrie, une fois mélangés à la vapeur d'eau de l'atmosphère, se retrouvent piégés lorsque celle-ci se condense en gouttes d'eau, ce qui donne naissance aux pluies acides très néfastes pour les forêts.

LA COMPRESSIBILITÉ

Puisque les gaz sont principalement composés de vide, ils n'ont pas de volume fixe et on peut facilement les comprimer (réduire leur volume). Cette propriété est propre aux gaz : les liquides et les solides sont, eux, très peu compressibles. Lorsque la roue d'une bicyclette ou d'une auto rencontre un obstacle, l'air du pneu se comprime et absorbe le choc. On utilise également la compressibilité de l'air dans les bouteilles de plongée : on oblige une grande quantité d'air à tenir dans un petit volume en augmentant la pression. On peut ainsi faire tenir l'équivalent de 200 litres d'air dans un volume d'un litre.

GAZ COURANTS

L'HYDROGÈNE ET LES ÉTOILES

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'Univers ; on le trouve sous la forme d'une molécule de dihydrogène (H₂, deux atomes d'hydrogène). Cet élément fut découvert en 1766 par le chimiste anglais Henry Cavendish. Le français Lavoisier l'a renommé à cause de sa capacité à générer de l'eau en s'associant avec l'oxygène lors d'une réaction explosive : de nombreux accidents eurent lieu lors de l'utilisation



d'hydrogène en présence d'oxygène, comme celui du **dirigeable Hindenburg** en 1937.

C'est l'hydrogène qui est au cœur du fonctionnement des étoiles. Lors de la formation d'une étoile, une énorme quantité d'hydrogène se rassemble et, sous l'effet de sa propre gravitation, se comprime. La température et la pression s'élevaient suffisamment pour que démarre la réaction de fusion nucléaire : des atomes d'hydrogène, en s'entrechoquant, se combinent pour donner naissance à des atomes d'hélium, plus complexes. Cette réaction libère une énergie formidable sous forme de lumière et de chaleur. L'hydrogène est également présent en grande quantité dans les nébuleuses, comme celle de la **tête de cheval**.



Le projet ITER qui s'installera à Cadarache, dans le sud de la France, vise à recréer artificiellement de telles conditions de température et de pression afin d'utiliser l'hydrogène, inépuisable, pour produire de l'électricité. On envisage également de l'utiliser dans la pile à combustible, pour alimenter les moteurs de véhicules électriques qui pourraient demain remplacer les moteurs à explosion de nos voitures.

L'OXYGÈNE ET SES RÉACTIONS

C'est Antoine Lavoisier qui a véritablement établi la nature de l'oxygène, en 1775. À l'état gazeux, on le trouve le plus souvent sous sa forme diatomique, le dioxygène (O₂). On le trouve également sous forme d'ozone (O₃) dans les hautes couches de l'atmosphère. Présent à raison de 20 % dans l'atmosphère, le dioxygène est impliqué dans trois réactions majeures.

- La combustion nécessite une température élevée pour démarrer ; c'est elle qui intervient lorsqu'on fait brûler du bois, du papier ou de l'essence. Au cours de cette réaction, l'oxygène de l'air s'associe avec le carbone du combustible pour former du gaz carbonique, ou dioxyde de carbone (CO₂) en dégageant de l'énergie (sous forme de lumière et de chaleur, comme la fusion). C'est grâce à la combustion que les moteurs à explosion fonctionnent, mais c'est aussi à cause d'elle qu'ils rejettent du gaz carbonique, responsable de l'effet de serre.

- L'oxydation est une réaction au cours de laquelle un composé s'associe avec des atomes d'oxygène pour former un oxyde ; l'exemple le plus connu est la **rouille**, issue d'une réaction entre le



fer et l'oxygène de l'air et accélérée par l'humidité. C'est grâce à cette réaction que l'on peut dater l'apparition de l'oxygène dans l'atmosphère à 2 milliards d'années, car celui-ci a réagi avec le fer contenu dans certaines roches, les rendant rougeâtres.

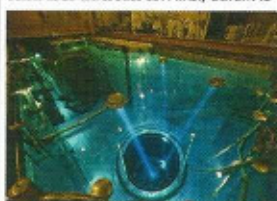
- La respiration cellulaire est un processus biochimique ayant lieu chez tous les êtres vivants (animaux et végétaux) au cœur de nos cellules. Des composés organiques (contenant du carbone) sont oxydés au cœur des cellules afin de produire de l'énergie. Cette oxydation consomme de l'oxygène et produit du gaz carbonique, ces gaz étant acheminés vers les cellules par voie sanguine grâce à l'hémoglobine.

LES GAZ NOBLES

Aussi appelés gaz rares, en raison de leur faible proportion dans l'atmosphère, ils sont au nombre de 6 : hélium, néon, argon, krypton, xénon et radon. Ces éléments sont inertes, c'est-à-dire qu'ils sont très stables et ne réagissent pas avec d'autres éléments. En effet leur couche électronique externe possède 8 électrons : elle est saturée et ne peut ni recevoir, ni céder des électrons au cours d'une réaction, d'où l'inertie de ces composés. L'hélium, peu présent dans l'atmosphère, se trouve dans des gisements de gaz naturel ; deuxième gaz le moins dense après l'hydrogène, il sert à gonfler les ballons dirigeables. Tout le monde connaît le néon, qui produit de la lumière lorsqu'un courant électrique traverse le tube qui le contient à basse pression. Chaque gaz noble donne en fait une couleur différente, et des mélanges de gaz

permettent d'obtenir d'autres couleurs. Les phares des voitures sont parfois équipés de lampes au xénon ; c'est lui qui produit une lumière bleue-blanche intense, lors du passage d'un arc électrique (une étincelle permanente) dans le gaz. Les ampoules traditionnelles contiennent, elles, de l'argon, qui permet au filament de durer plus longtemps.

Enfin le krypton 85 est produit lors de la fission de l'uranium, réaction qui a lieu au sein des **réacteurs des centrales nucléaires**. Ainsi, durant la



guerre froide, les États-Unis surveillaient les activités nucléaires de l'URSS en mesurant la quantité de krypton 85 dans l'atmosphère.

L'AIR ET L'ATMOSPHÈRE

L'atmosphère est une couche de gaz qui enveloppe la Terre. Elle est relativement mince (500 km d'épaisseur) au regard du rayon de cette dernière, 6 400 km environ. Cette atmosphère nous protège des radiations du Soleil, très puissantes, et permet à la vie de se développer sur Terre. Sa composition est la suivante : 78,08 % de diazote, 20,95 % de dioxygène, 0,93 % d'argon, 0,03 % de dioxyde de carbone, le reste étant constitué de gaz rares, de monoxyde d'azote et de méthane. L'atmosphère contient également de la vapeur d'eau en suspension, qui provoque des précipitations lorsqu'elle devient trop abondante.

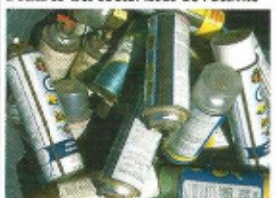
L'atmosphère est divisée en cinq couches principales. La troposphère, qui est la plus basse (de 0 à 12 km environ), est le siège des phénomènes météorologiques que nous connaissons : mouvements des masses d'air, formation des nuages... Lorsque l'on s'élève, la température diminue car la Terre est trop loin pour réchauffer la masse d'air. En outre, l'air se raréfie, ce qui s'explique simplement : si les molécules de gaz restent en altitude, c'est à cause de leur agitation thermique qui les empêche de tomber sous leur propre poids.

Comme il fait de plus en plus froid en altitude, l'agitation thermique devient faible et les molécules ont tendance à retomber vers la Terre. C'est pourquoi les alpinistes emportent de l'oxygène lors de l'ascension de grands sommets. L'origine de l'atmosphère remonte à 4,5 milliards d'années. Initialement, elle était constituée d'émanations volcaniques, comme de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone, de soufre et d'azote : elle contenait donc très peu de dioxygène. Progressivement la Terre s'est refroidie, entraînant la condensation de la vapeur d'eau et la formation des premiers océans ; des organismes ayant recours à la photosynthèse y sont apparus, dégageant du dioxygène dans l'atmosphère. Lorsque sa quantité a été suffisante, il y a 400 millions d'années, la vie a pu se développer sur Terre.

LA COUCHE D'OZONE

L'ozone est une molécule composée de trois atomes d'oxygène. Elle est présente de manière significative (10 parties par million) entre 20 et 50 km d'altitude, où l'action des rayons ultraviolets provenant du Soleil transforme le dioxygène en ozone. Cette couche nous protège en ne laissant parvenir sur Terre qu'une partie de ces ultraviolets responsables de cancers et d'affaiblissements du système immunitaire.

Dans les années 1970, un « trou » dans cette couche d'ozone a été mis en évidence au dessus de l'Antarctique, trou qui se forme au printemps et s'agrandit pendant plusieurs mois avant de se réduire. Le même phénomène existe au dessus de l'Arctique. On impute aujourd'hui ce trou à l'action des chlorofluorocarbures (CFC). Découverts en 1930, ces composés ont été massivement utilisés dans l'industrie à partir des années 1950, époque où on les pensait peu nuisibles pour l'environnement : on les retrouvait dans l'industrie du froid, dans les extincteurs, dans l'industrie électronique ou encore comme propulseurs dans les **bombes aérosols**. Issus de l'activité



humaine, ces composés se diffusent sous toutes les latitudes et montent dans la haute atmosphère. Là, les molécules sont transformées par l'action du rayonnement solaire en composés chlorés qui vont détruire les molécules d'ozone, provoquant un amincissement de la couche. Les CFC ont été interdits dans les années 1990, mais leur migration étant très lente, on estime que leurs effets se feront encore sentir pendant au moins 70 ans.

LES PLASMAS

Le plasma désigne un quatrième état de la matière. Il ne se rencontre qu'à très haute température, dans les étoiles, ou sur Terre à basse pression. Ainsi l'ionosphère, située dans la partie supérieure de l'atmosphère, est à 99 % constituée d'un plasma ; les **auroras boréales** en sont l'une des



manifestations. Les plasmas sont constitués de particules neutres, d'ions et d'électrons. La présence dans le gaz de particules chargées lui confère des propriétés remarquables, notamment en présence d'un champ électromagnétique. Ces gaz sont ainsi émetteurs de lumière (chacun connaît les lampes à plasma). Ils sont donc utilisés dans l'éclairage, mais également en microélectronique ou dans les propulseurs spatiaux.