

## Graines de sciences 4

# Physique de l'atmosphère

Jean-Louis Dufresne

L'atmosphère terrestre est omniprésente, elle fait partie de notre environnement immédiat : nous y vivons, nous nous y déplaçons, nous respirons son air. Pourtant, sa définition a longtemps été problématique : l'atmosphère est-elle confinée autour de la Terre, a-t-elle une limite, et si tel est le cas, qu'y a-t-il au-delà ? Si au-delà règne le vide, pourquoi notre atmosphère n'est-elle pas aspirée par ce vide ?

Ces interrogations ont préoccupé les scientifiques pendant plusieurs siècles. L'exploration spatiale a permis à l'homme d'observer la Terre depuis « l'extérieur » ainsi que d'observer l'atmosphère d'autres planètes. La photo reproduite ici montre une « vue de profil », selon la verticale, de l'atmosphère terrestre. La Terre, qui cache le Soleil, apparaît en bas, noire, et on devine sa courbure. Au-dessus, c'est l'atmosphère, dont la couleur (qui résulte de l'éclairement par le Soleil) varie de l'orange au bleu, et dans laquelle on aperçoit quelques nuages (cette variation de couleur est due à la variation verticale de la densité de l'air de l'atmosphère, dont nous expliquerons la raison). Son épaisseur semble très fine par rapport au rayon de la Terre. Plus à l'extérieur, c'est le noir des « ténèbres ». En effet, 99,9 % de la masse de l'atmosphère est comprise entre la surface et une altitude de 50 km. Au-dessus, l'air a une densité trop faible pour diffuser la lumière solaire, il n'y a pas d'autre source lumineuse que les étoiles lointaines, ce que l'on voit est identique à ce que l'on voit la nuit à la surface de la Terre.

La composition chimique de l'atmosphère est homogène, de la surface à une altitude de 50 km, sauf pour deux constituants : la vapeur d'eau et l'ozone (ou trioxygène, gaz dont les molécules comportent 3 atomes d'oxygène, et non 2 comme le dioxygène que nous respirons). L'air sec est principalement composé de diazote (78 % en volume) et de dioxygène (21 %). Parmi les autres composants, très minoritaires, signalons l'argon (0,9 %), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, également appelé gaz carbonique, 0,036 %) et le méthane (0,000 2 %). La vapeur d'eau se trouve principalement juste au-dessus du sol. Sa concentration dépasse rarement 2 % près de la surface et décroît très rapidement avec l'altitude. Quant à l'ozone, sa concentration est la plus forte entre 15 km et 50 km d'altitude, mais reste faible (environ 0,001 %).



*Photos d'une visée au limbe au lever ou au coucher du soleil. Sur les satellites en orbite autour de la Terre, les appareils d'observation sont généralement tournés « vers le bas » pour observer la Terre. Mais on peut aussi viser directement le Soleil à travers l'atmosphère. Cette technique, que l'on appelle visée au limbe, permet d'avoir une vue « de profil » de l'atmosphère.*

Dans ce chapitre, nous chercherons à comprendre les conditions de l'existence de l'atmosphère terrestre, détaillerons la formation des nuages et étudierons les phénomènes lumineux grâce auxquels nous voyons l'atmosphère : couleur du ciel, des nuages...Par la présentation détaillée de la formation des nuages nous montrerons que cette formation dépend fortement de phénomènes qui ne sont descriptibles qu'à l'échelle microscopique, de la présence de particules d'aérosols trop petites pour être directement visibles. Par contre nous n'aborderons ici ni l'influence des nuages sur le climat ni les phénomènes météorologiques eux-mêmes. Les caractéristiques du système climatique et quelques-uns des phénomènes qui régissent le climat ont déjà été abordés dans cette collection (« La Physique du climat », *Graines de sciences 2*).

### **Pression atmosphérique et gravitation**

Les trois étapes importantes dans le développement de la physique de l'atmosphère ont été la compréhension du rôle essentiel de l'attraction gravitationnelle sur la pression, sur la diminution progressive de la densité des gaz avec l'altitude et sur les échanges de matière entre l'atmosphère et l'espace. Mais ce ne fut pas immédiat.

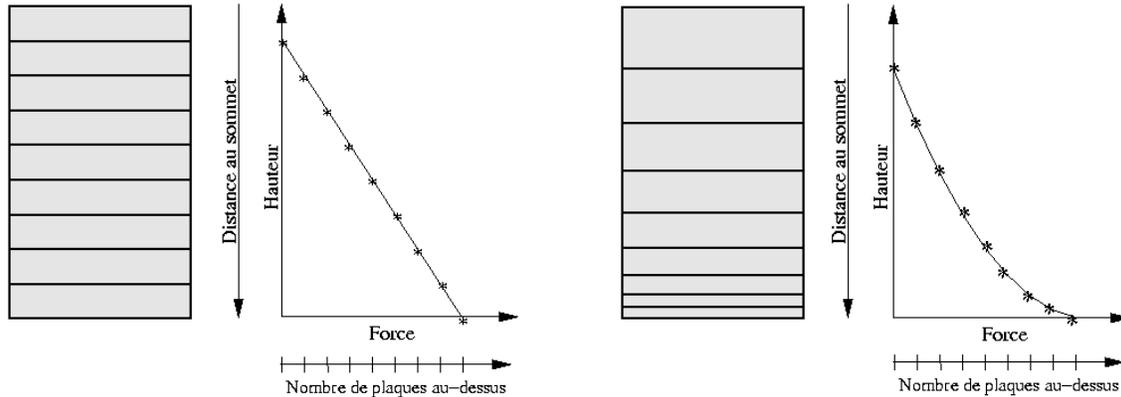
À l'époque de Galilée, des fontainiers de Florence avaient remarqué que l'eau ne pouvait être élevée de plus de 10 mètres par une pompe aspirante. Sollicité, le savant n'avait pu expliquer ce phénomène. C'est le physicien italien Evangelista Torricelli qui, en 1643, comprit le rôle clef de

la force due à la gravitation dans ce problème (pour une présentation de la gravitation, voir le chapitre XXX). Il réalisa une expérience en utilisant du mercure à la place de l'eau (le mercure étant plus dense, donc plus pesant à volume égal) : un tube fermé à une extrémité est rempli de mercure puis retourné au-dessus d'un récipient rempli du même liquide. Lorsque le tube est vertical, il ne reste rempli que sur une hauteur de 76 cm environ au-dessus du récipient inférieur. Les observations montrent que cette hauteur varie légèrement avec le temps, et qu'elle dépend notamment des conditions météorologiques. Le baromètre à mercure était né. L'idée de Torricelli était que l'atmosphère exerce une même force sur tout objet. L'INTENSITÉ de cette force est égale à celle du POIDS d'une colonne verticale d'eau de 10 mètres de haut environ. Elle est aussi égale à celle d'une colonne verticale de mercure de 76 cm de haut, le mercure étant environ treize fois plus dense que l'eau. Quelques années plus tard, Blaise Pascal prolongea le raisonnement de Torricelli : il comprit que la force exercée par l'atmosphère est due au poids de l'atmosphère elle-même, et en déduisit que la pression atmosphérique doit diminuer avec l'altitude. C'est ce qu'il vérifia en organisant une expérience pour mesurer, à l'aide d'un baromètre à mercure, la différence de pression entre la base et le sommet du puy de Dôme, puis plus simplement entre le bas et le haut de la tour Saint-Jacques à Paris. Il est intéressant de noter que, dans cette démarche scientifique, la théorie, née d'une observation inexplicée, a d'abord permis la mise au point d'un nouvel instrument de mesure, le baromètre, lequel a ensuite permis de mesurer une conséquence de la théorie, la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

La différence de pression entre le haut et le bas d'une colonne verticale d'un fluide immobile, appelée PRESSION STATIQUE, est égale à l'intensité du poids de cette colonne divisée par la surface pressée. L'unité de pression est le pascal (abréviation Pa). En météorologie, on utilise souvent son multiple l'hectopascal (1 hPa = 100 Pa), qui est égal au millibar (mb), une ancienne unité très employée auparavant. La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer est de 1 013 hPa. C'est la valeur de la pression exercée par une masse de 10 000 kg sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup>. Cela correspond au poids par unité d'environ surface d'une colonne verticale d'air sur toute la hauteur de l'atmosphère terrestre, à celui d'une colonne de mercure de 76 cm de haut ou à celui d'une colonne d'eau de 10 m de haut.

Pour une explication imagée de la pression statique et de sa variation verticale, on peut utiliser une pile d'objets identiques. En partant du haut, le premier objet exerce sur le second une force de même intensité que son poids, le second objet exerce sur le troisième une force de même intensité que le poids des deux premiers objets... La force qu'un objet exerce sur celui du dessous dépend du nombre d'objets au-dessus de lui, puisqu'il transmet la force due à ceux-ci. Si ces objets sont rigides (**figure 1**, à gauche), la force qu'un objet de la pile exerce sur celui du dessous augmente proportionnellement à la distance au sommet de la pile. C'est ce que l'on observe dans un fluide incompressible. Pour l'eau liquide, par exemple, la pression augmente de 1 000 hPa chaque fois que l'on descend de 10 mètres, quelle que soit la profondeur. Si maintenant les objets ne sont plus rigides (**figure 1**, à droite), ils vont s'écraser sous l'action de la force exercée sur eux. Plus un objet est loin du haut de la pile, plus la force qu'il doit supporter

est élevée et plus il s'écrase. Du fait de cet écrasement, la force qu'un objet de la pile exerce sur celui du dessous n'est plus proportionnelle à la distance au sommet, mais augmente d'autant plus que l'on s'éloigne du sommet. L'air étant un gaz compressible, c'est ce que l'on observe dans l'atmosphère (cf. **figure 3**). La pression varie de 10 hPa pour un dénivelé de 400 m à une altitude de 10 000 m, pour un dénivelé de 200 m à une altitude de 5 000 m et pour un dénivelé de 100 m lorsque l'on est près du niveau de la mer.



**Figure 1**

*Expérience : On peut illustrer ceci en utilisant d'une part des plaques montées sur des cales rigides et d'autre part des plaques montées sur des cales souples (en mousse, par exemple). On tracera l'évolution du nombre de plaques au-dessus d'une hauteur donnée en fonction de cette hauteur. Si toutes les plaques ont la même masse, le poids des plaques est proportionnel à leur nombre, et on obtiendra le même genre de courbes que ci-dessus.*

La variation verticale de la pression statique est utilisée pour se positionner dans l'espace. Par exemple, l'altimètre et le profondimètre sont des baromètres qui convertissent la pression mesurée en altitude ou en profondeur suivant les lois de la variation verticale de la pression statique.

La pression totale de l'air comporte également une contribution due au mouvement de l'air : la pression dynamique ; c'est celle que nous ressentons lorsque nous essayons de marcher face à un vent violent. Essentielle pour les avions (cf. « Un avion, comment ça vole ? », *Graines de sciences 3*), dans l'atmosphère terrestre, elle ne joue un rôle significatif que pour des mouvements de « petite échelle » (inférieurs à quelques dizaines de kilomètres) tels que les mouvements très rapides de l'air qui ont lieu dans les tornades et certains orages. Nous n'aborderons pas ces phénomènes ici, et ne considérerons que la pression statique exercée par l'atmosphère.

### **Pourquoi toutes les planètes n'ont-elles pas d'atmosphère ?**

L'atmosphère reste confinée autour de la Terre grâce à la gravitation. On peut le comprendre en imaginant ce qui se passe à la limite supérieure de l'atmosphère et en faisant appel à la théorie atomiste, ainsi qu'à la physique statistique. Ces deux théories sont nées à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, grâce notamment aux travaux de Ludwig Boltzmann, James Clerk Maxwell et Jean Perrin. Elles considèrent que les molécules d'un gaz se comportent comme des petites particules qui se déplacent librement dans le vide et qui s'entrechoquent. Dans les situations courantes, le nombre de molécules à prendre en compte est gigantesque. À la surface de la Terre, il y a par exemple plusieurs dizaines de milliards de molécules dans un cube d'air de 0,1 mm de côté. Ce nombre gigantesque permet d'utiliser une description statistique de ce qui se passe à l'échelle moléculaire pour décrire ce qui se passe à notre échelle. Ainsi, des grandeurs courantes telles que la température, la pression, la masse volumique... s'expriment comme des valeurs moyennes de fonctions statistiques qui dépendent de la VITESSE D'AGITATION des molécules, de leur masse, de leur nombre par unité de volume...

En reprenant l'analogie de la pile verticale d'objets compressibles, on comprend que plus on s'élève dans l'atmosphère, plus la pression diminue et plus l'air se dilate. Le nombre de molécules par unité de volume diminue et on s'approche progressivement des conditions du vide.

Dans la très haute atmosphère (à plus de 100 km d'altitude), où le nombre de molécules par unité de volume devient très faible (dix millions de fois moins qu'au sol) et où les molécules entrent de moins en moins souvent en collision, considérons une molécule qui se dirige vers le haut avec une certaine vitesse. Si cette molécule ne rentre pas en collision avec une autre, la seule force qui l'empêche de s'éloigner indéfiniment de la Terre, et donc de quitter l'atmosphère, est la force de gravitation. Il existe une vitesse seuil, appelée « vitesse d'échappement », au-dessus de laquelle l'attraction gravitationnelle n'est plus suffisante pour empêcher une molécule de quitter l'attraction terrestre (cf. chapitre « gravitation »). Toute planète perdra donc progressivement les molécules de gaz dont la VITESSE D'AGITATION dans la haute atmosphère est supérieure à la vitesse d'échappement.

La vitesse d'agitation moléculaire augmente avec la température et, pour une température donnée, les molécules les plus légères sont celles qui vont le plus vite. C'est pour cette raison que les molécules d'hydrogène, qui constituaient l'essentiel de l'atmosphère lors de la formation de la Terre il y a environ 4,5 milliards d'années, ont été perdues car elles étaient beaucoup trop légères. En revanche, la Terre a gardé son azote, car ses molécules sont trente fois plus massives. Mercure est la planète la plus proche du Soleil et sa masse est 20 fois plus faible que celle de la Terre. La température de l'atmosphère y est élevée, la gravitation est insuffisante pour retenir les molécules de gaz et Mercure a ainsi perdu toute son atmosphère. L'attraction gravitationnelle autour d'une planète augmente avec sa masse (cf. chapitre « gravitation »). C'est une des raisons pour lesquelles notre Lune, bien que ne recevant pas plus d'énergie solaire que la Terre, a également perdu toute son atmosphère.

Si l'existence d'une atmosphère autour d'une planète est avant tout déterminée par la température (donc par la distance au Soleil) et par l'attraction gravitationnelle (donc la masse), d'autres phénomènes interviennent également : vent solaire, champs magnétiques, activité volcanique, réactions chimiques...

### Décroissance de la température avec l'altitude

Nous venons de montrer que la pression diminue avec l'altitude, et nous allons maintenant expliquer comment cette baisse de pression influence la température de l'air. Ceci nous permettra de comprendre pourquoi, dans l'atmosphère située en dessous de 10-15 km, que l'on appelle troposphère, la température diminue lorsque l'altitude augmente d'une valeur à peu près constante : 7°C lorsque l'on s'élève de 1 km.



**Figure 2**

*Expérience : On prend une bouteille en verre sèche (pour éviter tous phénomènes d'évaporation-condensation) et sans bouchon. Après l'avoir chauffée, par exemple en la mettant dans le jet d'air d'un sèche-cheveux pendant quelques minutes, on la retourne rapidement sur un récipient contenant un peu d'eau. La bouteille et l'air qu'elle contient se refroidissent progressivement, et ceci s'accompagne d'une diminution de la pression dans la bouteille et, par conséquent, d'une montée progressive de l'eau dans le goulot (typiquement 2 à 3 cm). En utilisant la même démarche que celle qui introduit la pression statique (analogie avec la pile d'objets), on obtient que la hauteur à laquelle l'eau s'élève est une mesure de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la bouteille.*

Dans les conditions ordinaires de pression et de température, la loi dite « des gaz parfaits » permet de déterminer le lien entre la variation  $t$  de la température, la variation  $p$  de la pression et la variation  $v$  du volume, lorsque ces variations ne sont pas trop importantes :

$$t = a p + b v$$

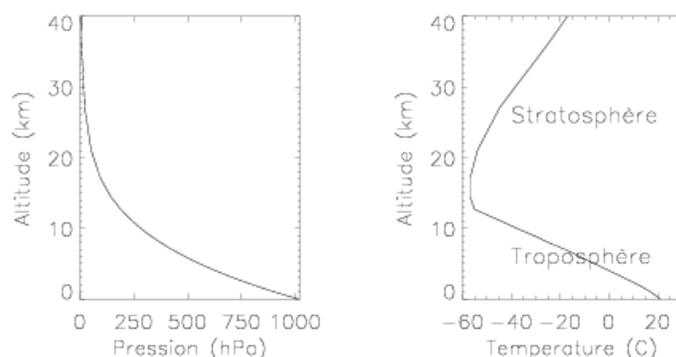
Les coefficients  $a$  et  $b$  peuvent être considérés ici comme constants. Cette relation montre que les variations de température et de pression ne sont pas reliées de façon univoque entre elles, mais dépendent également de la variation du volume de gaz et, lorsque l'on réalise une

expérience, des conditions de celle-ci. Si la température augmente et que la pression reste constante, alors le volume occupé par le gaz augmente. Si maintenant la température augmente et que le volume reste constant (gaz enfermé dans une enceinte rigide), alors la pression du gaz augmente. Notre expérience est intermédiaire puisque la diminution de température de l'air entraîne à la fois une diminution de la pression et une diminution du volume de l'air à l'intérieur de la bouteille.

Dans la basse atmosphère, on peut montrer qu'un volume d'air qui se déplace verticalement échange très peu d'énergie thermique (de chaleur) avec son environnement. On peut utiliser cette propriété pour modifier l'équation provenant de la loi des gaz parfaits et obtenir une relation directe entre la variation  $t$  de température et celle  $p$  de pression :  $t = c p$ , le coefficient  $c$  pouvant être considéré comme constant. Comme on connaît la décroissance de la pression avec l'altitude, on obtient finalement que la température diminue d'environ  $7^\circ\text{C}$  lorsque l'on s'élève de 1 km. C'est ce que l'on vérifie dans la pratique, lors d'une ascension en montagne ou grâce aux mesures des ballons météorologiques (cf. figure ci-dessous). Donnons quelques exemples :

- un avion à 9 000 m d'altitude vole dans de l'air dont la température est  $-50^\circ\text{C}$  ;
- entre le bas et le haut de la tour Eiffel, haute de 300 m, il y a un écart de température de  $2^\circ\text{C}$ .

Dans la démarche ci-dessus nous avons considéré un volume d'air qui se déplace verticalement. Dans l'atmosphère terrestre, les mouvements verticaux sont généralement importants ce qui fait que la décroissance de la température d'environ  $7^\circ\text{C}$  lorsque l'on s'élève de 1 km est très souvent observée. Signalons deux exceptions importantes. Au-dessus de 10-15 km d'altitude, dans la stratosphère, le rayonnement solaire ultraviolet est absorbé par l'ozone ce qui tend à réchauffer l'air. Ce réchauffement de l'air en altitude tend à former une couche d'air chaud au dessus d'un air plus froid, ce qui tend à réduire drastiquement le brassage vertical de l'air. Finalement on observe qu'au dessus de cette altitude, la température augmente avec l'altitude (cf. figure 3). Dans les régions polaires, les conditions climatiques très particulières (air très sec, surface du sol très froide) peuvent conduire à une quasi suppression du brassage vertical de l'air dans la partie basse de l'atmosphère. On peut alors observer une augmentation de la température avec l'altitude. Pour terminer, signalons que sur certaines planètes telle Venus, L'EFFET DE SERRE est si important que c'est lui qui contrôle la variation verticale de la température.



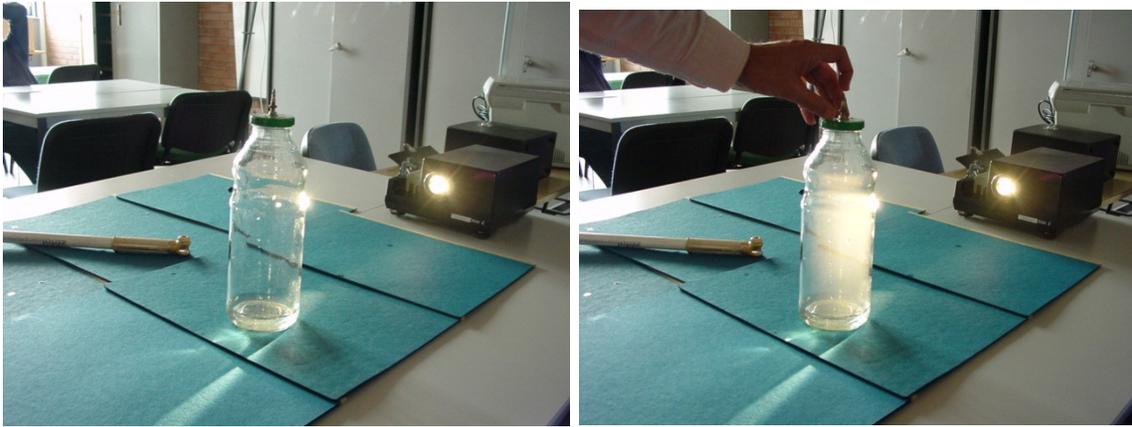
**Figure 3**

*Profils verticaux mesurés de la pression et de la température caractéristique d'une journée d'été aux moyennes latitudes. La forme de l'évolution de la pression avec l'altitude correspond à l'évolution que nous avons obtenue en empilant des plaques qui s'écrasent sous la compression (cf. fig. 1). La décroissance de la température avec l'altitude est remarquablement linéaire depuis la surface jusqu'à une altitude de 12 km.*

### **Formation des nuages**

Lorsqu'un volume d'air s'élève dans l'atmosphère, sa pression et sa température baissent pour les raisons que nous venons d'évoquer. L'expérience proposée ici montre qu'une conséquence de cette baisse de pression et de température est la formation possible de nuages.

*Expérience : On prend une bouteille transparente en verre ou en plastique rigide avec un peu d'eau au fond, le tout étant à température ambiante. On y introduit pendant quelques secondes une allumette ou un bâton d'encens allumé. On ferme la bouteille à l'aide d'un bouchon sur lequel on aura fixé une valve de chambre à air de vélo (on peut aussi couper un tronçon de chambre à air avec valve, l'enfiler sur le goulot et fermer l'autre extrémité hermétiquement). Avec une pompe on injecte de l'air comme on le ferait pour gonfler une roue de vélo (quelques coups de pompe suffisent; attention à ce que la surpression ne fasse pas sauter le bouchon; la surpression est insuffisante pour être lisible sur le manomètre éventuellement présent sur la pompe à vélo). Après avoir attendu quelques minutes (**Fig. 4, photo de gauche**), on dégonfle légèrement la bouteille en laissant sortir de l'air pendant 1 ou 2 secondes. On voit alors apparaître un fin brouillard à l'intérieur de la bouteille (**Fig. 4, photo de droite**). Si on réinjecte de l'air (ou si l'on attend assez longtemps), le brouillard disparaît. Pour bien voir le phénomène, on utilisera une bouteille de grand diamètre, on se placera dans un endroit sombre et on éclairera la bouteille avec un faisceau lumineux (projecteur de diapositives...).*



**Figure 4 :** *Après avoir pompé de l'air dans une bouteille contenant un peu au fond, on attend quelques minutes que l'équilibre liquide-vapeur soit atteint (photo de gauche). L'échappement d'un peu d'air par la valve conduit à une baisse de pression dans la bouteille et à la formation d'un nuage d'eau dont les gouttelettes diffusent la lumière (photo de droite) (photos L. Fairhead)*

Les quelques minutes d'attente, après avoir gonflé la bouteille, permettent d'atteindre une situation d'équilibre : l'ensemble air-eau-bouteille est à la même température et de l'eau s'évapore jusqu'à ce que la SATURATION en humidité soit atteinte à l'intérieur de la bouteille. Lorsque l'on fait sortir de l'air par la valve, la pression à l'intérieur de la bouteille baisse, et donc la température aussi. Cette baisse de température entraîne la condensation d'une partie de la vapeur d'eau sous forme de fines gouttelettes que l'on voit à l'intérieur de la bouteille. Le rayon de ces gouttelettes est typiquement de quelques micromètres ( $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire quelques millièmes de mètres).

Sur Terre, le processus de formation des nuages (voir aussi « La physique du climat », *Graines de sciences 2*) peut être très analogue à celui qui est reproduit dans cette expérience : l'air est humidifié par évaporation de l'eau contenue dans le sol, dans les feuilles ou directement présente en surface (lac, mer...). Lorsque cet air s'élève, sa pression et sa température diminuent. Lorsque le refroidissement est tel que le point de saturation est atteint, il y a condensation et formation de nuages bourgeonnants, dont l'extension verticale est assez forte et qui font partie de la famille des cumulus. Ces nuages sont associés à d'importants mouvements verticaux d'air, généralement dus à de la convection : l'air réchauffé au niveau du sol devient moins dense que l'air environnant et s'élève. Des nuages de formes très différentes peuvent également apparaître sans brassage vertical important. C'est par exemple le cas lorsque de l'air chaud et humide se trouve au-dessus d'air froid. La montée de l'air chaud est progressive, l'air chaud et humide se refroidit lentement et, si la saturation est atteinte, de la vapeur d'eau peut se condenser. Ces situations produisent des nuages fins et horizontalement étendus (cirrus, alto stratus...). La forme des nuages est un des reflets des mouvements verticaux de l'air.

Insistons sur le fait que la vapeur d'eau est un gaz invisible et que, dans un nuage, ce sont les gouttelettes d'eau que l'on voit. C'est également vrai pour des expériences quotidiennes telles que le petit « nuage » parfois présent au-dessus du bec d'une bouilloire ou de la soupape d'une cocotte-minute. Ce petit nuage est généralement appelé « vapeur » dans le langage courant, alors qu'il est en réalité formé de gouttelettes d'eau. Celles-ci se sont formées lorsque l'air, qui a été chauffé et humidifié à la surface de l'eau très chaude, et qui contient donc une importante quantité de vapeur d'eau (invisible), se refroidit ensuite en se mélangeant à l'air ambiant. Ce refroidissement entraîne la condensation d'une partie de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes d'eau (visibles par diffusion de la lumière ambiante).

### **L'évaporation et la condensation à la loupe**

La matière peut se trouver sous trois états principaux : gazeux, liquide ou solide. Dans l'état gazeux, la distance moyenne entre les molécules est beaucoup plus importante que dans les deux autres états. À pression et température ambiante, cette distance moyenne entre molécules est d'environ 3 nm (nm, nanomètre, milliardième de mètre) pour un gaz, et environ 10 fois plus faible pour un liquide ou un solide. De ce fait, les interactions entre les molécules d'un gaz sont faibles et on peut faire l'hypothèse que les molécules d'un gaz se déplacent « librement » (on dit qu'elles sont « libres ») et qu'elles n'échangent de l'énergie que lorsqu'elles s'entrechoquent. À pression et température ambiante, une molécule dans un gaz subit environ 100 milliards de collisions par seconde. La vitesse moyenne d'agitation des molécules augmente avec la température aussi bien dans un liquide que dans un gaz. La vitesse individuelle des molécules varie autour de cette moyenne, certaines allant plus vite, d'autres plus lentement, l'ensemble étant aléatoire.

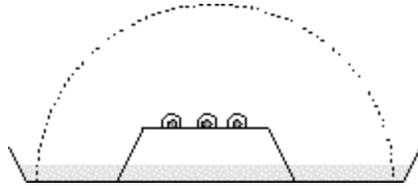
Considérons un récipient fermé rempli d'air et au fond duquel se trouve de l'eau liquide. Pour décrire ce qui se passe lors de l'évaporation ou de la condensation, il est possible de simplifier le problème est de ne considérer que les molécules d'eau, de négliger les autres molécule de l'air. Une molécule située au milieu du volume liquide est entièrement entourée d'autres molécules auxquelles elle est fortement liée. Une molécule située à l'interface entre le liquide et le gaz est fortement liée avec les molécules du liquide, qui sont proches, mais n'est que faiblement liée avec les molécules du gaz, beaucoup plus éloignées. Cette dissymétrie est à l'origine d'une force appelée tension superficielle du liquide (cf. « Bulles, gouttes et perles liquides », *Graines de sciences* 3) et aussi de l'évaporation : de temps à autre, de façon aléatoire, l'effet combiné d'un ensemble de molécules près de l'interface liquide-gaz provoque une force de répulsion suffisante pour arracher l'une d'entre elles et l'envoyer dans le gaz. Symétriquement, des molécules d'eau présentes dans le gaz entrent en collision avec les molécules à l'interface liquide-gaz et peuvent se lier aux molécules du liquide : c'est la condensation. Une situation d'équilibre est atteinte lorsque, sur une assez longue durée, autant de molécules passent de l'état libre à l'état lié (du gaz au liquide) que de l'état lié à l'état libre (du liquide au gaz). On dit que l'équilibre liquide-vapeur

est atteint, que l'on est à la « saturation » du gaz en molécules d'eau. À partir de cet état, une augmentation de température va entraîner une augmentation des collisions moléculaires dans le liquide et une augmentation du flux de molécules arrachées au liquide pour aller dans le gaz. Une fois un nouvel équilibre atteint, le nombre total de molécules d'eau dans le gaz aura augmenté, celui dans le liquide diminué. Et inversement lorsque la température baisse.

Dans l'expérience précédente, nous avons introduit de la fumée d'encens ou d'allumette. Cette fumée est constituée de toutes petites particules d'AÉROSOLS, à la surface desquelles se produisent les mêmes phénomènes qu'à la surface du liquide : d'une part des molécules d'eau présentes dans le gaz se lient aux particules d'aérosol puis se lient entre elles, d'autre part certaines de ces molécules liées sont arrachées et retournent à l'état libre, dans le gaz. À l'équilibre liquide-vapeur, on peut montrer que le nombre moyen de molécules d'eau liées aux particules d'aérosol est très faible lorsque les aérosols sont petits (inférieurs à une fraction de micromètre). Si la température baisse soudainement (par diminution de la pression dans notre expérience), on s'écarte de l'équilibre et le nombre de molécules d'eau arrachées de la surface des particules d'aérosol pour retourner à l'état libre diminue. De l'eau s'accumule autour des particules d'aérosols, qui grossissent jusqu'à former des gouttelettes suffisamment importantes pour diffuser de la lumière et ainsi devenir visibles. On dit que ces particules d'aérosols sont des noyaux de condensation. Si on refaisait cette expérience dans de l'air sans aucun aérosol, il n'y aurait pas apparition de gouttelettes. On dirait alors que l'air est « sursaturé ».

Dans l'atmosphère terrestre, les gouttelettes des nuages se forment de façon privilégiée autour de certaines particules d'aérosol, appelées « noyaux de condensation », présents soit naturellement (poussières, pollens...), soit à cause des activités humaines (fumées...). Actuellement, lorsque l'on s'interroge sur les changements climatiques futurs dus aux activités humaines, l'effet d'un changement de concentration des aérosols sur la formation des nuages et celle de la pluie est une question très ouverte. Les phénomènes sont très complexes dans leurs détails et difficiles à mesurer, mais cette incertitude ne doit pas laisser croire qu'il ne se passera rien.

Nous avons vu ci-dessus qu'il faut être légèrement hors équilibre liquide-vapeur, en situation de sursaturation, pour que les aérosols de petit rayon s'entourent d'eau. Par contre, des aérosols de diamètre plus élevé peuvent servir de noyau de condensation et donner naissance à des gouttes d'eau, même en situation d'équilibre liquide-vapeur. Nous n'en donnerons pas les raisons ici, mais utilisons cette propriété pour proposer une expérience illustrant au ralenti la formation de gouttelettes d'eau dans un nuage.



*Expérience : Une coupelle renversée sur laquelle sont disposés des grains de sel de cuisine (sel fin) est placée dans un récipient plat (genre plat à tarte) avec de l'eau au fond. Le tout est couvert d'un saladier transparent et placé loin de toute source de chaleur (soleil...). Après une durée qui dépend de la température ambiante (entre 30 minutes et 1 heure à 20 °C), chaque grain de sel se retrouve au centre d'une goutte d'eau. Si ensuite le couvercle (le saladier) est retiré, cette eau s'évapore, les grains de sel perdent l'eau qui les entourait et retrouvent leur aspect initial.*

Cette expérience illustre bien la permanence d'un flux d'évaporation et d'un flux de condensation, la quantité d'eau sous forme liquide et sous forme gazeuse étant le résultat d'un équilibre entre ces deux flux. Selon les conditions physiques, cet équilibre se déplace, conduisant à la formation ou à la disparition de gouttes d'eau. On peut remarquer qu'il n'est pas nécessaire que l'eau bouille pour qu'elle passe à l'état gazeux. Ceci peut également être observé sur des phénomènes courants, tels l'évaporation des flaques d'eau et le séchage de toute surface mouillée.

Lors du processus d'évaporation, il y a plus de molécules arrachées au liquide que de molécules qui l'intègrent. Pour arracher du liquide cet excès de molécules, il faut utiliser une grande quantité d'énergie. Lorsque de l'eau s'évapore d'une surface, l'énergie nécessaire est prise à la surface, ce qui tend à faire baisser sa température. C'est par exemple le cas lorsque notre peau est mouillée et que l'on se sèche à l'air : l'évaporation de l'eau nous procure une sensation de froid. De même, l'évaporation de l'eau à la surface d'un lac ou d'une mer les refroidit. Lorsqu'une casserole contenant de l'eau bout sur une cuisinière, c'est la combustion du gaz (ou la plaque électrique) qui fournit cette énergie. Cette expérience courante nous permet de faire une observation importante : en maintenant constante la puissance de la flamme, il suffit de quelques minutes pour porter l'eau à son point d'ébullition (c'est-à-dire pour élever sa température de 15 °C environ à 100 °C), alors qu'il faut plusieurs dizaines de minutes, voire quelques heures pour que toute l'eau de la casserole s'évapore. Il faut donc beaucoup plus d'énergie pour évaporer une quantité d'eau donnée que pour augmenter de plusieurs dizaines de degrés sa température.

Il faut fournir de l'énergie pour évaporer de l'eau et, symétriquement, la vapeur d'eau restitue cette énergie à son environnement lors de la condensation. Ces échanges d'énergie jouent un rôle important en météorologie. En effet, lorsque de grandes quantités de vapeur d'eau se condensent

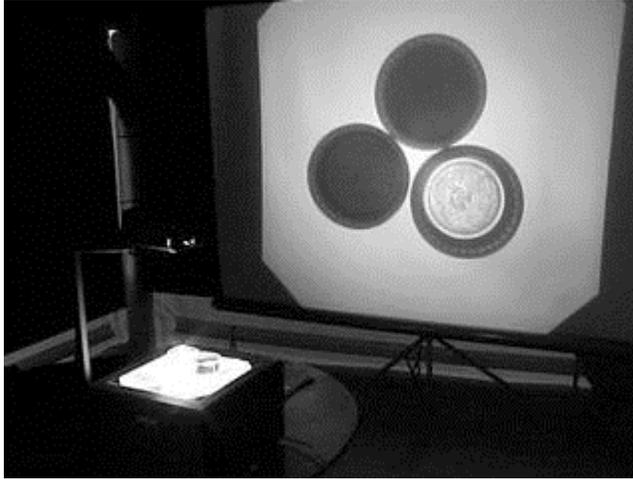
pour former des nuages ou de la pluie, cette condensation libère une très grande quantité d'énergie dans l'air environnant, ce qui augmente sa température et peut fortement amplifier les phénomènes qui ont initialement donné naissance aux nuages ou à la pluie. De cette amplification résulte la violence de nombreux phénomènes météorologiques (orages, cyclones...), qui ont lieu lorsque l'air contient beaucoup de vapeur d'eau, c'est-à-dire dans les régions chaudes et humides (cf. « La physique du climat », *Graines de sciences 2*).

La formation des flocons de neige suit un processus proche de celui de la formation des gouttes d'eau, mais à température plus basse. Un flocon de neige est un cristal de glace de structure particulière. Dans la glace, les molécules d'eau sont rangées dans l'espace de façon très régulière, tandis que dans l'eau liquide l'arrangement des molécules est irrégulier et variable dans le temps. Le cristal de glace a la forme d'un hexagone très plat. De même que la goutte d'eau se forme autour d'un noyau de condensation, le cristal de glace naît autour d'un noyau de congélation. Ensuite, les molécules de vapeur d'eau qui sont dans l'air et qui se déplacent de façon aléatoire entrent en collision avec les cristaux déjà formés et s'y lient. Ces liaisons s'effectuent en respectant la géométrie du cristal déjà constitué, qui grandit en conservant la mémoire de sa forme initiale. Mais un flocon de neige est constitué d'un nombre gigantesque de molécules d'eau (de l'ordre de  $10^{19}$ , c'est-à-dire d'une dizaine de milliards de milliards), et le hasard des collisions fait que la forme finale de cet assemblage ne correspond pas strictement à sa forme initiale. D'où à la fois les formes très variées des flocons de neiges et le fait que ces formes sont généralement proches de celle d'un hexagone ou d'une étoile à six branches.

*Photos de flocons de neige*

## Nuages blancs, nuages noirs

Les nuages, dont nous venons d'étudier la formation, sont constitués soit de gouttelettes d'eau d'environ  $10\ \mu\text{m}$  de rayon soit de particules de glace d'environ  $40\ \mu\text{m}$  de rayon. Si, au lever ou au coucher du soleil, la couleur des nuages tend vers l'orange ou vers le rouge, en milieu de journée, les nuages sont blancs ou gris. En particulier, les nuages très épais, comme ceux des orages, sont blancs à leur sommet et gris, parfois très sombre, à leur base. La base des nuages serait-elle constituée de gouttelettes noires ou foncées ?



*Expérience : Sur un rétroprojecteur, nous posons trois récipients (type ramequin en verre transparent) contenant de l'eau claire, de l'eau mélangée à de la poudre de talc et de l'eau mélangée à quelques gouttes d'encre de Chine. Le rétroprojecteur devra être un modèle avec éclairage par-dessous. La projection de l'ombre de ces trois récipients sur un écran nous montre que le premier, transparent, est clairement identifiable mais qu'il est impossible de faire la distinction entre celui contenant du talc et celui contenant de l'encre noire. Pourtant, lorsque l'on regarde les ramequins par le côté, l'un est très blanc, l'autre gris sombre. Pour un meilleur effet, on ajustera la concentration en encre de Chine de sorte que les ombres portées sur l'écran aient le même aspect.*

La poudre de talc est obtenue à partir d'un minéral finement broyé : les grains ont un rayon du même ordre de grandeur que les gouttes d'eau dans les nuages ( $10\ \mu\text{m}$ ). Les grains de talc qui baignent dans l'eau jouent le rôle de petits réflecteurs, qui renvoient la lumière incidente dans toutes les directions. On dit qu'ils diffusent la lumière. Dans notre expérience, le faisceau lumineux du rétroprojecteur est partiellement diffusé dans toutes les directions par le talc. Seule une partie de ce faisceau atteint la lentille supérieure du rétroprojecteur, puis l'écran de projection. Le faisceau lumineux qui va de la lampe du rétroprojecteur à l'écran est atténué par diffusion. L'encre noire, quant à elle, absorbe le rayonnement, c'est-à-dire qu'une partie de l'énergie transportée par le faisceau lumineux est absorbée et transformée en chaleur. L'intensité

du faisceau lumineux qui atteint l'écran est donc partiellement réduite du fait de cette absorption. Le ramequin contenant de l'eau claire sert de témoin, pour montrer que c'est la présence d'encre ou de talc qui crée l'ombre sur l'écran.

Ainsi les deux faisceaux lumineux ont été atténués, l'un par diffusion, l'autre par absorption, et l'observateur qui regarde l'écran (ou bien qui regarde les ramequins par-dessus – à éviter car cela fait mal aux yeux) ne peut faire la distinction entre un milieu absorbant et un milieu diffusant. Si l'on transpose cette expérience dans l'atmosphère, on obtient qu'un observateur qui regarde un nuage par en dessous voit la même chose si le rayonnement solaire est diffusé par le nuage ou s'il est absorbé. Pour pouvoir séparer ces deux hypothèses, il faut regarder les nuages de côté, de même que l'observation des ramequins par les côtés permet de distinguer sans ambiguïté celui qui diffuse la lumière de celui qui l'absorbe.

Lorsqu'un nuage est épais, son sommet nous paraît très blanc car il est directement éclairé par le soleil. Mais, du fait de la diffusion, seule une petite fraction de la lumière solaire atteint la base du nuage, qui nous paraît donc gris par contraste avec le sommet ou le pourtour blanc. C'est la diffusion, et non l'absorption du rayonnement solaire lors de la traversée du nuage qui nous fait paraître sa base grise. Signalons que certains nuages en haute altitude sont constitués de cristaux de glace dont la forme n'est pas sphérique et dont le rayon moyen est plus grand que celui des gouttes d'eau (environ 40  $\mu\text{m}$  de rayon de rayon contre 10  $\mu\text{m}$  pour les gouttelettes). Ces nuages apparaissent plus laiteux (enclume des cumulo nimbus), mais les propriétés optiques des gouttes d'eau et des cristaux de glace sont peu différentes et ils diffusent la lumière à peu près de la même façon.

### **Ciel bleu, coucher de soleil rouge**

Certains phénomènes optiques qui ont lieu dans l'atmosphère font apparaître des couleurs. C'est le cas du ciel, qui est bleu le jour et « noir » la nuit, ou du soleil qui est blanc la journée et rouge-orangé à l'aube ou au crépuscule. La perception de la couleur fait appel à divers phénomènes aussi bien physiques que physiologiques (*cf.* « En voir de toutes les couleurs », *Graines de sciences 1*). La lumière visible est un rayonnement électromagnétique qui couvre toute une plage de longueur d'onde allant de 0,4  $\mu\text{m}$  à 0,7  $\mu\text{m}$ . Un rayonnement dont la longueur d'onde est d'environ 0,4  $\mu\text{m}$  est perçu par notre œil comme étant de couleur violet-bleu, celui dont la longueur d'onde est d'environ 0,7  $\mu\text{m}$  est perçu comme rouge. Pour les longueurs d'onde intermédiaires, les couleurs varient progressivement du vert au jaune puis à l'orange (*cf.* « La lumière » et « La physique du climat », *Graines de sciences 2*). Ici, nous simplifions à l'extrême, et partageons le domaine visible en deux plages de longueur d'onde : les petites qui correspondent à la couleur bleue et les grandes qui correspondent à la couleur rouge. Si la contribution de ces deux plages de longueurs d'onde est « équilibrée », l'œil perçoit la couleur blanche. Si l'intensité des petites longueurs d'onde domine, l'œil voit du bleu, si c'est l'intensité des grandes, l'œil voit du rouge.

Certains phénomènes d'absorption et de diffusion entraînent l'apparition de couleurs à partir d'une lumière blanche. Toutefois, les phénomènes d'absorption du rayonnement visible sont généralement négligeables dans l'atmosphère terrestre. Les phénomènes que nous présentons ici sont uniquement dus à la diffusion de la lumière.



*Expériences : Un aquarium (ou un grand saladier transparent) est rempli d'eau très claire dans une pièce sombre. Il est traversé par le faisceau lumineux d'un projecteur de diapositives, le faisceau étant projeté sur un écran à quelques mètres de l'aquarium. On ne voit que le passage de quelques poussières à travers le faisceau lumineux.*

*On ajoute une ou deux gouttes de lait dans l'aquarium, on mélange et on laisse reposer. Le faisceau lumineux devient immédiatement très visible. La lumière diffusée est légèrement bleutée, le bleu étant plus prononcé près de l'entrée du faisceau dans l'aquarium. La tache lumineuse sur l'écran prend une couleur orangée. On continue à introduire progressivement du lait. La lumière diffusée est toujours bleutée près de l'entrée dans l'aquarium, mais devient progressivement orangée près de la sortie. La tache sur l'écran devient rouge-orange foncé.*

*On refait la même expérience dans un second aquarium, mais en remplaçant le lait par de la poudre de talc. Le talc se mélangeant difficilement à l'eau, on préparera au préalable un mélange eau-talc dans un petit récipient (une cuillère à soupe de talc dans un bol d'eau) et on introduira progressivement ce mélange dans l'aquarium. Ce que l'on observe est maintenant très différent : la lumière diffusée est blanche, sans aucune teinte, et la tache lumineuse sur l'écran reste également blanche. Lorsque l'on augmente la quantité de talc, la lumière diffusée ou celle atteignant l'écran reste toujours blanche, seule son intensité varie.*

*Pour que ces expériences donnent des résultats satisfaisants, le récipient devra être assez grand (30-40 cm de long). Le faisceau lumineux sera celui d'un projecteur de diapositives : il est bien focalisé et provient d'une lampe halogène, dont la lumière a une composante bleue significative bien que plus faible que celle du rayonnement solaire. Un éclairage par une lampe de poche standard donnera des résultats décevants, sa lumière ne comportant presque pas de bleu. On n'obtiendra de toute façon jamais le bleu de notre ciel. On aura avantage à réaliser les deux expériences en même temps, avec deux récipients identiques éclairés alternativement. Les couleurs de l'expérience avec le lait apparaîtront mieux par contraste avec le blanc de l'expérience avec le talc.*

La première expérience reproduit à petite échelle les phénomènes qui sont à l'origine de la couleur bleue du ciel et de la couleur orange du soleil bas sur l'horizon. La seconde, avec du talc, reproduit les phénomènes qui sont à l'origine de la couleur blanche des nuages et est utilisée ici comme témoin.

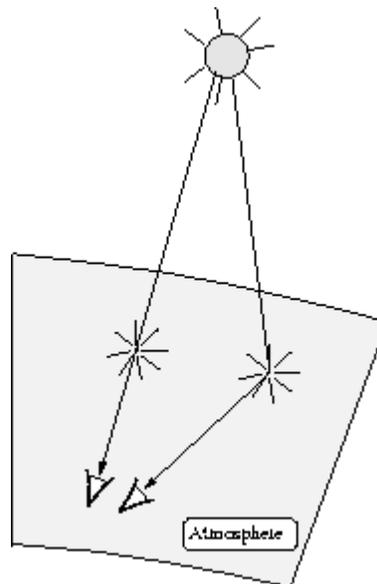
Toutes les particules diffusent la lumière qui les éclaire, les propriétés de cette diffusion dépendant essentiellement de la taille des particules (leur composition intervient également, mais nous négligerons cet effet). Quand le rayon des particules est petit devant la longueur d'onde, le rayonnement de courte longueur d'onde (couleur bleue) est beaucoup plus diffusé que celui de grande longueur d'onde (couleur rouge). Quand, au contraire, le rayon des particules est plus grand que la longueur d'onde, toutes les longueurs d'onde sont diffusées de la même façon.

Les macromolécules du lait dilué dans l'eau sont des particules de petits rayons devant la longueur d'onde de la lumière visible. La probabilité d'être diffusée est alors beaucoup plus élevée pour un rayonnement de courte longueur d'onde (couleur bleue) que pour un rayonnement de plus grande longueur d'onde (couleur rouge). C'est ce que l'on observe dans la première expérience : le faisceau diffuse une lumière bleutée lorsqu'il pénètre dans l'aquarium contenant du lait. Du fait de cette diffusion, le faisceau lumineux qui traverse l'aquarium, c'est-à-dire qui n'est pas diffusé, a un spectre appauvri en rayonnement de courte longueur d'onde (bleu). La lumière blanche à laquelle on soustrait du bleu prend une teinte rouge-orangé, d'où la couleur de la tache du faisceau sur l'écran. Cette tache est orange très clair, presque blanc, lorsqu'il y a très peu de lait. La couleur orange devient de plus en plus marquée au fur et à mesure que l'on rajoute du lait.

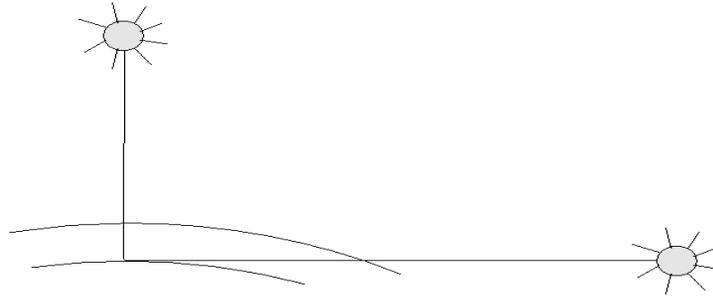
La lumière blanche qui éclaire l'aquarium contenant du talc mélangé à de l'eau est diffusée sans qu'on observe un changement de couleur. De même, la lumière transmise est blanche. Le rayon des grains de talc (quelques microns c'est-à-dire quelques millièmes de millimètres) étant plus grand que la longueur d'onde du rayonnement (quelques dixièmes de microns), ces grains diffusent de la même façon le rayonnement de courte et de grande longueur d'onde. Si une poussière de talc est éclairée par de la lumière blanche, elle diffuse donc de la lumière blanche et le rayonnement transmis est également blanc.

Plaçons-nous maintenant sur Terre et supposons dans un premier temps qu'il n'y ait pas d'atmosphère ou que l'atmosphère soit parfaitement transparente au rayonnement visible (pas de diffusion ni d'absorption). Si l'on regarde vers le soleil (à éviter absolument !), le rayonnement perçu par notre œil provient directement du soleil. Si nous regardons dans une autre direction, notre œil ne reçoit aucun rayonnement, nous voyons du noir. La lune est un exemple d'une telle planète sans atmosphère. Les photographies qui y sont prises nous montrent des astronautes sur fond noir (alors que les mêmes photos sur Terre nous les montreraient sur fond de ciel bleu). Notre expérience avec de l'eau parfaitement claire est analogue. On ne voit pas le faisceau qui traverse l'aquarium. Pour voir ce faisceau, il faut regarder directement le projecteur.

Considérons maintenant la Terre entourée de son atmosphère. Les molécules de l'air diffusent davantage le rayonnement de courte longueur d'onde (bleu) que celui de grande longueur d'onde (rouge). Lorsque l'on regarde le ciel ailleurs que vers le soleil, on voit le rayonnement solaire qui a été diffusé par l'atmosphère, donc un rayonnement plus riche en bleu qu'en rouge, d'où la couleur bleue du ciel. Dans notre expérience, c'est ce que l'on observe lorsque l'on mélange une ou deux gouttes de lait à de l'eau claire. On voit bien le faisceau traverser l'aquarium et la lumière diffusée est bleutée.



Pour le rayonnement allant directement du soleil à notre œil, le rouge est moins diffusé que le bleu, donc le spectre du rayonnement transmis est plus riche en rouge qu'en bleu. Toutefois, sur Terre, les rayons lumineux traversent l'atmosphère sur une faible distance lorsque le soleil est haut sur l'horizon. De ce fait, peu de bleu a été diffusé, notre œil corrige cet effet et nous voyons un soleil blanc. Par contre, lorsque le soleil est bas sur l'horizon, les rayons lumineux traversent l'atmosphère sur une plus grande distance avant d'atteindre la surface (*cf. figure 5*). Beaucoup de bleu a été diffusé et le soleil devient rouge.



**Figure 5-**

Dans notre expérience avec du lait, la tache du faisceau sur l'écran est blanche lorsque seulement une ou deux gouttes de lait ont été introduites. Lorsque la concentration de lait augmente, la tache devient progressivement orangée puis rouge. Notre expérience reproduit à petite échelle le changement de couleur du soleil au moment de son lever et de son coucher. Dans l'expérience proposée, nous avons augmenté la concentration en lait plutôt que de prendre un second aquarium plus grand, pour des raisons de commodités. L'effet recherché est le même : c'est l'augmentation de la diffusion. Dans toutes ces expériences, le bleu que l'on peut voir est très pâle comparé à celui du ciel, car le rayonnement émis par les lampes à filament a un spectre pauvre en bleu comparé à celui du soleil (on peut le vérifier en prenant une photo sans flash dans une pièce éclairée avec des lampes à filament : la photo aura une teinte rouge orangée). Signalons également que l'interprétation de cette expérience repose sur une analogie entre ce qui se passe dans l'atmosphère et ce qui se passe dans l'aquarium. L'effet de la diffusion est comparable dans les deux cas, mais l'origine de la diffusion est différente : dans l'atmosphère, la diffusion est le fait des molécules de l'air soumises aux fluctuations de la densité locale de l'air, tandis que dans l'aquarium la diffusion provient de la présence de petites particules mélangées à de l'eau.

### Épilogue

Certaines caractéristiques de l'atmosphère peuvent être expliquées par des principes physiques assez généraux. Nous avons par exemple vu le rôle fondamental de la gravitation sur la variation verticale de la pression et sur le confinement d'une atmosphère autour des planètes. De même la couleur du ciel et celle des nuages peuvent être comprises sans connaître les détails

de la composition chimique de l'atmosphère ou des nuages. Par contre l'étude d'autres phénomènes importants peut nécessiter de prendre en compte une combinaison de plusieurs phénomènes complexes ou encore de prendre en compte de nombreux « détails » telle la présence de certains composants très minoritaires. L'absorption du rayonnement ultraviolet par l'ozone stratosphérique est essentielle pour protéger la vie sur Terre alors que la concentration maximale de l'ozone ne dépasse pas 0,001 %. L'EFFET DE SERRE, grâce auquel la température de la Terre est si clémente, est dû à des gaz très minoritaires : la vapeur d'eau (concentration variable mais inférieur à 0,1% en altitude), le dioxyde de carbone (0,036 %), le méthane (0,000 2%)...

Comprendre et prédire la composition chimique de l'atmosphère, et notamment la concentration de tous ces composants minoritaires, nécessite de prendre en compte de nombreuses réactions chimiques, les effets de la biosphère, de la biologie marine, des volcans... Nous avons encore une compréhension incomplète de ces phénomènes mais des mesures faites en analysant des bulles d'air emprisonnées dans les glaces polaires nous permettent d'estimer la composition chimique de l'atmosphère depuis quelques centaines de milliers d'années. Ces mesures indiquent notamment que la composition chimique de l'air et les caractéristiques générales du climat étaient particulièrement stables depuis 10 000 ans, c'est-à-dire depuis la dernière déglaciation. Durant cette période – en excluant le xx<sup>e</sup> siècle –, la concentration en dioxyde de carbone n'a pas varié de plus de  $\pm 5$  % et la concentration en méthane pas de plus de  $\pm 15$  %. Depuis un siècle, la composition de l'atmosphère terrestre a beaucoup changé du fait des activités humaines, et notamment de l'accroissement de la population humaine et des nouveaux modes de consommation. En 150 ans, la concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> a augmenté de 30 %, celle du méthane de 140 %, les CFC (chlorofluorocarbures, encore appelés « fréons ») sont apparus en raison de leurs usages industriels alors qu'ils étaient inexistantes auparavant. La forte progression démographique, les pressions économiques sur certaines régions boisées, le changement des pratiques agricoles ont largement modifié l'utilisation des sols : déforestation, irrigation à grande échelle... Ceci a contribué à augmenter la concentration en dioxyde de carbone et en méthane, mais aussi à modifier certaines propriétés importantes des sols (absorption du rayonnement solaire par la surface, rétention de l'eau dans le sol...). Aujourd'hui, la communauté climatique pense que tous ces changements sont vraisemblablement la principale cause de l'accroissement de la température moyenne de la Terre (0,6 °C depuis un siècle).

Et dans le futur ? La physique de l'atmosphère et celle du climat sont trop complexes pour que l'on puisse énoncer des certitudes. Aujourd'hui, les scientifiques ont fait connaître l'importance des risques de changements climatiques dans le futur. Ils ont aussi indiqué que de nombreuses incertitudes demeurent. Par exemple, nous avons évoqué dans ce chapitre comment la formation des nuages dépendait de la présence d'aérosols. Les détails de ce phénomène ne sont cependant ni bien compris, ni bien mesurés, alors qu'ils jouent un rôle important sur les propriétés optiques des nuages (c'est-à-dire leur propriété à réfléchir le rayonnement solaire ou à augmenter l'effet de serre) et probablement sur la formation de la pluie. La communauté scientifique continuera à apporter des éléments d'information sur les risques de changements

climatiques, mais c'est la société dans son ensemble qui devra choisir de prendre ou non ces risques, de définir et d'appliquer le cas échéant les mesures pour les limiter.

### *Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants*

*Comment des émissions de produits chimiques près de la surface peuvent-elles perturber l'ozone qui se trouve dans la haute atmosphère ?*

L'ozone (ou trioxygène, gaz dont les molécules comportent 3 atomes d'oxygène, et non 2 comme le dioxygène que nous respirons) est formé et détruit par des réactions chimiques qui nécessitent l'absorption de rayonnement ultraviolet (noté UV). Ces réactions de formation et de destruction de l'ozone s'équilibrent, aboutissent à une concentration maximale de l'ozone entre 10 et 50 km d'altitude (dans la stratosphère) et déterminent la quantité totale d'ozone. La présence de certaines molécules ou de certains atomes tels que le chlore peut augmenter considérablement l'efficacité du processus de destruction de l'ozone et modifier cet équilibre.

Les CFC (chlorofluorocarbures), conçus et produits par l'homme, sont des gaz chimiquement stables qui contiennent du chlore. Ces gaz sont émis près de la surface, se mélangent progressivement dans toute l'atmosphère et finissent par atteindre la stratosphère où le rayonnement UV « casse » leurs molécules et libère des atomes de chlore. Ceux-ci accélèrent alors la destruction de l'ozone stratosphérique. Comme les processus de formation de l'ozone ne sont pas accélérés, il y a diminution de la quantité totale d'ozone dans la stratosphère. C'est parce que les CFC sont chimiquement peu réactifs qu'ils peuvent rester longtemps dans l'atmosphère et finalement atteindre la stratosphère, plusieurs années après avoir été émis près de la surface. Leur production et leur utilisation sont désormais sévèrement réglementées.

*Qu'est ce que le « rayon vert » ?*

Le rayon vert est un phénomène optique que l'on peut observer lorsque le bord supérieur du soleil frôle l'horizon et que l'atmosphère est limpide. Ce phénomène est de très courte durée. On aperçoit pendant une fraction de seconde un flash de couleur verte. Ce n'est pas une illusion d'optique mais un phénomène physique. C'est le résultat de l'effet combiné de la diffusion de la lumière par l'atmosphère terrestre (présentée dans ce chapitre) et de la diffraction réfraction de la lumière lorsqu'elle traverse l'atmosphère (en raison de la variation verticale de la densité de l'air, il se produit une déviation des rayons lumineux). Lorsque la lumière solaire est rasante, la diffusion privilégie la transmission du rayonnement de grande longueur d'onde (rouge) tandis que la diffraction privilégie la transmission du rayonnement de courte longueur d'onde (bleue). La combinaison particulière de ces deux effets aboutit à favoriser un rayonnement de longueur intermédiaire, qui correspond à la couleur verte.

*Est-ce que l'atmosphère ne fait que réfléchir (ou diffuser) la lumière du Soleil ?*

Dans le domaine visible du rayonnement solaire, c'est-à-dire dans la plage de longueur d'onde allant de 0,4 à 0,7  $\mu$ , l'atmosphère absorbe très peu le rayonnement, elle le diffuse principalement. Par contre, en dehors du domaine visible, une partie non négligeable du rayonnement solaire est absorbée par l'atmosphère. Le rayonnement ultraviolet (c'est-à-dire dont la longueur d'onde est inférieure à 0,4  $\mu$ ) est presque totalement absorbé dans la haute atmosphère par l'ozone et le dioxygène. Dans le proche infrarouge (entre 0,7 et 4  $\mu$ ), le rayonnement solaire est absorbé par les molécules d'eau et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Au total, l'atmosphère absorbe environ 20 % du rayonnement solaire incident et en réfléchit 22 %. Le rayonnement est réfléchi (diffusé) par les gaz eux-mêmes (*cf.* le bleu du ciel), mais surtout par les nuages.

*Pourquoi fait-il plus froid en altitude ?*

Tout corps émet un rayonnement, ce qui lui fait perdre de l'énergie et le refroidit jusqu'à ce qu'il reçoive de son environnement autant d'énergie qu'il en perd. L'atmosphère terrestre ne fait pas exception ; elle émet du rayonnement infrarouge, notamment de par la présence de gaz dits « à effet de serre » (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane...). Cette énergie perdue par rayonnement est compensée par l'énergie solaire absorbée par le sol puis transférée à l'atmosphère, en particulier grâce aux mouvements verticaux de l'air. Nous avons vu dans ce chapitre que ces mouvements verticaux de l'air conduisaient à limiter la décroissance de la température à environ 7 °C lorsque l'altitude s'élève de 1 km. C'est donc l'émission de rayonnement par l'atmosphère qui est à l'origine de la décroissance de la température avec l'altitude, et ce sont les mouvements verticaux de l'air qui contrôlent la valeur de cette décroissance.

*Comment était l'atmosphère primitive ? Comment s'est-elle formée ?*

Actuellement, on pense que la Terre primitive a perdu toute son atmosphère originelle. L'atmosphère actuelle a été formée plus tard, par la libération progressive des gaz emprisonnés dans les roches au moment de la formation de la Terre. Ce dégazage s'est notamment fait grâce aux volcans et a introduit de l'eau, du diazote, du dioxyde de carbone, etc. dans l'atmosphère. La concentration en CO<sub>2</sub> a ensuite progressivement décru, le CO<sub>2</sub> réagissant chimiquement avec les roches de surface et étant ensuite enfoui sous terre (carbonates) ou déposé sous les océans. Le dioxygène n'est apparu que plus tard, grâce à la photosynthèse des végétaux, notamment d'algues. Le dépôt puis l'enfouissement d'une importante quantité de ces végétaux a également contribué à diminuer la concentration de dioxyde de carbone (c'est l'époque carbonifère, début de la transformation de cette matière organique en charbon et pétrole). Depuis environ

10 millions d'années, la composition de l'atmosphère semble assez stable. Elle varie essentiellement au rythme des périodes de glaciation et de déglaciation. On la connaît par l'analyse des bulles d'air emprisonnées dans les glaces très anciennes des calottes glaciaires arctique et antarctique.

## **Bibliographie**

Robert Sadourny, *Le climat est-il devenu fou ?*, Le Pommier, 2002.

Un excellent petit livre, simple et clair, qui résume les connaissances scientifiques actuelles sur les conséquences climatiques d'une augmentation des gaz à effet de serre.

Robert Kandel, *Les eaux du ciel*, Hachette, 1998.

Une présentation de l'atmosphère, du climat de la Terre et de leurs évolutions à travers le voyage d'une molécule d'eau des calottes polaires au verre de vin.

Hervé Le Treut et Jean-Marc Jancovici, *L'effet de serre : Allons-nous changer le climat ?*, coll. « Dominos », Flammarion, octobre 2001.

Ce livre aborde les risques d'un changement climatique dû à une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il présente également les principales sources de ces gaz et s'interroge sur les possibilités qui existent pour réduire leur émission.

A. Chapel, M. Fieux, G. Jacques, J.-M. Jacques, K. Laval, H. Letreut, *Océans et Atmosphère*, coll. « Synapses », Hachette Éducation, 1996.

Un livre sur le climat, la physique et la chimie de l'atmosphère et de l'océan, initialement destiné aux enseignants du secondaire.

Jacques Labeyrie, *L'homme et le climat*, coll. « Points Sciences », éd. du Seuil, 1993.

Une présentation attirante du climat qui détaille son évolution passée.

Didier Renaut, *Découvrons la Météorologie*, éd. Circonflexe, 1997.

Une présentation simple et attrayante de la météorologie.

Gérard Lambert, *L'air de notre temps*, coll. « Science ouverte », éd. du Seuil, 1995.

Un livre qui présente de façon approfondie mais abordable la chimie de l'atmosphère, la façon dont la composition de l'atmosphère varie...

**Sur la toile :**

« Planet-Terre », site mis en place par l'École Normale Supérieure de Lyon sous la responsabilité du Groupe d'Experts des Sciences de la Vie et de la Terre aux lycées. Regarder notamment les rubriques « dossiers scientifiques » et « foire aux questions ».

<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre>

« Sagascience Climat », le dossier climat du site du CNRS.

<http://www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/index.htm>

Le site de Météo France

<http://www.meteo.fr>