

Jean-Pierre Chalon

Combien pèse un nuage?

ou pourquoi

les nuages

ne tombent pas





Jean-Pierre Chalon

Combien pèse un nuage ?

ou pourquoi les nuages ne tombent pas

Préface de Claude Allègre

Illustrations
de Thomas Haessig



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

En couverture : Illustration originale de Thomas Haessig.

ISBN : 2-86883-610-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP-Sciences 2002.

« Bulles de sciences »
Collection dirigée par Bénédicte Leclercq

Ouvrages déjà parus :

La Terre chauffe-t-elle ? Gérard Lambert

Asymétrie, la beauté du diable, Frank Close

Que sait-on des maladies à prions ? Émile Desfeux

Des séquoias dans les étoiles, Philippe Chomaz

Les neutrinos vont-ils au paradis ? François Vannucci

Les requins sont-ils des fossiles vivants ? Gilles Cuny

Des vampires chez les plantes, Georges Sallé

À paraître :

La vie ralentie, Jean Générmont et Catherine Perrin

Couper les secondes en quatre, Tony Jones

Préface

Dans la vie de tous les jours, il y a des objets qui nous sont à la fois familiers et étrangers.

Tels sont les nuages.

Depuis que l'homme existe, il n'a cessé de regarder les nuages. Ceux qui assombrissent le ciel et annoncent la pluie, navrante pour les vacanciers, bienfaisante pour les agriculteurs, ceux qui par leur blancheur décorent l'azur des après-midi ensoleillés d'été. Ceux que l'on voit arriver avec plaisir après les avoir attendus trop longtemps, ceux que l'on espère voir disparaître pour les avoir vus trop longtemps aussi.

Pourtant, peu de personnes savent ce que sont ces nuages. De quoi sont-ils constitués ? Comment se forment-ils ? Comment évoluent-ils ? Comment apportent-ils la pluie, la grêle ou la neige ? Et pourquoi tantôt l'une tantôt l'autre ? Pourquoi la foudre ? Pourquoi les cyclones et les tornades ? Et bien d'autres questions...

Le livre de Jean-Pierre Chalon va effacer d'une lecture cette ignorance. Clair, précis, bien informé, bien écrit, facile à lire, il a en outre l'énorme avantage de faire constamment le lien entre ce que l'on voit et ce que l'on sait, entre observation et théorie, sans pour autant cacher les zones d'ignorance.

PRÉFACE

C'est tantôt le livre d'un naturaliste précis, qui décrit les nuages ou les cyclones avec la même minutie qu'un entomologiste décrit un insecte, tantôt le livre d'un physicien, qui explique avec une extraordinaire clarté comment un nuage peut porter en son sein plus d'énergie que n'en produit en un mois une centrale nucléaire et, à partir de là, pourquoi le nuage est un rouage si important dans l'immense machine qu'on appelle l'atmosphère et qui est responsable du climat et de ses fluctuations, de l'agriculture et de ses angoisses et, plus généralement, de la vie sur cette planète exceptionnelle qu'on appelle la Terre.

Il nous montre aussi que, dans le fameux débat climatique qui agite le monde, les nuages, leur abondance, leurs caractéristiques sont 40 fois plus importants que les variations récentes des gaz à effet de serre. De quoi faire réfléchir quelques-uns et remettre les choses à leur juste place. Avant de prédire le climat de demain, commençons par comprendre son facteur essentiel, à savoir le cycle de l'eau et la formation des nuages !

Au moment où les esprits les plus lucides commencent à prendre des positions sur les équilibres planétaires, le livre de Jean-Pierre Chalon fournit un élément essentiel du dossier, d'autant plus que demain des millions d'hommes souffriront plus du manque d'eau que des gaz à effet de serre.

Un grand sujet, un grand auteur, un grand livre.

Je suis sûr que beaucoup de lecteurs prendront le même plaisir que moi à le lire.

Claude Allègre,
professeur à l'Université Denis Diderot,
directeur du laboratoire Géochimie et Cosmochimie
de l'Institut de physique du Globe de Paris, Prix Crafoord 1986.

1

Le rôle des nuages

Loués par les peintres et les poètes pour leur aspect esthétique, légers et rassurants ou noirs et menaçants, les nuages font la pluie et le beau temps. On se souvient des épisodes violents et douloureux qui se sont produits à Nîmes en 1988, à Vaison-la-Romaine en 1992, dans l'Aude en 1999 ou dans la Somme en 2001, lorsqu'un excès d'eau venu du ciel a causé de nombreuses victimes et des dégâts considérables. Redoutés lorsqu'ils provoquent des inondations, des chutes de grêle, la foudre, des coups de vent ou des tornades, les nuages sont cependant, le plus souvent, souhaités et attendus : ils fournissent la pluie qui arrose les champs et combat la sécheresse ; ils apportent la neige qui recouvre les montagnes et les pistes de ski tout en accumulant des réserves d'eau récupérables pendant les périodes plus chaudes et plus sèches.

Parce qu'ils influent sur le climat de notre planète, sur notre environnement et sur nos activités humaines, les nuages ne nous laissent pas indifférents. Comment se forment-ils ? Pourquoi sont-ils parfois incapables de nous donner la moindre goutte de pluie ? Pourquoi renferment-ils parfois tant de violence ? Combien pèsent-ils ? Comment peuvent-ils tout à la fois flotter comme des plumes et fournir des trombes d'eau ou des milliers de tonnes de grêle ? D'où viennent ces quantités d'eau qui précipitent et arrosent nos cultures tout au long de l'année ?

COMBIEN PÈSE UN NUAGE ?

Autant de questions auxquelles ce livre s'efforce de répondre. L'étude des nuages comporte des enjeux importants, en météorologie mais aussi en climatologie. En les connaissant mieux, on pourra prévoir comment ils réagiront au réchauffement de la planète prévu pour les années qui viennent. Seront-ils plus nombreux ou plus rares ? Plus fins ou plus épais ? Plus calmes ou plus violents ?

L'eau douce nécessaire à la vie

Levons les yeux et rendons hommage à l'atmosphère : non seulement elle nous permet de respirer, mais elle intervient de façon importante dans le cycle planétaire de l'eau. Elle contribue à la répartition spatiale des précipitations en favorisant le transport de l'eau depuis les sols ou les océans vers les strates moyennes et élevées de la troposphère (la première couche de l'atmosphère), des régions océaniques vers les régions continentales, puis de nouveau vers le sol. Elle joue aussi un rôle majeur dans la séparation de l'eau et du sel mélangés dans les mers et dans les océans. Ce faisant, par l'intermédiaire des nuages et des précipitations, l'atmosphère fournit l'eau douce indispensable à la vie de l'homme et à ses activités de base comme l'élevage et l'agriculture.

Au total, l'eau de notre planète occuperait, sous forme liquide, un volume d'environ 1,4 milliard de kilomètres cubes. Ce volume est à peu près constant depuis plusieurs millions d'années. Plus de 97 % de cette eau se trouve dans les océans et dans les lacs salés. Moins de 3 % se retrouve sous forme d'eau douce, dont la majeure partie est stockée dans les régions polaires ou dans les glaciers (plus de 75 %) et dans le sol profond (près de 25 %) où elle reste difficile d'accès.

Que reste-t-il ? L'eau douce des rivières, des lacs, des retenues d'eau artificielles et des nappes phréatiques peu profondes (eau douce facilement récupérable) ne représente que 130 000 kilomètres cubes, soit environ 0,33 % du total de l'eau douce. Sans la pluie, ces réservoirs s'assécheraient rapidement et ne pourraient plus répondre

aux besoins. Quelles sont donc les quantités d'eau contenues dans l'atmosphère qui engendrent les pluies si souvent attendues ? Ces réserves sont-elles inépuisables ?

Ramenée sous forme liquide, l'eau atmosphérique ne représenterait pas plus de 12 000 kilomètres cubes, soit à peine un cent millième de l'eau totale de notre planète. Sa masse est 10 fois moins importante que celle de l'eau douce facilement récupérable, et la majeure partie se trouve au-dessus des océans et de régions difficiles d'accès. Cette quantité est faible par rapport à nos besoins, mais l'atmosphère n'est pas un lieu de stockage : c'est une usine, un lieu de traitement et de transport pour l'eau en transit entre le sol, les fleuves et les océans. Une molécule d'eau n'y séjourne en moyenne qu'une dizaine de jours (temps du cycle atmosphérique moyen de l'eau). Pendant ce temps, elle subit toutes les transformations associées, en passant par des phases d'évaporation, de transport, de condensation et de précipitation (*voir l'encadré intitulé « Le cycle de l'eau », à la fin de ce chapitre*). Les équilibres qui assurent le maintien du climat actuel de la planète sont fragiles. Dans certaines régions du globe, l'homme a provoqué une désertification en modifiant les écosystèmes. Il est du ressort des météorologistes et des climatologues de surveiller les évolutions de l'environnement qui pourraient perturber la bonne marche du cycle de l'eau. Nous examinerons dans les prochains chapitres les mécanismes atmosphériques qui y participent.

Un domaine de recherche foisonnant

Depuis 20 à 30 ans, des progrès importants ont été faits pour comprendre la structure fine des nuages et leurs comportements. On les doit à de nouveaux outils : des instruments de télédétection capables de mesurer des variations du contenu en eau ou de la force et de la direction du vent à l'intérieur des nuages ; des avions conçus pour faire des mesures au cœur même des orages les plus violents ; des modèles numériques capables de simuler l'évolution des nuages

et des précipitations grâce aux équations de comportement de l'air atmosphérique et des changements de phase de l'eau. De grandes expériences scientifiques coordonnées ont fourni une bonne vue d'ensemble des multiples mécanismes mis en jeu.

Ces résultats ont eu des conséquences immédiates sur la surveillance et la prévision des phénomènes météorologiques dangereux. Aujourd'hui, les outils de prévision immédiate (radars, satellites, etc.) permettent d'observer, de suivre et de signaler des phénomènes violents comme les orages, les tempêtes ou les cyclones. Les modèles mathématiques utilisés pour la prévision du temps à plusieurs jours, tout comme ceux qui prédisent le climat, prennent en compte certains effets des nuages et des précipitations. Cependant, malgré ces progrès importants, prévoir la localisation ou l'intensité des précipitations et de phénomènes violents tels que les orages, les chutes de grêle, les tornades ou les pluies intenses reste difficile, car les mécanismes qui interviennent sont extrêmement complexes. Malgré les progrès réalisés depuis quelques décennies, la physique des nuages et des précipitations est un domaine encore mal maîtrisé où les sujets de recherche sont loin d'être épuisés.

Une température partout clémente

Non seulement les nuages fournissent les précipitations, mais ils contrôlent en partie les rayonnements reçus et émis par la planète, agissant ainsi sur son échauffement et sur la répartition de la chaleur reçue. En leur absence, la Terre serait une planète chaude, sèche et aride, parcourue par des tempêtes de sable et de poussière.

La planète est constamment en déséquilibre thermique, car le Soleil chauffe plus fortement l'équateur que les pôles. Les nuages réduisent ce déséquilibre grâce aux échanges de chaleur qui accompagnent les changements de phase de l'eau. En effet, près de la moitié de l'énergie transmise à la surface de la planète sous forme de rayonnement solaire sert à évaporer une partie de l'eau contenue

dans les sols humides, les mers et les océans. Cette énergie est ensuite libérée dans l'atmosphère lorsque la vapeur d'eau condense pour former des nuages. Ce mécanisme est particulièrement actif entre les tropiques où se produisent d'importants mouvements de l'atmosphère, qui dispersent la chaleur et l'humidité vers les régions moins exposées au soleil. Ainsi, les régions intertropicales se refroidissent et les régions polaires et tempérées se réchauffent. C'est aussi par ce mécanisme que s'organisent les nuages et les précipitations qui affectent l'ensemble de la planète.

Les nuages influent également sur la quantité de chaleur reçue et émise par la Terre (*voir l'encadré intitulé « Le bilan radiatif de la Terre », à la fin de ce chapitre*). Leur effet est double : ils réfléchissent en moyenne près de 20 % du rayonnement solaire vers l'espace et l'empêchent d'atteindre la surface terrestre, mais ils participent aussi au réchauffement de la Terre en retenant une partie du rayonnement infrarouge terrestre qui ne peut plus s'échapper hors de l'atmosphère. Nous avons tous constaté qu'avec un ciel dégagé, pendant la journée, il fait plus chaud qu'en présence de nuages, ces derniers réduisant le rayonnement solaire qui parvient jusqu'à nous. Au contraire, les nuits de ciel calme et dégagé sont souvent bien plus froides que les nuits de ciel nuageux, car en l'absence de nuage, le rayonnement infrarouge (transmettant la chaleur) émis par la Terre s'échappe plus facilement vers l'espace. Tous les nuages ne jouent cependant pas un rôle similaire : certains fonctionnent surtout comme de forts réflecteurs du rayonnement solaire alors que d'autres ont une plus forte aptitude à retenir le rayonnement infrarouge terrestre. Au total, dans le climat actuel, la présence des nuages diminue d'environ 6 % l'énergie radiative de la planète et maintient une température clémente. Mais une modification de l'environnement pourrait changer ces données, car la quantité d'eau que peut contenir l'atmosphère dépend de sa température. Nous verrons cela en détail dans les chapitres suivants.

Et si le climat se réchauffe ?

Depuis plus de 10 ans, la communauté scientifique nous met en garde contre un réchauffement prévisible du climat consécutif à l'augmentation des gaz à effet de serre, en particulier du gaz carbonique (CO_2) : ces gaz retiennent une partie de l'énergie émise par la Terre et l'empêchent de s'échapper vers l'espace interstellaire. Comment réagira la couverture nuageuse à un tel réchauffement ? Si la température du globe augmente, les quantités de vapeur d'eau doivent augmenter, et, en principe, on s'attend à voir se développer plus de nuages. Mais quels types de nuages ? Atténueront-ils le réchauffement en réduisant davantage le rayonnement solaire incident ? Ou au contraire l'amplifieront-ils en augmentant encore l'effet de serre ?

La réponse à ces questions est cruciale. En effet, l'impact global des nuages sur le bilan radiatif de la planète est 40 fois supérieur à celui attribué aux variations des teneurs en gaz à effet de serre enregistrées au cours de ces dix dernières années. Une petite variation de la couverture nuageuse ou une modification de la nature des nuages peut donc fortement réduire ou amplifier ces risques.

Les climatologues utilisent des modèles mathématiques pour simuler le comportement couplé de l'atmosphère, de l'océan et de la végétation, et pour estimer l'évolution du climat. Ces modèles doivent représenter précisément l'effet des nuages sur les rayonnements solaire et terrestre, mais aussi les modifications de leurs caractéristiques (étendue spatiale et organisation des nuages, nombre et dimension des gouttelettes d'eau, forme, nombre et dimension des cristaux de glace, etc.) qui résulteraient d'un réchauffement de la planète. Ce genre d'études est d'autant plus important que la réaction des nuages aura des conséquences non seulement sur la température, mais surtout sur la pluviométrie et la sécheresse. Or, ces processus sont encore assez mal compris. C'est une des difficultés majeures et une des principales sources d'imprécision que rencontrent les tentatives de prévision des évolutions du climat. Des chercheurs du monde entier collaborent pour résoudre ce problème.

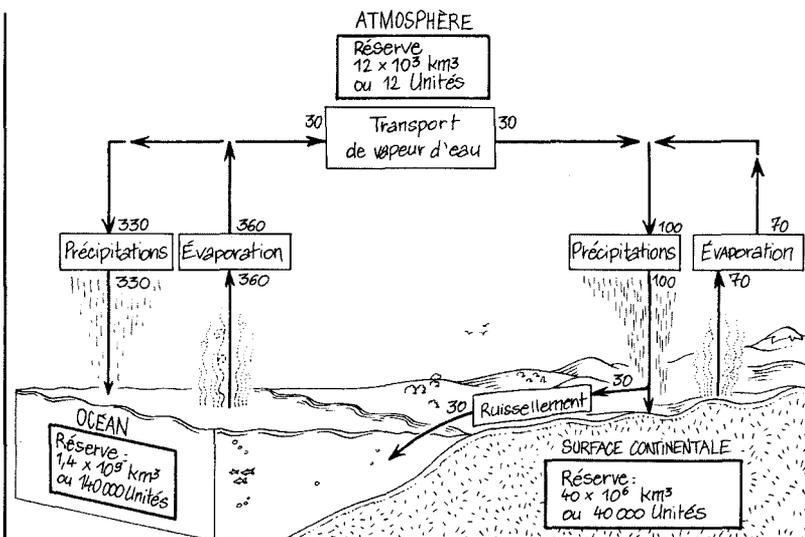
Pour comprendre les mécanismes qui gouvernent leur formation et celle des phénomènes associés, commençons notre promenade dans les nuages. Dans les chapitres suivants, nous examinerons d'abord divers aspects que prennent les nuages : formes, tailles, couleurs ou effets lumineux (chapitre 2). Nous proposerons ensuite une classification des nuages en fonction de leurs caractéristiques dans le chapitre 3. Celles-ci reflètent le comportement de l'élément principal des nuages : l'eau, sous toutes ses formes. Le chapitre 4 décrit la formation des gouttelettes et des cristaux de glace qui composent les nuages et les brouillards. La naissance et l'évolution des nuages sont retracées au chapitre 5. Le chapitre 6 traite de l'organisation des précipitations, alors que le chapitre 7 s'attache à décrire les phénomènes violents qui leur sont parfois associés : foudre, tornades, etc. Enfin, le chapitre 8 expose les moyens de mesure et de surveillance disponibles ainsi que les méthodes employées pour faire progresser notre connaissance et notre compréhension de ces phénomènes. Tout au long du livre, des encadrés proposent d'aller plus loin, sans être indispensables à la compréhension générale des phénomènes décrits.

Circulations d'eau et de chaleur

Le cycle de l'eau : les transferts et les réserves

Les réserves d'eau disponibles sur la planète sont d'à peu près 1,4 milliard de kilomètres cubes dans les océans, 40 millions de kilomètres cubes dans les glaces polaires, les nappes phréatiques, les sols, les lacs et les rivières, et seulement 12 000 kilomètres cubes dans l'atmosphère. Les échanges annuels entre les surfaces continentales, l'atmosphère et l'océan sont représentés de façon schématique sur la figure 1. Les unités représentent 1 000 kilomètres cubes d'eau (1 000 milliards de tonnes) et sont notées « Unités ». L'évaporation depuis les surfaces océaniques et les surfaces continentales vers l'atmosphère transfère chaque année 430 unités, soit 430 000 kilomètres cubes.

COMBIEN PÈSE UN NUAGE ?



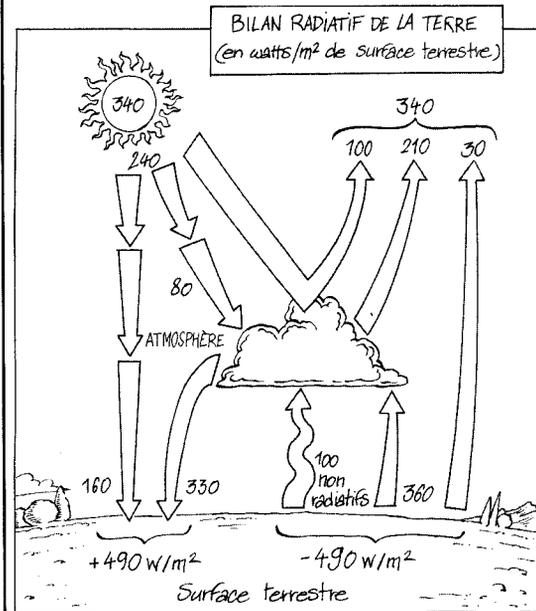
1. Réserves d'eau atmosphérique et transferts annuels moyens entre les surfaces continentales, l'atmosphère et l'océan. Les volumes indiqués sont ceux qu'occuperait l'eau atmosphérique si elle était entièrement condensée sous forme liquide. Les précipitations annuelles sont 36 fois plus importantes que la réserve d'eau atmosphérique. Les unités sont exprimées en milliers de kilomètres cubes, ce qui correspond aussi à des milliers de milliards de tonnes.

Cette évaporation est totalement compensée par les précipitations qui représentent un flux identique. Elles sont environ 36 fois plus importantes que les réserves en eau de l'atmosphère à un instant donné.

L'évaporation est globalement cinq fois plus importante au-dessus des océans qu'au-dessus des continents, les précipitations y sont trois fois plus importantes. Le bilan de ces transformations donne un gain d'évaporation (évaporation moins précipitations) de 30 unités au-dessus des océans. En revanche, au-dessus des continents, l'évaporation ne suffit pas à alimenter les précipitations dont une partie ruisselle sur les sols, dans les rivières et dans les nappes souterraines avant de rejoindre les mers ou les océans. C'est le vent qui permet de combler ce déficit en transportant une quantité moyenne annuelle de 30 unités de vapeur d'eau, des régions océaniques vers les régions continentales.

Le bilan radiatif de la Terre

La température du système Terre-atmosphère résulte d'un équilibre entre l'énergie qu'il reçoit et celle qu'il émet. La majeure partie de l'énergie reçue provient du Soleil qui nous transmet un flux énergétique d'environ 0,17 milliard de milliards ($0,17 \times 10^{18}$) de watts (1 watt vaut 1 joule par seconde), soit un flux moyen de 340 watts par mètre carré de surface terrestre. Sa température de surface atteignant environ 6 000 degrés Celsius (°C), le Soleil émet un rayonnement surtout composé de lumière visible, avec un maximum qui correspond à la couleur jaune (0,6 micromètre de longueur d'onde). Plus froides que le Soleil, la Terre et l'atmosphère émettent un rayonnement de plus grandes longueurs d'onde, concentré entre 4 et 80 micromètres, avec un maximum dans l'infrarouge thermique, vers 12 micromètres. Par chance, l'atmosphère est relativement transparente au rayonnement solaire mais absorbe fortement le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre. Le flux moyen d'énergie solaire dirigé vers la Terre et qui arrive aux limites de l'atmosphère est de 340 watts par



2. La Terre a une température moyenne de 15 °C parce qu'elle reçoit de l'énergie à la fois du Soleil et de l'atmosphère. En l'absence d'atmosphère, ce serait une planète glacée dont la température n'excéderait pas -18 °C.

COMBIEN PÈSE UN NUAGE ?

mètre carré : une partie (80 watts par mètre carré) est absorbée par l'atmosphère, une autre (100 watts par mètre carré) est réfléchi vers l'espace, le reste (160 watts par mètre carré, soit près de 50 %) est absorbé par la surface terrestre.

La température de cette surface résulte d'un équilibre entre l'énergie qu'elle reçoit (490 watts par mètre carré) à la fois du Soleil (160 watts par mètre carré) et de l'atmosphère (330 watts par mètre carré) et l'énergie qu'elle renvoie (490 watts par mètre carré) vers l'atmosphère et l'espace interstellaire. Ces échanges d'énergie permettent de maintenir une température globale moyenne de 15 °C. Sur les 490 watts par mètre carré d'énergie renvoyés, une partie (100 watts non radiatifs) réchauffe l'atmosphère par conduction (10 à 15 watts par mètre carré) ou est utilisée pour évaporer de l'eau des océans, des lacs ou des sols humides (85 à 90 watts par mètre carré) ; le reste (390 watts par mètre carré) est absorbé par l'atmosphère (360 watts par mètre carré) ou rayonné directement vers l'espace (30 watts par mètre carré).

Les deux tiers de l'énergie que reçoit la surface terrestre lui sont transmis par l'atmosphère, nous voyons que cette dernière joue un rôle majeur sur le bilan radiatif de la Terre. En l'absence de nuages et de gaz dits à effet de serre comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, la Terre aurait une température moyenne de -18 °C et serait une planète gelée. Ce phénomène, qui réchauffe la Terre de près de 33 °C et lui permet d'avoir une température moyenne de 15 °C, est souvent nommé effet de serre. Cette appellation est impropre puisque, dans une serre, la température est maintenue élevée par suppression des échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, ce qui n'est pas le cas de l'atmosphère réchauffée qui favorise les échanges par convection. La température de la Terre reste élevée parce qu'elle reçoit de l'énergie à la fois du Soleil et de l'atmosphère. Le rôle des nuages est important dans le maintien de l'équilibre thermique que nous venons de décrire, et une modification, même faible, de leurs caractéristiques (composition, altitude, épaisseur, couverture nuageuse, etc.) pourrait entraîner des conséquences dramatiques pour le climat.

2

L'allure d'un nuage

Ils font un art d'aller
Sur les chemins du vent.
Quand plonge la grenouille
Se dresse l'éléphant
Et les formes bredouillent
Dans un dessin d'enfant.

*Nuages dans Carnet de Veilles de Gaston Puel,
Éditions L'Arrière-Pays (Auch).*

Lequel d'entre nous ne s'est pas attardé à regarder passer, comme Gaston Puel, les nuages qui prennent les apparences les plus variées, se forment et se déforment pour ressembler tour à tour à une grenouille, à un oiseau ou à un éléphant ?

La hauteur des nuages peut se limiter à quelques centaines de mètres ou dépasser une quinzaine de kilomètres. La largeur des nuages est encore plus variable : le petit cumulus de beau temps s'étend sur quelques centaines de mètres, tandis que le cumulonimbus générateur d'orages couvre une dizaine de kilomètres ; encore plus impressionnants, les lignes de grains, les cyclones tropicaux ou les systèmes frontaux qui arrosent nos régions en hiver occupent plusieurs centaines, voire quelques milliers de kilomètres.

Ce que nous racontent les nuages

Forme, dimensions, localisation et comportement des nuages reflètent l'état de l'atmosphère au-dessus de nos têtes. Ces caractéristiques résultent en effet des mouvements de l'air et de la transformation de la vapeur d'eau en gouttelettes liquides ou en cristaux de glace. Certains nuages sont pacifiques et annoncent le beau temps ; d'autres sont inquiétants et signalent la présence de phénomènes dangereux ou l'arrivée imminente du mauvais temps. Par exemple, les nuages en forme de vagues déferlantes (nuages en rouleaux) ou ceux qui s'effilochent en longs filaments blancs, en chevelure ou en traînées obliques (cirrus uncinus) nous indiquent la présence de vents forts en altitude. Lorsque ces filaments sont associés à une perturbation, ils précèdent souvent d'une dizaine d'heures le mauvais temps et les premières précipitations, et en sont le premier signe identifiable.

Les nuages en forme de lentilles (altocumulus lenticularis), immobiles dans le ciel, correspondent à une ondulation de l'air soulevé par une montagne ou une colline voisine. Ils sont associés à la présence d'une forte turbulence, laquelle s'étend parfois bien au-dessus des régions couvertes par les nuages. Ceux en forme de châteaux ou de remparts (altocumulus castellanus) sont le signe d'une forte instabilité de l'air, susceptible de faciliter le développement d'orages dans les heures à venir. Les grandes enclumes qui s'étalent au sommet du roi des nuages, le cumulonimbus, signalent une activité orageuse, souvent accompagnée d'averses, de vents forts, de coups de foudre, voire de grêle ou de tornades.

La contenance d'un nuage

À l'exception des voiles fins, les nuages sont opaques ; leurs bords étant souvent nets et bien marqués, ils paraissent avoir une bonne consistance. Lorsqu'on passe à proximité en avion, et quand ils sont directement éclairés par le Soleil, on a l'impression qu'on pourrait s'y accrocher, y glisser comme sur un champ de neige. En

réalité, on les traverse facilement, car ils sont essentiellement composés d'air. Les gouttelettes et les cristaux, pourtant fort nombreux (plusieurs centaines de millions à plusieurs milliards dans chaque mètre cube de nuage), représentent au plus quelques millièmes de la masse d'air nuageux et occupent rarement plus d'un millionième de son volume: les 999 999 millièmes restants sont occupés par de l'air sec et de la vapeur d'eau.

Les nuages sont constitués d'air sec, de vapeur d'eau et d'eau condensée sous forme de gouttes liquides ou de cristaux de glace. Leurs masses représentent la somme des masses de ces trois constituants. Les petits nuages bourgeonnants qui flottent dans le ciel les jours de beau temps paraissent légers comme des plumes. Il semble qu'on pourrait les porter d'une seule main. Pourtant, le moindre petit cumulus mesure près d'un kilomètre de côté et de haut, et pèse plus d'un million de tonnes. Il contient 10 000 tonnes d'eau sous forme de vapeur et plus de 500 tonnes sous forme de gouttelettes ou de cristaux de glace. Un gros cumulonimbus de 15 kilomètres de côté et de 10 kilomètres de haut pèse 1 000 fois plus, soit un milliard de tonnes; il contient plusieurs millions de tonnes d'eau liquide et de glace. Il est aussi lourd qu'un milliard d'automobiles ou que trois millions d'Airbus A340, et contient autant d'eau que 10 000 camions citernes ou que plusieurs pétroliers géants. On peut se demander comment, avec une masse si importante, les nuages ne nous tombent pas sur la tête. Souvent, la raison évoquée est la présence de courants d'air ascendants qui soulèvent les gouttes et les cristaux; mais ce n'est pas si simple. Nous y reviendrons au chapitre 5.

La couleur des nuages

Un enfant dessine volontiers un ciel bleu parsemé de nuages blancs. Quand le ciel est couvert, on le voit gris. Pourquoi ces couleurs?

La lumière blanche du Soleil est un mélange de toutes les couleurs visibles par l'œil humain. Or, la multitude de molécules d'air rencontrées perturbe le trajet des rayons solaires et diffuse une grande

- Stratocumulus** Couche nuageuse sombre ou ensemble de bancs nuageux minces, situés à une altitude moyenne de 2 000 mètres. 37
- Stratosphère** Couche de l'atmosphère comprise entre la tropopause (située entre 6 à 17 kilomètres d'altitude) et la stratopause (50 kilomètres d'altitude). 78
- Stratus** Nuage des niveaux bas qui présente l'aspect d'un voile continu. 38
- Sublimation** Passage de l'état solide à l'état gazeux sans passage par l'état liquide. 50
- Supercellule** Voir orage supercellulaire. 143
- Surfusion** État d'une substance qui reste liquide au-dessous de son point de congélation. 71
- Sursaturation** État d'un gaz contenant une quantité de vapeur supérieure à celle qui serait nécessaire pour le saturer. 71
- Sursaturation par rapport à la glace** État d'un échantillon d'air humide pour lequel la quantité de vapeur d'eau est supérieure à celle permettant la saturation de l'échantillon par rapport à la glace, à la même température et à la même pression. 61
- Sursaturation par rapport à l'eau liquide** État d'un échantillon d'air humide pour lequel la quantité de vapeur d'eau est supérieure à celle permettant la saturation de l'échantillon par rapport à l'eau liquide, à la même température et à la même pression. 61
- T**
- Température** Mesure de l'énergie interne due à l'agitation thermique des molécules. Elle s'exprime en degrés Celsius ou en Kelvin. 10
- Tension de vapeur** Pression exercée par la vapeur sur une surface. 55
- Thermosphère** Couche de l'atmosphère, située au-dessus de la mésopause, dans laquelle la température croît généralement avec l'altitude. 78
- Tonnerre** Bruit sec ou roulement sourd qui accompagne l'éclair. 153
- Tornade** Perturbation atmosphérique tourbillonnante, de petite dimension mais très intense, aux effets destructeurs. 154
- Traceur** Première phase (prédécharge) d'une décharge atmosphérique explosive qui correspond à l'établissement d'un canal ionisé et se propage généralement d'un nuage vers le sol. 152
- Traceur par bonds** Traceur d'une première décharge, dans laquelle le canal ionisé s'établit par bonds successifs. 152
- Trainée de condensation** Nuage formé dans le sillage d'un aéronef lorsque l'air au niveau du sol est suffisamment froid et humide. 41
- Tropopause** Limite entre la troposphère et la stratosphère, située vers 6 à 8 kilomètres au voisinage des pôles, 16 à 18 kilomètres à l'équateur, et caractérisée par un changement net de la variation verticale de température. 78

LEXIQUE

Troposphère Partie de l'atmosphère comprise entre le sol et la tropopause, dans laquelle la température décroît avec l'altitude. 31

U-V

Ultraviolet Domaine des longueurs d'ondes électromagnétiques comprises entre 0,004 et 0,4 micromètres (μm). 79

Vapeur d'eau Forme gazeuse transparente de l'eau. 14

Vapeur saturante Vapeur ayant atteint son point de saturation. 53