

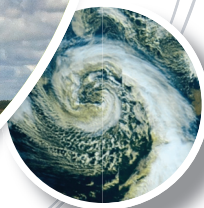


JEAN-PIERRE CHALON

Combien pèse un nuage ?

ou pourquoi les nuages ne tombent pas

Seconde édition



Combien pèse un nuage ?

This page intentionally left blank

Combien pèse un nuage ? ou pourquoi les nuages ne tombent pas

JEAN-PIERRE CHALON

Seconde édition



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Composition et mise en pages : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-1072-7

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, 2014

- « Qui aimes-tu le mieux, homme énigmatique, dis ?
Ton père, ta mère, ta sœur ou ton frère ?
– Je n'ai ni père, ni mère, ni sœur, ni frère.
– Tes amis ?
– Vous vous servez là d'une parole dont le sens m'est resté jusqu'à ce
jour inconnu.
– Ta patrie ?
– J'ignore sous quelle latitude elle est située.
– La beauté ?
– Je l'aimerais volontiers, déesse et immortelle.
– L'or ?
– Je le hais comme vous haïssez Dieu.
– Eh! qu'aimes-tu donc, extraordinaire étranger ?
– J'aime les nuages... les nuages qui passent... là-bas... là-bas...
les merveilleux nuages ! »

« L'étranger », petit poème en prose de Charles Baudelaire,
« Le spleen de Paris »

This page intentionally left blank

REMERCIEMENTS

À France Citrini pour la pertinence de ses remarques, à Thierry Michel pour nos longues et intéressantes discussions sur la description des nuages, à Sébastien Laflorencie, Thierry Michel, Didier Costes, Ruben Hallali, Mathieu Quillé, Sébastien Rouzot pour la qualité de leurs photos qui toutes participent largement à l'illustration et à la pédagogie de cet ouvrage.

This page intentionally left blank

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	13
1. Le rôle des nuages	15
L'eau douce nécessaire à la vie.....	15
<i>Le cycle de l'eau : les transferts et les réserves</i>	17
Un domaine de recherche foisonnant.....	19
Une température partout clémente	20
<i>Le bilan radiatif de la Terre</i>	21
Et si le climat se réchauffe ?	23
2. L'allure d'un nuage	27
Ce que nous racontent les nuages.....	28
La contenance d'un nuage	28
La couleur des nuages	29
Irisations et halos.....	32
Gloires et arcs-en-ciel.....	34
Les nuages vus depuis les satellites.....	36
La nébulosité	38
3. Petite zoologie des nuages	41
La classification des nuages.....	41
Les dix genres de nuages	44
Nuages spéciaux	53
<i>Les espèces de nuages</i>	56

<i>Les variétés de nuages.....</i>	58
<i>Les particularités supplémentaires des nuages</i>	60
4. L'eau dans tous ses états.....	63
L'agitation des molécules	65
Les changements d'état.....	66
Une énergie considérable	68
La saturation de la vapeur.....	69
<i>Comment représenter l'humidité ?</i>	70
<i>Comment mesurer le taux d'humidité de l'air ?</i>	72
Le degré de sécheresse	73
5. Gouttelettes et cristaux	75
Le rôle des poussières et autres aérosols	75
Les gouttelettes de brouillard et de nuage.....	80
<i>Sursaturation et surfusion</i>	80
Les cristaux de glace	84
<i>Les principales formes des cristaux de glace en fonction de la température.</i>	88
Quelques brouillards remarquables	89
<i>La sursaturation par mélange</i>	90
6. La naissance d'un nuage.....	95
L'atmosphère terrestre.....	95
La pression ou le poids des molécules	97
Les principales couches de l'atmosphère.....	98
Mouvements verticaux, théorie de la parcelle	100
Stabilité et instabilités de l'atmosphère	104
<i>Poids et mesures</i>	106
<i>Stabilité de l'atmosphère.....</i>	111
La génération de courants ascendants.....	117
<i>Remarque sur l'effet de foehn.....</i>	123
Énergies disponibles et sommet des nuages	127
<i>La base et le sommet des nuages</i>	128
Pourquoi les nuages ne tombent pas ?	131
Éphémères gouttelettes.....	133
Où vont les nuages ?	135

7. Les précipitations.....	137
La pluie.....	143
Comment se forment les gouttes de pluie ?.....	144
<i>Signature radar de la région de fonte des cristaux de glace :</i> <i>la « bande brillante »</i>	<i>148</i>
Poudrin de glace et flocons de neige.....	151
Neige en grains, neige roulée, grésil et grêle.....	152
8. Orages et grains	157
Un fort déséquilibre énergétique de l'atmosphère.....	158
Les orages ordinaires	160
Les supercellules : des cellules particulièrement dévastatrices	167
Les systèmes organisés : des systèmes nuageux à grand rayon d'action	170
La foudre, les éclairs et le tonnerre	175
Les tornades.....	181
<i>Échelle d'intensité des tornades de Fujita modifiée</i>	<i>186</i>
9. Les moyens d'investigation : observer, comprendre prévoir	187
Surveiller les orages et mesurer les précipitations	188
Comprendre les mécanismes de formation	193
<i>Les équations de simulation de l'atmosphère et des nuages</i>	<i>197</i>
Prévoir les risques d'orage ou d'inondation	199
Lexique	209

This page intentionally left blank

AVANT-PROPOS

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, dans le Sommiérois en 2002, ou la région de Draguignan en 2010, 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 ? De quoi sont-ils constitués ? 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 ?

Autant de questions auxquelles ce livre s'efforce de répondre. L'étude des nuages comporte des enjeux importants, en météorologie mais aussi en climatologie. Mieux les connaître permettra de comprendre 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 ? Joueront-ils un rôle atténuateur ou au contraire accélérateur du réchauffement ? Leurs transformations s'accompagneront-elles d'un déficit accru de précipitations dans des régions du monde qui souffrent déjà cruellement d'un manque d'eau douce ?

1

Le rôle des nuages

Sans nuages, l'eau douce facilement accessible dans les lacs, les rivières et les nappes phréatiques disparaîtrait en quelques mois. La **répartition** de la chaleur entre l'équateur, les régions tempérées et les régions polaires serait modifiée. La Terre deviendrait une planète aride, battue par des vents violents et affrontant des températures extrêmement contrastées, plus torrides dans les régions intertropicales, plus glaciales aux latitudes polaires et dans les régions actuellement tempérées.

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 troposphère¹, 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.

1. La troposphère est la première couche de l'atmosphère qui s'élève du sol jusque vers 6 à 8 km d'altitude lorsqu'on est près des pôles et vers 16 à 18 km d'altitude lorsqu'on se trouve près de l'équateur.

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 facilement récupérable, celle que l'on trouve dans les rivières, les lacs, les retenues d'eau artificielles et les nappes phréatiques peu profondes, ne représente que 130 000 kilomètres cubes, soit environ 0,33 % du total de l'eau douce.

Sans la pluie, ces réservoirs d'eau douce s'assècheraient en quelques mois 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 elle est continuellement renouvelée. 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 »*).

Mais 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**. L'usage de certains combustibles fossiles produit du dioxyde de soufre (SO₂) qui, dans les nuages, se transforme en acide nitrique et provoque des pluies acides particulièrement nocives pour la végétation et la faune aquatique. De son côté, le réchauffement climatique pourrait modifier fortement la répartition des précipitations et l'accès à l'eau douce dans de nombreuses régions. 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.

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 (soit 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. Cette évaporation est totalement compensée par les précipitations qui représentent un flux identique. Elles sont environ 36 fois plus importantes que les quantités d'eau qui se trouvent dans l'atmosphère à un instant donné.

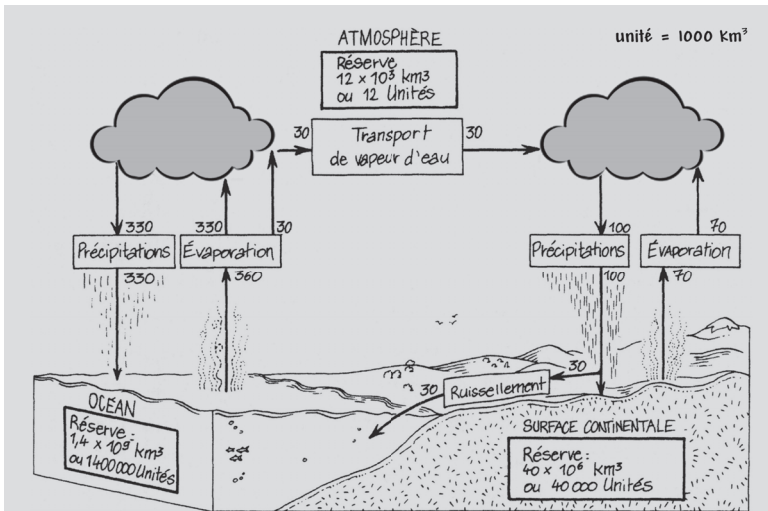


Figure 1 | Réserves d'eau atmosphérique et transferts annuels moyens entre les surfaces continentales, l'atmosphère et l'océan. Les volumes indiqués sont ceux qu'occuperait l'eau atmosphérique si elle était entièrement condensée sous forme liquide. Les précipitations annuelles sont 36 fois plus importantes 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.

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.

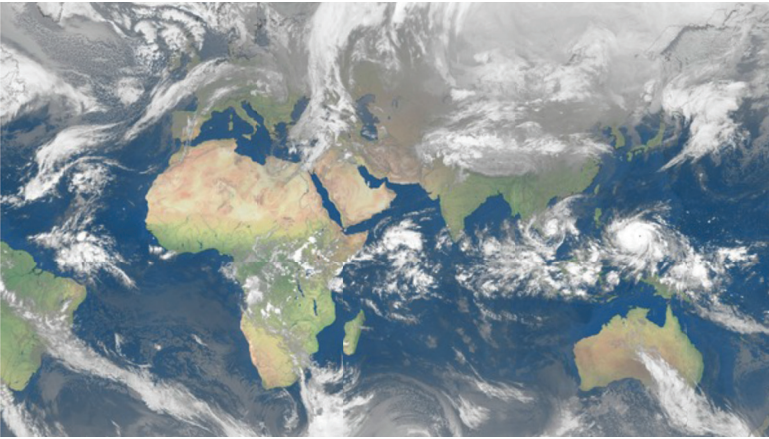
UN DOMAINE DE RECHERCHE FOISSONNANT

Depuis plus de 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 détection, la prévision et la signalisation des phénomènes météorologiques dangereux comme les orages, les tempêtes ou les cyclones. Leur prise en compte dans les **modèles de simulation** numérique permet aussi d'obtenir des projections plus réalistes dans l'étude des climats futurs.

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 dans leur formation sont nombreux et extrêmement complexes.

Des avancées importantes ont été réalisées depuis quelques décennies, mais, à ce jour, la physique des nuages et des précipitations reste un domaine encore mal maîtrisé où les sujets de recherche sont loin d'être épuisés.

**Figure XXVI | Situation générale**

Cette image multisatellitaire a été obtenue à partir de cinq satellites géostationnaires et du satellite défilant MetOp-02, le 07/11/2013 à 12h00 UTC. On peut observer différents types de systèmes nuageux dont la couleur varie entre le blanc et les différents tons de gris. Dans les parties supérieures et inférieures, qui correspondent aux latitudes polaires et tempérées, quelques systèmes frontaux étalent leurs nuages sur plusieurs milliers de kilomètres et maintiennent un temps particulièrement maussade. Les systèmes nuageux présents dans la région équatoriale sont moins étendus mais certains d'entre eux sont extrêmement violents. Sur la partie droite de la photographie, sous l'apparence d'un petit disque de couleur blanc intense, le violent typhon Haiyan s'apprête à dévaster les Philippines avec des rafales de vent dépassant 300 km/h (source : Météo-France ; Image publiée par Météo-France/CMS le 07/11/2013 à 21h00 (heure de Paris)).

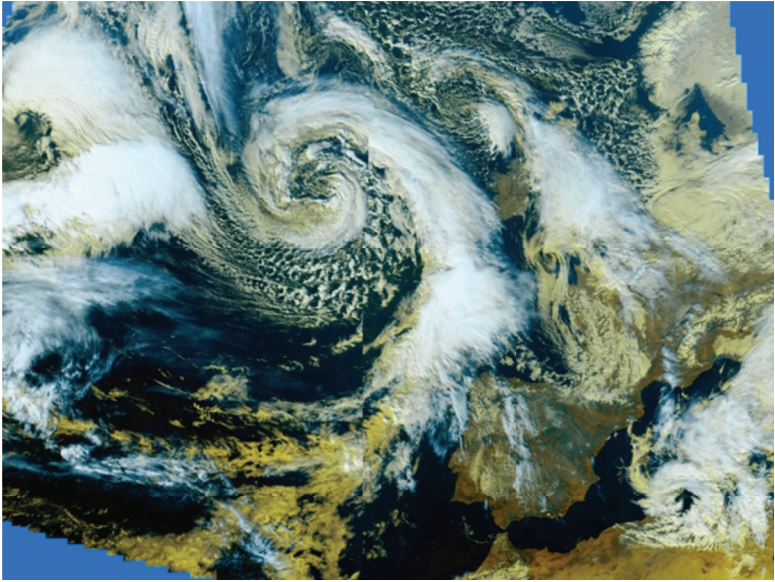


Figure XXVII | Exemple de perturbations frontales.

Sur cette photographie, prise le 09 février 2007 à 14h15 par le satellite NOAA18, on observe plusieurs systèmes nuageux qui viennent s'enrouler autour de centres dépressionnaires et se propagent vers l'Est. Le système nuageux qui se trouve au milieu va bientôt atteindre la Métropole en produisant de très forts coups de vent et en déversant d'importantes quantités de neige et de pluie. Il résulte de la rencontre entre l'air chaud remontant du Portugal vers les îles britanniques avec de l'air froid qui descend du Groenland, avant de s'enrouler autour d'une forte dépression centrée sur l'Islande. Dans l'air froid situé à l'ouest et au sud la dépression, on peut observer toute une série de petites cellules plus ou moins hexagonales (cellules de Bénard) composées d'une alternance d'éclaircies et de cumulus ou de cumulonimbus générateurs d'averses de pluie ou de grésil, comme on peut en observer au moment des giboulées de mars (source : Météo-France ; Image publiée par Météo-France/CMS le 07/09/2010 à 10h00 (heure de Paris)).