

La physique du climat

Primaire et collège

Résumé

Le climat peut être défini comme l'ensemble des situations météorologiques propres à une région de la Terre plutôt que comme un hypothétique « état moyen ». Cet ensemble de situations météorologiques évolue sur toutes les échelles de temps, du mois à plusieurs millions d'années, en passant par des cycles glaciaires de 150 000 ans ou des fluctuations d'un siècle à l'autre.

la physique du climat

Jean-Louis Dufresne

Le climat peut être défini comme l'ensemble des situations météorologiques propre à une région de la Terre plutôt que comme un hypothétique « état moyen ». Cet ensemble de situations météorologiques évolue sur toutes les échelles de temps, du mois à plusieurs millions d'années, en passant par des cycles glaciaires de cent cinquante mille ans ou des fluctuations d'un siècle à l'autre.

Nous n'évoquerons pas, dans cet exposé, cette variabilité du climat ni les mécanismes sous-jacents. Nous présenterons plutôt quelques-uns des processus physiques fondamentaux du climat, nous les illustrerons, si possible, par des expériences simples et nous montrerons comment ils interviennent dans le système climatique.

Climat et Soleil

Les Grecs, sans doute inspirés par l'esthétique géométrique de la sphère, mais aussi par des observations telles que les éclipses de Lune (ombre portée de la Terre sur la Lune) s'étaient convaincus que la Terre était une sphère, au centre de l'Univers. Pour décrire la position d'un lieu sur la Terre, ils définirent des « climats » (du grec *klima*, « inclinaison ») comme des régions dans lesquelles la hauteur du Soleil (à midi et à une saison donnée)

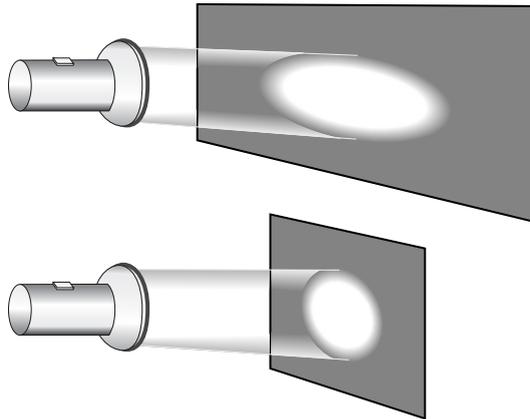
est à peu près la même partout. C'est ce principe de repérage qui a débouché, bien plus tard, sur la notion de LATITUDE. Le mot « climat », à l'origine associé à la hauteur du Soleil, signifia rapidement ce que l'on entend aujourd'hui : climat tropical, climat désertique, climat polaire. Ce glissement de sens provient probablement des liens étroits qui existent entre latitude, hauteur du Soleil et température.

L'ÉNERGIE lumineuse reçue par unité de surface est plus importante lorsque cette surface est perpendiculaire au RAYONNEMENT que lorsqu'elle lui est presque parallèle.

Cet exemple peut être transposé au Soleil qui éclaire la Terre. Dans les régions équatoriales, à midi et aux équinoxes, la surface du globe est, côté Soleil, presque perpendiculaire au rayonnement solaire, tandis que, près des pôles, la surface est presque parallèle (cf. le dessin p. 108). L'énergie solaire reçue par unité de surface est donc plus importante près de l'équateur que près des pôles. Une deuxième raison pour laquelle la température de surface dépend de la latitude est la variation de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux. Lorsque les rayons sont perpendiculaires à la surface, l'épaisseur d'atmosphère traversée est la plus faible ; la lumière est moins absorbée et moins DIFFUSÉE par l'atmosphère, et la surface reçoit



Lorsqu'un faisceau lumineux d'une lampe torche éclaire une surface qui lui est perpendiculaire, il dessine une petite tache circulaire. Si l'on incline la surface par rapport au faisceau, la lumière s'étale (formant une tache elliptique) et cet étalement devient d'autant plus important que la surface devient presque parallèle au faisceau (cf. ci-dessous). La puissance de la lampe étant constante, l'énergie reçue par une même surface est plus élevée lorsque le faisceau est perpendiculaire à cette surface (petite tache) que lorsqu'il est presque parallèle (tache étalée).



davantage d'énergie solaire.

L'énergie solaire absorbée par une surface dépend de l'intensité du rayonnement qu'elle reçoit (rayonnement incident), mais également des propriétés optiques de la surface. Une partie du rayonnement solaire incident est absorbée, le reste est réfléchi.

L'absorption correspond à une transformation d'énergie transportée par rayonnement en ÉNERGIE THERMIQUE (chaleur). La fraction entre le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement incident est appelée « coefficient de réflexion » ou encore « albédo ». Plus la fraction de rayonnement réfléchi est élevée, plus l'énergie solaire absorbée est faible. Lorsque l'œil perçoit

une surface comme étant claire, c'est parce qu'une fraction importante du rayonnement visible est réfléchi (et n'est donc pas absorbée). Au contraire, une surface perçue comme sombre réfléchit peu de lumière et en absorbe beaucoup.

La très forte luminosité d'un paysage enneigé illustre bien la valeur élevée de l'albédo de la neige. Une photo satellite de la Terre montre un océan très sombre ; son albédo est donc faible.

Une conséquence de la valeur élevée de l'albédo de la neige (qui absorbe peu de rayonnement solaire) est un auto-entretien (ou même une amplification) des situations froides. En effet, si une région



Pour illustrer la relation entre l'albédo (ou la clarté) d'une surface et l'absorption, on peut prendre deux plaques métalliques, l'une peinte en blanc, l'autre en noir. Ces deux plaques sont posées horizontalement sur un isolant thermique et placées au soleil dans un endroit sans vent. Après une dizaine de minutes environ, lorsque l'ÉQUILIBRE THERMIQUE est atteint, un simple toucher de la main permet de constater que la température de la plaque noire est supérieure à celle de la plaque blanche. La température peut être mesurée en plaçant la sonde d'un thermomètre électronique entre la plaque et l'isolant. Cet isolant joue deux rôles : rendre la température des plaques plus sensible au flux solaire absorbé et faciliter la mesure de température en protégeant thermiquement la sonde.

est suffisamment froide pour conserver un important manteau neigeux, le rayonnement solaire est fortement réfléchi. Il y a donc moins d'énergie absorbée que s'il n'y avait pas de neige, ce qui contribue à maintenir une situation froide. Actuellement, on suppose que ce mécanisme a eu un rôle important lors des entrées en période glaciaire. Si, aux hautes latitudes, les étés deviennent trop froids pour que la neige fonde, l'absorption de rayonnement solaire est réduite, ce qui contribue à maintenir cette anomalie froide.

neige	0,8	peinture blanche	0,8
désert	0,3	peinture noire	0,05
forêt	0,1	planète Terre	0,3
océan	0,05		

Albédo moyen (c'est-à-dire coefficient de réflexion) pour quelques types de surfaces.

L'absorption du rayonnement solaire par la surface de la Terre est le phénomène climatique dominant. C'est parce que les pôles reçoivent moins d'énergie solaire que les tropiques qu'il y fait plus froid. C'est parce que, en hiver, l'énergie solaire est plus faible qu'il y fait plus froid. C'est l'énergie solaire qui est le moteur de tous les phénomènes climatiques, des mouvements de l'air dans

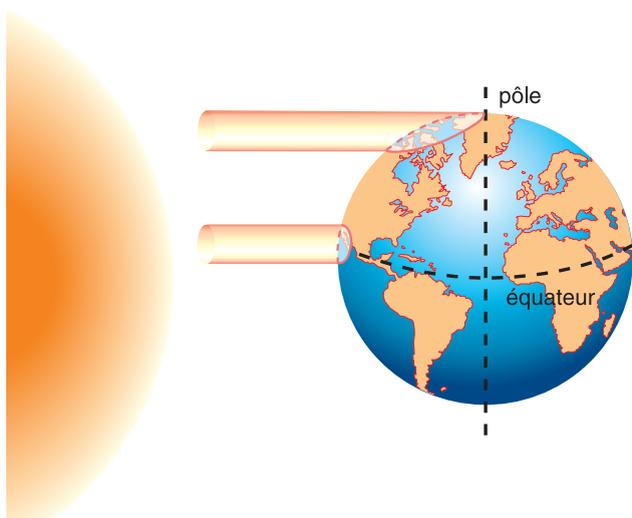
l'atmosphère et de l'eau dans l'océan. L'énergie solaire absorbée par la surface de la Terre est transmise à l'atmosphère principalement par CONVECTION et par évaporation-condensation de l'eau, puis émise par l'atmosphère vers l'espace sous forme de rayonnement INFRAROUGE.

La convection

L'air chaud monte. Cette observation est courante : fumée qui s'élève au-dessus d'un feu, air chaud qui s'élève au-dessus d'un radiateur, montgolfières gonflées à l'air chaud... L'air, comme presque tous les corps, se dilate lorsqu'il s'échauffe. Sa MASSE VOLUMIQUE (masse par unité de volume) est plus faible que celle de l'air froid. Du fait de la poussée d'Archimède, une parcelle d'air chaud entourée d'air plus froid aura tendance à monter, et réciproquement une parcelle froide entourée d'air chaud descendra.

Le phénomène de brises côtières que l'on observe parfois en été, par temps calme, est une illustration météorologique de la convection. La température de surface de la mer varie peu entre le jour et la nuit. En revanche, la température de surface de la terre peut augmenter significativement de jour et devenir nettement plus chaude que celle de la mer. Cette différence de température est à l'origine de la brise de mer. La nuit, la terre se refroidit et le processus contraire peut se développer. C'est la brise de terre.

Ce phénomène existe également à l'échelle continentale et saisonnière. C'est par exemple le cas de la mousson indienne (de l'arabe *mausim*, « saison ») qui fut utilisée par les navigateurs dès l'époque romaine. En été, les vents de mousson soufflent d'ouest en est et facilitent la navigation à voile de la mer Rouge vers l'Inde. En hiver, les vents d'est



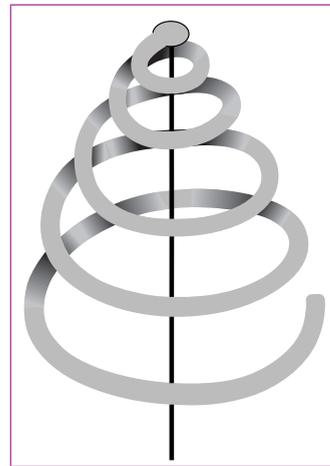


Une hélice disposée au-dessus d'une source chaude permet de mettre en évidence cette convection, cette montée d'air chaud. On pourra utiliser une spirale en papier tournant autour d'un axe vertical (cf. le dessin ci-dessous). Les carillons de Noël d'origine nordique illustrent également très bien ce phénomène : une hélice horizontale à laquelle sont souvent fixés des anges se met à tourner lorsqu'on allume les bougies situées en dessous. Néanmoins, les mouvements de l'air sont souvent trop désordonnés pour que le mouvement ascendant soit directement visible.

Une expérience avec de l'eau permet, en revanche, de bien visualiser la convection. Deux récipients transparents (par exemple, des bouteilles en plastique lisse coupées) sont remplis d'eau à température ambiante ($\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Deux petits flacons sont remplis d'eau colorée (l'encre rouge marche très bien). Dans l'un, on met de l'eau froide ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$), dans l'autre de l'eau bien chaude ($\approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ensuite, il faut faire descendre doucement un flacon dans chacun des récipients, en le retenant par une ficelle. Cette opération est un peu délicate, car il faudra le maintenir bouché pendant la descente pour éviter que l'eau colorée ne se disperse (par exemple, en appuyant dessus avec une tige ayant un bouchon à son extrémité). Lorsque l'on débouche les flacons, l'eau chaude s'élève en un joli panache et remplit tout le récipient, tandis que l'eau froide reste confinée dans son flacon (cf. la photo page suivante).

en ouest permettent de faire le chemin de retour. Ce phénomène de mousson est fondé, comme les brises côtières, sur un contraste de température entre océan et continent, mais à une plus grande échelle d'espace et de temps. Comme l'océan est fortement brassé sous l'action du vent, sa température de surface varie peu avec les saisons. En revanche, le continent indien s'échauffe fortement en été, générant une convection importante. Cet air qui s'élève est remplacé par de l'air venant de l'océan, induisant des vents d'ouest au-dessus de l'océan Indien (cf. le dessin p. 116). L'ASCENDANCE de l'air au-dessus de l'Inde produit également de fortes pluies à la fin de l'été ; nous verrons plus loin (cf. « Climat sec, climat humide ») que la relation entre ascendance et précipitations est générale dans les régions tropicales.

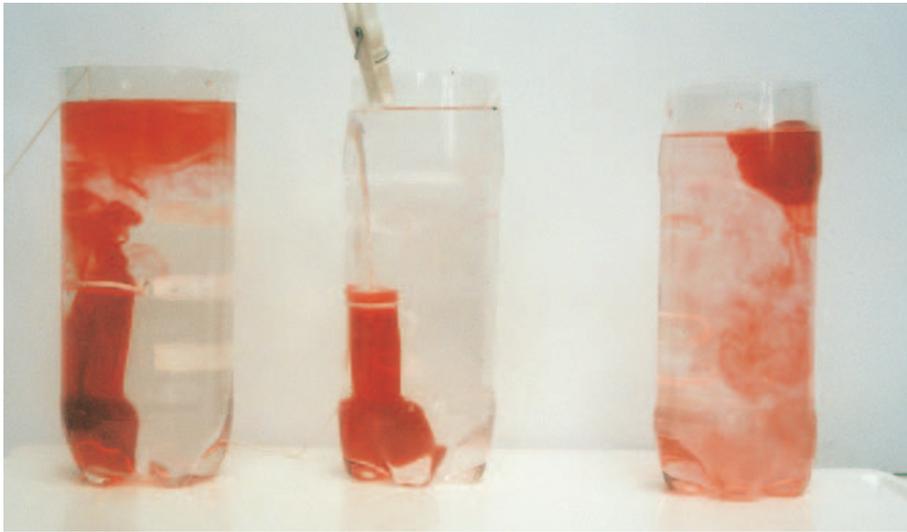
Finalement, la convection est également présente à une échelle encore plus grande, l'échelle planétaire. Comme nous l'avons



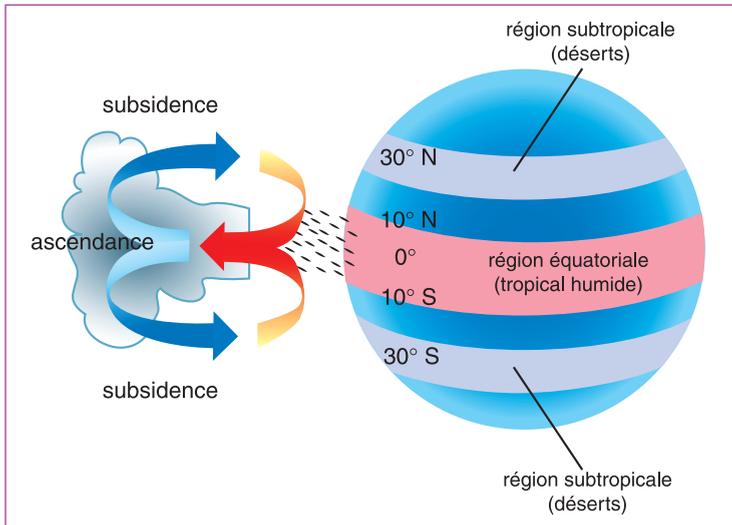
vu précédemment, les régions proches de l'équateur sont celles qui reçoivent le plus d'énergie solaire. La température est maximale dans cette ceinture équatoriale, elle baisse lorsqu'on s'en éloigne. Cette variation de la température avec la latitude est à l'origine d'une structure convective à très grande échelle. L'air chaud des régions équatoriales s'élève et « aspire » de l'air



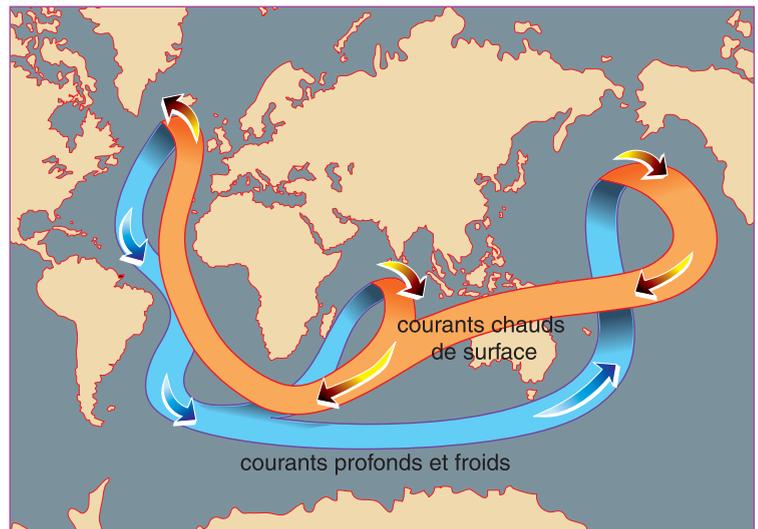
Brise de mer – brise de terre. Lors de journées calmes et ensoleillées, la terre peut devenir plus chaude que la mer. L'air chaud s'élève au-dessus de la terre, ce qui donne naissance à la brise de mer (dessin de gauche). La nuit, la terre peut au contraire devenir plus froide que la mer et donner naissance à la brise de terre (dessin de droite).



Expérience de convection naturelle. Au milieu, l'eau colorée, plus chaude que l'eau extérieure, reste à l'intérieur du flacon. À gauche, l'eau colorée, plus froide que l'eau extérieure, tend à monter. À droite, l'eau colorée qui provient de la fonte du glaçon est plus froide que l'eau extérieure, elle tend à descendre vers le fond de la bouteille. © Nicole Lemperière



L'eau plonge aux environs du Groenland sous l'effet du refroidissement et de l'augmentation de la salinité, traverse l'océan Atlantique vers le sud à une profondeur de 2000 m environ, et remonte en surface dans l'océan Pacifique et l'océan Indien. Une fois en surface, cette eau est réchauffée, revient dans l'Atlantique et rejoint la région du Groenland via le Gulf Stream. Cette boucle est parcourue en deux mille ans environ.



provenant des régions subtropicales. Pour fermer la boucle, l'air qui s'est initialement élevé au-dessus de l'équateur descend ensuite dans les régions subtropicales. Cette circulation atmosphérique est appelée « circulation de Hadley » (représentée ci-contre, au milieu).

La convection est également présente dans l'océan mais, contrairement à l'atmosphère, principalement dans les régions polaires. Dans les régions équatoriales en effet, l'eau est chauffée en surface par le rayonnement solaire. Cette eau chaude, donc moins dense, reste en surface. Dans les régions polaires, l'eau est, à l'inverse, fortement refroidie par l'air glacial. En se refroidissant, elle devient plus dense et coule vers le fond de l'océan. Ces « colonnes convectives » océaniques constituent le phénomène symétrique de celui des « tours convectives » atmosphériques.

La masse volumique de l'eau de mer dépend de la température mais aussi de la salinité ; à une température donnée, l'eau de mer est d'autant plus dense qu'elle est salée. La salinité de la surface de l'océan augmente lorsque la surface perd de l'eau douce par évaporation et diminue lorsque la surface gagne de l'eau douce grâce aux précipitations. La salinité varie aussi avec la formation ou la fonte de la glace de mer. Lorsque l'eau de mer gèle, la glace qui se forme possède une salinité très faible, le SEL restant principalement dans l'eau liquide. La concentration en sel de l'eau de surface augmente alors, ce qui accroît sa masse volumique et favorise sa plongée vers les grands fonds. Dans l'hémisphère Nord, les régions de fortes convections se trouvent principalement à l'est du Groenland. Cette

plongée d'eau est à l'origine de la circulation océanique dite du tapis roulant (ou de la courroie de transport) et qui est schématisée sur la figure située ci-contre, en bas.

Variation verticale de la pression

Nous avons vu précédemment que la convection était générée par des différences de masse volumique, différences dont l'origine est une différence de température dans l'air, une différence de salinité ou de température dans l'eau de mer. Lorsqu'on considère l'atmosphère dans toute sa hauteur (plusieurs kilomètres), il est nécessaire d'introduire la **PRESSION** pour pouvoir aborder plus précisément les phénomènes de convection.

Après la mise au point du baromètre par Evangelista Torricelli au début du XVII^e siècle, Blaise Pascal fit réaliser une expérience au Puy de Dôme. Il fit mesurer la pression atmosphérique en bas et en haut de cette montagne, à l'aide d'un baromètre à mercure, et mit ainsi en évidence la différence de pression atmosphérique avec l'altitude. Ces résultats aboutirent à la notion de pression hydrostatique dont la valeur est celle du poids d'une colonne verticale d'air (ou d'un autre fluide) dont la base a une surface de 1 m². Elle a permis de grands progrès en fournissant, par exemple, une explication au principe d'Archimède.

La réalisation d'un baromètre sensible aux faibles variations de la pression atmosphérique est délicate et les montages à partir de bouteilles plastiques proposés dans de nombreux livres pour enfants ne fonctionnent



On prend un récipient rempli d'eau à température ambiante (ou éventuellement tiède). À la surface, on dépose un glaçon d'eau colorée. On voit clairement que l'eau colorée froide, qui provient de la fonte du glaçon, coule vers le bas (cf. la photo en haut de la page 110).





La dépendance de la pression atmosphérique avec l'altitude peut être illustrée par une analogie entre l'atmosphère et une « tour humaine ». Prenons quatre personnes assez agiles pour monter les unes sur les autres, debout sur les épaules. La personne tout en bas porte sur ses épaules ses trois camarades, celle au-dessus deux, celle encore au-dessus un, et celle tout en haut ne porte personne. Ainsi le poids porté est d'autant plus faible que la personne est en hauteur. La situation est analogue dans tout fluide au repos, tel que l'atmosphère ou l'océan. Au sommet de l'atmosphère, la pression est nulle, et elle augmente lorsque l'on descend vers la surface. Dans l'océan, la pression est égale à celle de l'atmosphère près de la surface et augmente lorsque l'on descend.

pas ou sont plus sensibles à une variation de la température de l'air ambiant qu'à une variation de la pression. Ainsi proposons-nous plutôt une expérience par la pensée.

L'air, comme tous les gaz, est compressible : à température constante, le volume occupé par une masse fixe de gaz diminue lorsque la pression augmente. Ainsi, l'air en bas de l'atmosphère est davantage « écrasé » que l'air en haut de l'atmosphère. Pour la Terre, on obtient finalement que la pression atmosphérique est divisée par deux chaque fois que l'on s'élève de 5 000 m environ.

Variation verticale de la température

Cette relation entre volume, température et pression d'un gaz peut également être utilisée pour établir qu'une parcelle d'air qui se déplace verticalement sans échange de chaleur avec son environnement voit sa température diminuer avec l'altitude de 10 °C/km pour de l'air sec à 5 °C/km pour de l'air très humide, avec une valeur typique de 8 °C/km. Si la décroissance de la température est plus élevée que ces valeurs, alors l'air en bas est trop chaud (ou l'air en haut trop froid) par rapport à une situation d'équilibre, et il y a apparition de convection. Si la température décroît moins vite que ces valeurs, l'air en bas est plus froid (l'air en haut plus chaud) que dans une situation stable, et le mélange vertical par convection est inhibé. Dans de telles situations

et en l'absence de vent, des pics de pollution peuvent apparaître dans certaines régions : la diminution du mélange d'air réduit la dilution des gaz émis par les activités humaines.

La diminution de la température de l'air avec l'altitude est directement perceptible lors des séjours en montagne. Avec une décroissance de la température de 8 °C/km, on obtient, par exemple, que lorsqu'il fait 20 °C au niveau de la mer, il fait environ 0 °C à 2 500 m d'altitude, - 20 °C en haut du mont Blanc et - 45 °C à 8 000 m (altitude des plus hauts sommets et des avions de ligne).

La variation verticale de la température est principalement influencée, outre la convection, par l'absorption du rayonnement solaire et par le refroidissement par rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire est principalement absorbé par la surface de la Terre, seule une petite partie est absorbée directement par l'atmosphère elle-même. Ce rayonnement absorbé ne modifie pas directement la variation verticale de température, sauf entre 10 et 50 km d'altitude, région qui contient l'essentiel de l'ozone atmosphérique. L'ozone y absorbe le rayonnement solaire, principalement le rayonnement ultraviolet, ce qui conduit à une augmentation de la température.

Le cycle de l'eau

Eau et climat sont étroitement liés. L'eau s'évapore, est transportée parfois sur des milliers de kilomètres, se condense pour

former des nuages, puis de la pluie ou de la neige. Elle a un rôle majeur sur le climat à travers l'effet de serre de la vapeur d'eau, l'effet des nuages sur les échanges par rayonnement, l'énergie thermique absorbée lors de l'évaporation de l'eau ou, au contraire, l'énergie dégagée lorsque la vapeur d'eau se condense en gouttelettes pour former les nuages et la pluie.

Le cycle de l'eau est très varié mais peut être schématisé de la façon suivante. L'eau s'évapore des océans. Une partie se condense et précipite sur l'océan, une autre est transportée sur la terre sous forme de pluie ou de neige. Sur terre, ces précipitations entretiennent la présence des glaciers, remplissent les cours d'eau et humidifient les sols. Une partie de cette eau rejoint la mer, tandis que le reste s'évapore du sol ou des cours d'eau pour précipiter de nouveau... (cf. le chapitre de Ghislain de Marsily dans cette partie et le schéma page suivante) L'évaporation au niveau du sol s'effectue principalement *via* la transpiration des plantes et dépend beaucoup du type de végétation. Une forte modification du couvert végétal (déforestation, culture intensive...) peut entraîner un changement sensible du climat local.

L'eau à l'état gazeux, la vapeur d'eau, est toujours présente dans l'air qui nous environne. Cette présence se révèle quotidiennement, lors de la formation de buée sur les vitres en hiver, par exemple.

À une température donnée, la quantité de vapeur d'eau dans un volume donné ne peut dépasser une valeur maximale. Cette valeur correspond à la saturation, à une humidité

relative de 100 %. Si la température diminue, il y a condensation. C'est ce qui se passe lors de la formation de buée sur une surface froide : l'air se refroidissant à son contact, la saturation est atteinte et de la vapeur d'eau se condense. Lorsqu'un récipient fermé contient un peu d'eau, au bout d'un temps assez long, la quantité de vapeur d'eau présente dans ce récipient correspond à la saturation. Il y a équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse. L'évaporation d'une quantité d'eau est immédiatement compensée par la condensation d'une quantité égale de vapeur. Il y a en moyenne autant de MOLÉCULES d'eau qui vont du liquide au gaz que de molécules allant du gaz au liquide.

La vapeur d'eau est inodore et incolore. Au-dessus d'une casserole qui bout, le panache blanc que l'on voit n'est pas de la vapeur mais est constitué de minuscules gouttelettes d'eau. Celles-ci se forment lorsque l'air humide et très chaud qui s'élève au-dessus de la casserole se refroidit, ce qui conduit à la condensation de la vapeur d'eau. Lorsqu'il fait très froid, notre souffle génère du brouillard. L'air que l'on souffle est toujours humidifié par nos poumons, mais la présence de vapeur d'eau n'est visible que lorsqu'il fait très froid. Il y a alors suffisamment de vapeur d'eau qui se condense pour que les gouttelettes formées soient observables.

L'évaporation et la condensation mettent en jeu des quantités importantes d'ÉNERGIE. L'évaporation absorbe de l'énergie alors que la condensation en libère.

L'évaporation absorbe de l'énergie, c'est-à-dire que l'eau prend de l'énergie au milieu



Un récipient métallique poli (timbale, carafe de cantine...) rempli d'eau très froide, avec des glaçons, fait apparaître de la buée, des gouttes d'eau sur sa partie extérieure. Ces gouttes d'eau résultent de la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air.





On place un ventilateur à une cinquantaine de centimètres d'un thermomètre. On remplit un brumisateur (lave vitres, etc.) d'eau tiède ou chaude. Si l'on vaporise cette eau dans le courant d'air du ventilateur, la température indiquée par le thermomètre baisse. Ainsi, bien que l'eau vaporisée soit chaude, l'énergie thermique absorbée lors de l'évaporation est suffisamment importante pour abaisser la température. On peut également vaporiser cette eau chaude sur sa peau (dos de la main par exemple).

qui l'entoure pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. Lorsque l'on fait bouillir de l'eau sur une cuisinière, cette énergie provient de la combustion du gaz (ou autres). Lorsqu'une gouttelette d'eau en suspension dans l'air s'évapore, elle prend l'énergie à l'air qui l'entoure. Cet air perd de l'énergie thermique (de la chaleur), c'est-à-dire que sa température baisse. Ce phénomène mis en évidence dans l'expérience ci-dessus est également présent dans la nature. Les gouttes de pluie qui tombent d'un nuage peuvent, durant leur chute, traverser de l'air plus sec et alors s'évaporer. Cette évaporation refroidit l'air ambiant qui devient plus dense et donc se met à descendre. Ces mouvements descendants d'air existent à l'intérieur et au voisinage des orages, et peuvent être très violents et dangereux, notamment pour les avions.

Pour évaporer un gramme d'eau, il faut fournir environ six fois plus d'énergie que pour chauffer ce gramme d'eau de 0 °C à 100 °C. L'importance de l'énergie thermique

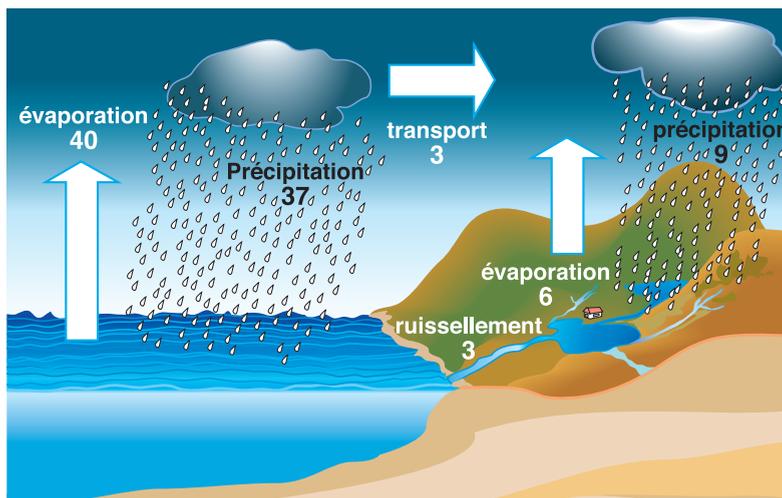
absorbée lors de l'évaporation est perceptible lors d'expériences banales. Lorsqu'on est mouillé, la sensation de froid est plus forte que lorsqu'on est sec à cause de l'évaporation de l'eau sur la peau. L'eau contenue dans une gourde poreuse (faite en cuir, en tissu...) est rafraîchie grâce à l'évaporation de l'eau qui humidifie les parois.

L'évaporation absorbe de l'énergie et la condensation, par symétrie, en libère.

Orages et cyclones sont des phénomènes météorologiques dans lesquels l'énergie dégagée par la condensation de la vapeur d'eau joue un rôle majeur. À l'origine, il y a un phénomène de convection d'air humide. Cet air se refroidit en s'élevant dans l'atmosphère et, lorsque la saturation est atteinte, la vapeur d'eau se condense pour former des nuages (cf. la photo p. 118, en haut), puis éventuellement de la pluie. Cette condensation libère de l'énergie, ce qui réchauffe l'air, diminue sa MASSES VOLUMIQUES et donc augmente l'intensité de la convection. La convection s'auto-amplifie et

peut donner naissance à des nuages d'orage qui peuvent atteindre une dizaine de kilomètres de hauteur (cf. la photo p. 118, en bas).

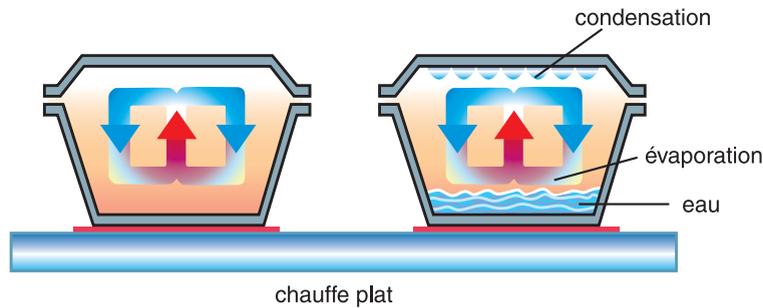
Lorsque la vapeur d'eau commence à se condenser dans l'atmosphère, elle forme



Représentation schématique du cycle de l'eau. Les flux d'eau sont exprimés en unités de $10^{13} \text{ m}^3/\text{an}$, $10^{13} \text{ m}^3/\text{an}$ correspondant à environ deux cents fois le débit du Rhône, ou encore, à deux fois celui de l'Amazone.



Sur un chauffe-plat, on dispose deux plats identiques, en verre et avec leur couvercle. Attention : pour éviter que la dilatation des gaz ne fasse exploser les récipients, les couvercles doivent pouvoir se soulever ou rester très légèrement ouverts. Dans l'un des récipients, le fond est recouvert d'eau (quelques millimètres suffisent). Après quelques minutes, des gouttes d'eau se forment sur le couvercle. La température du fond des deux plats est identique, car ils sont posés sur le même chauffe-plat ; qu'en est-il de la température des couvercles ? Une mesure avec un thermomètre ou un simple toucher permet de constater que la température du couvercle est plus élevée pour le récipient contenant de l'eau que pour l'autre. Dans les deux cas, la convection transporte de l'énergie thermique du fond vers le couvercle. Mais dans le récipient contenant de l'eau, il y a également transport de vapeur d'eau qui s'évapore au fond et se condense sur le couvercle. Cette condensation apporte un supplément d'énergie thermique au couvercle qui se traduit par une température plus élevée.



de toutes petites gouttes d'eau d'environ 10 μm de diamètre (10 micromètres, c'est-à-dire dix millièmes de mètre ou encore 0,01 mm). Ces gouttes sont suffisamment petites pour rester en suspension dans l'air et former un nuage. Elles diffusent efficacement la lumière solaire, ce qui rend les nuages si blancs à leur sommet. Lorsque la densité des gouttes à l'intérieur des nuages augmente, elles entrent de plus en plus fréquemment en collision, s'agglomèrent et grossissent. Si les gouttes atteignent un diamètre de 100 μm environ (0,1 mm), elles commencent à tomber et continuent à grossir en s'agglomérant aux gouttes d'eau rencontrées dans leur chute. Les gouttes de pluie éclatent du fait de leur

vitesse lorsqu'elles deviennent trop grosses ; le diamètre des gouttes de pluie est en général compris entre 0,5 mm (bruine) et 5 mm.

Climat sec, climat humide

La répartition géographique de la végétation naturelle dans les tropiques est extrêmement contrastée (cf. p. 117). Les régions équatoriales qui s'étendent de 10° sud à 10° nord sont couvertes de forêts très denses qui prospèrent dans un climat chaud et humide. En s'éloignant de l'équateur, on trouve entre 20° et 30° de latitude nord et sud des déserts, de la steppe désertique ou de la savane sèche. Dans l'hémisphère Nord, ce sont le Mexique,



Lorsque l'on projette de fines gouttes d'eau sur une vitre avec un vaporisateur (tel que ceux utilisés pour laver les vitres), on voit d'abord que la vitre passe de transparente à translucide : les petites gouttes diffusent la lumière et sont immobiles sur la vitre. Si l'on continue la vaporisation, ces gouttes se regroupent pour en former de plus grosses, puis certaines, devenues très grosses, se mettent à glisser sur la vitre et à tomber, comme des gouttes de pluie. On a ainsi une analogie avec ce qui se passe dans un nuage.

l'Arizona, le Sahara, le désert d'Arabie, l'Iran, le Pakistan, le désert de Gobi en Chine, et, dans l'hémisphère Sud, l'Australie et le sud de l'Afrique. Pourquoi une telle répartition géographique ? Pourquoi passe-t-on si brutalement d'un climat très humide à un climat très sec vers 20° de latitude nord et sud ? Nous allons fournir une explication à partir des différents phénomènes physiques présentés précédemment.

Les régions tropicales sont celles qui reçoivent le plus d'énergie solaire et qui sont les plus chaudes. Dans ces régions, la convection atmosphérique est intense. Elle est à l'origine de la cellule de Hadley qui est décrite par une zone d'ascendance au-dessus de l'équateur et par deux zones de SUBSIDENCE vers 30° nord et sud (cf. p. 110). Dans la zone d'ascendance (également appelée « zone de convergence intertropicale »), l'air chaud monte et, comme la pression diminue, se refroidit. La vapeur d'eau se condense et ainsi se forment de gros cumulo-nimbus, qui peuvent, comme nous l'avons vu, atteindre plus de 10 km de haut et génèrent des pluies très importantes. Sur mer, cette région est bien connue des marins qui l'ont surnommée « pot au noir ». Leurs bateaux peuvent rester encalminés plusieurs jours dans cette région, sous un déluge d'eau et en proie à des vents faibles et changeants. Cette zone d'ascendance n'est pas située en permanence à l'équateur géographique, mais se déplace avec les saisons, avec l'ensoleillement maximal. Elle se déplace au nord pendant l'été boréal (juin-août) et au sud pendant l'été austral (décembre-février). Sur les océans, cette migration est réduite à cause de la forte inertie thermique, le vent

mélangeant l'eau sur plusieurs dizaines de mètres. Sur Terre, cette zone d'ascendance suit davantage la position du Soleil, et son passage correspond à la saison des pluies.

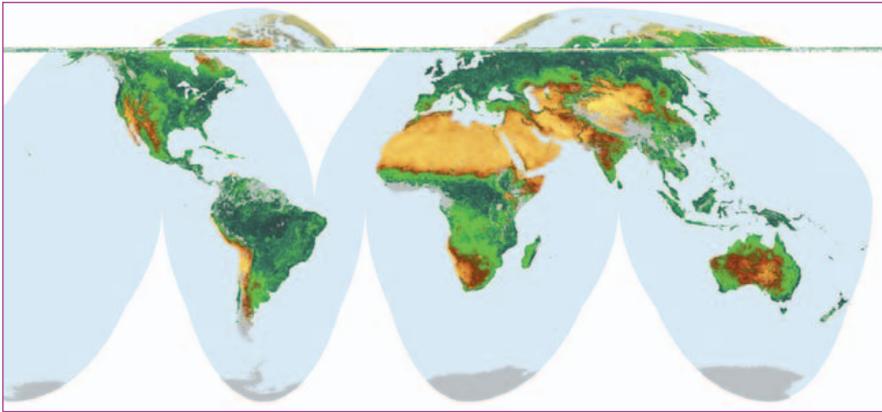
L'air qui s'élève dans la zone de convergence intertropicale se refroidit ; de la vapeur d'eau se condense et une partie de cette eau est éliminée sous forme de pluie. Au fur et à mesure que l'air s'élève en altitude, il y reste de moins en moins de vapeur d'eau. Une fois en altitude, l'air s'éloigne ensuite de l'équateur et va descendre dans les régions de subsidence situées aux environs de 30° nord et sud. Lors de cette descente, la température de l'air augmente du fait de l'augmentation de pression, interdisant ainsi toute possibilité à la vapeur de se condenser et de donner naissance à de la pluie. D'où les zones désertiques situées dans ces régions. Comme la zone d'ascendance, la zone de subsidence se déplace avec les saisons.

Un petit changement de ces déplacements dû à une modification aléatoire de la circulation générale atmosphérique peut avoir des conséquences dramatiques pour les zones à la limite des déserts, comme au Sahel dans les années 1970 à 1985.

Les zones de subsidence entraînent une valeur de la pression au sol plus élevée que la moyenne, d'où la présence d'une ceinture de haute pression (anticyclone) tout autour du

La mousson indienne d'été. L'air s'élève au-dessus du continent indien surchauffé, générant des pluies importantes. L'aspiration d'air crée des vents d'ouest en est sur l'océan Indien.





Répartition géographique de la végétation naturelle. On remarque les régions désertiques, situées de part et d'autre de la bande équatoriale dont la végétation est dense et luxuriante.
© CNES/NASDA

globe, vers 30° nord et sud. Dans l'Atlantique Nord, c'est le fameux anticyclone des Açores. Nous venons de voir que les zones de subsidence sont des régions sans pluie et sans nuage, ce qui justifie qu'en été, en France, on soit si attentif à la présence de cet anticyclone pour avoir des vacances ensoleillées.

Cet effet d'assèchement est également présent derrière les grandes chaînes de montagnes (les Andes, les Rocheuses, l'Himalaya). L'air qui se refroidit en montant pour franchir ces montagnes donne naissance à des précipitations. Une fois la montagne franchie, l'air descend, s'échauffe et le peu de vapeur d'eau qui reste ne peut plus se condenser pour former des pluies. Lorsque la direction des vents est toujours la même, un côté du massif montagneux est très humide, tandis que l'autre est très sec. C'est le cas du massif des Andes toujours soumis au flux de vents d'ouest venant du Pacifique. Le franchissement d'un massif montagneux par de l'air peut également produire un réchauffement important (c'est, par exemple, le vent appelé « foehn » dans les Alpes). Nous avons vu précédemment que l'air humide se refroidit avec l'altitude d'environ 5 °C/km, tandis que l'air sec subit un changement de température d'environ 10 °C/km. Ainsi, si de l'air humide franchit une montagne de 1 000 m de haut, cet air

se refroidira de 5 °C pendant son ascension, mais se réchauffera de 10 °C lors de sa descente, puisqu'il est maintenant sec, d'où un réchauffement final de 5 °C !

Circulation générale

Dans les mouvements de l'air que nous avons décrits jusqu'à présent, nous n'avons pas pris en compte le fait que, comme toutes les autres planètes, la Terre tourne sur elle-même.

Or cette rotation a une conséquence surprenante, démontrée au début du XIX^e siècle par Gustave Coriolis : tout corps qui se déplace à la surface de la Terre subit une force qui dépend de sa latitude (nulle à l'équateur, maximale aux pôles) et de sa vitesse de déplacement par rapport à la Terre (cette force augmente avec la vitesse). Dans l'hémisphère Nord, les corps sont déviés vers la droite par rapport à leur mouvement, tandis que, dans l'hémisphère Sud, ils sont déviés vers la gauche.

Cette découverte fut largement popularisée à travers le pendule que le physicien français Léon Foucault fit installer en 1851 sous la coupole du Panthéon et que de nombreux Parisiens vinrent voir. Le pendule, au lieu de suivre toujours la même trajectoire, tourne légèrement sur lui-même à cause de la rotation terrestre.



Par beau temps, l'absorption du rayonnement solaire entraîne une augmentation de la température de surface. Les basses couches de l'air, réchauffées, donnent naissance à des mouvements convectifs, dont ces nuages de type cumulus sont la signature.

© Jean-Yves Pontailler/CNRS

Un tel pendule est, par exemple, visible au palais de la Découverte, à Paris.

Dès que l'on s'éloigne de l'équateur, la force de Coriolis joue un rôle clef dans la circulation atmosphérique et océanique. En Europe de l'Ouest, par exemple, le climat est dominé par l'influence des dépressions qui nous viennent de l'océan Atlantique ; l'existence et l'évolution de ces dépressions sont directement liées à la force de Coriolis. Si caractéristique des moyennes latitudes, cette circulation atmosphérique ne sera pas abordée ici. Nous ne nous intéresserons qu'aux régions équatoriales et aborderons rapidement les liens entre la circulation de Hadley, déjà évoquée, et les vents d'alizés.

Par rapport à la circulation de Hadley, telle que nous l'avons présentée précédemment, la force de Coriolis a pour effet, dès que l'on s'éloigne de l'équateur, de dévier l'air vers la droite dans l'hémisphère Nord, vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

Pour illustrer les raisons physiques de ces déviations, nous allons utiliser l'analogie avec une figure connue des danseurs et des patineurs : l'artiste tourne d'abord lentement

Dans la zone de convergence inter-tropicale, l'extension des mouvements convectifs peut être très importante et se traduire par des nuages de type cumulo-nimbus qui atteignent une dizaine de kilomètres de hauteur.

© Nicolas Metz/CNRS



sur lui-même, membres écartés, puis se met à tourner de plus en plus vite au fur et à mesure qu'il se ramasse sur lui-même. Cette augmentation de la vitesse de rotation est due à la conservation du MOMENT CINÉTIQUE et a un lien direct avec l'existence de la force de Coriolis (voir aussi le chapitre Les mouvements de la Terre, page 35). Si vous n'êtes ni danseur ni patineur, vous pouvez essayer de réaliser cette expérience assis sur une chaise pivotante.

Appliquons ce principe à l'atmosphère. Avec la circulation de Hadley, en altitude, l'air va des régions équatoriales vers les régions de subsidence. Les régions de subsidence, situées vers 30° nord et sud, sont plus près de l'axe de rotation de la Terre que les régions équatoriales. Quand l'air qui s'est élevé au-dessus de l'équateur se dirige vers les régions de subsidence, il se rapproche donc de l'axe de rotation de la Terre.

On peut alors faire l'analogie avec le danseur qui se ramasse sur lui-même et tourne de plus en plus vite. Si l'air tourne à la vitesse de la Terre à l'équateur, l'air tournera plus vite que la Terre, en altitude, au-dessus des régions de subsidence. Comme la Terre tourne d'ouest en est, ces forts vents d'altitude qui tournent plus vite que la Terre

se déplacent également d'ouest en est par rapport à la Terre. On observe effectivement des vents d'environ 200 km/h dans ces régions, vents qui font que le trajet en avion pour aller de l'Europe vers les États-Unis ou de Chine vers l'Europe est environ une heure plus long que le vol du retour.

Près du sol, l'air revient des zones de subsidence vers l'équateur et nous sommes dans la situation symétrique de la précédente : lorsqu'il se dirige vers l'équateur, l'air s'éloigne de l'axe de rotation de la Terre, et donc sa vitesse de rotation va diminuer. Les vents se dirigent donc vers l'équateur en étant très fortement déviés vers l'ouest. Ce sont les vents d'alizés, assez forts, très réguliers et très appréciés des navigateurs. Utilisés par Christophe Colomb lors de son périple vers Cuba, ils ont ensuite largement servi aux navires de commerce (d'où le nom anglais des alizés : *trade winds* ou « vents du commerce »). Aujourd'hui, on en tire parti pour traverser confortablement l'Atlantique en bateau à voiles. Nous avons vu que la circulation de Hadley se déplaçait avec les saisons. La région des alizés accompagne ce mouvement : elle se déplace au nord pendant l'été boréal, au sud pendant l'été austral.

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

Qu'est-ce que El Niño ? Quelle est son influence sur le climat de la Terre ?

L'utilisation du nom El Niño (l'Enfant-Jésus en espagnol) provient, à l'origine, d'une modification de la circulation océanique le long de la côte du Pérou, qui débute vers Noël. Un courant froid est en général présent le long de cette côte. Il est alimenté par des remontées d'eau profonde riche en nutriments, ce qui rend la région très poissonneuse. Parfois (environ deux à trois fois par décennie), ces remontées d'eau sont réduites ou supprimées par une modification de la circulation atmosphérique, ce qui a pour effet direct de réduire dramatiquement la quantité de poissons. Au début du XX^e siècle, on s'aperçut que cette variation de la température de l'océan était associée à une variation climatique qui affecte tout l'océan Pacifique tropical, mais aussi l'océan Indien, l'Indonésie, l'Australie et une large part du continent américain. Le régime des pluies est alors totalement perturbé : des régions arides

sont inondées, d'autres humides souffrent de sécheresse, des cyclones apparaissent dans des régions habituellement épargnées. Par extension, on appelle maintenant El Niño cette importante variation naturelle du climat qui affecte une large partie de la planète deux à trois fois par décennie.

Pourra-t-on prévoir dans le futur le temps qu'il fera quinze jours à l'avance ?

La prévision météorologique déterministe du temps est fondée sur l'utilisation de modèles numériques qui résolvent les équations de base régissant la circulation atmosphérique. Ces modèles sont initialisés avec l'état supposé de l'atmosphère à un instant donné, puis calculent l'évolution de l'atmosphère pour les jours suivants.

Mais un tout petit changement de l'état initial de l'atmosphère, par exemple dû à une petite erreur de mesure, peut modifier totalement le temps prévu quelques jours plus tard. En effet, l'atmosphère est un système chaotique : en l'occurrence, suivant l'exemple donné par le météorologue américain Edouard Lorenz, un battement de papillon en un point du globe peut entraîner (ou supprimer !) un cyclone en un autre point plusieurs jours plus tard. Actuellement, on estime que la prévision déterministe quinze jours à l'avance est un objectif que l'on peut atteindre dans l'avenir, mais qu'il sera difficile à dépasser. Ces prévisions permettront de donner les caractéristiques principales du temps prévu, mais non des informations détaillées telles que l'heure, l'emplacement et l'intensité précises des précipitations prévues. Sans oublier que certains phénomènes particuliers et parfois violents (comme les tempêtes de décembre 1999) sont très difficiles à prévoir même quelques jours à l'avance, du fait de leur petite taille et de leur très rapide croissance.

Qu'appelle-t-on « microclimat » ?

C'est un climat spécifique à une petite région. Cette spécificité provient généralement d'une situation géographique particulière : relief, orientation par rapport aux vents dominants, situation par rapport aux courants marins.

Comment une éruption volcanique peut-elle modifier le climat de la Terre ?

Lors d'une éruption volcanique, d'importantes quantités de poussière sont émises dans l'atmosphère (cf. le chapitre précédent). Une grande partie de ces poussières retombe assez rapidement mais, notamment lors des très grosses éruptions, une partie monte dans la haute atmosphère, jusqu'à la stratosphère, où elle peut demeurer pendant quelques années. Ces poussières réfléchissent le rayonnement solaire et cet effet d'ombre refroidit la surface de la Terre. Elles sont également responsables d'un effet de serre, mais celui-ci est plus faible et ne compense pas ce refroidissement.

En quoi l'étude de la glace des pôles contribue-t-elle à la connaissance du climat de la Terre ?

Les glaciers des régions polaires sont constitués de glace accumulée pendant des dizaines, parfois des centaines de milliers d'années. En effectuant des carottages et en analysant finement les propriétés physico-chimiques de cette glace, on en déduit certaines caractéristiques du climat au moment de la formation de la glace : propriétés de l'air (température, concentration des différents gaz...), niveau des mers, circulation atmosphérique *via* le transport des poussières... Actuellement, le plus profond de ces forages est celui récemment réalisé à Dome C, en Antarctique. Profond de 3 260 mètres, il a permis de reconstituer l'évolution du climat des huit cent mille dernières années, avec huit transitions entre périodes glaciaires et interglaciaires. Ces observations ont clairement mis en évidence que le climat n'était pas immuable mais en permanente évolution. D'autre part, on espère qu'en comprenant les changements climatiques passés, nous serons à même de mieux prévoir les éventuels changements futurs.

Bibliographie

Climat d'hier à demain, Sylvie JOUSSAUME, CNRS Éditions, 1993 (nouvelle édition 2000).

Un livre accessible et attrayant, présentant à la fois les caractéristiques principales du climat et leurs évolutions au cours du temps (périodes glaciaires...).

Découvrons la météorologie, Didier RENAUT, Circonflexe, 1997. Un très bon livre d'initiation à la météorologie, c'est-à-dire à l'évolution rapide du temps et à sa prévision.

Combien pèse un nuage ? Ou pourquoi les nuages ne tombent pas. Jean-Pierre CHALON, EDP Sciences, 2002. Un petit livre très réussi qui, à partir des réponses apportées à des questions de bon sens, fait découvrir l'importance du rôle des nuages dans le fonctionnement de l'atmosphère.

Atmosphère, océan et climat, Robert DELMAS, Serge CHAUZY, Jean-Marc VERSTRAETE et

Hélène FERRÉ, Belin/Pour la Science, 2007. En s'appuyant sur un ensemble de schémas pédagogiques de grande qualité, ce livre explique de façon simple mais précise le fonctionnement de l'atmosphère, de l'océan et du climat.

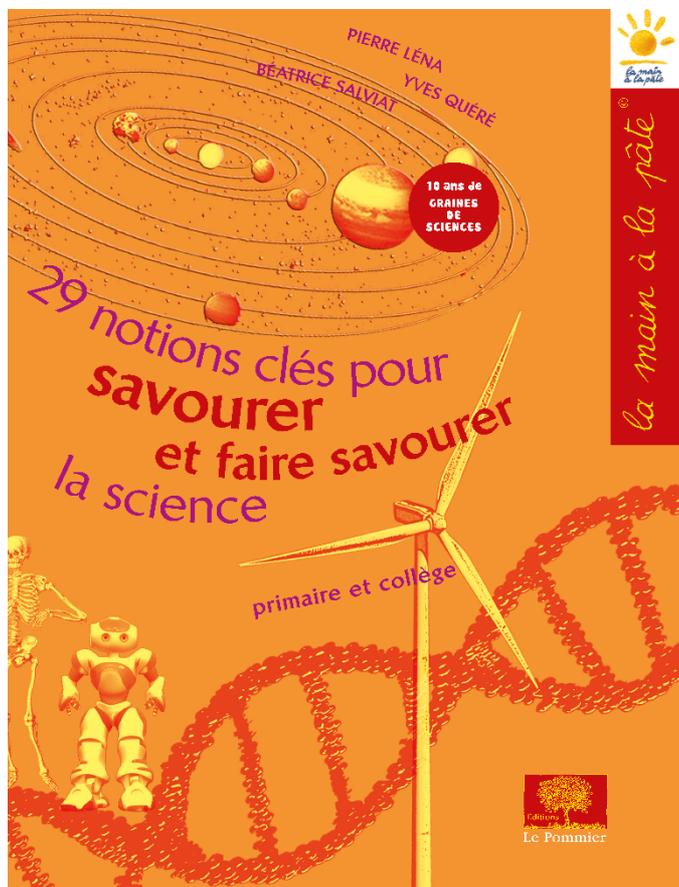
Techniguide de la météo, Jean-Louis VALLÉE, Nathan, 2004. En 243 questions-réponses, ce livre, d'une lecture facile et ludique, balaie les grands thèmes de la météorologie et de la climatologie. Des schémas pédagogiques soignés accompagnent le texte qui réussit à concilier simplicité et précision.

En DVD :

Combien pèse un nuage ?, adapté du livre de Jean-Pierre Chalon et produit par Mille et Une Productions.

C'est pas sorcier, la météo : le bulletin des sorciers, France 3 éditions, 2008.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE