

Presque tout sur le climat

Jacques Deferne



Photo J. Deferne

Avant-propos

Le climat est l'équilibre atmosphérique qui règne en moyenne dans une région donnée. On le ressent par ses variations saisonnières de température, par ses épisodes pluvieux et par les vents qui balaient par moment ladite région.

Il nous semble parfois ressentir des «changements de climat » lorsque nous imaginons que les hivers sont moins froids qu'autrefois ou que certains étés sont particulièrement pluvieux. En réalité, pour définir le climat d'une région, il faut prendre en compte la moyenne des observations faites sur plusieurs dizaines d'années.

Mais ce qui est certain, c'est que les climats qui règnent dans les diverses régions de notre Planète, résultent d'un équilibre extrêmement précaire entre les divers acteurs qui les régissent. Ces acteurs sont principalement la situation géographique, l'ensoleillement, les vents, les courants marin et la subtile composition chimique de l'atmosphère qui conditionne l'effet de serre.

Les climats ont maintes fois changé au cours des millions d'années qui ont rythmé l'évolution de la Terre. Le niveau des mers a varié de plusieurs dizaines de mètres, les températures ont chuté ou, au contraire, augmenté. Des glaciers ont périodiquement envahi tout le Nord de l'Europe puis se sont retirés.

Mais l'Homme n'était pas là pour en rendre compte et, aujourd'hui, nous nous inquiétons, à juste titre, des petites variations climatiques qui semblent nous attendre et qui risquent peut-être de perturber notre environnement artificiellement aménagé par notre technologie.

Nous sommes des hôtes passagers de cette bonne vieille Terre et nous devons nous soumettre à ses sautes d'humeur. Par nos activités industrielles (qui fonctionnent pour notre « bien être »), tels des apprentis sorciers, nous bousculons le subtil équilibre qui règle notre environnement et nous risquons, peut-être, d'en subir un jour les conséquences !

L'étude de la climatologie fait appel à de nombreuses disciplines. C'est une science difficile d'accès. Je ne suis pas climatologue et je n'ai pas la prétention de vous présenter un traité de climatologie. Mais à force de chercher à comprendre comme tout cela fonctionne, je pense que je suis capable de vous transmettre tout ce que j'ai eu plaisir à découvrir.

Bonne lecture, toutes vos remarques seront les bienvenues !

La situation privilégiée de la Terre



La Terre est la seule planète à bénéficier de toutes les conditions nécessaires à l'apparition de la vie :

- *sa masse est suffisamment élevée pour retenir une atmosphère, principalement composée d'azote et d'oxygène, qui filtre les radiations ultraviolettes et atténue les différences de température entre le jour et la nuit,*
- *son juste éloignement du Soleil, combiné avec un certain effet de serre naturel dû à son atmosphère, lui confère une température moyenne de 15°, et maintient la plus grande partie de son eau sous forme liquide,*
- *ses océans fonctionnent comme régulateurs de température et, en absorbant le CO₂ excédentaire, ils stabilisent la composition chimique de l'atmosphère,*
- *son champ magnétique dévie le "vent solaire" dont les particules ionisantes seraient nocives à toute forme de vie.*

Contrairement aux autres planètes, la Terre est aussi vivante sur le plan géologique. La chaleur résiduelle qu'elle renferme est encore suffisante pour déplacer les continents, soulever des chaînes de montagnes et entretenir les phénomènes volcaniques.¹

¹ voir du même auteur "Que savons-nous de notre planète ?"

Les climats changent au cours du temps

Années après années, nous sommes habitués à voir revenir le printemps après l'hiver, à nous réjouir de la chaleur bienfaisante de l'été et nous nous attendons à ce que ce cycle se poursuive indéfiniment. On imagine mal qu'il y a seulement 25'000 ans (un court instant à l'échelle géologique) Genève était recouverte de plusieurs centaines de mètres de glace, qu'il y a 18'000 ans, la rade de Genève commençait tout juste à être libérée des glaces et que le niveau du lac était de 30 mètres plus élevé qu'aujourd'hui. La fin de cette dernière glaciation a provoqué également l'augmentation du niveau des mers de près de cent mètres.

Oui, les climats changent avec le temps pour des raisons que nous commençons à peine à entrevoir. Il y a eu des changements de climat importants à l'échelle des temps géologiques, il y en a de moindre importance au cours de la période historique.

A l'apogée de l'empire romain, il semble qu'il faisait plus chaud qu'aujourd'hui et que les glaciers étaient tout aussi en retrait si non plus encore que ce que nous constatons de nos jours. Après un fléchissement des températures, on trouve à nouveau une période chaude entre 950 et l'an 1'350. C'est au cours de cette dernière période que les Vikings ont colonisé le Groenland où l'agriculture était alors prospère. Le climat était alors plus chaud que celui que nous connaissons aujourd'hui. Puis on assiste à un refroidissement constant à partir de la fin du 16ème siècle jusqu'eu vers 1800 environ, suivi enfin d'une longue remontée des températures jusqu'à aujourd'hui, momentanément interrompue par un petit refroidissement aux alentours de 1850. Mais ces variations historiques ne sont que de minuscules fluctuations en regard de l'alternance des épisodes glaciaires et interglaciaires qui ont marqué le dernier million d'années de notre planète.

Comment le sait-on ?

Pour la période historique l'avance ou le recul des glaciers sont des indices intéressants. On peut aussi examiner les dates de début des vendanges soigneusement consignées dans les registres officiels. Elles nous renseignent sur l'évolution des températures estivales. Les périodes de famine indiquent une rigueur exceptionnelle des hivers et, pour les périodes récentes, on a les données des relevés d'observations de l'état du temps.

Les cernes de croissance des arbres enregistrent le climat.

La **dendrochronologie** est la méthode de datation des cernes des arbres. En zone tempérée, la montée de la sève au printemps entraîne une croissance vigoureuse et produit des cernes clairs. Vers la fin de l'été, la croissance ralentit et provoque la formation de cernes foncés. Chaque année est caractérisée par un cerne clair et un cerne foncé. La largeur de ces cernes reflète aussi la qualité de l'environnement et nous indique les conditions climatiques que subissait l'arbre au moment de la croissance de ce cerne. Ils sont plus larges lorsque la température est plus élevée et que les précipitations sont plus abondantes. Ils sont étroits lorsque les conditions sont plus rigoureuses.

Dans une même région, les séquences des cernes relevés sur les arbres d'une même espèce sont les mêmes et on peut déterminer précisément l'année de formation de chaque cerne. En comparant les cernes d'un arbre centenaire avec ceux des poutres anciennes des cathédrales, puis des arbres anciens enfouis dans des marécages ou dans des moraines glaciaires, on peut remonter dans le temps et retracer les conditions climatiques sur plusieurs milliers d'années en arrière. La **dendroclimatologie** est donc devenue un complément très intéressant de la dendrochronologie.



Les cernes sont le témoins des conditions climatiques qui régnaient au moment de leur formation.

Un peu plus loin dans le temps

Les glaces du Groenland et surtout de l'Antarctique nous permettent de remonter dans le temps sur plusieurs centaines de milliers d'années. Certains forages ont livré des échantillons de glace vieux de près de 800'000 ans. La glace formée en hiver est un peu différente de celle formée en été. Cela forme des strates saisonnières. En comptant les strates on peut connaître l'âge de formation de la glace. Les bulles d'air et les poussières emprisonnées dans la glace sont des témoins de l'état de l'atmosphère au moment de sa formation. La mesure du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dépend de la température de l'air qui régnait au-dessus de la calotte polaire au moment des chutes de neige. On peut donc retracer dans le temps l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère, dater certaines éruptions volcaniques et reconstituer les climats anciens.

Les sédiments nous renseignent aussi

Les carottes de forages effectués sur le fond des océans fournissent aussi de précieuses indications sur l'évolution des climats. Par diverses méthodes on peut dater les différentes strates qu'on distingue dans les carottes de sondage. On peut mesurer les rapports isotopiques $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ qui nous renseignent sur la température de surface de la mer au moment du dépôt de telle ou telle strate. On peut identifier les strates engendrées par les alluvions terrigènes. On peut aussi identifier celles qui caractérisent les apports glaciaires. L'étude des pollens qu'elles renferment permettent d'identifier les plantes qui les ont produits.

Grâce à ces données, les géologues ont pu identifier dans nos régions quatre périodes glaciaires au cours des 600'000 dernières années. Le tableau ci-dessous montre la succession de ces grandes glaciations.

<i>Les quatre dernières glaciations identifiables dans nos régions</i>			
<i>Glaciation de Günz</i>	<i>-600'000 ans</i>	<i>Période interglaciaire Günz-Mindel</i>	
	<i>-540'000 ans</i>		
<i>Glaciation de Mindel</i>	<i>-480'000 ans</i>		<i>Période interglaciaire Mindel-Riss</i>
	<i>-430'000 ans</i>		
<i>Glaciation de Riss</i>	<i>-240'000 ans</i>	<i>Période interglaciaire Riss-Würm</i>	
	<i>-180'000 ans</i>		
<i>Glaciation de Würm</i>	<i>-120'000 ans</i>		
	<i>-10'000 ans</i>		

Tableau tiré de Wikipedia

La période dite "quaternaire" est donc caractérisée par une alternance de périodes froides et chaudes qui ont engendré une succession de glaciations entrecoupées de périodes interglaciaires.

Nous vivons aujourd'hui dans la période interglaciaire qui a succédé à la dernière glaciation dite de Würm qui a pris fin il y a à peine 10'000 ans.

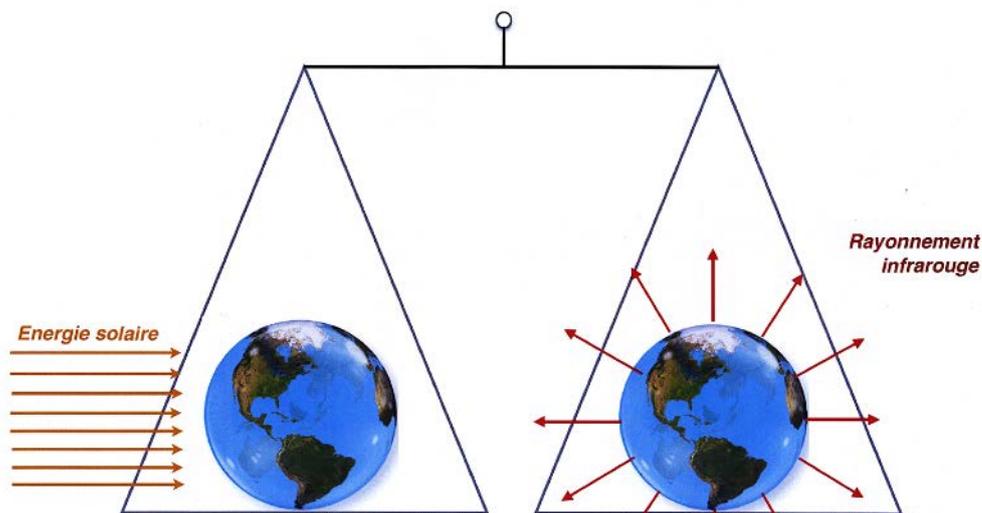
Oui, les climats changent. Mais la Terre compte en millions d'années alors que nous-mêmes ne comptons tout au plus qu'en décennies !

Les protagonistes du climat

Le Soleil, principal moteur du climat

L'énergie solaire nous parvient sous la forme d'un rayonnement comprenant des rayons ultra-violet, de la lumière visible et un rayonnement infrarouge. Le tiers de ce rayonnement est directement réfléchi vers l'espace par les nuages, la neige, les lacs, les océans et les glaciers. La quantité restante est considérable. Elle est en moyenne de 241 watts par mètre carré soit une valeur 4000 fois plus grande que le flux de chaleur interne de la Terre.

Toutefois, la Terre finit par restituer la totalité de l'énergie solaire reçue à l'espace interplanétaire, sous la forme d'un rayonnement infrarouge. L'équilibre entre l'énergie reçue et celle qui est restituée a pour principale conséquence de maintenir la surface de la Terre à la température moyenne de 15°.



La Terre renvoie vers l'espace intersidéral la quasi totalité de l'énergie solaire reçue

Cet équilibre est complexe car les régions proches de l'équateur reçoivent plus de chaleur qu'elles ne peuvent en rayonner alors que les régions polaires sont dans la situation inverse. Pour compenser ce déséquilibre il y a transfert de chaleur des régions équatoriales vers les régions septentrionales par l'entremise des vents dominants, des précipitations et des courants marins.

Mais l'albédo s'en mêle

Le terme albédo signifie en latin « blancheur ». Il exprime la capacité d'une surface à réfléchir la lumière solaire vers l'espace avant qu'elle ne produise ses effets sur la surface du sol. C'est l'effet réfléchissant des surfaces claires comme les nuages, la neige, les glaciers, les lacs et les océans. L'albédo s'exprime en pour cent de l'énergie reçue. Une augmentation de l'albédo implique un refroidissement de la surface de la Terre; une diminution entraîne une augmentation de la température. L'albédo est également un acteur du climat. Il joue donc un rôle important sur la régulation de la température de notre environnement.



Valeur de l'albédo de différentes surfaces	
neige fraîche	70 à 95 %
glaciers	60 %
lacs et océans	5 à 15 %
forêts de sapins	5 %

La neige et les glaciers possèdent un albédo important : ils réfléchissent une partie importante de l'énergie solaire directement vers l'espace.

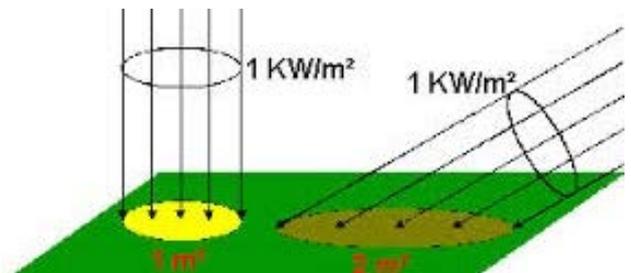
La Terre emprunte momentanément de l'énergie solaire

La Terre emprunte - momentanément - une partie de l'énergie solaire pour maintenir la vie à sa surface, en particulier pour la croissance des végétaux. Cette énergie peut alors être stockée sous forme de bois, de tourbe, de charbon et de pétrole.

Mais, inexorablement, l'énergie dégagée par le pourrissement du bois ou par la combustion ultérieure du charbon et du pétrole, restituera cette énergie à l'espace interplanétaire !

L'énergie solaire est inégalement répartie

La quantité d'énergie solaire reçue dépend de l'angle d'incidence du soleil. Dans les régions équatoriales elle est maximale, proche des pôles elle est très faible. Cela implique un transfert d'énergie des régions chaudes vers les régions froides par le biais des vents et des courants marins. Cette inégalité dans la distribution de l'énergie solaire sur notre planète est donc le moteur qui génère les vents, les cyclones, les précipitations et les courants marins. Elle est donc le principal facteur qui conditionne le climat de chaque région de la planète.



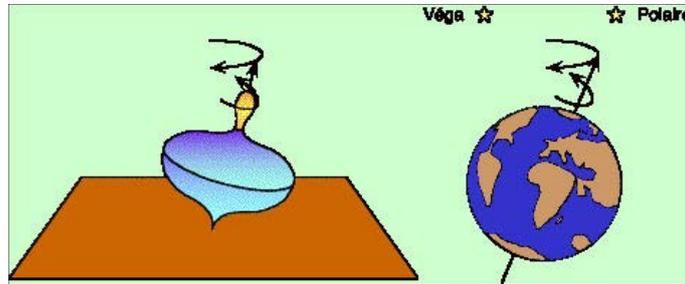
L'intensité de l'ensoleillement dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires

L'inclinaison de l'axe de la terre complique les choses

Si l'inclinaison de l'axe de la Terre était nulle, l'énergie solaire reçue serait constante pour chaque région en fonction de sa latitude et il n'y aurait pas de variations saisonnières. Mais voilà, l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite autour du Soleil est actuellement de $23^{\circ}26'$. Cette inclinaison varie légèrement d'environ 1° tous les 70 ans mais elle reste comprise entre $21,8^{\circ}$ et de $24,4^{\circ}$. Le cycle complet de la variation de l'inclinaison de l'axe de la Terre est d'environ 41'000 ans. La variation de l'obliquité est due aux effets conjoints de l'attraction de la Lune et du Soleil sur une Terre qui n'est pas une sphère parfaite mais qui est un peu aplatie aux pôles.

L'axe de la Terre décrit aussi un cône. On peut comparer la rotation de la Terre à celle d'une toupie : si l'axe de rotation de la toupie est incliné, il va tourner lentement en décrivant un cône. Il en est de même avec l'axe de la Terre qui décrit un cône et en fait la rotation complète en 25'765 années. C'est ce que les astronomes appellent **la précession des équinoxes**.

L'extrémité nord de l'axe de la Terre est actuellement dirigé vers l'étoile polaire mais dans 12'000 ans, cet axe pointera vers Véga dans la constellation de la Lyre.



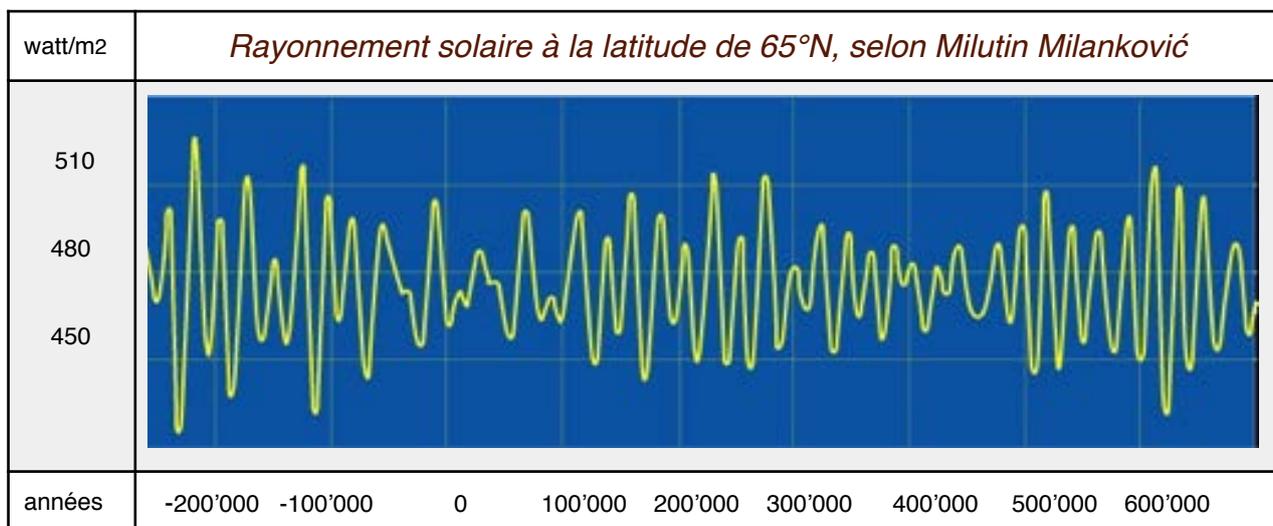
Comme une toupie, l'axe de la Terre effectue un mouvement conique en 25'765 années.

Mais ce n'est pas tout !

La Terre décrit une orbite elliptique dont le Soleil occupe un des foyers. L'excentricité¹ de cette ellipse varie au cours du temps avec une période d'environ 100'000 ans. L'excentricité passe de 0,005 (presque un cercle) à 0,058. Cette variation est due à l'attraction conjointe de toutes les autres planètes.

Milutin Milanković intervient

En 1941, Milutin Milanković, un astronome serbe, met en évidence la relation entre la variation des paramètres des mouvements de la Terre autour du Soleil et la distribution de l'insolation. Il montre que les variations de l'excentricité de l'orbite terrestre, l'obliquité de l'axe terrestre et la précession des équinoxes ont une incidence notable sur l'insolation des zones situées sous les latitudes élevées. La superposition des cycles de 41'000 ans (inclinaison de l'axe terrestre), de 25'000 ans (la précession des équinoxes) et de 100'000 ans (excentricité de l'orbite) lui permet de dessiner la courbe de l'intensité du rayonnement solaire pour la latitude de 65° nord. La fréquence d'apparition des dernières glaciations est tout à fait en accord avec les cycles calculés par Milanković.



¹ l'excentricité d'une ellipse est égale à la distance d'un foyer au centre de l'ellipse divisé par son demi grand axe.

L'effet de serre, un autre acteur important du climat

De même qu'à l'intérieur d'une serre la température est maintenue à une température supérieure à celle du jardin qui l'entoure, divers constituants de la haute atmosphère constituent un voile protecteur qui empêche une partie du rayonnement infrarouge émis par notre planète de s'échapper vers l'espace. Ces constituants sont **les gaz dits à effet de serre**. Ce sont essentiellement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone, le méthane et le protoxyde d'azote. L'effet de serre est donc un phénomène naturel qui permet de retenir une partie de la chaleur du soleil dans notre atmosphère.



Mécanisme de l'effet de serre

Le rayonnement infrarouge émis par la Terre est partiellement absorbé en altitude par les gaz à effet de serre. Ces derniers se réchauffent et renvoient à leur tour un rayonnement infrarouge vers la Terre. C'est l'effet de serre qui permet de maintenir la surface de notre planète une température moyenne agréable de 15°. Sans cet effet de serre, la température tomberait très vite à -18°.

Principaux gaz à effet de serre et importance de leur contribution à cet effet

vapeur d'eau, H ₂ O	60 %	ozone, O ₃	8 %
dioxyde de carbone, CO ₂	26 %	méthane, CH ₄ protoxyde d'azote N ₂ O	6 %

C'est probablement des variations de l'effet de serre qui ont conditionné les changements climatiques importants dans l'histoire géologique ancienne de notre planète en raison de l'abondance des gaz à effet de serre. Ce sont des manifestations volcaniques de grande envergure qui, dans un passé lointain, ont rejeté d'énormes quantités de gaz dans l'atmosphère, modifiant l'effet de serre et entraîné d'importants réchauffements de la planète.

Il pourrait même faire beaucoup plus froid

Mais, sans effet de serre, l'abaissement de la température ne s'arrêterait peut-être pas là. En effet, à -18° de moyenne, les glaciers se développeraient, les lacs et les océans gèleraient. L'albédo augmenterait d'une manière importante et les surfaces blanches réfléchiraient beaucoup plus les rayons solaires. La température pourrait alors descendre jusqu'à -50° et entraîner une glaciation gigantesque.

L'atmosphère, scène des animations climatiques



L'atmosphère est une mince couche gazeuse qui entoure notre planète

L'atmosphère entoure notre planète

Ce que nous appelons le ciel est une mince couche de gaz qui entoure notre planète. Elle est composée principalement d'azote et d'oxygène. On y trouve aussi un peu d'argon, du dioxyde de carbone, ainsi que des traces de néon, d'hélium et, bien sûr, de la vapeur d'eau qui s'ajoute à l'air dans des proportions variant entre 1 et 4 %. Les atomes d'azote et d'oxygène n'aiment pas la solitude. Ils se regroupent deux par deux. On parle alors de molécules de diazote et de dioxygène.



La molécule dioxygène

La composition de l'atmosphère a beaucoup évolué

L'atmosphère primitive de la Terre, il y a plus de 4 milliards d'années, était essentiellement formée de dioxyde de carbone, CO_2 , de diazote, N_2 , de méthane, CH_4 et d'ammoniac, NH_3 . C'est l'apparition des premières bactéries, il y a plus de 3.5 milliards d'années, qui va modifier la composition de cette atmosphère primitive. Ce sont des **cyanobactéries**, sortes d'algues bleues, qui engendrent de curieuses constructions calcaires, les **stromatolithes**. L'activité de ces organismes contribue pour une très large part à l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène. Ils ont participé à l'édification de puissants massifs calcaires et ont ainsi participé à la fixation du CO_2 de l'atmosphère, diminuant ainsi l'effet de serre et abaissant la température de l'environnement.



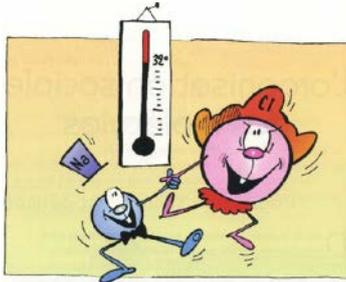
Stromatolites actuels, Shark Bay, Australie

<i>Composition actuelle de l'atmosphère</i>			
<i>Azote, N_2</i>	<i>78 %</i>	<i>Argon, Ar</i>	<i>0,9 %</i>
<i>Oxygène, O_2</i>	<i>20.9 %</i>	<i>Dioxyde de carbone, CO_2</i>	<i>0.04 %</i>

Comportement des molécules

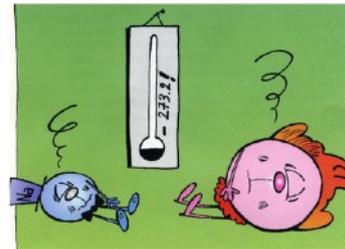
Dans un gaz, les molécules sont agitées et se déplacent en tous sens à des vitesses qui dépendent de la température. A température ordinaire elles se déplacent à la vitesse moyenne d'environ 500 mètres par seconde. Il s'agit d'une vitesse moyenne car certaines se déplacent beaucoup plus rapidement, d'autres plus lentement. Ces vitesses sont toutefois très insuffisantes pour leur permettre d'échapper à l'attraction terrestre. C'est donc grâce à cette attraction que l'atmosphère ne s'échappe pas dans l'espace interplanétaire.

Dans leur course effrénée, les molécules d'air se heurtent constamment les unes aux autres. Le libre parcours des molécules entre deux collisions est de l'ordre du millionième de millimètre à pression ordinaire. Mais avec l'altitude il y a diminution du nombre de molécules par cm^3 et le parcours moyen augmente. A 100 km d'altitude il est de 14 cm et à 300 km de 2'600 m.



L'agitation augmente avec la température

A $-273,2^\circ$ les molécules tombent en léthargie



Pourquoi le ciel est-il bleu ?



Un arc-en-ciel

La lumière solaire est le résultat de la superposition de nombreuses radiations colorées. Ces radiations colorées sont celles que nous observons dans un arc-en-ciel. Les molécules d'air sont sensibles aux couleurs qui correspondent aux courtes longueurs d'onde du spectre solaire, soit le rouge, l'indigo et le violet. Elle absorbent puis rediffusent préférentiellement ces couleurs dans toutes les directions de l'espace. C'est comme si toutes ces molécules devenaient de petites sources lumineuses bleuâtres.

La présence de poussière et de gouttelettes d'eau dans l'atmosphère affaiblit la diffusion de la lumière par les molécules d'air et le ciel devient alors bleu pâle. Plus on monte en altitude, moins il y a de poussière et de vapeur d'eau. Le bleu du ciel devient plus intense. Vue de l'espace, notre planète mérite alors son nom de "planète bleue".



La planète bleue

Le poids de l'atmosphère engendre une certaine pression

Les estimations indiquent que la masse de l'atmosphère est d'environ 5 millions de milliards de tonnes ! Ce poids engendre une certaine pression qui, au niveau de la mer, est d'environ un kg par cm^3 . On a attribué à cette pression une unité pratique, l'**atmosphère**, mais qui n'appartient pas au système international. L'atmosphère est une unité qui correspond à peu près à

une colonne d'eau de 10 mètres. C'est une unité pratique mais un peu imprécise car la pression atmosphérique varie légèrement en fonction des conditions météorologiques.

Aussi les scientifiques utilisent aujourd'hui comme unité de pression le **pascal** [P] qui correspond à la force exercée par un newton¹ sur un mètre carré. C'est une unité très petite, aussi utilise-t-on l'**hectopascal** [hPa] qui correspond à 100 pascal.

On utilise aussi le **bar** qui vaut 1000 hectopascals et qui a l'avantage de correspondre à peu près à une atmosphère. Les météorologues utilisent indifféremment les hectopascals et les millibars pour indiquer la pression de l'air. Au niveau de la mer la pression correspond à peu près à 1013 [hPa] ou, autrement dit, à 1013 millibars.

Nous supportons uniquement le "poids de l'atmosphère" qui est au-dessus de nous. Ce poids se manifeste par une certaine pression qu'on mesure avec un baromètre.

Si, au niveau de la mer, la pression est d'environ 1013 hPa. Au sommet du Mont-Blanc, le "poids de l'atmosphère" est plus faible et la pression n'indique plus que 554 hPa (ou si on préfère, 554 millibars).

Mesure de la pression atmosphérique

Pour mesurer la pression atmosphérique, on utilise un **baromètre**.

Puisque la pression diminue avec l'altitude un baromètre peut mesurer aussi l'altitude à laquelle on effectue la mesure.

L'**altimètre** est donc un baromètre dont l'échelle est graduée en altitude.



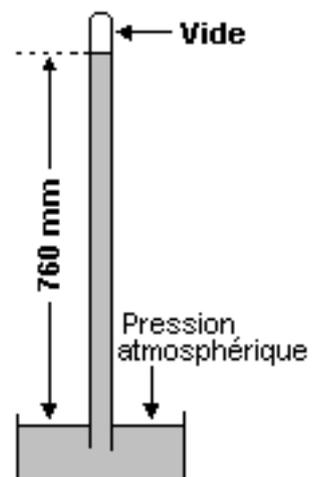
Altimètre de poche

Evangelista Torricelli invente le baromètre



Evangelista Torricelli
(1608-1647)

C'est le physicien italien Torricelli (1608-1647) qui a inventé le baromètre en 1644. Les fontainiers de l'époque avaient constaté qu'une pompe aspirante n'arrivait jamais à élever de l'eau à plus de 10 mètres. L'explication générale était que "la nature a horreur du vide". Pour vérifier ce phénomène, Torricelli choisit le mercure qui est 13.5 fois plus dense que l'eau. Il prend un long tube de verre, le remplit de mercure à ras-bord, bouche le tube avec son pouce, retourne le tube et le plonge dans une petite cuvette remplie de mercure. Il constate que la hauteur du mercure dans le tube est un peu supérieure à 28 pouces, soit 760 mm. Il en déduit que c'est la pression exercée sur la surface de mercure de la cuvette qui fait monter le mercure dans le tube. Torricelli vient d'inventer le baromètre.



Il fait aussi une remarque intéressante : la hauteur dans le tube varie avec le temps qu'il fait et une baisse du mercure dans le baromètre annonce souvent une pluie prochaine.

Il fait aussi une remarque intéressante : la hauteur dans le tube varie avec le temps qu'il fait et une baisse du mercure dans le baromètre annonce souvent une pluie prochaine.

¹ le newton [N] est la force nécessaire pour communiquer à une masse d'un kg une accélération de 1 mètre par seconde. Soumis à l'accélération de la pesanteur, une masse de 1 kg génère une force de 9,8 N.

Il existe d'autres sortes de baromètres.



Baromètre anéroïde

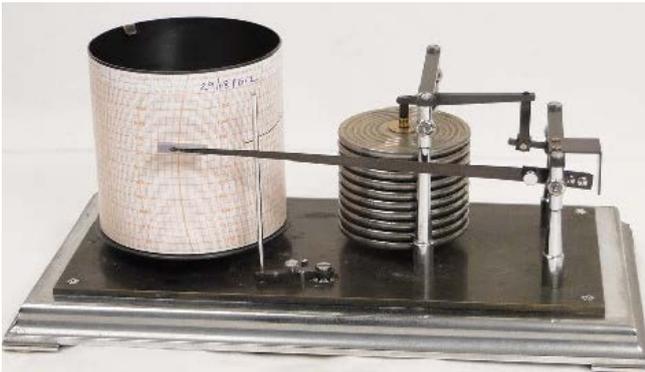
Inventé en 1843 par Lucien Vidie, un ingénieur français, le **baromètre anéroïde**¹ est constitué d'un boîtier circulaire étanche fait de mince tôle ondulée à l'intérieur duquel règne un vide partiel. Pour empêcher que ce boîtier ne s'écrase sur lui-même, les deux parois sont maintenues écartées par un ressort. Le boîtier gonfle ou s'affaisse plus ou moins selon la pression extérieure. Un mécanisme de précision transmet ces variations à une aiguille dont la position indique la valeur de la pression atmosphérique.

Le couvercle de ce godet de crème gonfle avec l'altitude. C'est le principe utilisé dans un altimètre anéroïde.



Le barographe

C'est un baromètre enregistreur. Il est constitué d'un empilement de capsules anéroïdes dont les déformations sont transmises à une aiguille. L'extrémité de l'aiguille est munie d'un bec encreur qui trace les variations de pression atmosphérique sur un tambour qui tourne sur lui-même en une semaine.



Le barographe est un baromètre enregistreur

Structure de l'atmosphère

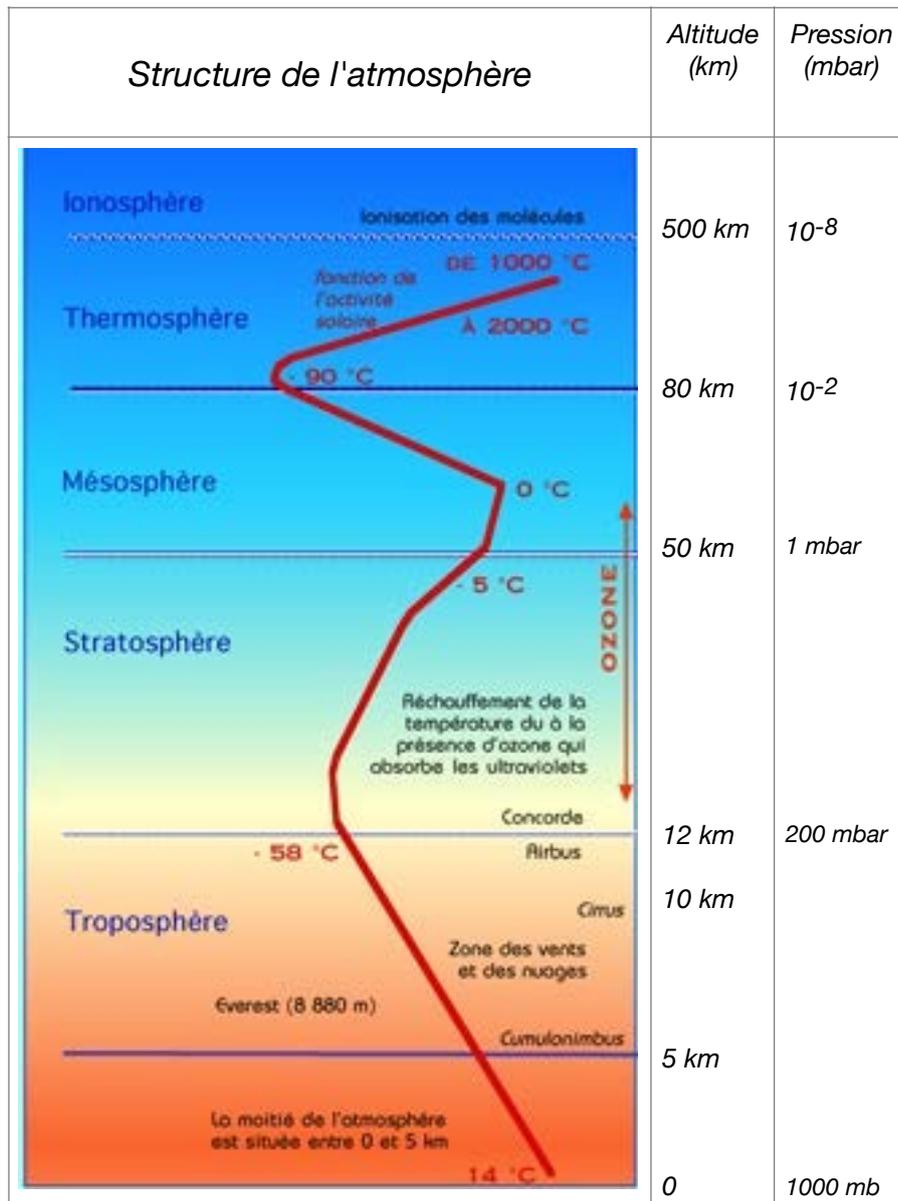
Au fur et à mesure qu'on s'élève en altitude la densité de l'air diminue et les molécules sont de plus en plus éloignées les unes des autres. Cela se produit d'une manière parfaitement continue. Toutefois certains paramètres montrent des inversions de tendance en fonction de l'altitude.

Aussi, les scientifiques ont subdivisé l'atmosphère en plusieurs couches successives en fonction de la façon dont la température évolue dans chacune d'elles.

- une partie basse, **la troposphère** où la température baisse lorsque l'altitude augmente,
- **la stratosphère** qui lui succède où la température augmente avec l'altitude,
- **la mésosphère** où la température baisse à nouveau,
- **la thermosphère** où la température augmente à nouveau

Au delà de la thermosphère on trouve encore **l'exosphère**, une zone de transition avec l'espace interplanétaire.

¹ anéroïde signifie "sans liquide"



La troposphère, royaume des nuages

C'est la partie inférieure de l'atmosphère à l'intérieur de laquelle se déroulent tous les phénomènes météorologiques. La troposphère représente environ 80% de la masse de l'atmosphère. Son épaisseur varie entre 8 et 15 km suivant les saisons et la latitude. La température de l'air y décroît régulièrement avec l'altitude à raison de 6,5° par mille mètres. Elle renferme une quantité importante de vapeur d'eau. C'est là le royaume des vents et des nuages. C'est vers le haut de la troposphère que s'accumulent les gaz dits à effet de serre.

La troposphère se termine par **la tropopause**, une mince couche d'environ 2 km d'épaisseur à l'intérieur de laquelle le refroidissement n'est plus que de 2° par mille mètres. Cette couche fait la transition entre la troposphère et la stratosphère qui lui succède. C'est une des régions les plus froides de l'atmosphère. Sa température, relativement stable, se situe entre -50° et -65°.



Les nuages se développent dans la troposphère

<i>altitude (m)</i>	<i>pression (mbar)</i>	<i>temp. (°C)</i>	<i>Pression et température dans la troposphère en fonction de l'altitude</i>
10000	285	-50,0	
9000	307	-43,5	
8000	357	-37,0	
7000	411	-30,5	
6000	471	-24,0	
5000	541	-17,5	
4000	617	-11,0	
3000	658	-4,5	
2000	794	2,0	
1000	900	8,5	
0	1013	15'0	

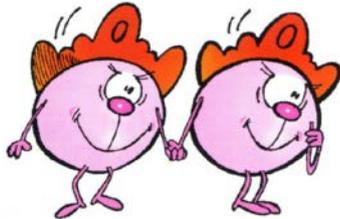
La stratosphère accueille la couche d'ozone

*Au-dessus de la tropopause on rencontre la stratosphère. Sa base fluctue entre 9 et 20 km d'altitude suivant les saisons et la latitude et sa limite supérieure varie entre 40 et 60 km. Elle ne contient que très peu de vapeur d'eau. C'est dans la basse stratosphère que se situe la **couche d'ozone**. La formation de l'ozone par l'absorption des rayons ultraviolets est une réaction exothermique, qui réchauffe la stratosphère et, à l'inverse de ce qui se passe dans la tropopause, la température augmente avec l'altitude et avoisine même le point de congélation de l'eau vers sa partie supérieure. Le Concorde, l'avion supersonique civil volait à 20'000 m. d'altitude, dans la basse stratosphère.*

*Quelques rares nuages apparaissent parfois entre 15'000 et 25'000 mètres d'altitude. Ce sont les "**nuages nacrés**" qui se forment lorsque la température est inférieure à -78°. Ils sont constitués de cristaux de glace qui se forment autour d'aérosols d'acide sulfurique ou d'acide nitrique.*

Qu'est-ce que la couche d'ozone ?

Dans l'atmosphère, les atomes d'oxygènes sont liés deux par deux et forment une molécule qu'on appelle **dioxygène**. Dans la stratosphère, les rayons ultraviolets du soleil peuvent casser cette molécule et libérer des atomes d'oxygène solitaires. Mais ils sont très instables et vont se lier très vite avec un autre atome essulé et reformer une autre molécule de dioxygène. Ou bien encore, ils s'accrochent avec un couple de dioxygène pour former un trio qu'on a baptisé **ozone**.



Deux soeurs Oxygène se lient entre elles pour constituer le couple dioxygène.



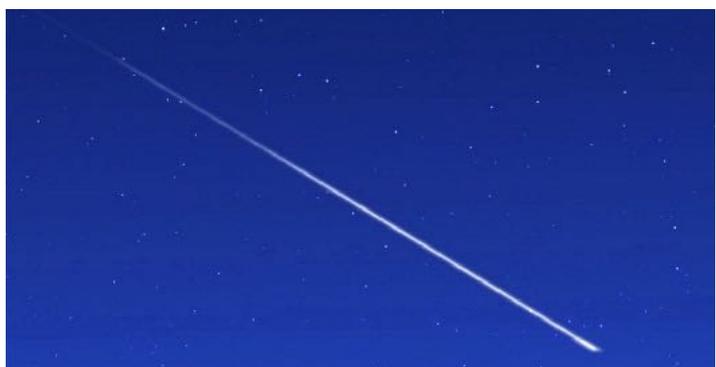
Trois soeurs Oxygène se lient entre elles pour constituer une molécule d'ozone.

Cet ozone se concentre dans la stratosphère à une altitude comprise entre 15 et 20 km. On parle de couche d'ozone. En fait, l'ozone est très dilué et ne représente que quelques dizaines de ppm¹ parmi les molécules de dioxygène. L'ozone s'auto-détruit mais est remplacé en permanence par le processus de formation décrit ci-dessus. Il y a donc un équilibre qui maintient une certaine quantité d'ozone dans la stratosphère. L'ozone constitue un filtre efficace qui arrête une partie importante du rayonnement ultraviolet et protège les organismes vivants de sa nocivité. Cette couche n'a rien à voir avec l'ozone produit par la pollution dans les basses couches de l'atmosphère.

La mésosphère, révélatrice des étoiles filantes

Troisième couche de l'atmosphère, elle s'étend environ de 50 à 80 km d'altitude. La température diminue à nouveau avec l'altitude. La mésosphère est encore mal connue car les avions et les ballons ne peuvent l'atteindre et les satellites circulent à une bien plus haute altitude.

C'est en entrant dans la mésosphère que les satellites et les navettes spatiales subissent l'important échauffement qui caractérise leur retour sur Terre. C'est là aussi que les micrométéorites deviennent incandescentes, s'illuminent et produisent l'effet d'étoiles filantes. **La mésopause**, située vers 80 km d'altitude, constitue la partie supérieure de la mésosphère. C'est la région la plus froide de l'atmosphère. La température y est d'environ -80°



Etoile filante entrant dans la mésosphère

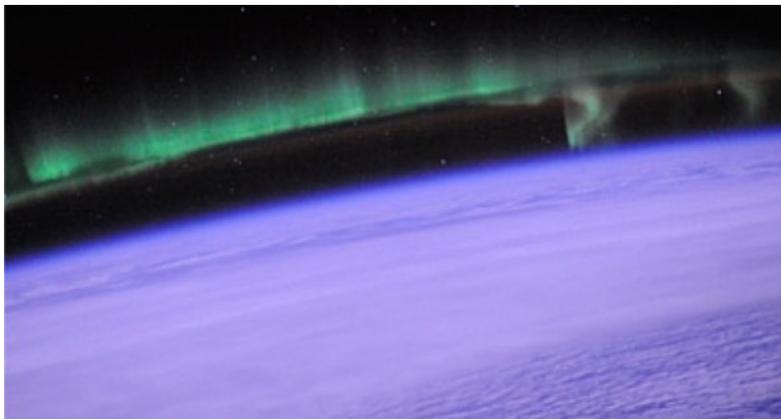
¹ 1 ppm = une partie par million

La thermosphère accueille les satellites et les aurores boréales

Au-dessus de la mésosphère, la thermosphère s'étend jusque vers 500 km d'altitude. L'atmosphère, telle que nous la ressentons, a pratiquement disparu. Les atomes peuvent parcourir de grandes distances avant de heurter un autre atome. Les molécules de dioxygène et de diazote sont dissociées en atomes isolés sous l'action des rayons ultraviolets de courte longueur. C'est une réaction exothermique qui augmente la température jusque à plus de 1'000°. Mais la raréfaction de l'air est telle que cette température n'a plus vraiment la signification qu'on lui attribue dans notre environnement habituel mais c'est plutôt une indication de la vitesse de déplacement propre de chaque atome.

La thermosphère accueille les satellites de basse altitude comme la station spatiale internationale dont l'orbite est située à 431 km de la Terre. Les satellites militaires espions naviguent aux alentours de 140 km d'altitude. Mais ils subissent un freinage qui ne leur confère qu'une durée de vie assez courte.

C'est aussi dans la thermosphère, que les atomes fortement ionisés par les rayons ultraviolets produisent **les aurores boréales**.



*Aurore boréale dans la thermosphère
(Nasa, Johnson Space Center)*



*Aurore boréale
sur Stockholm*

L'exosphère

Au-delà de la thermosphère, on trouve une zone de transition qui conduit petit à petit à l'espace interplanétaire. Ce n'est plus vraiment une couche de l'atmosphère mais une zone parcourue encore par quelques atomes isolés qui, s'ils possèdent une vitesse supérieure à 11,6 kilomètres par seconde, échappent à l'attraction terrestre et s'en vont dans l'espace interplanétaire.

Les nuages, véhicules de l'eau

L'air peut "dissoudre" de l'eau

Chacun peut remarquer la buée qui se dépose sur une bouteille froide sortant du réfrigérateur. L'explication est claire : c'est la vapeur dissoute dans l'air ambiant qui se condense sur cette surface froide. Cela montre que l'air renferme une certaine quantité d'eau sous forme gazeuse.

Nous avons appris, qu'à pression ordinaire, l'eau existe sous forme de glace en-dessous de 0°, sous forme liquide entre 0° et 100° et sous forme gazeuse au-dessus de 100°. L'expérience de la bouteille froide qui se recouvre de buée montre qu'une certaine quantité d'eau peut tout de même exister sous forme de vapeur en dessous de 100°.

Nous savons qu'un liquide peut dissoudre un solide car nous voyons fondre le sucre dans notre café et le sel se dissoudre dans l'eau. Les liquides peuvent absorber un gaz. C'est heureux, car une grande partie du gaz carbonique que nous produisons est absorbée par les eaux des océans.

L'air, quant à lui, peut absorber une certaine quantité d'eau. Sans cette propriété, la lessive ne sécherait pas !

Cette "certaine quantité d'eau" est variable et dépend de la température ambiante. L'air chaud peut absorber une plus grande quantité d'eau que l'air froid. Le petit tableau ci-dessous montre la quantité maximum d'eau que l'air peut absorber selon sa température et à pression ordinaire du niveau de la mer.

Absorption maximale d'eau par l'air suivant sa température*			
temp. [C°]	gr/m ³	temp. [C°]	gr/m ³
-10°	2.2	15°	12.8
-5°	3.3	20°	17.3
0°	4.7	25°	23.0
5°	7.8	30°	30.0
10°	9.4	40°	51.0

Cette quantité maximale est indiquée sur un hygromètre par la graduation 100 %. Mais, de même que le café n'est que rarement saturé de sucre, de même l'air ambiant ne renferme que rarement la totalité de l'eau qu'il peut absorber pour une température donnée. On peut avoir de l'air qui ne renferme que la moitié de sa capacité maximale d'absorption. En ce cas, l'hygromètre indiquera 50% d'humidité relative. On dit habituellement "humidité relative" pour montrer que cette valeur est relative à la quantité maximum d'eau que l'air peut absorber à la température considérée. On dit aussi "taux d'humidité" ou même, tout simplement, "humidité".

L'humidité relative dépend donc de deux valeurs : d'une part, la quantité absolue d'eau que contient l'air, d'autre part, la température.

Température, humidité relative et quantité d'eau dans l'air

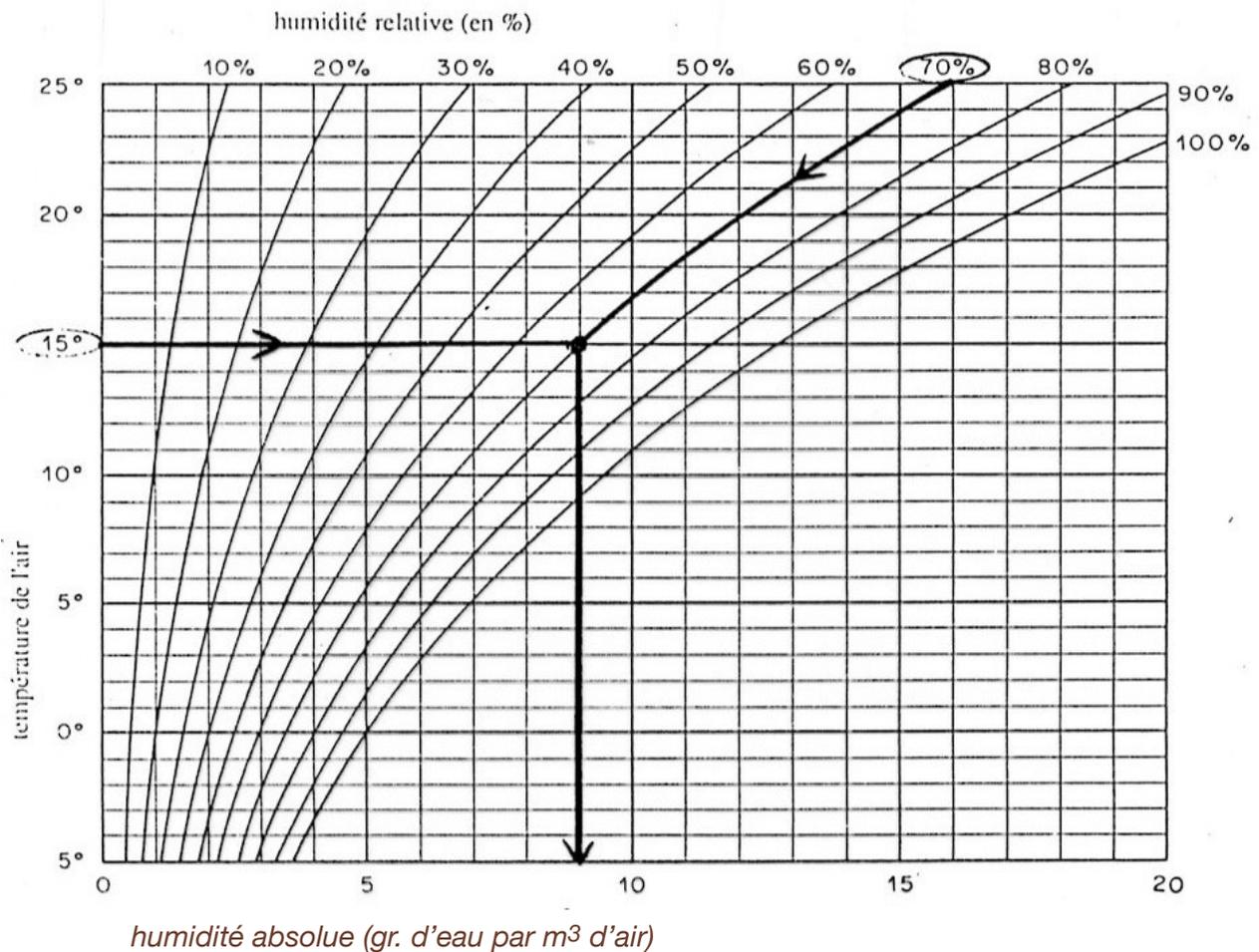
A pression ordinaire, nous sommes en présence de trois grandeurs¹ variables qui dépendent toutes les unes des autres :

- quantité absolue d'eau dans l'air,
- température de l'air,
- humidité relative.

Des expressions mathématiques complexes permettent de calculer une de ces valeurs lorsqu'on connaît les deux autres, mais il est plus commode d'utiliser le diagramme ci-dessous.

Son emploi est simple: l'échelle verticale indique la température de l'air, l'échelle horizontale la quantité d'eau présente dans l'air, exprimée en grammes par mètre cube et les courbes obliques indiquent le pourcentage d'humidité relative.

Exemple : le thermomètre indique 15°, l'hygromètre 70%.
quelle est la quantité d'eau contenue dans l'air ?



On cherche le point de rencontre entre la courbe 70% et la ligne horizontale correspondant à 15°. A partir de ce point on suit la ligne verticale vers le bas et on lit la teneur en eau de l'air, soit 9 gr. de vapeur d'eau par m³ d'air.

¹ Pour simplifier les explications, nous ne tenons pas compte ici de l'effet de la pression atmosphérique !

L'hygromètre à cheveux



C'est Horace-Bénédict de Saussure qui, le premier, a étudié l'hygrométrie au XVIII^e siècle. Il a inventé l'hygromètre à cheveux dont les versions modernes sont encore en usage courant aujourd'hui et il a défini également l'échelle hygrométrique exprimée en pour-cent de la saturation maximum pour une température donnée.

Cet hygromètre est basé sur la propriété qu'ont les cheveux blonds dégraissés de s'allonger de 2.5 % quand l'hygrométrie passe de 0 à 100%. L'hygromètre à cheveux d'aujourd'hui est un appareil simple et peu coûteux mais dont la précision laisse à désirer ($\pm 5\%$).

Hygromètre à cheveux actuel



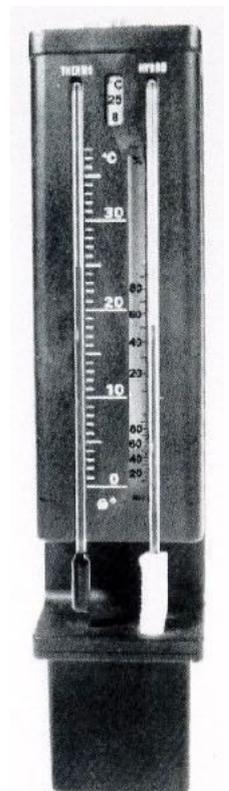
Hygromètre à cheveux inventé par H.B. de Saussure, modèle de laboratoire, construit à Genève en 1780 par Jacques Paul.

Le psychromètre

Ce sont deux thermomètres dont la sonde du premier est à l'air libre et celle du second est entourée d'un buvard ou d'une mèche imprégnée d'eau. L'évaporation de l'eau de la mèche se fait en prélevant de l'énergie à la sonde du thermomètre. Cela provoque l'abaissement de la température du thermomètre correspondant. La différence de température entre les deux thermomètres est une fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant. Une table permet de transformer ces mesures de température en % d'humidité relative. L'efficacité de l'évaporation de l'eau autour du thermomètre humide augmente avec la sécheresse de l'air.

Psychromètre d'appartement

On distingue les deux thermomètres. Une mèche plongée dans un petit réservoir d'eau entoure la sonde de celui de droite. Ce dernier indique six ou sept degrés de moins à cause du refroidissement dû à l'évaporation de l'eau. A l'aide d'une molette située au sommet de l'instrument on choisit l'échelle mobile correspondant à 25°, la température réelle. Le taux d'humidité se lit sur cette échelle à la hauteur de la température indiquée par le thermomètre humide.



Les hygromètres électroniques



On trouve sur le marché des appareils peu coûteux qui mesurent le taux d'humidité avec une bonne précision. Leur principe repose sur la variation de la constante diélectrique de l'alumine en fonction de l'humidité ou sur la variation de la résistance électrique d'un sel sensible à l'humidité ambiante. Un cadran digitalisé indique simultanément la température et le taux d'humidité. Certains instruments indiquent en plus la température du point de rosée. La précision est de 0.1° pour la température et 1 % pour le taux d'humidité relative.

Thermomètre/hygromètre électronique

Le point de rosée

C'est une notion importante qui détermine le moment de la formation de la rosée, du brouillard et des nuages. C'est le point où l'air étant saturé d'eau (humidité = 100 %), un léger abaissement de la température provoque une sursaturation avec l'apparition de gouttelettes d'eau.

En été, dans nos régions, grâce à la température élevée, l'air renferme en moyenne 11 gr d'eau sous forme gazeuse par mètre cube. Cela correspond, aux heures les plus chaudes de l'après-midi, à un taux d'humidité de 40 %. Mais, aux petites heures du matin, la température est beaucoup plus basse et le taux d'humidité dépasse 100 %. Une partie de l'humidité de l'air se condense en une myriade de gouttelettes d'eau : c'est la rosée qui recouvre les objets les plus froids. Ce point de dépassement de la capacité de l'air d'absorber la vapeur d'eau s'appelle le **point de rosée**.

Qu'y-a-t-il dans un nuage ?



A l'intérieur d'un nuage, c'est le brouillard !

Lorsque vous êtes dans un brouillard épais, vous êtes en réalité dans un nuage !

Un nuage est donc constitué d'une myriade de gouttelettes d'eau en suspension ou de cristaux de glace si la température est très basse.

Ces gouttelettes sont de très petite taille. Leur diamètre est de l'ordre du centième de millimètre.

Comment les gouttelettes prennent-elles naissance ?

La condition primordiale est que, dans l'atmosphère, le point de rosée soit atteint ou, autrement dit, que le degré de saturation de l'eau dans l'air soit atteint.

Mais cela n'est pas suffisant. Il faut encore que l'air renferme des poussières très fines (il y en a toujours) qui sont nécessaires et jouent le rôle de noyau de condensation.

Les gouttelettes ne s'associent pas facilement entre elles

En frottant sur l'air, les gouttelettes se chargent d'électricité statique. Elles se repoussent donc mutuellement, ralentissant le phénomène de coalescence qui tend à les associer pour former de plus grosses gouttes. Le haut des nuages accumule les charges électriques positives alors que la terre est chargée négativement. Nuages et terre constituent alors un gigantesque condensateur électrique : les étincelles ne sont pas loin ! Ce sont les éclairs.

Quel est le poids nuage ?

La masse des gouttelettes d'eau à l'intérieur d'un nuage peut varier entre 0.5 à 5 grammes d'eau par mètre cube. Un gros nuage d'orage qui aurait à la base 2 km sur 2 km et mesurerait 8'000 mètres de haut peut contenir entre 50'000 et 150'000 tonnes d'eau sous forme de gouttelettes, sans tenir compte de la masse énorme de l'eau encore sous forme de vapeur.

Pourquoi un nuage ne tombe-il pas ?

La vitesse de chute d'une goutte d'eau dépend de sa taille. Plus elle est petite, plus elle tombe lentement. Cela s'explique par le fait que le poids d'une goutte dépend du cube de son rayon alors que sa surface externe ne dépend que du carré du rayon. La vitesse de la chute est provoquée par le poids de la goutte mais ce n'est pas le frottement de l'air qui ralentit sa chute. En diminuant de taille, le poids de la goutte diminue beaucoup plus vite que sa surface et la résistance de l'air augmente beaucoup plus vite que l'attraction qui subit cette goutte vers le bas. Donc plus la goutte est petite, plus elle "tombe" lentement.

Par ailleurs les nuages sont le théâtre de courants ascendants qui contrent la tendance des gouttelettes de descendre.

Vitesse de chute d'une goutte d'eau dans l'air en fonction son rayon.	
rayon [mm]	cm/sec
0.001	0.1
0.005	0.30.
0.01	1.2
0.02	4.79
0.04	19.14

Mais elles peuvent grossir et générer la pluie.

Tant que l'air est saturé, les fines gouttelettes font office de noyau de condensation et la vapeur d'eau va continuer à se condenser sur elles. Leur diamètre va augmenter, amplifié par la coalescence de petites gouttes en plus grosses gouttes. Leur vitesse de chute va s'amplifier. Lorsqu'elles sont assez volumineuses et tombent beaucoup plus rapidement et elles deviennent alors des gouttes de pluie !

L'énergie a son mot à dire

En s'évaporant, la transpiration prélève sur votre peau les calories nécessaires à son évaporation. C'est ce qui vous rafraîchit. L'évaporation de l'eau ne peut se faire sans apport d'énergie. Il faut environ 0.63 kWh pour faire passer un litre d'eau à l'état de vapeur ou, si on préfère, 540 kcal. Pour passer à l'état de vapeur dans l'air, l'eau a prélevé la chaleur nécessaire dans son environnement : mer chaude, végétation réchauffée par le soleil. En fin de compte, l'énergie a été fournie par le soleil.

En se condensant en gouttelettes au sein d'un nuage, la vapeur d'eau restitue cette énergie à son environnement sous forme de chaleur. Ce dégagement de chaleur va accélérer les courants ascendants au sein même du nuage.

A ce propos, on peut remarquer aussi qu'au moment de la formation de la rosée, au petit matin, pour les mêmes raisons, on enregistre une légère élévation de la température de l'air.

Pour parler des nuages, il faut parler latin

Pour bien comprendre les nuages il faut parler le latin ! Voici donc un petit dictionnaire latin-français nécessaire pour parler de nuages :

<i>Nom des nuages</i>	
<i>Latin</i>	<i>Français</i>
<i>stratus</i>	<i>couverture, tapis, plaque</i>
<i>cumulus</i>	<i>amoncellement, amas</i>
<i>cirrus</i>	<i>boucle de cheveux</i>
<i>nimbus</i>	<i>nuage qui porte la pluie</i>

<i>Adjectifs qualifiant des nuages</i>	
<i>Latin</i>	<i>Français</i>
<i>altus ou alto</i>	<i>élevé au dessus de la terre</i>
<i>calvus</i>	<i>chauve, dénudé</i>
<i>castellanus</i>	<i>en forme de tour de château</i>
<i>congestus</i>	<i>entassement, amas</i>
<i>fibratus</i>	<i>fibreux</i>
<i>fractus</i>	<i>moi, brisé, mis en pièces</i>
<i>floccus</i>	<i>flocons de laine</i>
<i>humilis</i>	<i>humble, de petite taille</i>
<i>lenticularis</i>	<i>lenticulaire</i>
<i>mammatus</i>	<i>en forme de mamelles pendantes</i>
<i>mediocris</i>	<i>moyen, médiocre, modeste</i>
<i>nebulosus</i>	<i>brumeux</i>
<i>perlucidus</i>	<i>translucide, diaphane</i>
<i>spissatus</i>	<i>épaissi</i>
<i>stratiformis</i>	<i>en forme de couverture</i>
<i>tortus</i>	<i>en anneau de serpent</i>
<i>unicus</i>	<i>recourbé</i>

Pour les noms des nuages, on utilise aussi les noms composés : *nimbostratus*, *stratocumulus*, *cirrostratus*, *cirrocumulus*, *cumulonimbus*, *altostratus* et bien d'autres encore. On les décrit non seulement selon leur forme mais aussi selon l'altitude où on les rencontre. Le schéma suivant résume sommairement les divers types de nuage et l'altitude où on les rencontre habituellement.

*Le **stratus** est un nuage bas qui apparaît lorsque les basses couches de l'atmosphère sont saturées en eau. Au ras du sol c'est le brouillard. Les couches de stratus sont fréquentes en hiver. Vus de la montagne, c'est la nappe de brouillard qui s'étale comme une mer floconneuse. Suivant son épaisseur, il peut se disloquer partiellement et on parle alors de **stratus nebulosus** lorsqu'il prend l'apparence d'une brume, de **stratus fractus** lorsqu'ils se désagrègent en lambeaux.*



*Le **cumulus** ressemble à un amoncellement qui se développe en hauteur, à basse et moyenne altitude. Il a un aspect bourgeonnant qui fait penser inmanquablement à un chou-fleur. A l'intérieur d'un cumulus il y a un mouvement de convection provoqué par la force ascensionnelle d'air chaud. Un cumulus peut se développer en hauteur et former un cumulonimbus qui peut générer des orages importants.*



*Les **cirrus** sont des nuages de haute altitude qui se situent dans les couches supérieures de la troposphère. Ils ont l'apparence de filaments de couleur claire. Ils sont constitués de cristaux de glace. Ils sont la conséquence d'une augmentation de l'humidité en altitude et ils annoncent l'arrivée probable d'une perturbation.*



***Nimbus** est un terme abandonné aujourd'hui et qui signifiait "nuage de pluie". On conserve ce nom comme un préfixe tel le **nimbostratus** qui est un stratus qui montre une grande extension verticale et qui génère des pluies sur de grandes surfaces. Le **cumulonimbus** est un cumulus qui montre une grande élévation qui peut générer des orages violents avec des phénomènes électriques.*

*Les nuages peuvent encore prendre des aspects très particuliers et on leur adjoint des qualificatifs imagés conventionnels comme décrits dans le tableau précédent : **alto** lorsqu'ils se trouvent à une altitude élevée, **lenticularis**, en forme de lentille, **médiocris**, de taille modeste, **stratiformis**, en forme de couverture et bien d'autres termes encore.*

Autres exemples de dénomination de nuages



Cumulus calvus (dénudé)



Cumulus lenticularis (en forme de lentille)



Cirrus uncinus (recourbé)



*Cumulus orographic
créé par condensation due à la déviation d'air
saturé en humidité par un sommet vers le haut.*



*Les Alpes et le Salève émergeant de la mer de brouillard, un stratus qui recouvre la
cuvette genevoise en hiver, lorsque la situation est anticyclonique.*

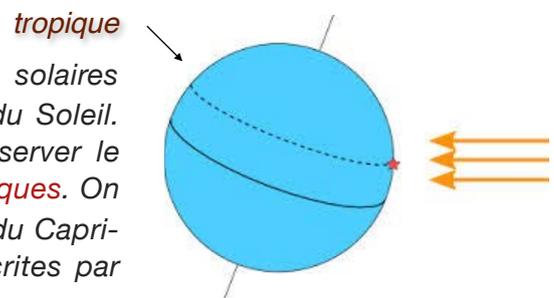
Les vents, conséquence de l'inégalité de l'ensoleillement

L'énergie solaire dépend directement de l'angle d'incidence des rayons du soleil. Plus ils sont proches de la perpendiculaire au sol, plus ils réchauffent le sol. C'est dans les régions intertropicales que l'énergie reçue est la plus grande. A l'opposé, les régions proches des pôles voient toujours le soleil très proche de l'horizon. Elles ne reçoivent que peu d'énergie.

L'inclinaison de l'axe de la Terre complique les choses

Si l'axe de la Terre était perpendiculaire au plan défini par son orbite (l'écliptique), l'équateur recevrait en permanence la maximum de l'énergie solaire. Mais ce n'est pas tout à fait le cas puisque cet axe est incliné actuellement de $23^{\circ}26'$.

Cela implique que l'angle d'incidence des rayons solaires varie au cours du périple annuel de la Terre autour du Soleil. La zone à l'intérieur de laquelle on peut parfois observer le Soleil au zénith est délimitée par deux lignes, **les tropiques**. On distingue le tropique du Cancer au Nord du tropique du Capricorne au Sud. Ces deux lignes avaient déjà été décrites par Eratosthène au IIIe siècle avant Jésus Christ.



C'est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre qui est responsable de l'alternance des saisons, alternance d'autant plus marquée qu'on se trouve dans des latitudes plus élevées.

L'air chaud est moins dense que l'air froid

La force ascensionnelle d'une montgolfière est due à l'air chaud qui est moins dense à l'intérieur de l'enveloppe que l'air ambiant extérieur. Il en est de même avec les masses d'air des régions fortement chauffées par le soleil. Moins denses, ces masses d'air ont tendance à s'élever et la pression atmosphérique va diminuer. Ces sont les zones dites de **basse pression**.

A contrario, les masses d'air froid qui surmontent les régions froides sont plus denses. La pression atmosphérique augmente. Ce sont les zones de **haute pression**.

Comme les pressions tendent à s'équilibrer, les masses d'air des régions de haute pression vont se précipiter vers les zones de basse pression. Le vent est donc né qui va chercher à compenser les inégalités de pression.



Les cellules de convection

A basse altitude, on assiste à un courant général du vent des régions de haute pression vers les régions de basse pression. En passant au-dessus des mers chaudes, le vent se charge d'humidité et il devient alors un agent important de transport de l'eau et de générateur de nuages.

A haute altitude, au-dessus des zones de basse pression, l'air ascendant se refroidit et va se diriger vers les zones de haute pression. C'est une sorte de mouvement de convection vertical animé par l'ascension de l'air dans les zones de basse pression et sa descente dans les zones de haute pression. Les climatologues les appellent **cellules de convection**.



*Orage en zone tropicale
(photo Jean Michel Donnet)*



Désert algérien en zone subtropicale

Mais Gaspard Coriolis s'en mêle

Déjà au XVe siècle on avait remarqué que les vents décrivait de grandes boucles tournant vers la droite. En 1487, Bartolomeu Dias, un navigateur portugais qui longeait les côtes de l'Afrique remarqua, qu'au delà de l'équateur, les vents tournaient vers la gauche.

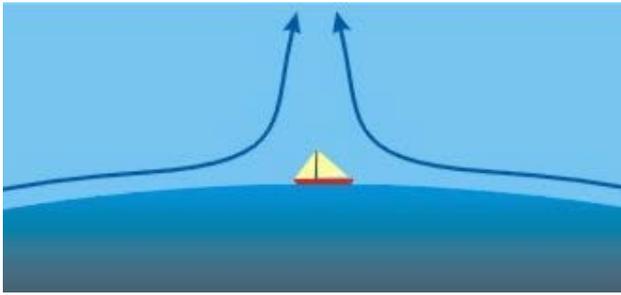
C'est l'ingénieur français Gaspard Coriolis qui, en 1835, donna une explication à ce phénomène. C'est comme si un corps en mouvement subissait une force qui le détournait vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. En faits, cette force, dite de Coriolis, n'existe pas réellement mais c'est une impression que nous ressentons car notre point d'observation se déplace en permanence. C'est donc la rotation de la Terre qui complique les choses.

Imaginons une zone de basse pression. Les vents vont se précipiter vers cette zone mais il leur faut un certain temps pour effectuer leur déplacement. Pendant ce temps, la zone de basse pression s'est déplacée, entraînée par la rotation de la Terre. Les vents doivent donc en permanence adapter leur direction vers cette zone de basse pression qui se déplace. C'est ce qui leur communique cet effet de lente rotation vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud.

Entre les deux tropiques, il pleut souvent

C'est la **zone intertropicale**, région où l'ensoleillement est maximum, il fait chaud, l'air devient moins dense et s'élève en altitude créant un lent mouvement ascendant. Il y a peu de vent. C'est une **zone de basse pression**. L'air se charge d'humidité provenant de la transpiration des arbres de la forêt tropicale ou de l'océan dont l'eau est tiède. En s'élevant, l'air se refroidit, l'humidité se condense, forme des nuages qui génèrent d'abondantes précipitations de nature orageuse. Les navigateurs à voile craignent cette zone qui est très instable. L'absence

de vent peut les immobiliser durant de longues semaines et les orages violents et subits peuvent les surprendre. C'est le fameux **pot-au-noir**.



Par ailleurs, une abondante couverture nuageuse est la source d'orages violents. C'est en traversant une zone d'orage au dessus du pot-au-noir entre le Brésil et l'Afrique que l'avion d'Air France AF447 s'est abîmé en mer.

Vue satellite de la couverture nuageuse au-dessus du pot-au-noir entre le Brésil et l'Afrique

Le Pot-au-noir

Lieu de rencontre des alizés du nord et du sud, dans la zone intertropicale. Zone caractérisée par sa chaleur extrême et son absence de vent. Les anciens navigateurs à voile avaient baptisé cette zone de "pot-au-noir".

Il redoutaient cette zone qui pouvait les immobiliser longtemps sur place.

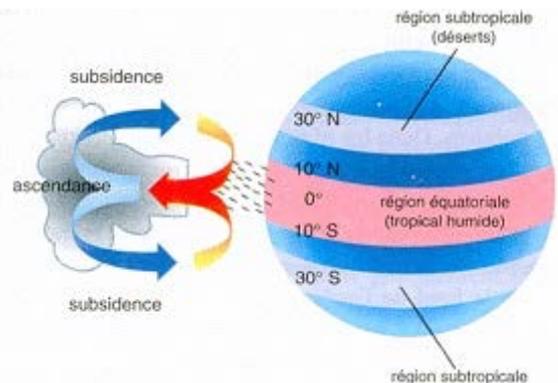


Dans la zone subtropicale, il ne pleut pas

L'élévation de l'air au-dessus de la zone intertropicale provoque un afflux d'air plus frais venant des latitudes plus élevées. Il proviennent des **zones subtropicales**, dites de haute pression atmosphérique, qui se situent entre 25° et 35° de latitude de part et d'autre de l'équateur.

En faits, il s'établit un mouvement de convection de l'air tropical qui, en s'élevant au-dessus de la zone intertropicale se refroidit, abandonne son humidité, devient plus dense, se dirige vers les latitudes plus élevées. Au-dessus de la zone subtropicale, les masses d'air commencent à descendre. Elles se réchauffent, ce qui diminue l'humidité relative et les nuages disparaissent complètement. C'est la crête subtropicale, une zone de haute pression sans précipitations et où les vents sont rares. Dans les parties continentales qui se trouvent dans ces zones, on rencontre les grands déserts, le plus connu étant le Sahara.

Cette circulation de l'air qui s'élève au-dessus de la zone intertropicale et qui redescend sur la zone subtropicale est appelée par les spécialistes **cellule de Hadley**¹.



Les zones intertropicales et subtropicales et les mouvements de convection de l'air.

¹ George Hadley (1685-1768), météorologue amateur anglais. Il a expliqué l'origine des alizés.

Les alizés, des vents dominants bien connus des navigateurs



Direction des vents alizés

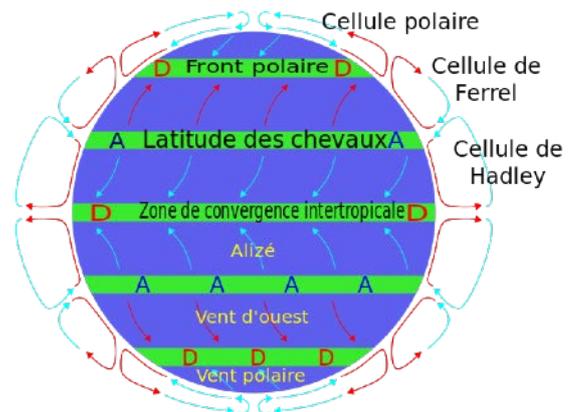
L'alizé est un vent qui souffle régulièrement d'Est en Ouest dans un couloir délimité par les deux tropiques. Il est généré par la différence de pression atmosphérique qui existe entre la zone intertropicale (basse pression) et les zones subtropicales, dites de haute pression atmosphérique. C'est un vent de basse altitude qui s'écoule entre 0 et 1'500 mètres environ. Vers 6'000 mètres, on trouve des vents frais qui se dirigent en sens inverse et vont se déverser au-dessus de la zone subtropicale. Aspiré par les basses pressions intertropicales, le vent est dévié vers l'ouest en raison de la rotation de la terre.

Cette circulation de l'air qui s'élève au-dessus de la zone équatoriale et qui redescend sur la zone intertropicale est appelée par les spécialistes **cellule de Hadley**¹

Autour des pôles

L'air très dense et très froid des pôles engendre des vents qui s'écoulent vers les latitudes moins élevées. Toujours à cause de la rotation de la Terre, ils sont déviés vers l'Ouest au Nord et vers l'Est au Sud. Pour compenser ce mouvement convectif, des masses d'air plus chaudes circulent en altitude en direction des zones polaires, en provenance des latitudes moyennes. Cet air est presque complètement dépourvu d'humidité et n'engendre aucune précipitation.

Les régions polaires sont des régions sèches et les précipitations neigeuses y sont extrêmement rares. Ce mouvement de convection des vents dans les régions polaires constitue ce que les climatologues appellent **la cellule polaire**.



Vue idéalisée des trois cellules ou zones de circulation atmosphérique (Wikipedia).

Les vents dans les latitudes moyennes

Dans les latitudes moyennes, comprises approximativement entre 30° et 60°, l'air froid qui vient des pôles rencontre l'air chaud issu de la zone intertropicale. Cette rencontre a lieu le long d'une zone étroite, sorte de ruban plus ou moins étroit où l'instabilité atmosphérique est due au forçage de l'air froid sous l'air chaud. Cette instabilité se manifeste par la formation locale d'une succession **d'anticyclones**, sortes d'immenses tourbillons tranquilles générés par des hautes pressions atmosphériques.

L'anticyclone des Açores

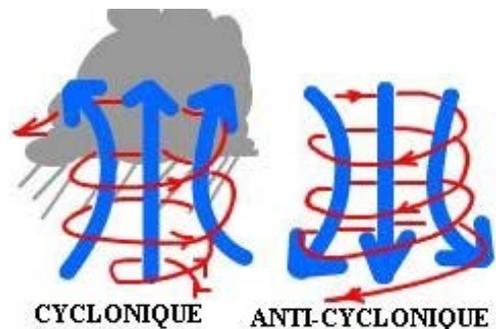
Les endroits où se forment ces anticyclones sont peu prévisibles. Toutefois, certaines régions sont plus favorables à leur apparition. C'est celui qu'on nomme Anticyclone des Açores. Ces anticyclones poussent l'air chaud vers les pôles et l'air froid revient vers la zone équatoriale. Dans un anticyclone le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, dans l'hémisphère nord. Cela génère un courant général des vents d'Ouest en Est. Ce sont les fameux vents d'Ouest qui déversent sur l'Europe les dépressions et nous amènent des précipitations.

D'une manière générale les masses d'air tièdes de la zone subtropicales se dirigent vers les latitudes plus élevées en étant déviées vers l'Est, toujours à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement de convection de l'air entre la zone subtropicale et les hautes latitudes proches des pôles constitue **la cellule de Ferrel**.

Entre les anticyclones on trouve des zones dépressionnaires ou zones cycloniques. A l'intérieur des zones dépressionnaires les vents tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et inversement dans l'hémisphère sud. Dans les latitudes moyennes, la direction des vents est donc extrêmement changeante.

A gauche ou à droite ?

Nous savons vu qu'autour d'un anticyclone le vent était dévié vers la droite à cause de la rotation de la Terre. Dans le cas d'une zone cyclonique, c'est le contraire et le vent va s'enrouler dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. C'est l'inverse qui se produit dans l'hémisphère Sud.



Circulation des vents dans l'hémisphère Nord.
La circulation est inversée dans l'hémisphère Sud.

Vents locaux et vents régionaux

Brise de mer, brise de terre.

A Terre, au cours de la journée, sous l'effet du Soleil le sol se réchauffe beaucoup plus vite qu'une surface lacustre ou marine. L'air est réchauffé et engendre un courant ascendant qui est associé à une baisse de pression locale qui va être compensée par une brise venant de la mer ou du lac. C'est la **brise de mer**.

A la tombée du jour, c'est l'inverse qui se produit. Le sol se refroidit beaucoup plus rapidement que la surface de l'eau et le courant ascendant se produit au-dessus de l'eau. Un vent léger souffle alors de la terre vers le plan d'eau. C'est la **brise de terre**.

Brise de mer et brise de terre sont bien connues des amateurs de voile qui repèrent leur arrivée par les risées que ces vents légers impriment à la surface de l'eau.

Le fœhn

C'est un vent régional chaud et sec provoqué par le franchissement du vent au-dessus d'une chaîne de montagnes. A l'amont, le vent provenant généralement du sud-ouest, heurte la montagne et prend de l'altitude pour franchir cet obstacle. Il se refroidit, entraînant la condensation de l'humidité qu'il transporte. Cela forme des nuages qui restent bloqués à l'avant de la chaîne de montagne. L'effet de condensation réchauffe le vent.

Après l'obstacle, le vent redescend à l'aval de la montagne. La compression le réchauffe encore, fait disparaître les nuages et c'est un vent chaud et sec qui balaie les vallées situées au Nord des Alpes apportant un épisode ensoleillé. Ce vent peut être extrêmement violent et observe parfois de véritables "**tempêtes de fœhn**". Le nom fœhn est utilisé en Suisse et en Autriche.

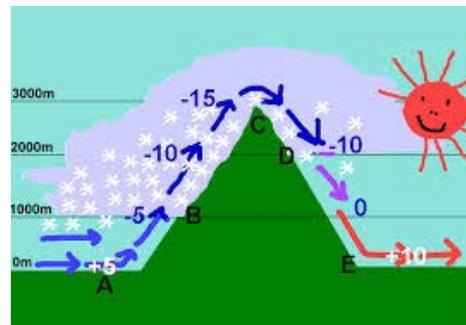
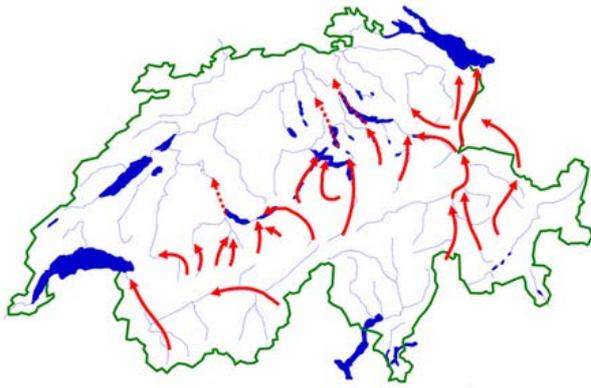


schéma tiré de info@meteoweb.it



Un mur de fœhn

Sur l'itinéraire Chamonix-Zermatt, on franchit le Col de l'Evêque, laissant un mur de nuage au Sud. Ils se dissolvent en redescendant vers le Nord, faisant place à un temps ensoleillé. (Photo Olivier Dufour)



Les vallées à fœhn en Suisse
(Stephan Blaser, Université de Zürich)

Les conditions qui créent le fœhn, ou *effet de fœhn*, sont largement connues partout dans le monde sous des noms locaux : le vent *d'autan* dans le Languedoc, la *tramontane* dans les Pyrénées, le *chinook* dans les Montagnes Rocheuses etc...

Les fronts froids et les fronts chauds

Lorsque deux masses d'air de température différente se rencontrent, elles ne se mélangent pas car elles diffèrent par leur densité. On appelle *front*, la ligne de rencontre de ces deux masses d'air. Les phénomènes qui apparaissent alors sont complexes. En simplifiant beaucoup, on peut dire, qu'à cause de sa densité plus faible, la masse d'air chaud va s'élever au-dessus de la masse d'air froid et entraîner un effet semblable à l'effet de fœhn décrit plus haut. C'est l'évolution de la masse d'air chaud qui va conditionner alors les perturbations météorologiques issues de cette rencontre. Les météorologues distinguent :

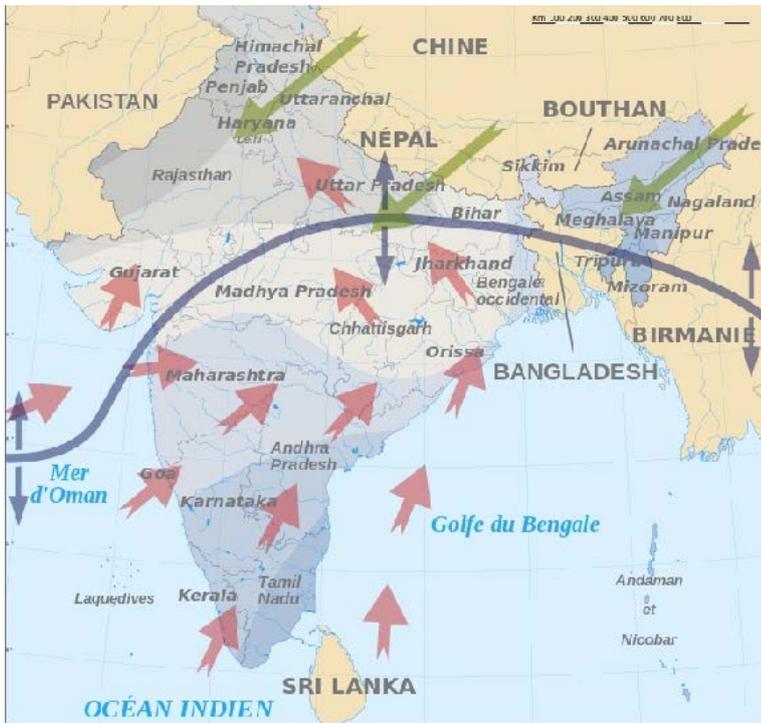
- **Front chaud** : il s'agit de la limite entre une masse d'air chaud qui avance à la rencontre d'une masse d'air plus froid. Le front chaud repousse l'air froid tout en s'élevant en altitude par dessus l'air froid. A l'approche du front chaud on voit l'apparition de cirrus puis d'altostratus et enfin de nimbostratus qui génèrent des précipitations continues. En hiver on a des précipitations de pluie verglaçante, de neige ou de grésil.
- **Front froid** : c'est la limite entre une masse d'air froid qui avance, de l'air polaire par exemple, qui prend la place d'une masse d'air chaud et force cette dernière à se soulever en altitude. La température au sol fraîchit rapidement et des précipitations importantes se produisent.
- **Front stationnaire** : c'est une situation dans laquelle la limite entre deux masses d'air est quasi stationnaire. Cette situation peut durer plusieurs jours. Le mauvais temps s'installe avec un ciel nuageux et des précipitations abondantes, parfois sous forme d'orage.
- **Front occlus** : c'est le resserrement d'une masse d'air froid contre une masse d'air frais et entre lesquelles de l'air chaud est rejeté en altitude



Symboles désignant les divers fronts sur les cartes météorologiques

La mousson, une grosse brise de mer

Il s'agit de vents saisonniers très actifs dans l'océan indien et l'Asie du Sud. Alors que les brises de mer ou de terre alternent dans un cycle circadien, la mousson change de direction selon la saison.



Direction de la Mousson
suivant la saison



Mousson d'été



Mousson d'hiver

Au cours de l'été le soleil réchauffe considérablement le continent indien et l'air s'élève, créant une vaste zone de basse pression. L'air humide venant de l'océan va s'engouffrer et provoquer d'abondantes précipitations. C'est la **mousson d'été**. Cette situation dure plusieurs semaines avant que la surface de l'océan ne devienne aussi chaude que le continent.

Les entrées d'air humide océaniques proviennent, à l'Ouest, de la mer d'Oman et, à l'Est, du golfe du Bengale. En approchant de la chaîne himalayenne, l'air se refroidit, se condense et provoque d'intenses précipitations. Au pied de l'Himalaya la hauteur cumulée des pluies peuvent atteindre 10 mètre par an ! En hiver, c'est le contraire qui se produit et on observe la **mousson d'hiver** qui font souffler les vents du continent vers la mer.



La mousson d'été arrive !

Les phénomènes météorologiques sont particulièrement spectaculaires en Inde, au Bangladesh, en Birmanie et dans une grande partie de l'Asie du Sud-Est.

Il existe aussi des moussons dans d'autres parties du monde. En Afrique, le phénomène est beaucoup moins intenses et les pluies ne s'observent que dans les régions côtières. Le Brésil subit aussi une mousson d'été qui lui apporte d'abondantes précipitations.

Les courants marins, climatiseurs de notre planète

Le cas du Gulf Stream

Lorsqu'on parle de courant marin, on pense immédiatement au **Gulf Stream**, ce courant bien connu qui réchauffe les côtes de l'Europe. C'est un navigateur espagnol, Juan Ponce de León qui, en 1513, remarqua qu'au large de la Floride, ses navires étaient emportés vers le Nord par une sorte de fleuve chaud qui semblait provenir du golfe du Mexique et qui aidait ses navires à regagner l'Europe. Il venait de découvrir le Gulf Stream.

Au large de la Floride, le Gulf Stream est comme un immense fleuve de 30 à 150 km de largeur qui s'écoule vers le nord à près de 9 km/h. par endroits puis bifurque vers l'Est au delà du Cap Hatteras. Son influence en profondeur se fait sentir jusqu'à 300 mètres voire même jusqu'à plus de 1000 mètres. On estime que l'écoulement du Gulf Stream entraîne plus de 100 millions de m³ d'eau par seconde.

Arrivé dans l'Atlantique, il ralentit, se divise en plusieurs branches, certaines se dirigent vers le Nord et vont lécher les côtes de France, de Grande Bretagne, de Scandinavie et d'Islande. D'autres bifurquent vers le Sud et forment une boucle qui rejoint un autre courant, le courant équatorial, qui repart vers l'Ouest poussé par les vents alizés

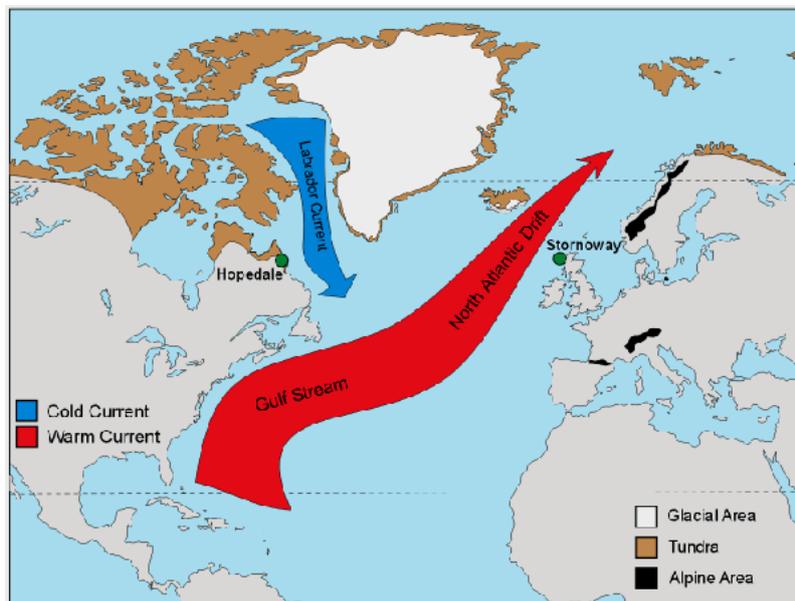
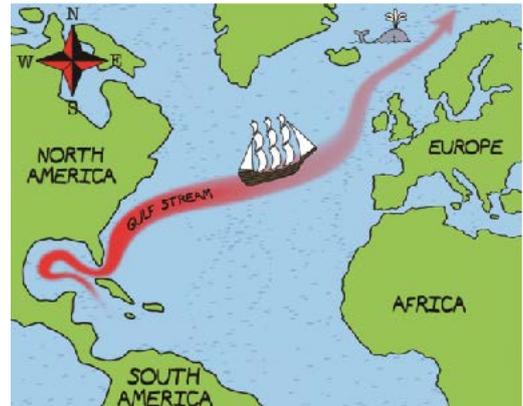
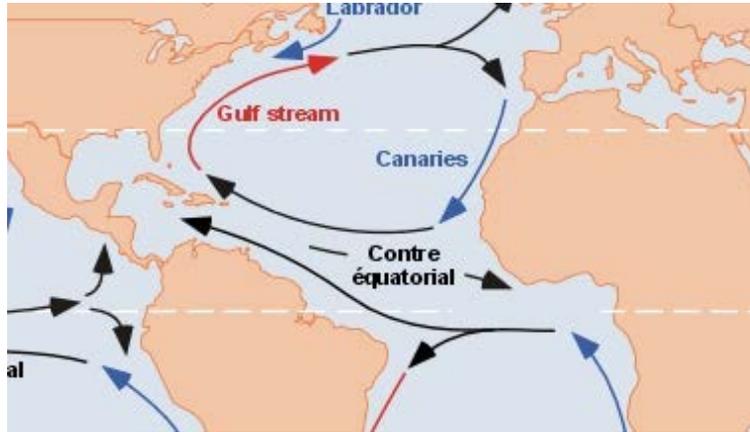


Schéma simplifié du Gulf Stream (British Society for Geomorphology)

Le Gulf Stream constitue un véritable radiateur pour tout le nord-ouest de l'Europe qui jouit d'un climat relativement doux en regard de sa position dans des latitudes assez élevées. La température moyenne, à latitude égale, est d'environ 15° supérieure à celle qu'on observe le long des côtes canadiennes.

Le moteur qui anime le Gulf Stream

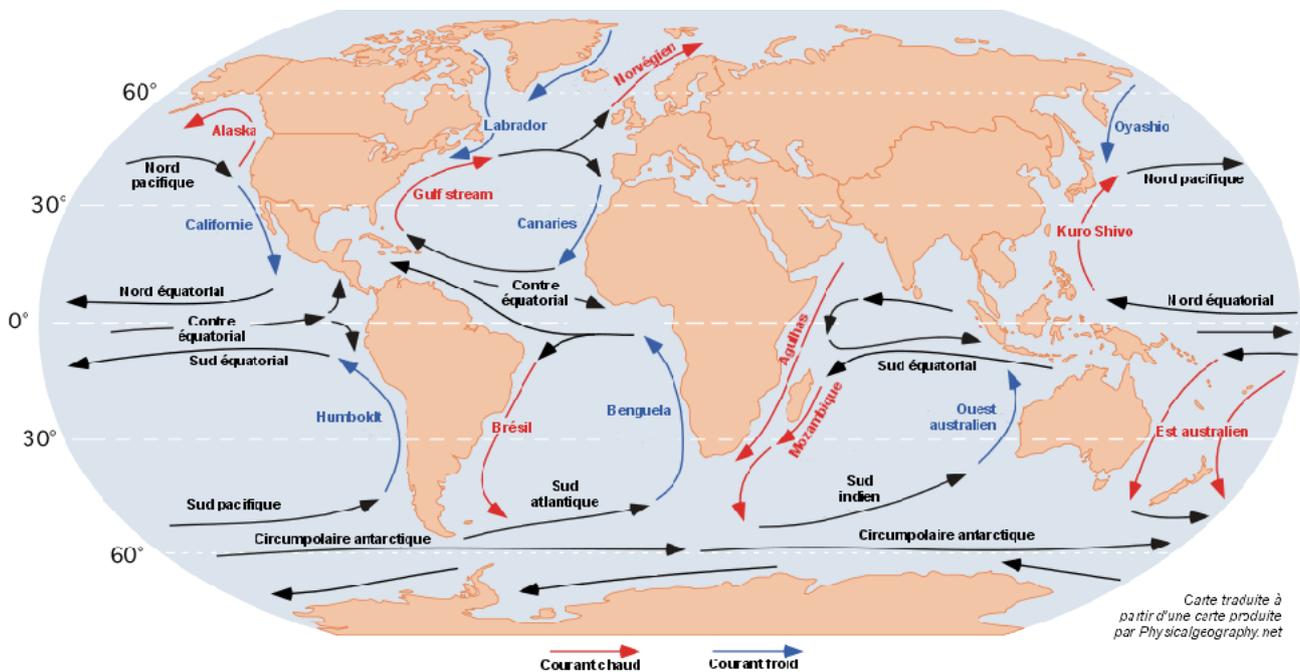
Ce sont les vents dominants qui mettent en mouvement les masses d'eau et créent les courants marins de surface. Entre l'Afrique et l'Amérique du Sud, les courants sud-équatorial et nord-équatorial entraînent les masses d'eau superficielles qui se dirigent vers le Golfe du Mexique. L'Isthme de Panama constitue une barrière qui arrête ce mouvement et fait refluer cette masse d'eau vers le Nord : c'est le Gulf Stream.



Origine du Gulf Stream

Il finit par sombrer dans les profondeurs de l'océan

Arrivé à l'extrémité nord de la Norvège, l'eau s'est beaucoup refroidie et sa densité a augmenté. En gelant, la glace expulse le sel, ce qui va augmenter encore la salinité et la densité de l'eau restée à l'état liquide. Cette eau va sombrer dans les profondeurs de l'océan et constituer un courant de profondeur qui va lentement retourner vers le Sud.



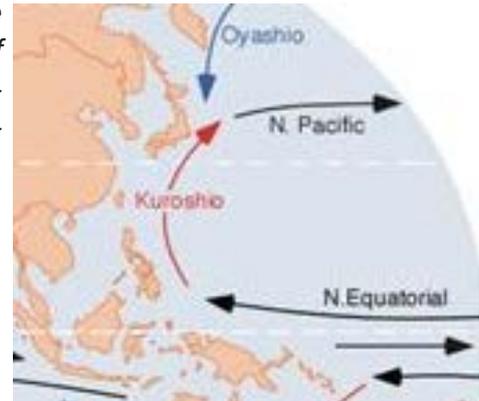
Carte traduite à partir d'une carte produite par Physicalgeography.net

Carte des courants de surface

Ils forment comme cinq grandes boucles qui tournent dans les principaux océans. On voit qu'ils tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et inversement dans l'hémisphère sud.

Le Kuroshivo, un frère jumeau du Gulf Stream dans le Pacifique

En examinant la carte des courants marins, on découvre dans l'Océan pacifique un courant analogue à celui du Gulf Stream, le Kuroshivo. Il transporte les eaux chaudes tropicales du Pacifique et longe les côtes le Japon auquel il apporte la chaleur qui adoucit son climat.



Le Kuroshivo

Les courants marins répartissent la chaleur

Générés principalement par les alizés, les courants marins forment de grandes boucles qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud. Ils amènent la fraîcheur des régions polaires vers les zones équatoriale et réchauffent les régions des latitudes élevées après avoir emmagasiné de la chaleur dans les zones tropicales.

Ils s'écartent parfois de leur chemin

Les courants marins dévient parfois de leur trajectoire. Ainsi, en octobre 2011, la route du Gulf Stream s'est écartée de son cours d'environ 200 km vers le Nord pendant quelques semaines avant de retrouver son cours normal. On ne sait pas ce qui a provoqué ce changement de l'itinéraire habituel du courant. Selon certaines hypothèses, cette déviation aurait pour origine les ouragans Irène et Katia qui se sont produits pendant cette période.

Ils peuvent même ralentir ou s'interrompre

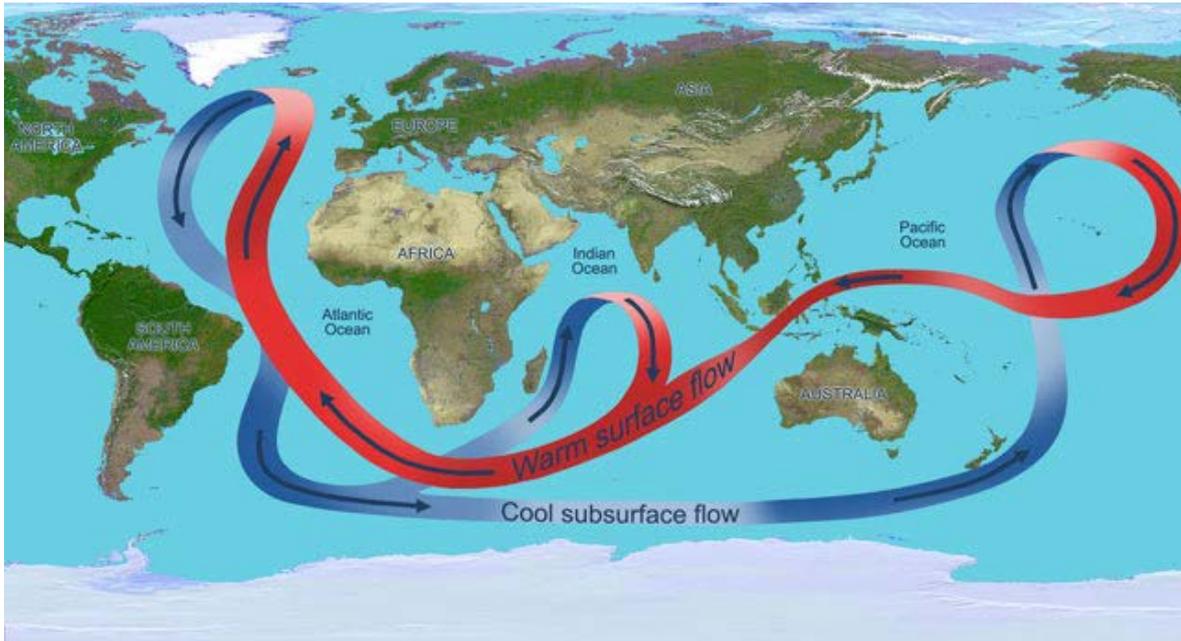
Les carottes de sédiments prélevés dans l'Atlantique montrent qu'il y a 8'000 ans le cours du Gulf Stream a été momentanément interrompu. La cause en a été le déversement subit dans l'océan d'un immense lac d'eau douce, ancien lac glaciaire situé sur le continent Nord-Américain. Cela a diminué la salinité et la densité des eaux du Gulf Stream empêchant sa plongée vers les profondeurs au large de la Norvège et entraînant par conséquent d'importantes perturbations dans la circulation générale des courants de profondeur. Ce ralentissement a entraîné une baisse générale des températures en Europe et en Amérique du Nord ainsi qu'une diminution notable de la pluviosité.

Il y a aussi des courants en profondeur

En fin de course, en se rapprochant de la zone polaire nord, les eaux du Gulf Stream sont refroidies et la glace qui commence à se former expulse le sel, ce qui augmente la salinité de l'eau non encore gelée. Cette eau très dense va s'enfoncer dans les profondeurs de l'océan et contribuer à l'existence d'un courant de profondeur qui ramène ces eaux froides vers le Sud.

On trouve donc des courants profonds qui ne sont pas générés par les vents dominants mais par les différences de densité des diverses masses d'eau. Ils ne sont pas faciles à cartographier mais sont suivis aujourd'hui par des capteurs sous-marins qui permettent d'en dessiner les parcours.

Les plus profonds sont appelés **courants thermohalins**, les moins profonds portent le nom de **circulation thermohaline**.



Circuit général des courants de marins de surface et de profondeur

La grande boucle

Les courants profonds et de surface sont interconnectés, constituant ainsi une sorte d'immense "tapis roulant" qui met en circulation, comme une immense boucle, courants chauds et courants froids sur tout le globe. On l'appelle **boucle thermohaline**. On estime qu'une portion d'eau met environ 10'000 ans pour effectuer un parcours complet.

Le Gulf Stream est un des moteurs qui animent la boucle

La plongée des eaux au nord de la Norvège peut être considérée comme un des moteurs principaux de la circulation globale des courants de profondeur.

Un autre acteur se trouve aussi en mer de Weddel à l'est de la Péninsule antarctique. L'eau est glaciale et la banquise, en se formant, abandonne le sel ce qui augmente la densité de l'eau. L'eau plonge et participe alors ainsi à la circulation thermohaline.

El Niño

Normalement, les hautes pressions de la côte Est du Pacifique (Pérou, Chili, Equateur) engendrent les alizés qui se dirigent vers les basses pressions de la côte Ouest de Pacifique (Australie, Indonésie). Le niveau de la mer est en général 50 cm plus haut à l'Ouest qu'à l'Est. Cette différence de niveau entraîne un courant profond qui pousse les eaux froides qui remontent vers la côte Est et engendrent le courant froid, le courant de Humboldt, ce courant qui lèche les côtes du Pérou et du Chili.

Mais périodiquement, pour des raisons encore inexplicées, la différence de pression atmosphérique entre les côtes pacifique de l'Amérique du Sud et l'Australie et l'Indonésie diminue et entraîne une diminution de la force des Alizés et, du même coup, la remontée des courants froids qui habituellement baignent les côtes sud-américaines. La température de l'eau augmente et entraîne l'apparition de précipitations anormales sur les côtes du Chili et du Pérou et une sécheresse du côté de l'Indonésie et de l'Australie. Ce phénomène a été baptisé El Niño (l'enfant Jésus) parce qu'il apparaît aux alentours de Noël.

Les phénomènes violents

Orages, cyclones, tornades sont des phénomènes violents qui ont des causes légèrement différentes mais dont le mécanisme de formation utilise toujours les mêmes ingrédients : de l'air humide, de la chaleur et l'intervention de Monsieur Coriolis.

Les orages sont des phénomènes plutôt ponctuels qui ont une faible durée de vie de l'ordre de l'heure. Ils peuvent se produire aussi bien sur terre ferme qu'au-dessus des océans.

Les tornades sont des phénomènes très localisés, presque toujours liées à des zones orageuses. La surface balayée est de l'ordre de quelques centaines de mètres et leur durée de vie n'est que de quelques minutes.

Les cyclones sont des phénomènes de grande ampleur qui se forment toujours au-dessus de mers très chaudes. Leur durée de vie peut atteindre plusieurs jours.

<i>Ingrédients nécessaires pour créer des phénomènes météorologiques violents</i>	
<i>Air humide</i>	<i>Le vent qui circule au-dessus des océans se charge d'humidité, surtout dans les régions chaudes.</i>
<i>Chaleur</i>	<i>Sol fortement réchauffé par le Soleil ou mers très chaudes des zones intertropicales</i>
<i>Force de Coriolis</i>	<i>Déviations circulaires de l'air en mouvement conduisant à des vents tourbillonnaires à cause de la rotation de la Terre.</i>

Les orages

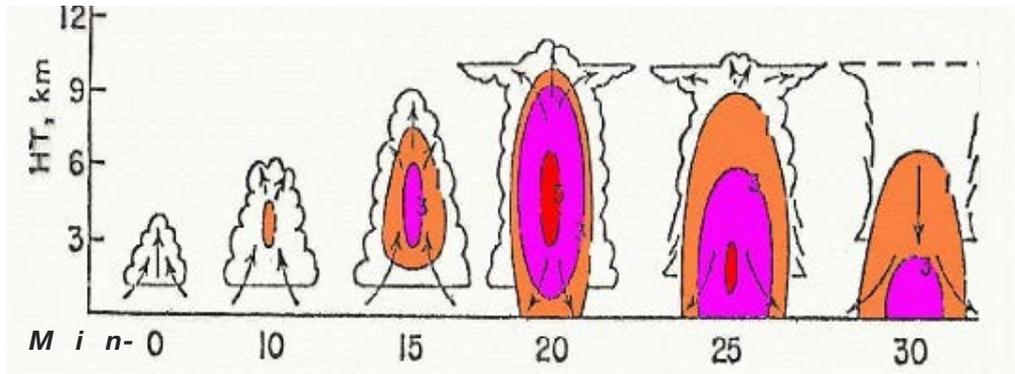
L'Orage est une perturbation atmosphérique due à un double facteur : de l'air humide et une surface réchauffée par le soleil. On parle parfois de cellule orageuse. Pour un orage ordinaire, dit **monocellulaire**, commence un cycle d'une durée approximative d'une heure.

1. L'air chauffé au contact du sol amorce un mouvement ascendant et se refroidit en gagnant de l'altitude. L'humidité relative augmente et en atteignant le point de rosée, des myriades de gouttelettes se forment créant ainsi un nuage. En se condensant, la vapeur d'eau dégage de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui contribue à accélérer le mouvement ascendant et développe un nuage à grande extension verticale : un **cumulus**. Les courants ascendants dépassent parfois plusieurs dizaines de mètres par seconde. L'extension vers le haut de ce type de nuage peut dépasser 12 km et atteindre la tropopause, cette zone limite entre la troposphère et la stratosphère. Lorsque les gouttelettes situées dans la partie supérieure du nuage se transforment en cristaux de glace, le cumulus devient alors un **cumulonimbus**.



Un cumulonimbus, un nuage d'orage

2. En prenant de l'altitude, la température baisse et le mouvement ascensionnel diminue puis s'arrête. C'est là le sommet du nuage et la fin du processus de convection ascendante. La masse de l'eau en suspension devient alors trop pesante. La pluie mêlée de grêlons commence à descendre. Au cours de cette descente, une partie des grêlons commence à s'évaporer en absorbant de la chaleur. L'air se refroidit, ce qui contribue à inverser le mouvement ascendant en mouvement descendant. On observe alors d'abondantes chutes de pluie. L'atmosphère se rafraîchi, petit à petit les nuages se dissipent, l'orage est terminé.



Cycle de vie d'un orage ordinaire dit monocellulaire

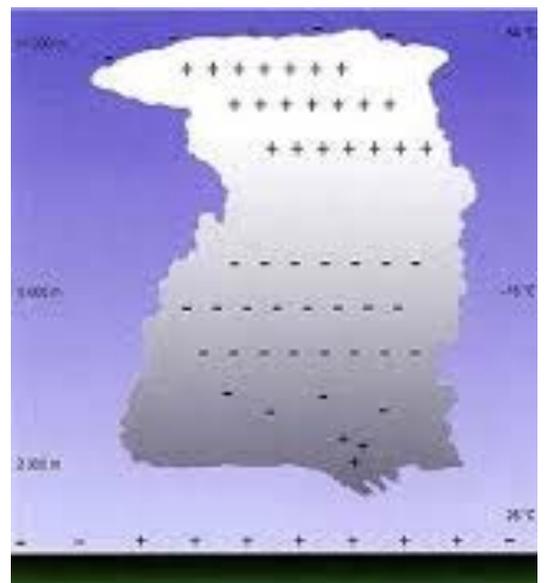
Quand les orages se forment-ils ?

Ils peuvent se former en toute saison, chaque fois que les conditions d'humidité de l'air et de chaleur locale sont réunies. Dans nos latitudes, ils apparaissent surtout entre la fin du printemps et le début de l'automne. Dans les régions tropicales et équatoriales, ils sont beaucoup plus fréquents.

Les phénomènes électriques qui les accompagnent

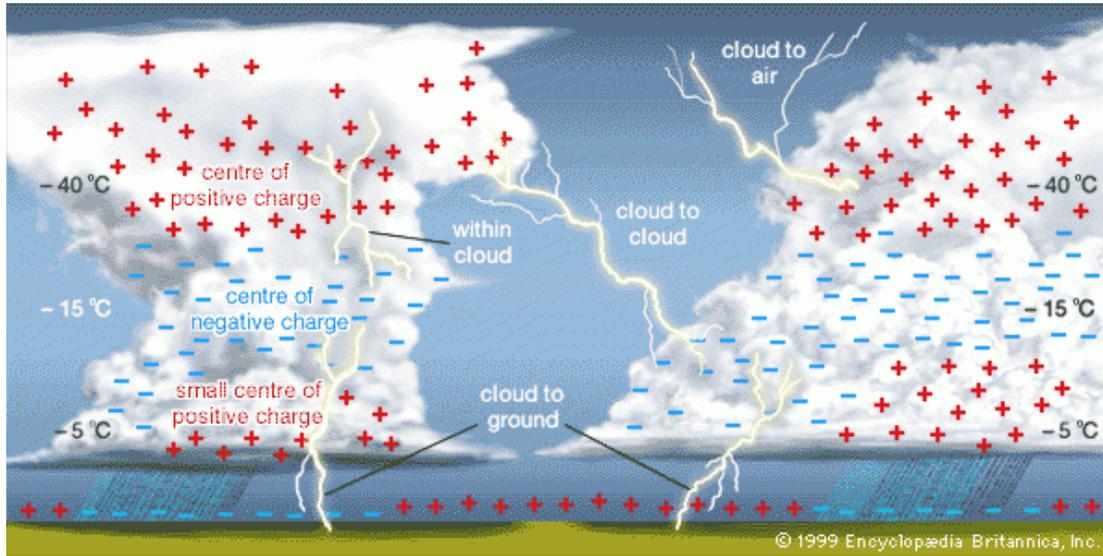
Les champs électriques qui apparaissent au sein d'un cumulonimbus sont considérables. Ils sont dus au brassage et aux frottements que subissent les gouttelettes entre elles dans les violents courants ascendants. Elles perdent des électrons et se retrouvent chargées positivement au sommet du nuage, alors qu'à la base du nuage elles sont chargées négativement.

Répartition des charges électriques à l'intérieur d'un cumulonimbus



La foudre et le tonnerre

La différence de potentiel électrique entre un cumulonimbus et la terre ou entre diverses parties d'un même nuage peut atteindre des dizaines de millions de volts.



La foudre se produit entre les zones dont les charges sont opposées, soit entre les nuages ou entre un nuage et la terre. (Encyclopædia Britannica)

Lorsque l'ionisation de l'air devient importante, l'air devient alors un fluide très conducteur qu'on appelle *plasma*. Lorsque la tension dépasse le point de rupture, une décharge brutale se manifeste sous forme d'un arc électrique dont l'intensité peut dépasser plusieurs dizaines de milliers d'ampères. Cette décharge brutale porte le nom de *foudre*. On réserve le terme *d'éclair* à la manifestation lumineuse qui accompagne ce phénomène. La longueur d'un éclair peut dépasser plusieurs km mais le canal que suit la foudre n'est que de quelques cm de diamètre. Tout comme dans une explosion, c'est la dilatation brutale de l'air le long du cheminement de la foudre qui est la cause du bruit, le *tonnerre*.



La foudre et les volcans



Dans les nuages de cendre projetés par un volcan en éruption, les myriades de grains de poussière subissent les mêmes frottements que les gouttelettes d'eau dans les nuages d'orage. On voit alors se former des zones comportant un fort potentiel électrique. Les décharges de foudre sont fréquentes et on peut observer de nombreux éclairs zébrant les nuages volcaniques.

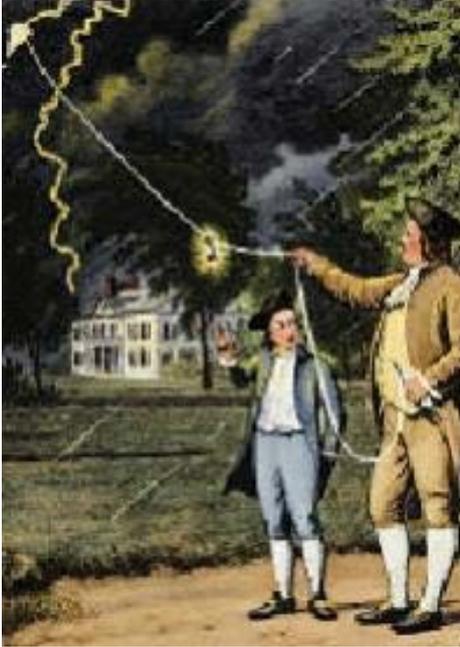
Eclairs traversant le nuage de cendre lors de l'éruption du volcan japonais Sakurajima (Photo Martin Rietze)

Quelle distance me sépare-t-elle d'un éclair ?

Si la vitesse de la lumière est de 300'000 km/s, celle du son dans l'air n'est que de 340 m/s. Il lui faut donc environ 3 secondes pour parcourir un km.

Au moment où voyez l'éclair, commencez à compter lentement à la vitesse de l'écoulement des secondes. Attribuez le chiffre 0 à l'instant de l'éclair. Divisez ensuite le chiffre atteint à l'instant où vous entendez le tonnerre par 3 et vous obtenez alors le nombre de kilomètres qui vous sépare de l'éclair. Faites cette opération plusieurs fois et vous saurez si l'orage se rapproche ou s'éloigne de vous !

Benjamin Franklin explique la nature de la foudre



C'est Benjamin Franklin qui, en 1750, suggère que les éclairs sont des décharges de nature électrique. En juin 1752, pour démontrer son hypothèse, il lança un cerf-volant en direction d'un nuage d'orage. L'humidité de la ficelle de chanvre la rendait légèrement conductrice. Franklin avait attaché une clé à l'extrémité inférieure de la ficelle. En approchant son doigt de la clé il déclencha une étincelle bien visible. Son hypothèse sur la nature des éclairs a été ainsi démontrée.

Expérience du cerf-volant



Benjamin Franklin, 1706-1790

L'effet de pointe

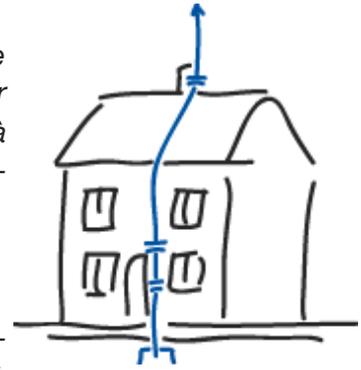


Foudre frappant la tour Eiffel

Dans un conducteur, les charges électriques de même signe se repoussent et cherchent à s'éloigner le plus qu'elles peuvent les unes des autres. À l'extrémité d'une pointe la densité de charge devient maximum. Cela rend l'air conducteur au voisinage de la pointe ce qui offre à la foudre un chemin plus facile et lui permet de relier les charges électriques entre un nuage et la terre.

Invention du paratonnerre

Benjamin Franklin proposa de placer sur les édifices une tige métallique pointue reliée à la terre. Il venait d'inventer le premier paratonnerre. Les charges positives de la terre s'accumulent à l'extrémité du paratonnerre, attirent les charges négatives du nuage et favorisent la canalisation de la foudre vers la terre.

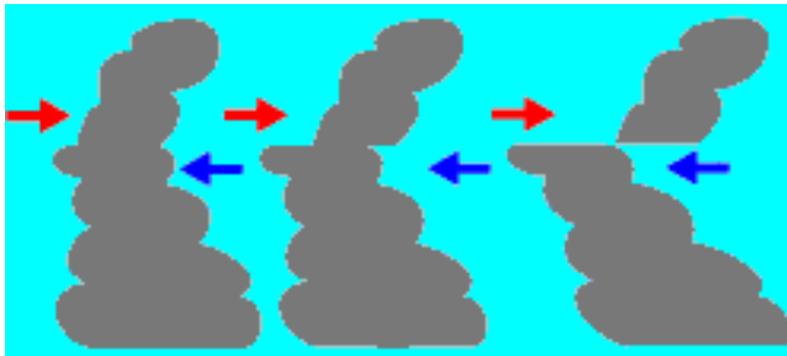


Un peu plus sur les orages

Le mécanisme expliqué plus haut concerne ce que les météorologues nomment un orage monocellulaire ou encore orage pulsatif.

C'est l'orage le plus simple qui se produit en l'absence de vent. Il ne dure que moins d'une heure.

Il existe d'autres types d'orages, dits multicellulaires, lorsque plusieurs cellules orageuses se développent parallèlement les unes aux autres. Cela se produit souvent lorsqu'il y a du vent dont la force varie avec l'altitude.



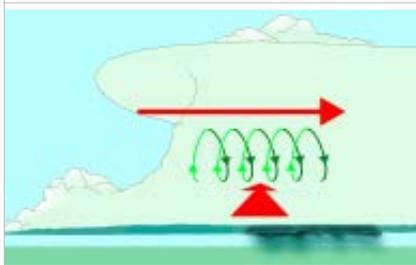
Cisaillement du vent en altitude pouvant provoquer la formation de plusieurs cellules orageuses.

L'emplacement du courant descendant est alors décalé en regard du courant ascendant. La conséquence est la production d'une succession de cellules orageuses qui peuvent former une **ligne orageuse** dont l'existence peut durer plusieurs heures. En réalité, il y a de nombreuses variantes d'orages multicellulaires et ce n'est pas notre propos de les décrire tous ici.

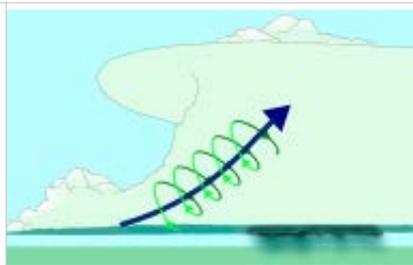
Les orages supercellulaires

On décrit sous le qualificatif de **supercellulaire** un orage d'une grande extension au sein duquel s'amorce un mouvement tourbillonnaire ascendant dit **mésocyclonique**. Cela se produit lorsque la force des vents varie avec l'altitude.

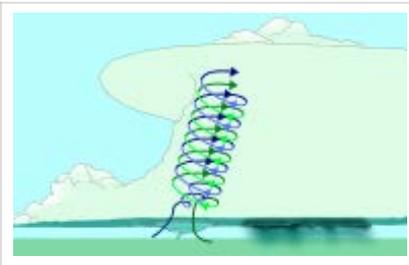
Mécanisme de formation d'une cellule mésocyclonique*



Le vent cisailant combiné avec le courant ascendant provoque une rotation horizontale



Le courant ascendant redresse la spirale de vent.



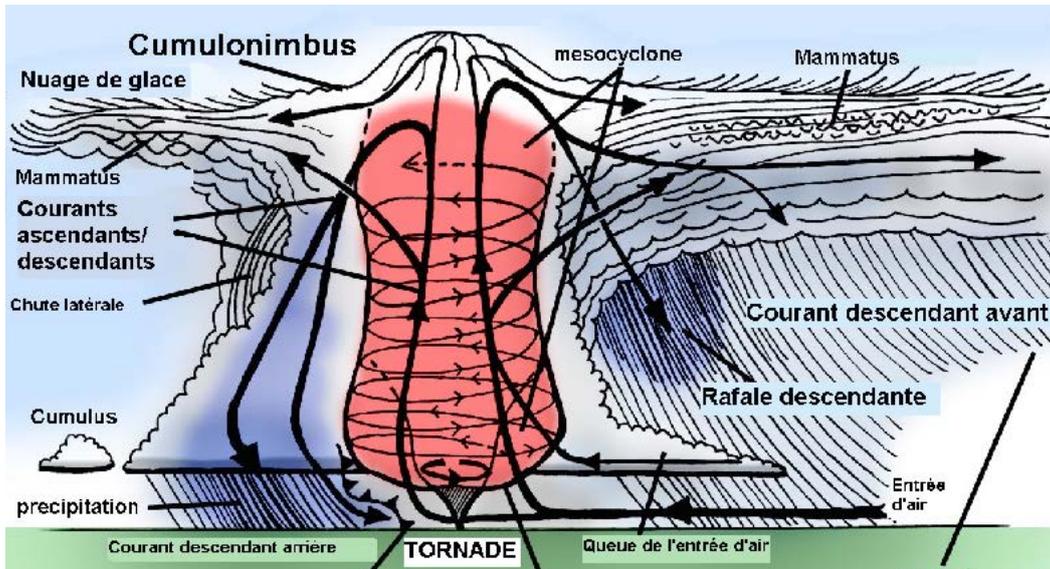
Le courant ascendant, entraîné par la rotation se transforme en un mésocyclone.

* Schéma de Vanessa Ezekowitz, tiré de Wikipédia

Les orages supercellulaires apparaissent le plus souvent dans les grandes plaines, en particulier dans les grandes plaines canadiennes et américaines. Ils ont souvent une grande extension horizontale. Ce sont les formes les plus violentes d'orage. Ils peuvent générer des pluies torrentielles, des chutes de grêle et des vents violents.

Le mouvement tourbillonnaire commence par être horizontal sous l'effet conjoint du mouvement ascendant et du vent horizontal. Puis le courant ascendant redresse le tourbillon qui prend place au milieu du système nuageux.

Les schémas ci-dessous montrent la complexité des mouvements de l'air à l'intérieur d'un système orageux supercellulaire.



Coupe verticale à travers une structure orageuse supercellulaire



Formation nuageuse annonçant un orage supercellulaire

Les tornades

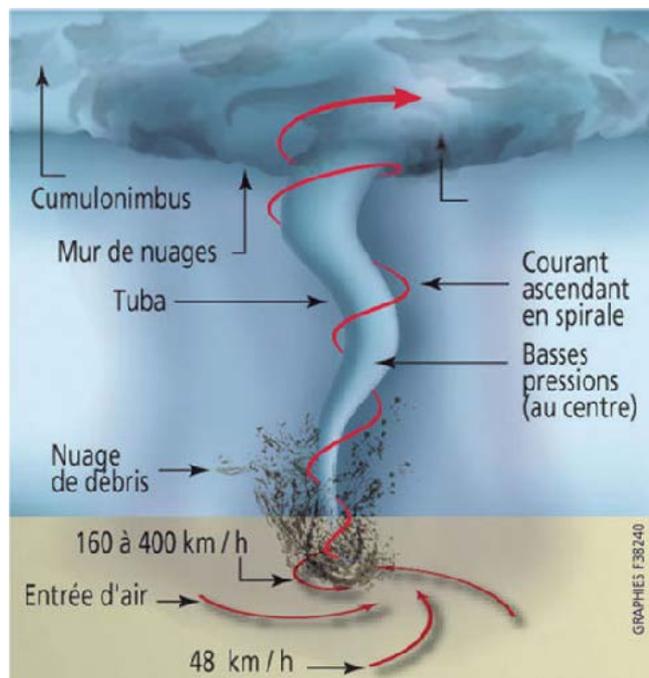


Passage d'une tornade près de la vile de Fatick à l'Ouest du Sénégal, le 12 octobre 2014

Une tornade est un tourbillon de vent

Une tornade est un tourbillon de vents qui se développe généralement au-dessous d'une masse nuageuse orageuse importante. On voit apparaître une tornade au voisinage de courants ascendants, en particulier au-dessous des cellules d'orages supercellulaires. Le courant mésocyclonique qui accompagne un tel orage peut former un entonnoir nuageux. Mais ce n'est que lorsque ce mouvement tourbillonnaire touche le sol qu'on parle alors de tornade. On parle de *trombe marine* lorsque la tornade prend naissance au-dessus de l'eau.

La tornade prend la forme d'un entonnoir faiblement conique dont la pointe en contact avec le sol a un diamètre de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le diamètre du corps de la tornade est de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. La longueur de cet entonnoir peut atteindre plusieurs kilomètres.



Structure d'une tornade

Au centre de l'entonnoir, la pression atmosphérique chute brusquement. La vitesse du vent sur les bords du tourbillon peut atteindre plusieurs centaines de km/h. Les tornades ont un impact très localisé et une durée de vie très éphémère mais leur violence est extrême.

La vitesse des vents mesurée sur les bords de la tornade peut dépasser 400 km/h. A l'intérieur ces vitesses peuvent être encore beaucoup plus élevées. La très forte baisse de pression à l'intérieur de la tornade peut faire exploser les portes et les fenêtres d'une maison au moment de son passage.

Elles se déplacent à une vitesse comprise entre 50 et 100 km/h, ravageant tout sur leur passage sur une largeur de quelques dizaines de mètres. Une tornade peut durer de plusieurs minutes à quelques heures. Après avoir atteint son intensité maximale, le tuba rétrécit en s'inclinant à l'horizontale, se déforme et finit par mourir.

L'intensité des tornades

Il existe une échelle de l'intensité des tornades. Elle a été établie par Tetsuya Théodore Fujita, un météorologue de Chicago.

<i>Echelle de l'intensité des tornades dite échelle de Fujita</i>		
<i>Catégorie</i>	<i>Vitesse du vent</i>	<i>Effets dévastateurs</i>
<i>F0</i>	<i>60 à 120 kmh</i>	<i>Légers dégâts</i>
<i>F1</i>	<i>120 à 180 km/h</i>	<i>Dégâts modérés : arbres déracinés, autos renversées</i>
<i>F2</i>	<i>180 à 250 km/h</i>	<i>Dégâts importants : toits arrachés, hangars démolis, maisons mobiles renversées.</i>
<i>F3</i>	<i>250 à 330 km/h</i>	<i>Dégâts considérables : les murs extérieurs et les toits sont projetés dans les airs, des maisons et des bâtiments s'effondrent ou subissent des dégâts importants, les arbres sont arrachés.</i>
<i>F4</i>	<i>330 à 420 km/h</i>	<i>Dégâts dévastateurs : les habitations solides s'effondrent, de gros objets en acier ou en béton sont projetés à grandes distances.</i>
<i>F5</i>	<i>420 à 510 km/h</i>	<i>Dégâts incroyables : les habitations sont rasées ou projetées sur de grandes distances, dommages très importants à de grosses structures telles que les écoles et les motels.</i>
<i>F6 à 12</i>	<i>510 à plus de 700 km/h</i>	<i>Dégâts incommensurables. Les automobiles et les gros objets se transforment en projectiles.</i>



Des dizaines de demeures endommagées par le passage d'une tornade en novembre 2013 dans l'Etat de l'Illinois. (Photo Tasos Katopodis, Agence France-Presse).



Photo aérienne montrant la trace laissée par une tornade sur son passage.

Les dégâts importants restent limités à quelques dizaines de mètres du passage de la tornade

Les cyclones tropicaux



Le cyclone "Catarina" vu de la station spatiale internationale le 26 mars 2004. Situé dans l'Atlantique sud, les vents tournent dans une direction horaire autour de l'importante dépression qui forme l'œil du cyclone

Qu'est-ce qu'un cyclone tropical ?

Sous le nom général de cyclone tropical, on désigne une dépression plus ou moins sévère qui prend naissance au-dessus des océans de la zone intertropicale. En faits, c'est une zone étendue de nuages d'orage qui s'organisent en rotation avec des vents violents.

Les ingrédients qui animent un cyclone tropical sont :

- *une mer très chaude,*
- *une zone dépressionnaire de vaste étendue.*
- *l'intervention de Monsieur Coriolis*

L'air surchauffé et humide s'élève, se refroidit en prenant de l'altitude et se condense en un nuage. La condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes est une réaction exothermique qui dégage de l'énergie sous forme de chaleur. Celle-ci augmente encore la vitesse ascensionnelle des nuages. L'air aspiré dans cette spirale est remplacé par des vents de surface qui se mettent à tourner sous l'effet des forces de Coriolis. Le sens de rotation est celui des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord.

Si les conditions sont favorables, le cyclone peut atteindre un diamètre de plusieurs centaines de km et la masse nuageuse peut se développer jusqu'à 20 km de hauteur.

Suivant la vitesse des vents les météorologues parlent :

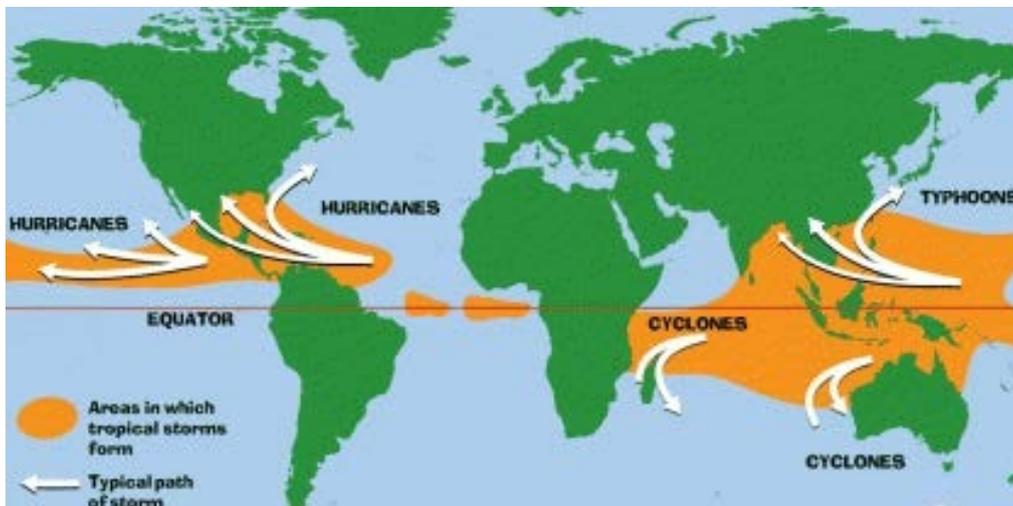
- *dépression tropicale* lorsque la vitesse du vent ne dépasse pas 63 km/h
- *tempête tropicale* lorsque la vitesse du vent est comprise entre 63 et 117 km/h
- *ouragan, cyclone, ou typhon* lorsque la vitesse des vents dépasse 117 km/h les vents et qui montre un œil dégagé de toute nébulosité en son centre.

Les termes d'ouragan (hurricane en anglais), de cyclone ou de typhon sont des noms locaux qui désignent tous le même phénomène. On parle de typhon dans le Pacifique nord à l'ouest de la ligne de changement de jour, de cyclone tropical dans le Pacifique sud et l'Océan indien et d'ouragan dans l'Atlantique et dans le Pacifique sud, à l'est de la ligne de changement de jour.



Appellation des cyclones selon les régions. Signalons encore le terme hurricane qui est la traduction américaine d'ouragan

Les cyclones tropicaux se développent généralement dans la région des orages tropicaux soit entre 10° et 30° de latitude. Ils sont beaucoup moins fréquents lorsqu'on se rapproche de l'équateur car les forces de Coriolis, indispensables pour amorcer les mouvements tourbillonnaires, sont trop faibles.



Zones de formation des cyclones tropicaux

Effets et puissance d'un cyclone

La pression atmosphérique tombe brutalement vers le centre de la dépression jusqu'à 890 hPa ce qui correspond à la pression qui règne habituellement à l'altitude de 1'000 mètres. Cette basse pression entraîne une élévation du niveau de la mer qui peut atteindre plusieurs mètres, ce qui favorise la formation de raz-de-marée.

Le cyclone produit d'abondantes précipitations et des vents violents. Il peut tomber jusqu'à près de 500 mm d'eau en quelques heures, ce qui provoque des inondations importantes. En se rapprochant de l'œil du cyclone, la violence des vents augmente et leur vitesse peut atteindre plusieurs centaines de km/h. La force destructrice est souvent extrêmement violente et l'énergie dégagée sous forme de chaleur par les plus puissants cyclones correspond à l'explosion d'une bombe nucléaire de 10 mégatonnes chaque 20 minutes. A l'intérieur de l'œil, le ciel est clair et les vents restent faibles.

Un cyclone se déplace et s'auto-entretient

Les cyclones se déplacent généralement d'Est en Ouest à la vitesse d'environ 30 km/h. Tant qu'il circulent au-dessus de mers chaudes, la chaleur et l'air humide constituent le meilleur carburant pour entretenir la violence d'un cyclone. En arrivant au-dessus des terres, ils s'affaiblissent se transforment en tempête tropicale puis finissent par disparaître.

Violence des cyclones

Les météorologues ont classé les cyclones en 5 catégories selon la violence de leurs effets. Voici cette échelle :

Catégorie	Vitesse des vents	Effets dévastateurs
1	de 119 à 153 km/h	Elévation du niveau de la mer de 1 m à 1,7 m. Peu de dégâts, inondations possibles.
2	de 154 à 177 km/h	Elévation du niveau de la mer de 1,80 m à 2,60 m. Dégâts notables aux habitations légères. Inondations des routes côtières quelques heures avant l'arrivée de l'œil du cyclone.
3	de 178 à 209 km/h	Elévation du niveau de la mer de de 2,70 m à 3,80 m. Les gros arbres sont déracinés. De nombreuses toitures sont arrachées ou fortement endommagées. Routes coupées par des inondations.
4	de 210 à 249 km/h	Elévation du niveau de la mer de 3,90 m à 5,60 m. Nombreux arbres arrachés. Importants dégâts aux toits et aux fenêtres. Inondations importantes le long des côtes.
5	plus de 249 km/h	Elévation du niveau de la mer de plus de 5,60 m. Peu de portes et fenêtres résistent. Destruction de nombreuses habitations, inondations un peu partout.
Tempête tropicale	de 63 à 117 km/h	Vents soutenus pouvant s'accompagner d'une hausse locale du niveau de la mer d'environ 1 mètre
Dépression tropicale	de 0 à 62 km/h	Perturbation tropicale de moyenne intensité avec des vents tournant autour du centre de la dépression.

Les noms des cyclones

Dès leur formation, les cyclones reçoivent un nom. Les coutumes varient suivant les régions. Les Espagnols leur attribuaient le nom du saint patron du jour. Puis la coutume est venue de leur donner un prénom féminin. A la suite des protestations des mouvements féministes, on leur attribue alternativement un prénom masculin et un prénom féminin.



Cyclone Lam arrivant sur les côtes du Nord de l'Australie le 18 février 2015 (photo Ryan Mac Kenzie)

Le parcours du cyclone Haiyan

Le 3 novembre 2013 une perturbation tropicale se forme dans les eaux chaudes du Pacifique à l'Ouest de la Micronésie. Dès le lendemain, elle se transforme en tempête tropicale. L'agence météorologique du Japon lance une alerte cyclonique et baptise ce cyclone Haiyan.

Le 5 novembre, le typhon présente un diamètre de 110 km, il gagne d'intensité, son œil s'agrandit et les autorités estiment qu'il atteint son état de super-typhon. Le 6 novembre, le président des Philippines lance une alerte générale. Les écoles sont fermées, près de 4 millions de personnes sont déplacées.

Le 8 novembre le typhon Haiyan atteint les Philippines. Des vents de 315 km/h ont été enregistrés. Les localités côtières ont été submergées par des vagues de plus de 7 mètres. La petite ville côtière de Tacloban a été entièrement détruite et on a dénombré près de 10'000 morts. On estime que ce typhon est l'un des plus puissants jamais enregistrés.

Après son passage sur les Philippines, le cyclone perd de son intensité et en arrivant sur le Viet-Nam ce n'est plus qu'une tempête tropicale accompagnée de pluies violentes qui inondent le pays.



*Itinéraire suivi par le cyclone Haiyan
Les couleurs correspondant à l'intensité
du cyclone, selon l'échelle d'intensité de
Saffir-Simpson.*



Scène de désolation après le passage du typhon Haiyan, aux Philippines. (photo Noël Celis AFP).

Quelques cyclones catastrophiques

Le 5 août 1975, un super-typhon baptisé **Nina** balaye plusieurs provinces chinoises, entraînant la mort de 171'000 personnes. Les vents ont atteint la vitesse de 250 km/h. Plusieurs barrages se sont effondrés, aggravant considérablement les inondations.

En novembre 1979, un cyclone tropical, connu sous le nom de **Bohla**, prend naissance dans le golfe du Bengale. Il atteint, dans la nuit du 12 au 13 novembre, le Bangladesh dans le delta du Gange où vit une nombreuse population au niveau de la mer. Les vents ont soufflé à près de 200 km/h. On estime que la vague gigantesque qui a balayé toute cette région a causé la mort d'environ 300'000 personnes. Sur la seule île de Bohla on compte 100'000 victimes.

En août 2005, l'ouragan **Katrina** dévaste gravement la Nouvelle Orléans et la Louisiane, causant la mort de près de 2'000 personnes, entraînant pour plus de 100 milliards de dollars de dégâts. Des vagues de 11 mètres ont été enregistrées sur la côte.

Le 8 novembre 2013, le super-typhon **Haiyan** ravage les Philippines, causant la mort de 10'000 personnes. Avec des vents dépassant 300 km/h, ce typhon est considéré comme le cyclone le plus puissant de l'histoire récente.

Récemment, les 13 et 14 mars 2015, les îles du Vanuatu ont été ravagées par un cyclone de catégorie 5. La vitesse des vents a atteint 340 km/h. Les dégâts sont immenses pour ce petit Etat de 260'000 habitants.

Les climats régionaux

Ce qui influence le climat

Le climat est l'équilibre atmosphérique qui règne en moyenne dans une région donnée. On le ressent par ses variations saisonnières de température, par ses épisodes pluvieux, par la sensation d'humidité ou de sécheresse de l'air et par les vents et les épisodes orageux qui balaient épisodiquement ladite région.

Les géographes et les climatologues ont cherché à classer les divers climats. Plusieurs classifications on vu le jour. La plus utilisée a été proposée vers 1900 par Wladimir Peter Köppen, un climatologue et botaniste allemand. Il définit chaque climat par trois lettres :

1. la première désigne le type de climat,
2. la seconde indique la régime pluviométrique,
3. la troisième décrit les variations de température.

Evidemment, si je décris le climat de la région genevoise par "**C f b**", selon M. Köppen, cela ne vous donne que peu de renseignements si vous n'avez pas la clé du système ! Dans ce cas précis, **C** indique qu'on est dans un climat tempéré, **f** indique des précipitation réparties sur tout l'année et **b** indique que la moyenne de température des 4 mois les plus chauds est supérieure à 10°.

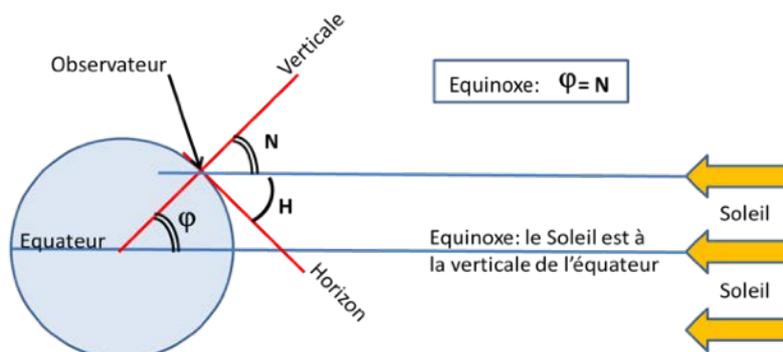
Aussi, laissons cette classifications aux climatologues et décrivons plus simplement les quelques types de climat que nous pouvons ressentir en voyageant sur notre bonne vieille Terre.

Le climat d'une région est la résultante de nombreux facteurs dont les principaux sont :

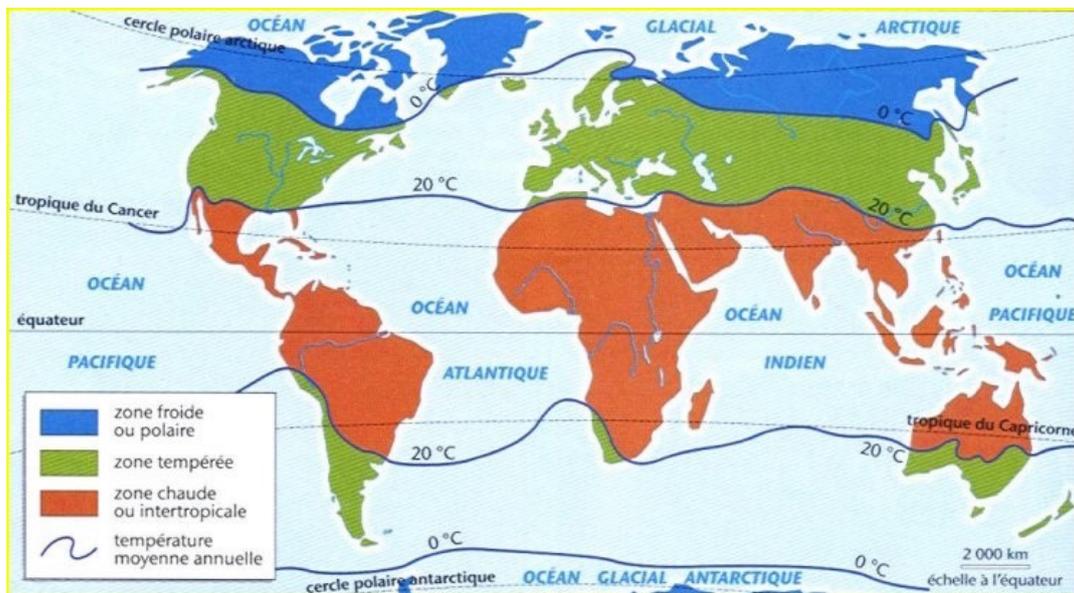
- la **latitude** dont dépend l'intensité de l'ensoleillement, donc de la quantité de chaleur reçue,
- l'**altitude** qui entraîne un abaissement de la température d'environ 6,5° chaque fois qu'on monte de 1'000 mètres au-dessus du niveau de la mer,
- les **précipitations** qui favorisent le développement d'une végétation ou dont l'absence conduit à la présence de zones plus ou moins désertiques,
- la **proximité d'océans** qui atténuent les variations extrêmes de température et apportent une certaine humidité,
- l'**importance de la nébulosité** qui diminue les écarts de température entre le jour et la nuit.

La latitude et l'incidence des rayons solaires

La latitude géographique est l'angle entre la verticale d'un lieu et le plan équatorial de notre planète. Cet angle est donc de 0° à l'équateur et 90° aux pôles.



Angle d'incidence des rayons solaires lors des équinoxes



Température moyenne en fonction de la latitude :

- zone intertropicale : temp. supérieure à 20°
- zone tempérée : temp. comprise entre 0° et 20°
- zone polaire : temp. inférieure à 0°

A l'équinoxe de printemps ou d'automne, lorsque le soleil est au zénith à l'équateur, l'angle d'incidence des rayons solaires est de 90° à l'équateur et 0° aux pôles.

La chaleur dispensée par le soleil est donc maximum à l'équateur et nulle aux pôles. La température moyenne d'une région décroît de la zone équatoriale en se rapprochant des pôles. Les géographes ont donc défini trois zones climatiques en fonction de leur température moyenne : la zone intertropicale, la zone tempérée et la zone polaire.

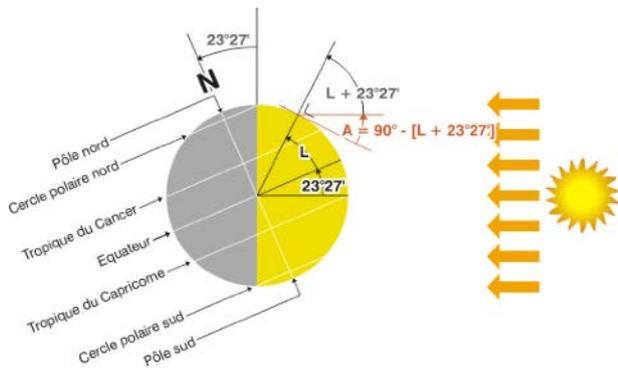
Par ailleurs, en allant de l'équateur vers les latitudes plus élevées, on passe progressivement d'une zone de basse pression avec ses précipitations abondantes, vers la zone de haute pression de la zone intertropicale avec son absence ou ses faibles précipitations.

Mais l'inclinaison de l'axe de la Terre complique les choses

Mais voilà, l'axe de rotation de la Terre est incliné de 23,5° sur le plan de l'équateur. L'angle d'incidence des rayons solaires varie donc au cours de l'année. A l'équateur, si le soleil est exactement au zénith au moments des équinoxes, il faut soustraire 23,5° aux moments des solstices, soit 66,5°.

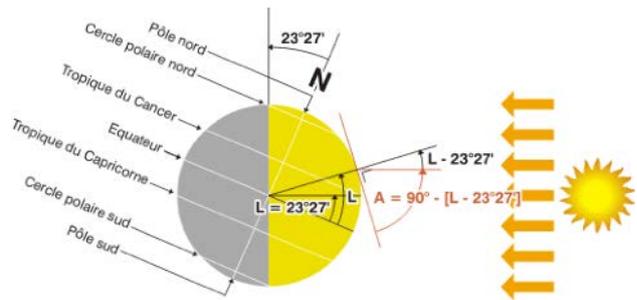
Cette alternance est responsable du **cycle des saisons**. A l'équateur, le Soleil ne s'éloigne de sa position zénithale que de 23,5° de part et d'autre de l'équateur.

Mais, aux latitudes plus élevées, à Genève par exemple dont la latitude est de 46° N, la différence est beaucoup plus sensible : en été, l'angle d'incidence du soleil est de 69,5° (46° + 23,5°) lors du solstice d'été mais n'est plus que de 22,5° (46° - 23,5°) lors du solstice d'hiver. La différence est donc de 47°. Plus on s'éloigne de l'équateur, plus la différence d'inclinaison du Soleil entre l'été et l'hiver est importante et plus la différenciation entre les saisons devient plus marquée.



Solstice d'hiver (21 décembre)

L'angle d'incidence des rayons solaires est de 66,5° à l'équateur.



Solstice d'été (21 juin)

L'angle d'incidence des rayons solaires est de 66,5° à l'équateur.

La différence d'ensoleillement est encore accentuée par la longueur du jour qui diminue en hiver et augmente en été. Le calcul de la longueur du jour pour une latitude donnée est un peu compliqué. Pour ceux qui voudraient effectuer ce calcul, reportez-vous à l'équation suivante :

où
$$D = 24 - \frac{24}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left(\tan \lambda \tan \left(\sin^{-1} (\sin \alpha \sin \delta) \right) \right)$$

- λ = latitude du site considéré
- δ = angle parcouru par la terre sur son orbite depuis sa position à l'équinoxe de printemps
- α = latitude des tropiques (23°27').

Le rôle de l'altitude

La pression de l'air diminue avec l'altitude entraînant une baisse de la température. En termes savants on parle du "gradient thermique adiabatique". Dans un air sec, sans perturbations dues au vent, on admet que la température baisse de 6,5° par mille mètres d'altitude. C'est la baisse de température avec l'altitude qui permet la persistance des "neiges éternelles" et des glaciers.

Toutefois, si l'air est humide, à une certaine altitude on atteint le point de rosée, l'humidité va se condenser en gouttelettes d'eau et former un nuage. La chaleur dégagée par la condensation réchauffe alors l'atmosphère et perturbe ainsi la diminution linéaire de la température.

Rappelons que la baisse de température avec l'altitude se limite à la troposphère et qu'au-delà, dans la stratosphère, d'autres phénomènes apparaissent.

L'inversion de température

En contradiction avec ce que nous venons d'exposer, il arrive parfois que la température de l'air en altitude est supérieure à celle qui règne près du sol. C'est une inversion de température. Cela se produit généralement lorsqu'une masse d'air froid se glisse sous une masse d'air chaud. Par absence de vent, ces deux masses d'air ne se mélangent pas et l'air froid stagne près du sol. Cela se passe surtout l'hiver lorsque la pression atmosphérique est élevée (situation anticyclonique)

Dans nos régions, c'est la fameuse nappe de brouillard (ou smog chez les Anglais) qui apparaît souvent en hiver. Les conséquences d'une période prolongée d'inversion de température sont pernicieuses : les polluants, les fumées et les poussières s'accumulent et restent piégés dans la couche froide. Cela pose un grave problème de santé. En hiver 1952, à Londres le smog a entraîné la mort de plusieurs milliers de personnes en quelques jours.

*Le smog à Paris, le 22 mars
2015 (photo AFP)*



La région genevoise est une véritable cuvette enfermée entre le Jura d'un côté, le Vuache, le Salève et les Voirons de l'autre côté. Cette inversion de température est fréquente en hiver et c'est un véritable couvercle de brouillard qui recouvre le bassin lémanique et la vallée de l'Arve alors que sur le haut du Salève on trouve un soleil éclatant.



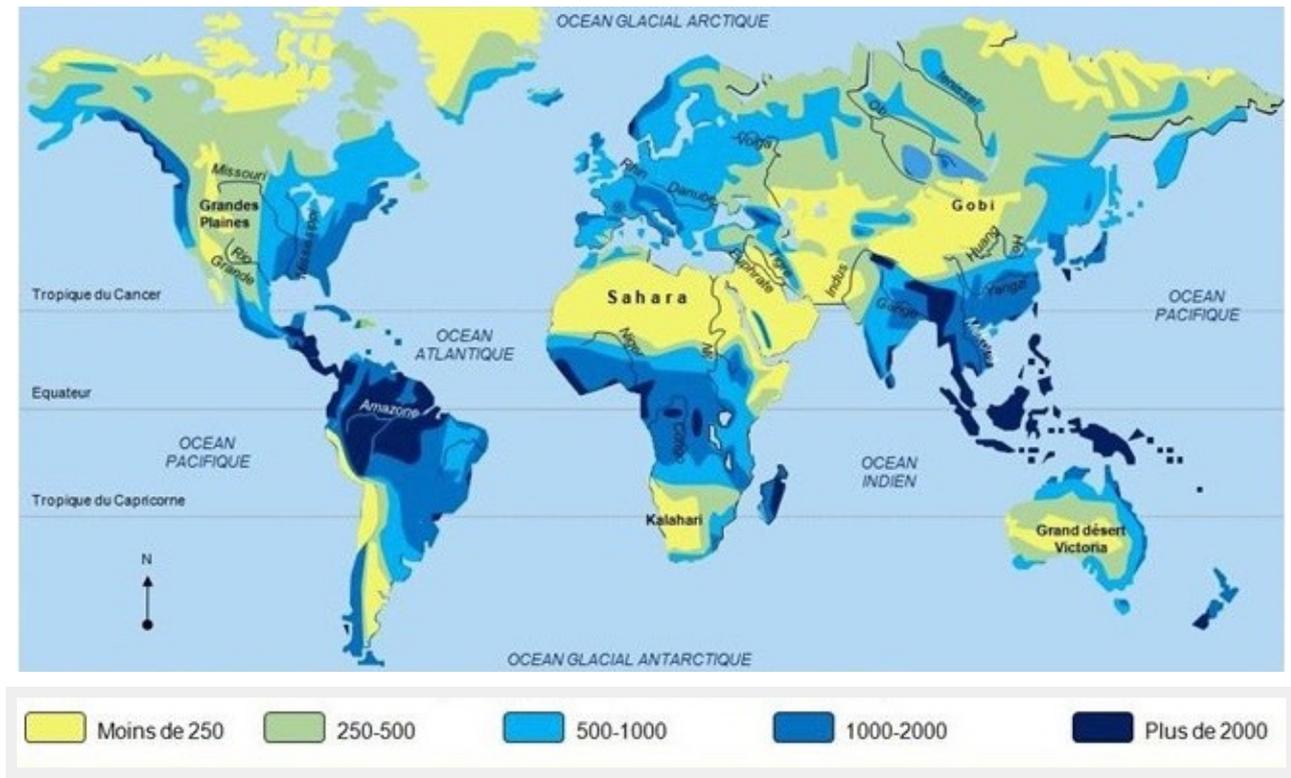
Mer de brouillard recouvrant le bassin lémanique.

Les précipitations

Les précipitations abondantes de la zone cyclonique équatoriale favorisent le développement de la végétation et des forêts. Cela favorise l'habitat grâce à l'agriculture et la faune abondante.

Au fur et à mesure qu'on se dirige vers les tropiques, les précipitations diminuent et au niveau de la zone tropicale anticyclonique, elles cessent parfois presque complètement et les déserts s'installent.

Puis en s'approchant des latitudes plus élevées, on arrive dans les zones sous l'influence des océans et des courants tièdes qui les parcourent et du régime des vents d'Ouest. La pluviosité augmente à nouveau, la température agréable favorise le développement des communautés humaines.



Moyenne des précipitations annuelles (en mm)

La proximité d'un océan

Les océans sont d'immenses réservoirs de chaleur. Ils se refroidissent ou se réchauffent beaucoup plus lentement que les zones continentales. Ils atténuent les différences de température entre l'été et l'hiver. En hiver, leur tiédeur adoucit les continents proches, en été, ils les rafraichissent. Ils apportent aussi l'air humide qui influe sur le régime des précipitations.

La couverture nuageuse

Un ciel nuageux constitue un écran qui retient la nuit le rayonnement infrarouge rayonné par la Terre et empêche un trop grand refroidissement nocturne.

La journée, l'albédo des nuages réfléchit une partie du rayonnement solaire, atténuant une trop forte augmentation de la température. Une couverture nuageuse atténue donc les grandes différences de température entre le jour et la nuit.

Au Sahara, où la couverture nuageuse est inexistante, les journées sont brûlantes mais les nuits peuvent être glaciales.

Dans les régions polaires, l'absence de nuages entraîne un très fort refroidissement durant la nuit. Les températures peuvent descendre en-dessous de -40° . La journée, le Soleil qui reste très bas sur l'horizon, ne réchauffe que faiblement l'environnement.

Description classique des climats

Il n'y a évidemment pas de limite précise entre les diverses zones climatiques. En partant de l'équateur, on passe progressivement d'un climat chaud et humide vers un climat tropical qui voit les précipitations diminuer. A la hauteur des tropiques, on arrive dans un régime de haute pression (zone anticyclonique), le ciel s'éclaircit, les précipitations diminuent fortement et on se dirige alors vers des régions désertiques.

En remontant encore vers des latitudes plus élevées, les vents d'ouest apparaissent, l'humidité revient et on trouve les climats de type océanique, méditerranéen ou continental.

En se rapprochant des pôles, l'énergie solaire reçue diminue d'intensité et on trouve à nouveau des zones anticycloniques: ce sont les climats polaires.

La carte ci-dessous montre la répartition de ces diverses zones climatiques.



Répartition des zones climatiques dans le monde
(dessin de Stéphane Tourneur, Collège Varlin, Le Havre)

	Equatorial		Océanique
	Tropical		Continental
	Aride		Polaire
	Méditerranéen		Montagnard

Climat équatorial

Il se caractérise par une chaleur élevée et une humidité constante. La température moyenne est de 28°. C'est une zone de basse pression avec des vents rares et des précipitations abondantes (jusqu'à 1'800 mm/an). Le climat est quasi constant tout au long de l'année. Tout au plus voit-on une légère diminution des précipitations au moment des solstices. Le soleil, souvent présent le matin provoque un mouvement ascendant de l'air humide qui aboutit à la for-

mation de cumulo-nimbus. Cela entraîne des précipitations orageuses souvent violentes vers le milieu de la journée.

La durée du jour est de 12 heures toute l'année et comme le Soleil descend perpendiculairement sur l'horizon, le crépuscule est très court et en quelques minutes il fait nuit.

Les sols calcaires sont rapidement lessivés en laissant sur place les oxydes de fer insolubles. C'est la *latérite* rougeâtre qui caractérise les sols des zones équatoriales et tropicales. La végétation naturelle est la forêt dense.



La forêt dense est la végétation naturelle de la zone équatoriale



Route en latérite, Cameroun (photo Michel Horenbeek)

Climat tropical

Lorsqu'on s'éloigne de l'équateur, on voit apparaître une différenciation toujours plus marquée des saisons. Lors du solstice d'hiver, les pluies diminuent et font place à une saison sèche. Lors du solstice d'été, les précipitations sont importantes. Il y a alternance d'une saison sèche et d'une saison des pluies. Plus on s'éloigne de l'équateur, plus la saison sèche dure longtemps.

On admet généralement qu'il s'agit du climat observé entre les deux tropiques. En réalité, on passe progressivement du climat équatorial vers les zones arides.

On définit comme climat tropical les régions où la température ne descend pas en-dessous de 18°. La quantité de pluie est importante lorsqu'on est encore proche de la zone équatoriale, puis elle diminue au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. On passe progressivement à :

- **climat tropical humide** caractérisé par une longue saison des pluies et une végétation de forêt tropicale humide,



- **climat tropical sec** caractérisé par un allongement de la saison sèche et par de moindres quantités de pluie. La végétation est la savane,



- **climat tropical aride** avec une saison des pluies très courte. La végétation est la steppe.



Climat aride

Aux alentours des tropiques, les précipitations sont nulles ou extrêmement faibles. L'ensoleillement est permanent. La différence de température entre le jour et la nuit est importante. L'environnement est caractérisé par une sécheresse quasi permanente. La végétation y est absente ou très rare et la faune peu abondante. C'est le **climat désertique chaud**. Les exemples les plus représentatifs sont le Sahara, le désert de Namibie, la Péninsule arabique et le désert australien. Les températures sont comprises entre 40° et 50° l'été. En hiver, la température demeure entre 15° et 25°. La nuit, la température peut descendre jusqu'à 0° à cause du fort rayonnement thermique du sol.



Erg ou champ de dunes au Sahara



*Reg ou désert de pierres dans l'Adrar Mauritanie
(Wikimedia)*



Désert d'Atacama, Chili



Désert de Simpson, Australie

L'aridité du désert d'Atacama, au Chili, est considéré comme un **désert doux**. Son aridité est due au manque de précipitations dû à l'important effet de fœhn provoqué par la barrière des Andes.

On trouve aussi des **déserts froids** dans des zones dites tempérées. Ce sont des plateaux généralement légèrement en altitude qui ne reçoivent pas ou peu de précipitations à cause d'un effet de fœhn dû à des reliefs qui assèchent les vents d'ouest. Le désert de Gobi, en Mongolie, en est un bon exemple.

Climat méditerranéen

Baptisé de méditerranéen, c'est le climat qui règne sur le pourtour de la Méditerranée. Il est caractérisé par des étés chauds et secs et par des hivers doux et humides. C'est le royaume des oliviers qui abondent sous ces conditions climatiques. En été la température moyenne est supérieure à 22° et dépasse fréquemment 30° durant la journée. La situation est anticyclonique et la nébulosité est rare ou absente. Il y a donc peu ou pas de précipitations. Dès l'automne, l'anticyclone se retire vers le Sud et laisse place à l'arrivée des perturbations d'Ouest. Les pluies sont fréquentes de septembre à avril.

La végétation est la **garrigue** sur les sols calcaires et le **maquis** sur les roches de nature granitique. La garrigue est un couvert végétal formé de buis, de genévriers et de chênes. Elle est le résultat de la déforestation intensive opérée par l'homme et les troupeaux de chèvres sur la forêt naturelle où dominaient les chênes. Le maquis est caractérisé par une végétation touffue de petits arbres.

Cette zone climatique n'est pas limitée au pourtour de la Méditerranée. On trouve le même type de climat en Californie du Sud, dans la région de Santiago au Chili et au sud-ouest de l'Australie. On trouve aussi des "îlots climatiques méditerranéens" dans des lieux limités protégés par des montagnes, orientés au Sud. En Suisse, les régions de Montreux ou de Sion et de Sierre bénéficient d'un microclimat méditerranéen.



Garrigue, La Couronne, Bouches-du-Rhône, France. Wikimedia

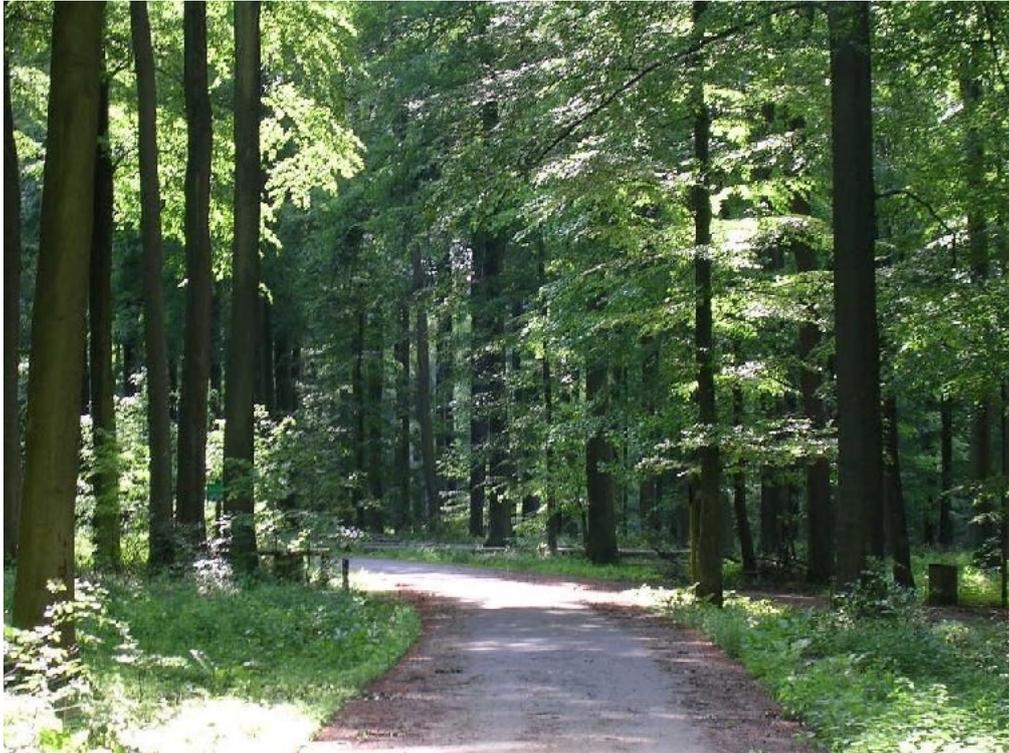


Maquis, Haute-Corse, entre Ponte Leccia et l'Île Rousse

Climat océanique

L'océan joue ici le rôle de régulateur de température et atténue les différences de température entre les saisons. Comme son nom l'indique le climat océanique règne dans les régions tempérées soumises à l'influence d'un océan. Il est caractérisé par des hivers doux et pluvieux et par des étés pluvieux et relativement frais. La température annuelle moyenne est comprise entre 8° et 16°. La quantité annuelle des précipitations est d'environ 1'000 mm.

Ce climat est très favorable à l'implantation des communautés humaines. L'agriculture y est prospère. La végétation naturelle est la forêt de chênes et de hêtres.



La forêt de Soignes à Bruxelles, la plus grande hêtraie d'Europe, est typique de la forêt des climats océaniques. Elle est constituée principalement de hêtres et de chênes

Les zones qui bénéficient de ce climat sont tributaires des courants marins chauds. Ainsi le Nord de l'Europe, les Iles britanniques et la Norvège bénéficient des eaux tièdes du Gulf stream. De même, la côte ouest des Etats-Unis bénéficie d'une partie des eaux encore tièdes du Kuroshivo. Par contre, le Chili et le Pérou, qui sont en contact avec les eaux froides du courant de Humboldt, ne sont pas sous l'influence d'un climat océanique.

Climat continental

C'est un climat typique des zones sises, dans l'hémisphère Nord entre 45° et 65° de latitude et éloignées de la mer. En s'éloignant du littoral, l'influence des océans diminue progressivement et on voit apparaître des différences thermiques beaucoup plus grandes entre l'été et l'hiver. Les hivers bénéficient d'une situation anticyclonique. Ils sont longs, secs et très froids. L'été est chaud et relativement pluvieux. Les pluies sont toutefois peu fréquentes et se manifestent sous forme d'orages. L'écart des moyennes de température entre l'hiver et l'été est caractéristique et peut atteindre 20° à 30°.

La végétation est la taïga constituée de prairies et d'immenses forêts de conifères parsemées de bouleaux et d'érables.



*Les prairies et la forêt de conifères caractérisent la végétation des zones continentales
(Photo Jean Philippe Delobel)*

Climat Polaire

C'est le climat des zones de hautes latitudes où le Soleil est toujours bas au-dessus de l'horizon en été et disparaît totalement pendant une partie de l'hiver. La durée du jour est longue en été et quasi nulle en hiver. A l'extrême limite, au Pôle, la nuit dure 6 mois en hiver et le jour 6 mois, en été.

Durant le court été, la température ne dépasse que très rarement 10°. Les hivers sont glaciaux avec des températures qui descendent souvent au-dessous de -40°. Comme la situation est en permanence anticyclonique, les précipitations sont faibles et tombent sous forme de neige. Le sol est gelé en permanence, empêchant la végétation de s'y installer. Toutefois, en bordure de la zone polaire, en bordure de la zone à climat continental, là où la rigueur du climat est moindre, la toundra peut s'installer. C'est le cas du Nord de la Sibérie où les tourbières offrent en été de maigres herbages aux troupeaux de rennes et aux quelques rares populations qui y vivent.



*Baie de Faraday, Péninsule antarctique
(Photo J. Deferne)*



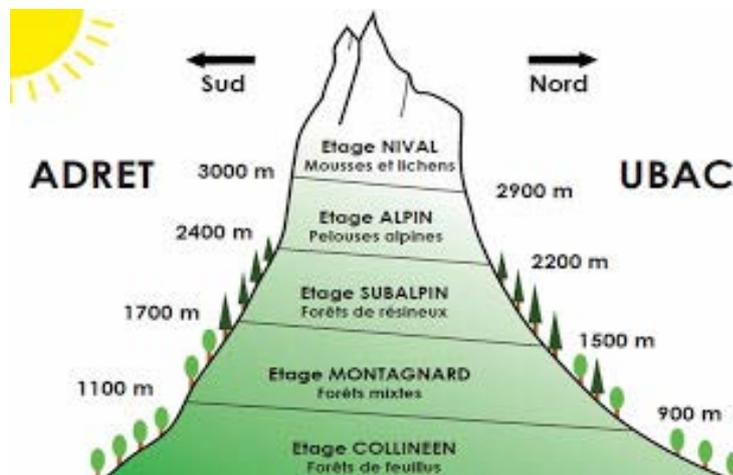
*Campement d'éleveurs de rennes, Péninsule de Yamal, Sibérie.
(Photo Steve Morgan)*

Climat de montagne

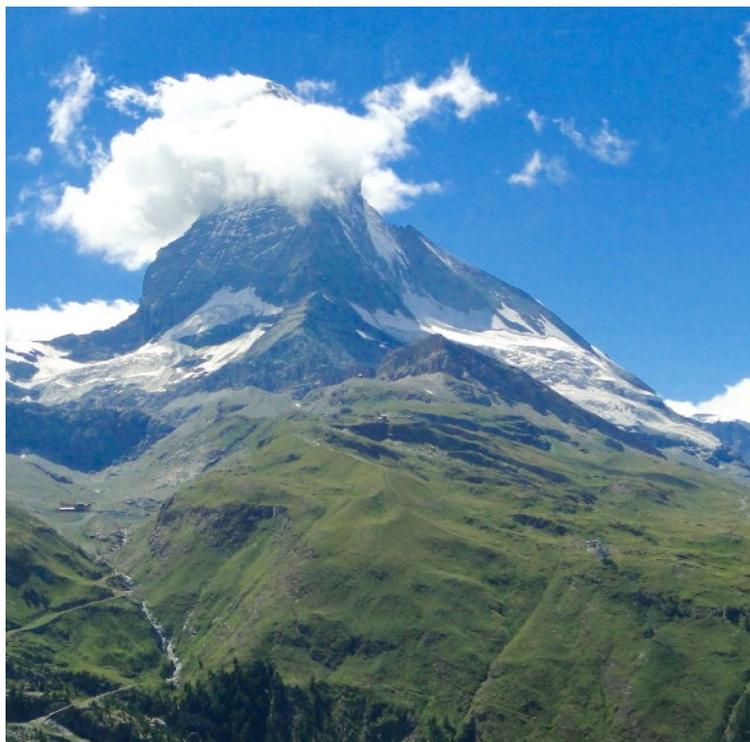
C'est la conséquence de la modification d'un climat qui règne à basse altitude. La température baisse d'environ 6.5° lorsque l'altitude augmente de mille mètres. Les précipitations augmentent aussi avec l'altitude. Le climat est caractérisé par des hivers froids et des étés frais et humides. Un manteau neigeux recouvre le sol en hiver. L'importance et la durée de l'enneigement dépend de l'altitude. L'ensoleillement en hiver dépend de l'orientation des vallées. Certains fonds de vallées très encaissées voient même le soleil disparaître en hiver pendant quelques semaines.

Adret et ubac

L'adret et l'ubac, mots bien connus des cruciverbistes, désignent, pour le premier, le flanc de vallée exposé au Sud, pour le second le flanc orienté vers le Nord. L'habitat et les quelques cultures possibles s'étagent du côté de l'adret. La végétation change progressivement avec l'altitude. Le schéma suivant montre cet étagement.



Etagement de la végétation dans les Alpes, en fonction de l'altitude



Etagement de la végétation

← lichens et mousses

← pâturages

← limite sup. des résineux

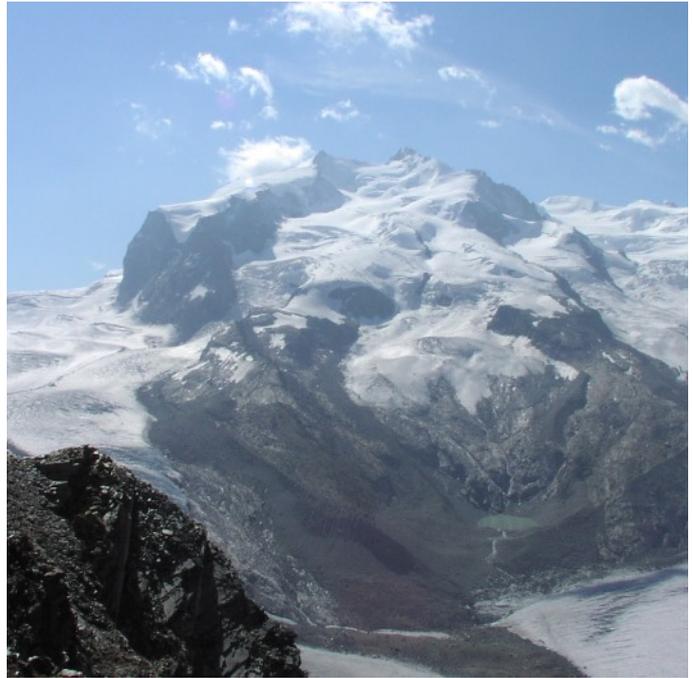


Région de Zermatt

*Etage des résineux, vers 1900 m.
mélèzes, aroles et prairie herbeuse.*

Massif du Mont-Rose

*Etage des neiges éternelles
et des glaciers*



Les glaciers aiment le climat de montagne

Au-dessus d'une certaine altitude, les précipitations tombent sous forme de neige. Ces chutes sont souvent importantes. Au sommet du Mont-Blanc, on enregistre la chute d'environ 40 mètres de neige. Avec l'alternance de la chaleur superficielle du jour et du froid de la nuit, cette neige se tasse et se transforme petit à petit en glace.

La glace possède une certaine plasticité et, comme un long fleuve, elle s'écoule lentement vers l'aval, occupant le fond des hautes vallées. Cet écoulement peut atteindre un mètre par jour. En arrivant vers des altitudes plus basses, la langue de glace, à l'avant du glacier, atteint des zones plus chaudes et sa fonte est plus rapide. Actuellement, les glaciers alpins fondent plus rapidement qu'ils ne se renouvellent et on observe un retrait régulier de la langue glaciaire ainsi qu'une diminution du volume de la glace.



Comme un long fleuve de glace : le glacier d'Aletsch, en Suisse, est le plus long glacier des Alpes

Les glaciers avancent lorsque l'alimentation en amont est supérieure à l'ablation de sa partie inférieure; ils reculent lorsque l'ablation est plus importante que son renouvellement par le biais des précipitations.

Depuis 1860, on observe un recul presque ininterrompu jusqu'à aujourd'hui. Il est indéniable que nous subissons depuis près de 150 ans un réchauffement continu. Au cours de la période historique on a enregistré plusieurs phases d'avance et de recul des glaciers, sans que l'on puisse clairement expliquer la cause de ces changements. Le réchauffement actuel fait suite au "petit âge glaciaire" qui s'est manifesté de 1300 jusque vers 1800 et qui a été marqué par une augmentation notable du volume des glaciers.

Lorsqu'on met tout ensemble !

Si les habitants du Sahara savent ce qu'est le climat désertique, si les Russes connaissent bien le climat continental et que les Bretons aiment leur climat océanique, il n'en est pas de même pour beaucoup de régions dont le climat n'est pas toujours un de ceux qui ont été décrits plus haut. On passe souvent insensiblement d'un climat à un autre. Parfois un climat régional résulte d'un mélange des climats types.

En Suisse on parle quatre langues différentes. Pour le climat c'est un peu la même chose et il faut utiliser la recette suivante :

- *prenez une pincée de climat maritime amené par les vents d'Ouest*
- *une pincée de climat continental du côté du Nord-Est,*
- *saupoudrez de quelques copeaux de climat méditerranéen du côté du Tessin, de Sion et de Montreux,*
- *nappez la région alpine de climat montagnard,*
- *ajoutez un zeste de foehn dans les vallées alpines.*

Ce cocktail climatique fait qu'on n'est jamais très sûr du temps qu'il fera le lendemain. C'est le lot des régions tempérées qui sont à la merci de l'humeur de l'anticyclone des Açores et des vents d'Ouest qui nous amènent beau temps ou précipitations.

Les paysans, les touristes, les capitaines de vaisseaux, les pilotes d'avion, ont besoin de savoir quel temps il fera le lendemain et les jours suivants. On a donc inventé la météorologie cette science qui essaye de nous dire comment va évoluer le temps dans l'avenir proche.

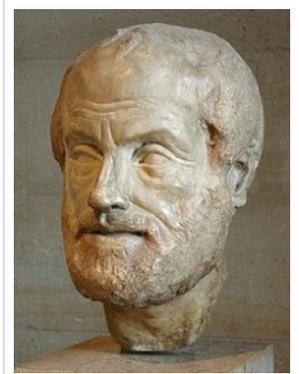
Prédire le temps à venir

C'est Aristote qui a inventé le terme **météorologie** vers 350 av. J.C. Il avait déjà décrit le cycle de l'eau :

"Maintenant le soleil, se déplaçant comme il le fait, met en branle un processus de changement, de devenir et de déclin qui par son action élève la plus fine et douce eau chaque jour, la dissout en vapeur et la transporte vers les hauteurs où elle se condense à nouveau par le froid et retourne ensuite à la terre."

Mais, pendant longtemps, la prévision du temps a été confiée aux devins et aux astrologues avec le peu de succès qu'on peut imaginer. Au 17ème siècle Torricelli observe que la hauteur de la colonne de mercure de son baromètre varie avec le temps et il remarque qu'une baisse de la hauteur du mercure précède bien souvent l'arrivée de la pluie.

La météorologie a pour étude les phénomènes atmosphériques qui déterminent le climat et le temps qu'il fait. C'est une science qui se base sur la mécanique des fluides (l'air), la thermodynamique qui prend en compte la température, la pression, l'hygrométrie et qui traite tout cela au moyen de modèles mathématiques très complexes.



Aristote 384-322 av. J.C.

Moyens d'observation

Aujourd'hui la météorologie s'appuie sur l'observation bien concrète de l'état de l'atmosphère dans de nombreux postes d'observation et sur la transmission instantanée de ces observations à des centres qui à partir d'une situation instantanée essayent de prévoir l'évolution de cet état dans les jours à venir

Les instruments

La météorologie n'a été rendue possible qu'après l'invention des instruments de mesures indispensables à l'appréhension des caractéristiques de l'atmosphère. Les principaux instruments sont :

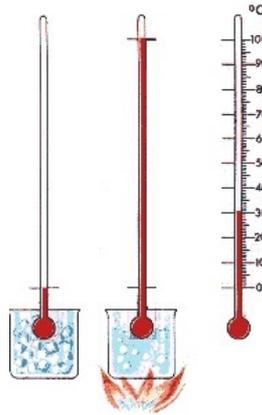
- le thermomètre qui mesure les températures,
- le baromètre qui mesure la pression atmosphérique,
- l'hygromètre qui mesure la quantité de vapeur d'eau renfermée dans l'air,
- l'anémomètre qui mesure la vitesse du vent.

Le **thermoscope**, construit en 1607 par Galilée, est considéré comme l'ancêtre du **thermomètre**. Le principe des thermomètres est basé sur la dilatation d'un liquide (mercure ou alcool) en fonction de la température dans un tube capillaire surmontant un petit réservoir. Divers physiciens ont proposé une échelle des températures. En 1717, Daniel Gabriel Fahrenheit fixe à 32° la température de la glace fondante et à 96° la température du sang. Cela porte à 212° la température de l'ébullition de l'eau. Cette échelle de température est encore utilisée aujourd'hui aux Etats Unis.

Les principaux instruments utilisés pour l'étude de la Météorologie



Anders Celsius (1701-1744)



Thermomètre

Basé sur la dilatation d'un liquide, mercure ou alcool coloré à l'intérieur d'un fin tube de verre.

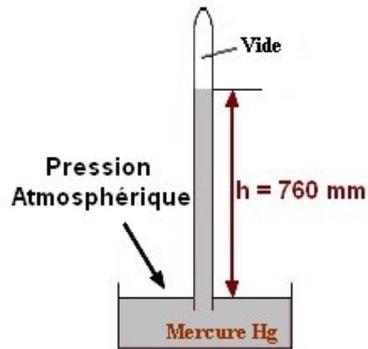
Echelle :

glace fondante 0°

eau en ébullition 100



Evangelista Torricelli (1609-1649)

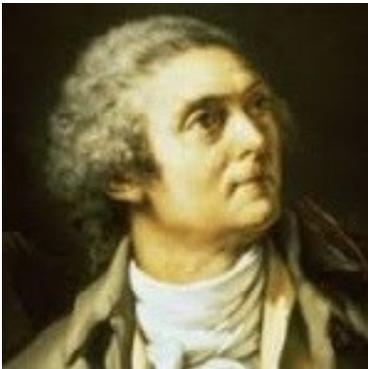


Baromètre

Basé sur la hauteur d'une colonne de mercure à l'intérieur d'un tube fermé et vide d'air, plongeant dans une cuvette de mercure.

Echelle :

Originellement mesurée en mm de mercure. Aujourd'hui exprimée en pascal [Pa] qui correspond à la force exercée par un Newton sur une surface d'un mètre carré. Cette unité étant très petite, on l'exprime en hectopascal [hPa].



H. B. de Saussure (1740-1799)



Hygromètre

Basé sur l'élongation d'un cheveu blond dégraissé en fonction de l'humidité relative.

Echelle :

En pour-cent du taux maximum d'humidité que renferme l'air pour à une température donnée.



Léon Battista Alberti (1404-1472)



Basé sur la vitesse de rotation d'une hélice ou d'une série de coupelles tournant autour d'un axe vertical.

Echelle : exprimée en mètres par secondes [m/s] ou km/h.

En 1741, Anders Celsius, un astronome suédois, définit une échelle de température et choisit 100° pour la glace fondante et 0° pour l'ébullition de l'eau. Jean-Pierre Christin, un astronome français, préconise alors d'inverser l'échelle de Celsius : 0° pour la glace fondante et 100° pour l'ébullition de l'eau. C'est l'échelle universellement adoptée aujourd'hui.

Le **baromètre** a été inventé par Evengelista Torricelli en 1644. Son invention a été définitive et le baromètre qu'il a décrit est toujours utilisé aujourd'hui.

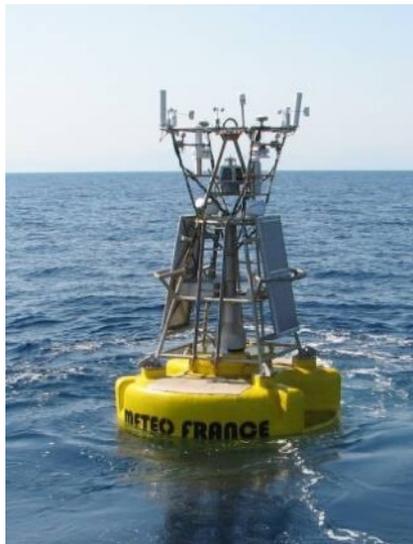
On attribue l'invention de l'**hygromètre** et surtout de hygrométrie¹ à H.B. de Saussure. Il utilise l'allongement d'un cheveux blond dégraissé en fonction de la teneur relative d'eau dans l'air. C'est lui aussi qui a défini l'échelle hygrométrique utilisée de nos jours allant de 0% pour la sécheresse absolue à 100% pour la saturation en humidité.

Le premier **anémomètre** a été inventé par Léon Battista Alberti en 1450. C'était une petite plaque tournant autour d'un axe horizontal, l'angle entre la plaque et la verticale indiquait la force du vent. Aujourd'hui les anémomètres sont tous basés sur la vitesse de rotation d'une hélice ou de coupelles hémisphériques tournant autour d'un axe horizontal.

Quelques moyens d'observation des conditions météorologiques



Ballon sonde



Station météorologique
sur une bouée



Radar météorologique de
Ouprime, Oklahoma)

¹ Essais sur l'hygrométrie, Ed. Samuel Fauche, Neuchâtel, 1783

La prévision du temps

Dès la plus haute antiquité les hommes ont cherché à connaître le temps à venir et à prédire la venue de pluies, des tempêtes de la sécheresse. C'était important pour les marins, les cultivateurs, les chefs d'armée et pour tous ceux dont les travaux dépendaient de l'état du ciel. Mais il n'y avait que peu d'indications fiables : la direction des vents, l'approche et l'aspect des nuages. Les devins et oracles étaient consultés mais sans grands résultats !

La prévision du temps a besoin de connaître l'état instantanément de l'atmosphère à divers endroits dans le monde. Cela n'a été possible qu'avec l'invention de télégraphe qui a permis de transmettre des données lointaines en temps réel.

Aujourd'hui de très nombreuses stations d'observations sont réparties dans le monde et transmettent automatiquement leurs données à des centres d'analyse. Chaque station indique la pression, la température, l'humidité de l'air, la direction et la force du vent. Les bouées et les navires transmettent aussi la température de l'océan. Il est évidemment nécessaire d'avoir un réseau de postes d'observation le plus dense possible.

Récolte des données

Les stations météorologiques, les navires, les avions et les bouées fixes transmettent leurs informations toutes les six heures. Ces informations portent sur la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la direction et la vitesse du vent, et l'ensoleillement.

Des lâchers de **ballon-sondes**, qui donnent la structure verticale de l'atmosphère, ont lieu toutes les 12 heures. Ils transportent une petite station d'enregistrement qui transmettent leurs données par radio. Gonflé à l'hélium, ils éclatent vers 25 km d'altitude et le module redescend en parachute. Un GPS incorporé permet de suivre leur course et de déterminer la vitesse du vent à diverses altitudes.

Depuis quelques dizaines d'années, des **satellites météorologiques** scrutent les formations nuageuses, détectent la formation des cyclones et mesurent même la température des océans.



Photo prises d'un satellite le 27 septembre 2010 à 14 h (Meteo France)

Les **radars météorologiques** voient arriver les perturbations, déterminent s'il s'agit de pluie de neige ou de grêle, déterminent les vitesses de leur déplacement et informent, en temps réel, le moment de leur arrivée.



Emplacement des radars météorologiques aux U.S.A.

Traitement des données

Parmi les premiers essais de prévision du temps, il faut mentionner l'action d'Urbain le Verrier, l'astronome français découvreur de la planète Neptune, qui a organisé le premier réseau européen d'observation météorologique. En 1865, 59 observatoires répartis à travers l'Europe sont reliés par le télégraphe.

Pendant la dernière guerre mondiale, on prend conscience de l'importance des prévisions météorologiques. C'est grâce à l'annonce d'une petite période d'accalmie pour la nuit du 5 au 6 juin 1944 que le débarquement de Normandie a pu avoir lieu.

Avec l'arrivée des ordinateurs, on commence à organiser à l'échelle mondiale la récolte des données et leur exploitation pour améliorer la précision des prévisions du temps. Enfin, l'organisation météorologique mondiale (OMM), fondée en 1951, organise les études météorologiques à l'échelle planétaire.

La complexité du problème

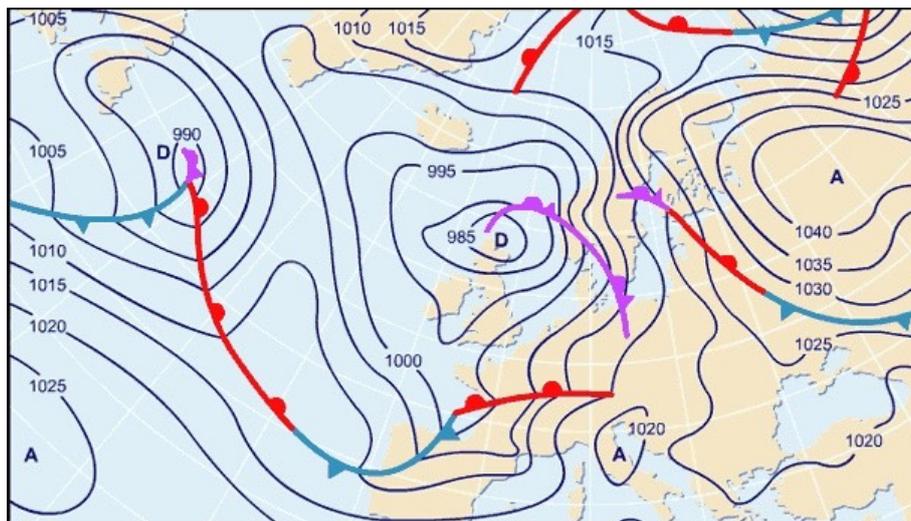
L'étude de la météorologie est basée sur les lois relatives à la dynamique des fluides, à la thermodynamique et doit essayer de prédire le comportement futur de l'atmosphère à partir de son état à un instant donné.

Il faut prendre en compte, non seulement la pression, la température, la densité de l'air, son degré d'hygrométrie, l'effet de la rotation de la Terre mais aussi les dégagements de chaleur provoqués par la condensation de l'humidité atmosphérique ou l'absorption de chaleur due à l'évaporation de l'eau des océans. Il faut ensuite analyser les variations de ces paramètres dans les trois directions de l'espace. Les équations générées par ces très nombreuses données sont extrêmement complexes. Elles ne peuvent être traitées que grâce à des super-ordinateurs.

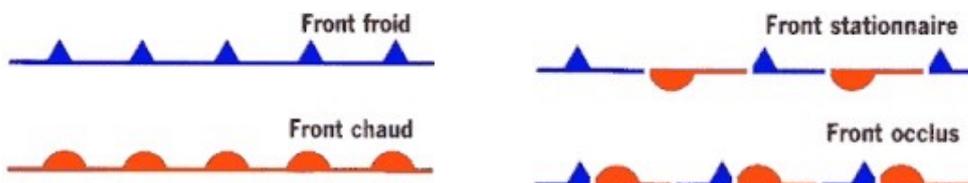
Le nombre des stations d'observation météorologiques est déjà important mais malheureusement encore très insuffisant en regard de l'immensité du territoire à couvrir et de l'altitude considérée. Le traitement de toutes ces données permettent de dresser des cartes météorologiques en temps réels, puis les ordinateurs imaginent l'évolution de ces cartes dans les jours à venir. C'est l'essentiel de la prévision météorologique.

Cartes météorologiques¹

La situation météorologique pour une région, à un instant donné, est reflétée par une carte géographique de ladite région sur laquelle on a superposé des symboles qui indiquent l'état de l'atmosphère tel que les stations d'observation l'ont enregistré. On peut faire figurer sur cette carte diverses sortes de paramètres. Les présentations les plus utilisées sont les cartes d'isobares. Ce sont des lignes d'égale pression atmosphérique réduites au niveau de la mer. Elles font apparaître les centres dépressionnaires, les centres anticycloniques les directions et la force des vents. Divers symboles signalent les fronts chauds ou les fronts froids.

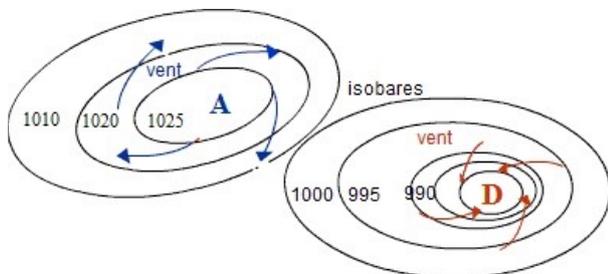


Carte météo comportant les isobares et les symboles des fronts chauds ou froids



Symboles désignant les fronts chauds ou froids, les fronts stationnaires ou occlus

A partir de ces tracés, on peut trouver la position des dépressions et des anticyclones. Ces cartes sont mises à jour toutes les six heures. On peut les consulter en temps réels sur divers sites internet. Un curseur permet même de visualiser la variation prévue de ces isobares pour les jours à venir.



Direction de vents autour d'une dépression ou d'un anticyclone relativement aux isobares.

Les vents quittent une zone anticyclonique en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre avec un angle d'une vingtaine de degrés par rapport aux lignes isobares.

Ces mêmes vents arrivent vers les zones dépressionnaires en tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et font toujours un angle d'une vingtaine de degrés par rapport aux isobares.

¹ tapez "meteo suisse cartes isobares"

Les satellites météorologiques

Il existe autour de notre planète un réseau de *satellites géostationnaires* placés au-dessus de l'équateur à une altitude de 35'880 km.

Ils sont complétés par des *satellites circumpolaires* placés à une altitude variant entre 600 km (au-dessus des pôles et 1'500 km (au-dessus de l'équateur). Leur axe de rotation est perpendiculaire à l'axe Terre-Soleil. Ils tournent autour de la Terre en 100 minutes. Ils sont héliosynchrones, ce qui signifie qu'ils survolent l'équateur ou importe quelle autre latitude chaque jour à la même heure.

Positionnement des satellites d'observation autour de la Terre

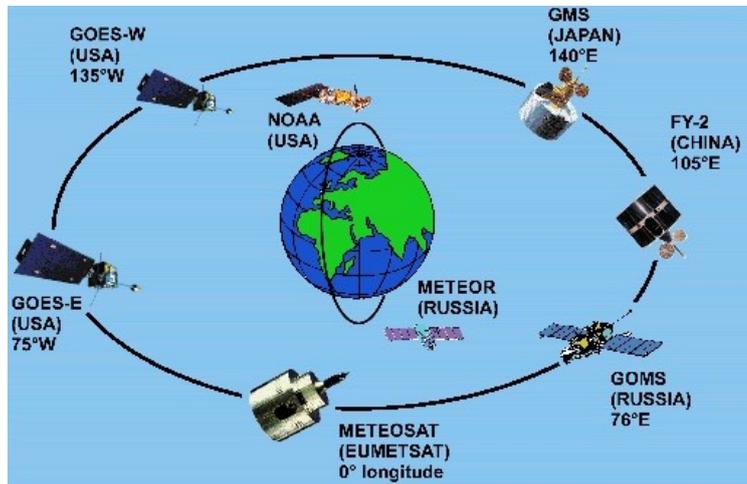


Image prise d'un satellite météorologique



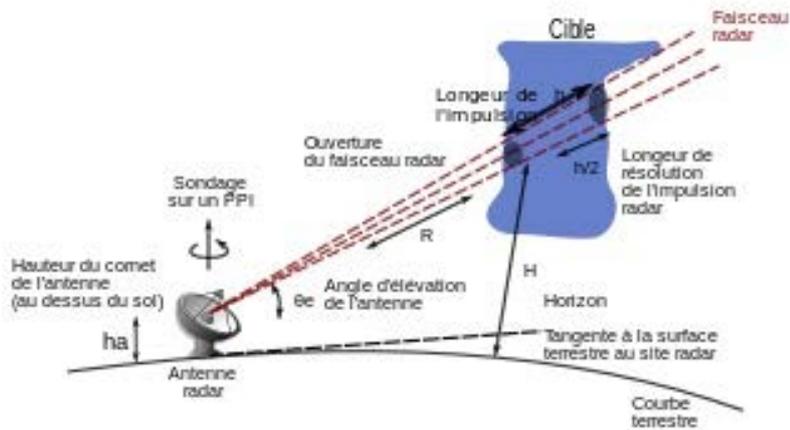
On voit une profonde dépression au Sud de l'Islande.

*Les nuages, entraînés par les vents, s'enroulent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.
(Photo Météosat du 21 mai 2011)*

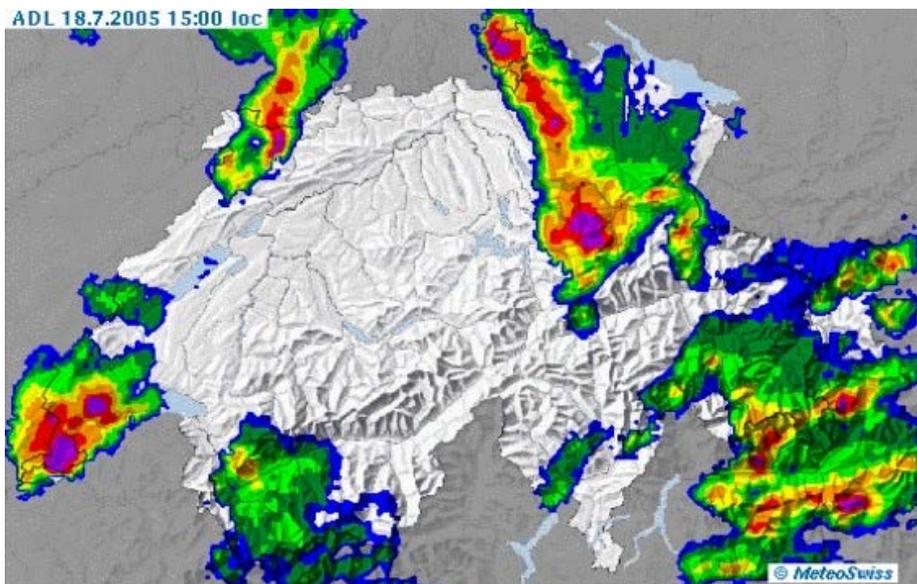
Ces photographies montrent le positionnement des dépressions et les anticyclones et permettent d'identifier très tôt la formation des cyclones tropicaux. Au delà des photos, ces satellites enregistrent la température de surface des océans, l'emplacement et de déplacement des icebergs et les zones de pollution.

Les radars météorologique

Ce sont des radars qui utilisent des longueurs d'ondes de quelques centimètres, particulièrement sensibles aux gouttelettes d'eau, à la neige ou à la grêle. Contrairement aux radars ordinaires, ils émettent de courtes impulsions dont ils enregistrent l'écho avant de produire une nouvelle impulsion. C'est l'écho multiple de toutes les gouttelettes rencontrées qui est enregistré.



Ces radars détectent les zones de précipitations, en indique l'importance et détectent leur vitesse. Ils peuvent donc prévoir avec grande précision l'heure d'arrivée des précipitations et leur importance. Les images radars sont disponibles en temps réel sur divers sites internet¹. Elles indiquent l'état de précipitation, la couverture nuageuse et la température de l'air. Un curseur permet de suivre l'évolution de ces paramètres dans les heures qui suivent. Les radars constituent un auxiliaire précieux pour la prévision régionale à court terme.



Couleurs indiquant l'importance des précipitations.	
	> 0.16 mm/h
	> 0.40 mm/h
	> 1.00 mm/h
	> 2.50 mm/h
	> 6.30 mm/h
	> 16.0 mm/h
	> 40 mm/h

Etat des précipitations sur la Suisse le 18 juillet 2005 à 15h. (MeteoSwiss)

¹ Introduire "radar meteo" sur un moteur de recherche.



Station de radar de la Dôle

Située à 1557 m. d'altitude cette station surveille d'une part le trafic aérien de l'aéroport de Cointrin et d'autre part enregistre les perturbations atmosphériques.

Et lorsqu'on met tout ensemble !

L'ensemble des données météorologiques ainsi que les cartes prévisionnelles issues des super-ordinateurs permettent de connaître l'état de l'atmosphère et son évolution dans l'avenir à l'échelle d'une région très vaste, l'Atlantique Nord et l'Europe, par exemple.

Mais le paysan de montagne qui souhaite savoir si le temps sera sec pendant plusieurs jours afin de faucher l'herbe et la sécher (à l'énergie solaire) ou l'organisateur d'une manifestation en plein air qui aimerait connaître les conditions météo qu'il devra pouvoir gérer, ne peuvent pas se contenter d'une carte météo à grande échelle.

Aussi, chaque pays organise son propre système de prévision météorologique pour les régions qui les concerne. C'est à partir de la situation générale qu'il faut alors affiner la prévision en tenant compte des altitudes de chaque région, de leur situation géographique, des zones à foehn, des zones protégées par les montagnes ou situées en bordure d'un lac.

Le réchauffement climatique

Etat des lieux

Depuis plus de 3 milliards d'années, il apparaît que la température de notre planète de s'est jamais éloignée de plus de quelques degrés de la température moyenne de 15°. Cette stabilité est remarquable en comparaison de ce qui se passe sur d'autres planètes. Cette stabilité est due à l'abondance de l'eau sur notre Terre.

Toutefois, une variabilité du climat est normale et dépend des fluctuations des courants océaniques, de la variation lente des paramètres astronomiques, des variations dans l'activité solaire, d'éruptions volcaniques majeures, de légères modifications de l'albédo et de l'effet de serre.

Ce que l'on a constaté

Nous avons découvert que, dans le dernier million d'années d'existence de notre planète, il y a eu alternance de périodes glaciaires interrompues par de courtes périodes de réchauffement.

Au cours de la période historique on a enregistré, entre environ 950 et 1350, ce qu'on a appelé **l'optimum climatique médiéval**, une période chaude qui a permis aux Vikings de coloniser le Groenland et d'y cultiver des céréales. La culture de la vigne s'est même étendue à tout le Nord de l'Europe, jusqu'en Ecosse.

Puis succède à ce réchauffement un brusque refroidissement entre environ 1400 et 1850. On l'a appelé **le petit âge glaciaire**. Les glaciers se développent et les langues glaciaires se sont avancées loin dans les vallées.

Dès le milieu du XIXème siècle, les températures remontent lentement. Ce réchauffement est un fait bien réel et on peut le qualifier de **réchauffement climatique**.

Importance du retrait du glacier du Rhône entre 1855 et 2009



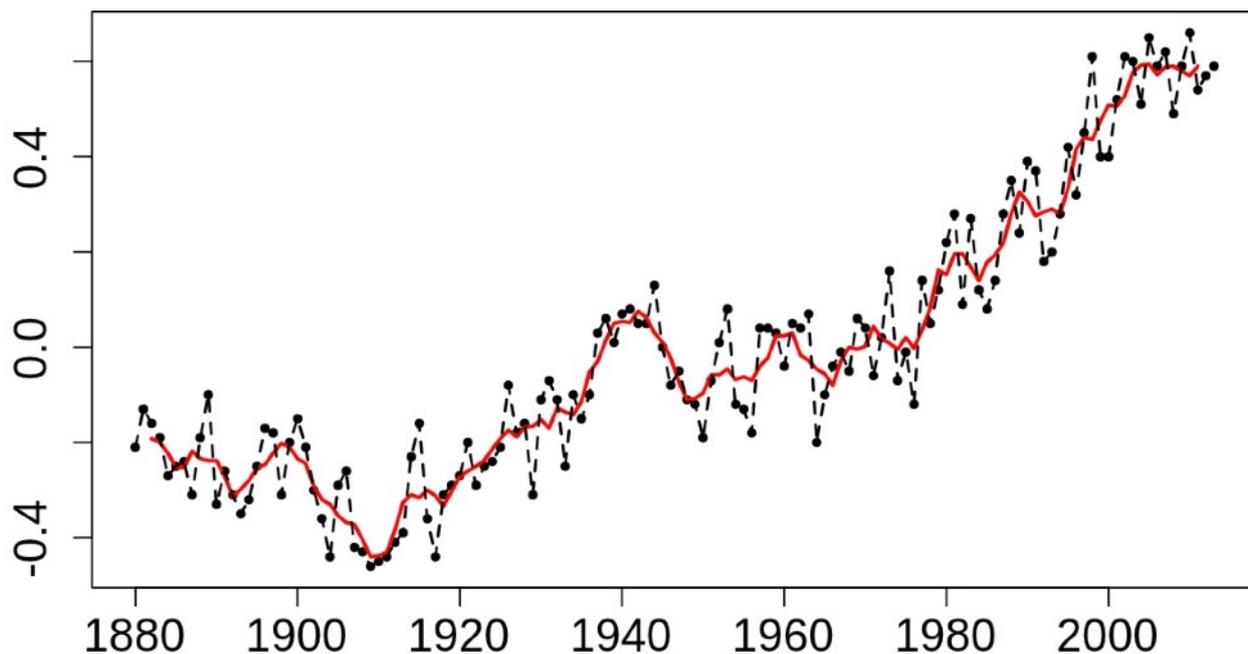
Glacier du Rhône en 1855 (Alpine Club, Londres)



Glacier du Rhône en 2009 (photo H. Dumoulin)

Les causes possibles

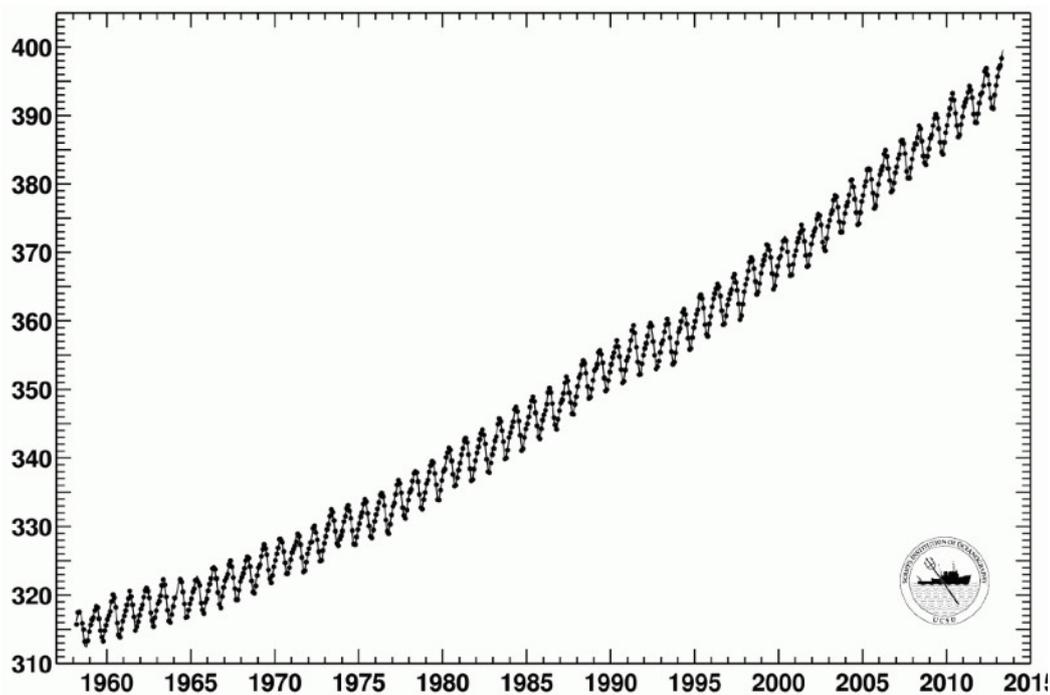
En observant les courbes ci-dessous, une première constatation s'impose : durant tout le XXème siècle la température moyenne augmente.



Variation de la température mondiale entre 1880 et 2015 (source : Nasa)

••• température enregistrée

— moyenne lissée sur cinq ans



Teneur en CO₂ de l'atmosphère (en ppm) enregistrée à l'observatoire de Mona Loa, Hawaï.

Sur le premier graphique, on voit que la température aurait diminué de $0,2^{\circ}$ entre 1880 et 1910 puis amorcé une lente remontée avec un petit pic de température vers 1940, puis ensuite, après une petite descente vers 1950, on assiste à une lente remontée jusqu'en 1998. La dernière quinzaine d'années, soit à partir de 1998, on voit une stabilisation de cette courbe.

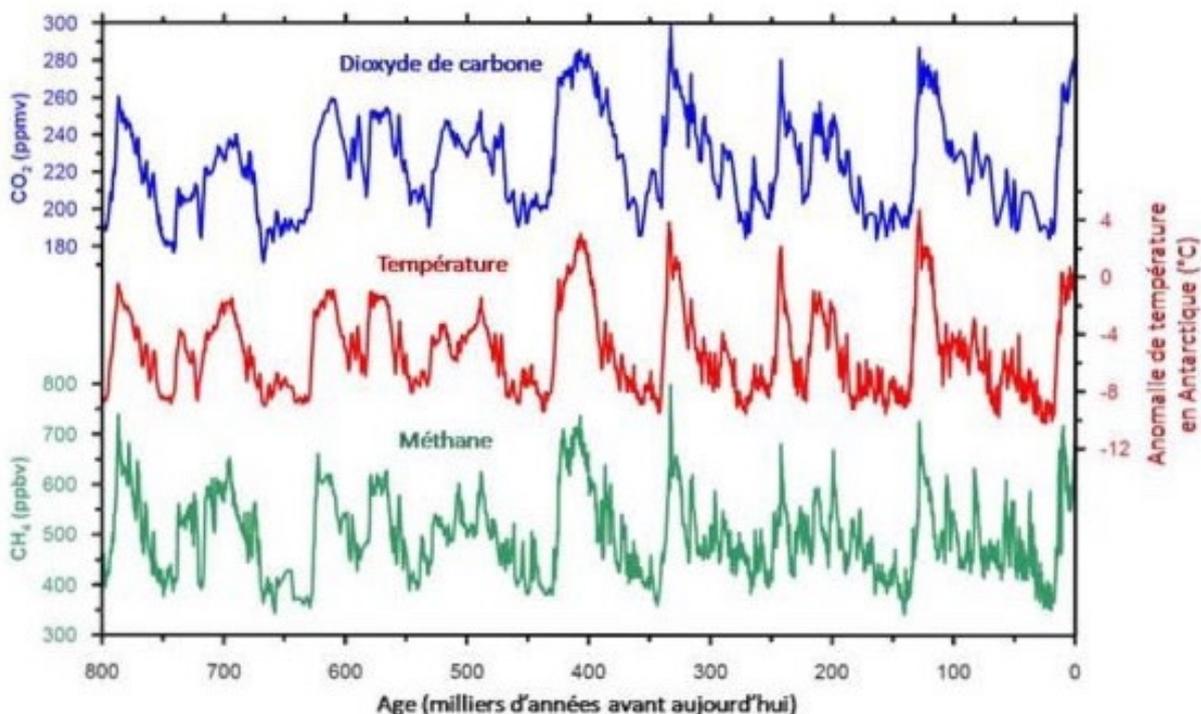
J'ai utilisé le conditionnel au début de ce paragraphe car les méthodes de mesures se sont affinées au cours des dernières années et leurs conditions d'enregistrement ne sont plus tout à fait les mêmes.

Quant au CO_2 , on constate une constante augmentation de sa teneur¹ dans l'atmosphère. Il est alors tentant de lier la teneur en CO_2 avec l'augmentation de la température. C'est ce que pense la plupart des mouvements écologiques.

Mais on est en droit aussi de se demander aussi si ce n'est pas le réchauffement climatique qui induit l'augmentation du CO_2 !

Que disent les carottes de glace ?

Le forage le plus profond réalisé en Antarctique a atteint 3'270m. On a atteint une glace qui s'est formée il y a 800'000 ans. L'étude de la composition de l'atmosphère piégée dans la glace ainsi que l'étude du rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ qui renseigne sur la température qui régnait au moment de la chute de neige, montrent que les périodes interglaciaires, c'est à dire des périodes de réchauffement, correspondent avec l'augmentation de la teneur en CO_2 et celle du méthane. On observe une alternance de périodes glaciaires et de périodes interglaciaire au cours desquelles la température remonte



On ne peut évidemment pas attribuer ces augmentations de CO_2 à une activité anthropique quelconque. On voit que la teneur en CO_2 oscille environ entre 200 et 300 ppm. Aujourd'hui, on se rapproche de 400 p.p.m. ce qui pourrait laisser penser que la teneur actuelle en CO_2 est particulièrement élevée et que c'est l'activité humaine pourrait en être la cause.

Mais ce raisonnement se heurte tout de même à quelques difficultés :

- depuis 1998, la température moyenne mondiale a cessé de grimper et elle est restée stable maintenant depuis près de 18 ans, bien que l'augmentation de la teneur en CO_2 ait continué de croître.
- il n'explique ni "l'optimum climatique médiéval", ni le "petit âge glaciaire".

¹ L'aspect "en dents de scie" de la courbe provient du fait que les enregistrements sont effectués en mai et en novembre. La différence d'environ 5 ppm provient de l'activité naturelle annuelle des forêts.

Par ailleurs, si la courbe d'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère semble impressionnante, il faut garder à l'esprit que les unités sont des ppm¹ et, qu'en réalité, la teneur en CO₂ a passé de 0.03 % à 0.04%, ce qui semble bien peu. Par ailleurs, on pourrait se demander si ce n'est pas l'augmentation de la température qui induit l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère !

Mon avis personnel est qu'il ne faudrait pas négliger les autres paramètres qui ont une influence sur les variations climatiques et ne pas impliquer uniquement sur le CO₂.

Mais d'où vient le CO₂ et où va-t-il ?

La vie n'existe qu'au travers des composés chimiques à base de carbone. Le carbone est donc l'élément fondateur de la vie sur Terre. Le carbone s'associe principalement avec l'Hydrogène, l'Oxygène et l'Azote pour former l'immense variété des **molécules organiques** qui orchestrent la plupart des processus vitaux.

Quant aux **hydrocarbures**, ils ne sont constitués que de carbone et d'hydrogène. Leur possibilité de polymériser, c'est à dire à se lier pour former des chaînes plus ou moins longues, implique la formation de très nombreux composés. Parmi les plus simples, mentionnons le méthane (CH₄), l'éthane (C₂H₆), le propane (C₃H₈), le butane (C₄H₁₀) etc...

Le Butane C₄H₁₀ est une joyeuse farandole d'atomes de carbone et d'hydrogène qui se tiennent par la main.



Mais le carbone entre aussi dans la composition de composés inorganiques, comme le dioxyde de carbone, le CO₂ un gaz qui nous concerne directement à cause de son rôle dans l'atmosphère. Sous forme de carbonates, il joue encore un rôle important dans la formation des calcaires, CaCO₃.

Où trouve-t-on le carbone ?

Une partie du carbone est momentanément stocké :

- dans les roches calcaires, env. 30'000'000 Gt²,
- dans les gisements de charbon et d'hydrocarbures, env. 7'000'000 Gt,
- dans la biosphère, sous forme de bois, env. 2'000 t.

A l'état de CO₂ :

- dans l'atmosphère, env. 750 Gt (masse totale de l'atmosphère: 5,13 x 10⁶ Gt),
- dissous dans les eaux des océans, env. 39'000 Gt.

¹ 1 ppm signifie une partie par million, soit 0.000.001 %

² Un gigatonne [Gt] correspond à un milliards de tonnes.



Le Creux-du-Van,

Un cirque de roches calcaires dans le massif du Jura.

Le calcaire renferme 12 % de carbone, en poids. C'est un des principaux réservoirs de carbone (30'000'000 Gt).

*Exploitation d'une couche de charbon à ciel ouvert aux U.S.A.
(réserves : 7'000'000 Gt)*



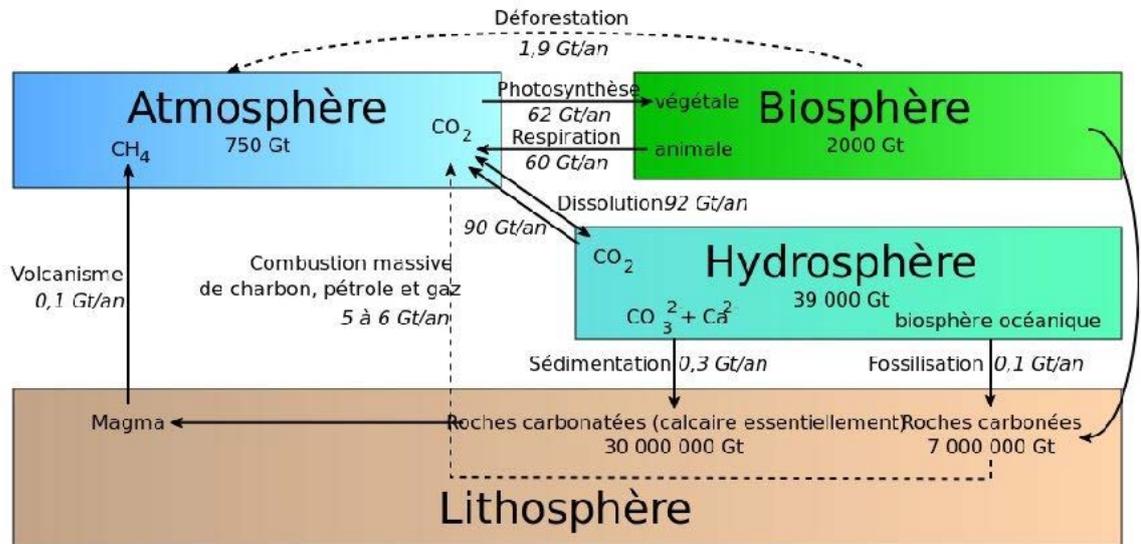
Forêt primaire en Indonésie

La végétation est un grand réservoir de carbone (env. 2'000 Gt).

Comment le CO₂ se déplace-t-il ?

Le CO₂ voyage beaucoup car il participe activement aux processus de la vie. Les échanges entre l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère sont importants. Par catégorie, on estime que :

- la respiration animale rejette 62 Gt/an de CO₂ vers l'atmosphère,
- la photosynthèse reprend 62 Gt/an de CO₂ à l'atmosphère pour le fonctionnement de la biosphère (croissance de la végétation),
- la déforestation envoie 2 Gt/an de CO₂ dans l'atmosphère,
- les océans absorbent 92 Gt/an de CO₂ pris à l'atmosphère,
- les océans rejettent 90 Gt/an de CO₂ vers l'atmosphère,
- l'activité humaine rejette 5 à 6 Gt/an de CO₂ dans l'atmosphère.



Cycle du carbone dans notre environnement

Et le méthane ?

Le méthane, CH₄, est le principal constituant du gaz naturel (plus de 90%). Dans la nature il est le produit de la décomposition de la matière organique dans les milieux dépourvus d'oxygène, en particulier dans les marécages, les rizières, les décharges publiques. Il apparaît aussi dans le système digestif des ruminants. Ainsi une vache peut produire jusqu'à un demi mètre cube de méthane par jour.

Largement utilisé aujourd'hui comme combustible, il brûle en produisant du CO₂ et de la vapeur d'eau selon le schéma :



Ce n'est donc pas un combustible "propre" au sens où les entendent ceux qui nous le vendent mais il est moins "sale" que le charbon ou le mazout. A énergie égale, il rejette 30% de CO₂ en moins.

Le méthane est un gaz à effet de serre beaucoup plus efficace encore que le CO₂. Mais il n'existe dans l'atmosphère qu'en très faible quantité (0.00018%). Par ailleurs son existence y est éphémère car, sous l'influence des ions OH⁻ présents dans l'atmosphère, il se dégrade en une dizaine d'années en CO₂ et H₂O.

Qui dit la vérité ?

Le Giec, (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. Aujourd'hui les thèses du Giec ressemblent surtout à une déclaration de foi :

C'est l'homme qui est responsable du réchauffement climatique par le biais de ses émissions de CO₂.

La mise en doute de certaines conclusions du Giec est le résultat d'une bataille, qui relève plus d'une guerre de religion que de critères scientifiques ouvertement débattus, entre les alarmistes soutenus par les mouvements écologiste souvent intégristes et les climato-sceptiques qu'on accuse d'être soutenus par les milieux économiques.

Le problème est si vaste et les données si fragmentaires encore que beaucoup d'interprétations restent envisageables. Par ailleurs, on sait bien que des conclusions alarmistes sont plus intéressantes pour la diffusion des médias que des conclusions optimistes et il est si facile de faire peur à une population en affirmant, par exemple, que les cyclones sont le résultat du réchauffement climatique.

Les thèses du Giec sont évidemment soutenues par les producteurs d'éoliennes et de panneaux solaires qui jouissent d'un large subventionnement des états apeurés et freinées par les industriels qui ont besoin d'énergie.

Le Giec a dû retirer ses déclarations fracassantes qui prédisaient un engloutissement rapide de Venise ou la disparition prochaine des glaciers himalayens. De même le Giec a dû admettre que le graphique "en forme de bâton de hockey" de l'augmentation de la température exposée par le climatologue Michael Mann s'est révélée être sans fondement et que les données avaient été manipulées.

Ce sont les politiciens qui s'accaparent des conclusions des uns ou des autres pour étoffer leurs campagnes électorales et ce détournement politique de conclusions scientifiques encore très incertaines n'est pas très rassurant !

Personnellement, je ne sais pas encore dans quel camp me situer. Mais je garde à l'esprit que la mise en doute d'une vérité trop bien acceptée est un principe qui a toujours été le moteur qui fait avancer la science !

Errare humanum est

Ce texte peut comporter quelques erreurs. Si vous en constatez quelques unes, je vous serais gré de bien vouloir me les signaler. Toutes vos remarques sont les bienvenues et m'aideront à améliorer cette publication.

deferne.jacques33@gmail.com

Glossaire

<i>Adret</i>	<i>Versant exposé au Soleil, généralement orienté vers le Sud.</i>
<i>Albédo</i>	<i>Capacité d'une surface à réfléchir l'énergie solaire vers l'espace avant qu'elle ne produise ses effets sur la Terre.</i>
<i>Alizés</i>	<i>Vents soufflants régulièrement d'Est en Ouest dans un couloir limité par les deux tropiques.</i>
<i>Anticyclone</i>	<i>Centre de haute pression qui génère des vents tournant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens inverse dans l'hémisphère Sud.</i>
<i>Atmosphère</i>	<i>Ancienne unité de pression atmosphérique remplacée aujourd'hui par le Pascal [Pa] ou par le Bar [bar].</i>
<i>Aurore boréale</i>	<i>Phénomène lumineux produit par l'ionisation de l'air sous l'influence des rayons ultraviolets au niveau de la thermosphère.</i>
<i>Bar</i>	<i>Autre unité de pression [bar] qui correspond à 100'000 pascals. Le bar présente la particularité d'être voisin de l'ancien "atmosphère".</i>
<i>Baromètre</i>	<i>Instrument, inventé par Torricelli en 1644, servant à mesurer la pression atmosphérique.</i>
<i>Cellule de convection</i>	<i>C'est le mouvement de convection vertical qui anime les masses d'air et déterminent les vents dominants.</i>
<i>Cumulus</i>	<i>Nuage formant un amoncellement qui se développe en hauteur faisant penser à un chou-fleur.</i>
<i>Cyanobactéries</i>	<i>Sorte d'algues bleues qui participent à l'édification de stromatolithes, des concrétions calcaires qui fixent le CO₂ et libèrent de l'Oxygène.</i>
<i>Cirrus</i>	<i>Nuages de haute altitude formant des filaments de couleur claire. Ils sont constitués de cristaux de glace.</i>
<i>Cyclone</i>	<i>Vents violents, accompagnés de précipitations importantes, entraînés dans une spirale gigantesque pouvant dépasser 100 km de diamètre, provoqués par une dépression profonde qui prend naissance dans la zone intertropicale.</i>
<i>Dendrochronologie</i>	<i>Méthode de datation basée sur les séquences des cernes des arbres</i>
<i>Dendroclimatologie</i>	<i>Etude des climats anciens basée sur la qualité des cernes qui reflètent l'environnement qui leur a donné naissance.</i>
<i>Dépression</i>	<i>Zone de faible pression atmosphérique qui génère des vents qui s'enroulent dans le sens anti-horaire dans l'hémisphère Nord et inversement dans l'hémisphère Sud.</i>
<i>Dioxygène</i>	<i>Molécule constituée de deux atomes d'oxygène [O₂].</i>
<i>Exosphère</i>	<i>Dernière couche de l'atmosphère qui conduit petit à petit à l'espace interplanétaire.</i>
<i>Effet de serre</i>	<i>Absorption par certains gaz des rayons infrarouges émis par la Terre et qui les renvoient vers ladite Terre.</i>
<i>Föhn</i>	<i>Vent régional chaud et sec provoqué par le franchissement du vent par dessus une chaîne de montagne.</i>
<i>Front</i>	<i>Ligne de rencontre entre deux masses d'air de température différente.</i>
<i>Hectopascal</i>	<i>Unité qui correspond à 100 pascals [hPa].</i>

<i>Humidité relative</i>	<i>Proportion de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la quantité maximum que ce même air peut absorber en fonction de sa température.</i>
<i>Hygrométrie</i>	<i>Science qui s'occupe des variations de la quantité de vapeur d'eau absorbée par l'air.</i>
<i>Hygromètre</i>	<i>Instrument mis au point par H.B. de Saussure à la fin du 18ème siècle qui mesure le taux d'humidité de l'air.</i>
<i>Mésopause</i>	<i>C'est la partie supérieure de la mésosphère qui fait la transition avec la thermosphère qui lui succède.</i>
<i>Mésosphère</i>	<i>Troisième couche de l'atmosphère qui s'étend environ entre 50 et 80 km. La température y diminue de nouveau avec l'altitude. C'est dans la mésosphère que se produit l'échauffement des satellites qui descendent sur Terre et que s'illuminent les "étoiles filantes".</i>
<i>Millibar [mbar]</i>	<i>C'est le millième d'un bar et correspond à un hectopascal.</i>
<i>Mousson</i>	<i>Vent saisonnier provoqué par la grande différence de température entre une zone continentale et l'océan. Il est chaud et humide en été, frais et sec l'hiver. Très actifs en Inde et dans l'Asie du Sud.</i>
<i>Nimbus</i>	<i>Ancienne appellation des "nuages de pluie". On conserve le préfixe "nimbo" pour qualifier le caractère pluvieux d'autres nuages (nimbostratus ou cumulonimbus).</i>
<i>Nuage nacré</i>	<i>Nuages apparaissant parfois dans la stratosphère lorsque la température est inférieure à -78°. Il sont associés à des aérosols acides et sont constitués de cristaux de glace</i>
<i>Orage</i>	<i>Phénomène violent, limité dans le temps, provoqué par la formation d'un cumulonimbus à la suite d'un fort mouvement ascendant d'air humide.</i>
<i>Ouragan</i>	<i>Terme utilisé dans l'Atlantique Nord et dans le Pacifique Nord-Est pour désigner un cyclone tropical.</i>
<i>Ozone</i>	<i>Gaz constitué de trois atomes d'oxygène [O₃] produit par l'effet des rayons ultra violets sur les molécules de dioxygène [O₂].</i>
<i>Pascal</i>	<i>Unité de pression atmosphérique [Pa] correspondant à la contrainte exercée par de 1 newton sur une surface de 1 mètre carré.</i>
<i>Plasma</i>	<i>En météorologie, le plasma est une masse d'air partiellement ou totalement ionisée.</i>
<i>Point de rosée</i>	<i>Point de dépassement de la capacité de l'air d'absorber de l'humidité. Correspond à un taux d'humidité de 100%. C'est le début de la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes d'eau.</i>
<i>Pot-au-noir</i>	<i>Zone redoutée des navigateurs, lieu de rencontre des alizés du nord et du sud, caractérisée par de longues absences de vent et par des phénomènes météorologiques soudains et violents.</i>
<i>Précession des équinoxes</i>	<i>Rotation lente de l'axe de la Terre qui, tel l'axe d'une toupie, décrit un lent cône. Un cycle complet dure 25'765 années.</i>
<i>Stratosphère</i>	<i>Deuxième couche de l'atmosphère qui succède à la troposphère. Sa limite supérieure varie entre 40 et 60 km. La température y augmente avec l'altitude. C'est dans la stratosphère que se forme la couche d'ozone.</i>
<i>Stratus</i>	<i>Nuage bas en forme de strate. Lorsqu'il rase le sol c'est la brouillard.</i>
<i>Stromatolithes</i>	<i>Concrétions calcaires issus de l'activité bactérienne des cyanobactéries.</i>

<i>Thermosphère</i>	<i>Partie la plus ténue de l'atmosphère qui s'étend jusque vers 500 km d'altitude. L'air y est si raréfié qu'elle peut accueillir les satellites militaires espions. Elle accueille aussi la station spatiale internationale, à 431 km d'altitude.</i>
<i>Tornade</i>	<i>Violent tourbillon de vents de faible diamètre qui se développe en dessous d'une masse nuageuse d'orages supercellulaires.</i>
<i>Tropique</i>	<i>Ce sont les deux lignes parallèles entre lesquelles le Soleil passe au moins une fois par an au zénith. Ces lignes sont situées à 23°26' de part et d'autre de l'équateur. Elles portent les noms de Tropique du Cancer au Nord, Tropique du Capricorne au Sud.</i>
<i>Tropopause</i>	<i>Limite virtuelle entre la troposphère et la stratosphère.</i>
<i>Troposphère</i>	<i>Partie basse de l'atmosphère dans laquelle se déroulent presque tous les phénomènes météorologiques. Son épaisseur varie entre 8 et 15 km suivant les saisons et la latitude. La température décroît régulièrement avec l'altitude.</i>
<i>Typhon</i>	<i>Terme utilisé dans l'Est de l'Asie pour désigner un cyclone tropical.</i>
<i>Ubac</i>	<i>Versant peu exposé au Soleil, orienté généralement vers le Nord.</i>
