

Le climat : un système complexe

Introduction :

Lors du cours précédent, nous avons pu comprendre comment l'atmosphère terrestre s'est mise en place. De la présence d'une atmosphère dépend une autre notion que nous allons à présent étudier : le climat. Avant d'expliquer le fonctionnement climatique de notre planète, nous allons découvrir les outils indispensables pour construire notre savoir scientifique sur le climat.

Météorologie et climatologie n'ont pas le même objet d'étude :

- la météo se préoccupe des conditions atmosphériques d'aujourd'hui, de demain et d'après-demain ;
- le climat décrit les conditions atmosphériques issues de valeurs moyennes sur plusieurs années (minimum sur 30 ans).

Néanmoins, météorologie et climatologie sont des sciences s'appuyant sur des paramètres atmosphériques communs.

Dans un premier temps, nous aborderons la description des paramètres atmosphériques et les phénomènes associés et, dans un second temps, les définitions des sciences météorologiques et climatiques seront approfondies.

1 | Les paramètres atmosphériques de la météo et du climat

a. Température et pression

La **température** de l'air correspond à un phénomène physique : l'énergie d'**agitation des molécules** de gaz autour d'un point d'équilibre.

➔ Plus les molécules s'agitent et s'entrechoquent, plus la température augmente.

La température se mesure grâce à un **thermomètre** soit sur l'échelle des degrés Celsius soit sur l'échelle anglo-saxonne des degrés Fahrenheit : zéro degré Celsius correspond au point de congélation et de fusion de l'eau et cent degrés Celsius correspondent à la limite entre la condensation et la vaporisation de l'eau.

L'unité internationale de la température est le **Kelvin**. Il n'y a plus aucune agitation moléculaire au zéro absolu en Kelvin : cela correspond à $-273,15\text{ °C}$.

→ La température est un paramètre essentiel en météorologie comme en climatologie.

La **pression atmosphérique** détermine le poids d'une colonne d'air sur une surface donnée au sol sous l'influence de la gravité. Elle sera donc fonction de l'altitude : ainsi, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Par convention, la pression au niveau de la mer est la plus usitée. Elle se mesure à l'aide d'un **baromètre** en pascals (**Pa**) ou en millimètres de mercure (**mmHg**).

→ La valeur moyenne de la pression atmosphérique est de **1 013,25 hPa**. C'est un paramètre fondamental pour définir les caractéristiques de l'atmosphère en météorologie (dépression, anticyclone).

b. Hygrométrie, nébulosité et pluviométrie

L'**hygrométrie** correspond au calcul de l'**humidité relative de l'air**. En effet, de manière absolue, l'atmosphère contient moins de 0,5 % de vapeur d'eau. Mais relativement, l'air sera désigné comme sec en deçà de 20 % de cette valeur absolue. À 100 % de cette valeur, l'air est considéré comme saturé de vapeur d'eau (nuages, pluie, brouillard, etc.).

→ L'hygrométrie est un paramètre essentiellement météorologique ; toutefois, par l'analyse des pollens fossilisés (palynologie), les paléoclimatologues peuvent avoir une idée de l'humidité par **actualisme**.



Définition

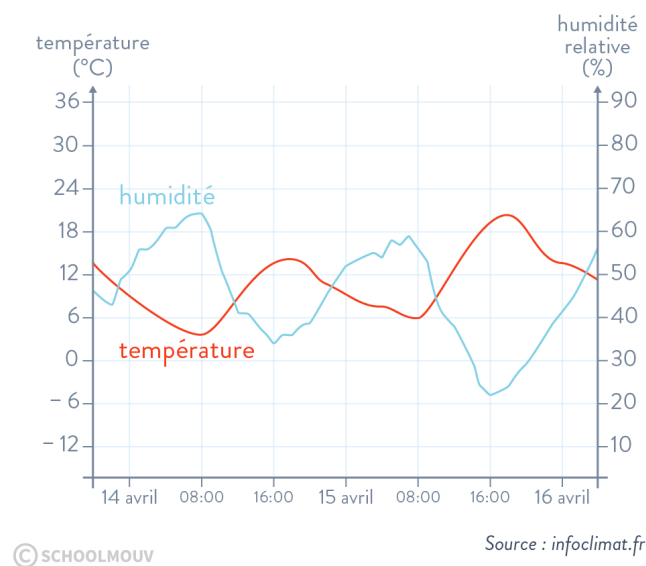
Actualisme :

Méthode scientifique qui transpose des observations actuelles dans le passé.

Exemple : des pollens de sapins sont associés à des climats froids et/ou d'altitude. Ils devaient donc l'être aussi par le passé.

Variation de l'humidité relative et des températures

Paris-Montsouris, du 14 avril au 16 avril 2020



→ L'humidité relative atteint un maximum vers 8 heures, quand les températures sont les plus basses. Cela peut déclencher le phénomène de rosée, visible au petit matin. Au contraire, les températures s'élevant en journée, l'humidité est relativement plus basse. Le phénomène de condensation des microgouttelettes d'eau est atténué.

La **nébulosité** est un paramètre permettant d'apprécier la **couverture nuageuse**. Cette dernière peut être constituée de nuages aux formes, aux tailles et altitudes très variés, ayant chacun une météorologie associée. Ainsi, les cirrus sont des nuages de beau temps, contrairement aux cumulonimbus, signes d'orages et de pluies.

Classification des nuages



© SCHOOLMOUV Source : Météo-France

→ La couverture nuageuse se mesure sur une échelle en **octas** de 0 (ciel clair) à 8 (ciel entièrement couvert).

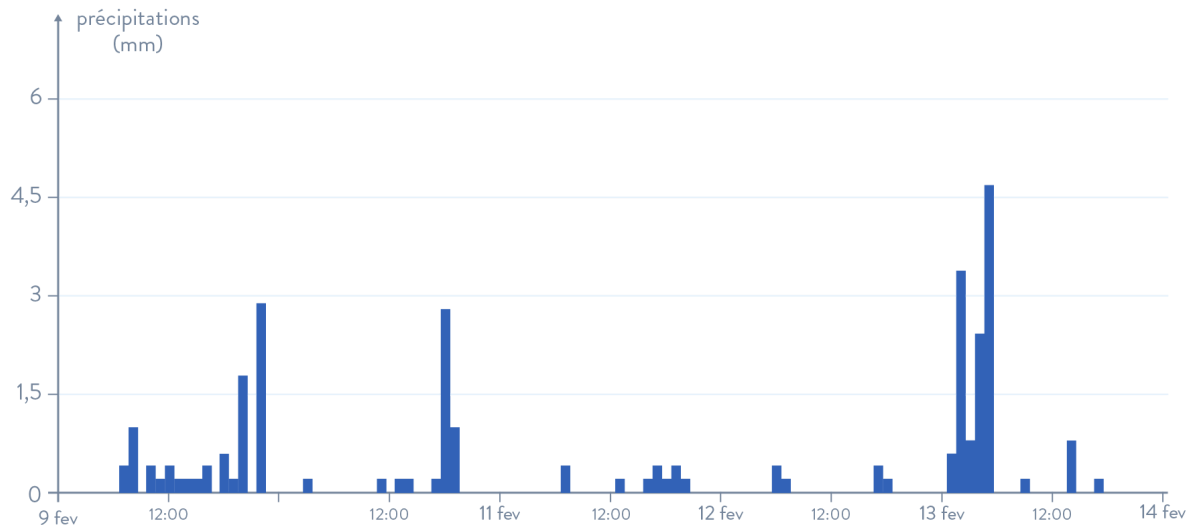
La formation des nuages dépend de la présence de noyaux de condensation (poussières, particules solides ou liquides) qui vont permettre localement à la vapeur d'eau de se liquéfier (gouttelette d'eau liquide en suspension).

La **pluviométrie** correspond à la **quantité de précipitations** (pluie et neige) tombant sur une surface donnée, en **millimètre par mètre carré** (la surface est implicite). Elle est mesurée grâce à un **pluviomètre**.

C'est une mesure directe difficile à estimer pour les météorologues car elle dépend de la pression, de l'humidité, de la température, des vents.

Lorsque les gouttelettes d'eau dans un nuage atteignent une certaine taille ($> 0,5 \text{ mm}$ de diamètre), cela déclenche des précipitations.

Enregistrement de la pluviométrie Brest-Guipavas, du 9 février au 14 février 2020



© SCHOOLMOUV

Source : infoclimat.fr

c. Les vents

Les **vents** correspondent à des **déplacements d'air horizontaux** caractérisés par leur **direction** et leur **vitesse**.

Un **anémomètre** permet d'obtenir la vitesse instantanée en **mètre par seconde** et une girouette indiquera la direction à l'aide des **points cardinaux** (nord, sud, ouest, est).

→ Le vent se forme entre une zone de haute pression (appelé anticyclone) et de basse pression (appelé dépression).

Du fait de la géographie, des vents particuliers peuvent se former : les vents locaux.



Par exemple, le mistral est la conséquence d'un anticyclone sur l'Espagne et d'une dépression sur le nord de l'Italie. Ce vent fort et de ressenti froid va du couloir rhodanien à la Méditerranée. Il fait souvent suite à des précipitations au printemps et à l'automne.

L'analyse des vents permet l'étude des **mouvements atmosphériques**. À l'échelle de l'hémisphère nord, en surface, il y a des vents d'est sur la région polaire, puis des vents d'ouest sur la région tempérée et enfin, dans la zone tropicale, des alizés du nord-est. Ces vents sont la conséquence de la fragmentation de **cellules de convection atmosphérique** à la surface de la Terre par l'**effet de Coriolis**. Cet effet va inverser le sens des vents dans l'hémisphère sud.



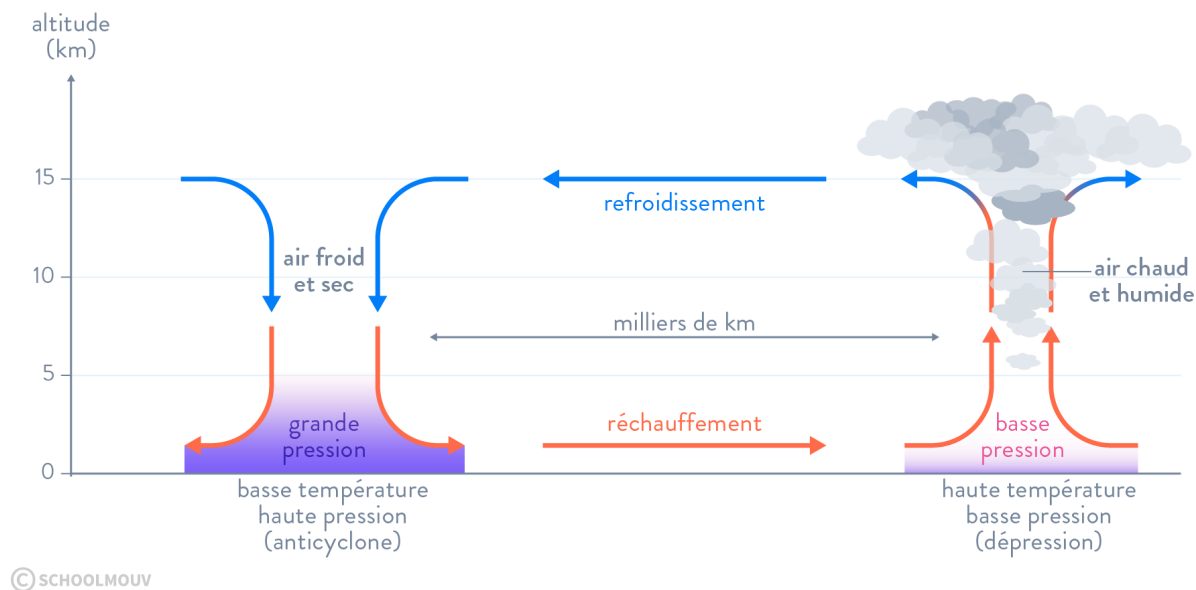
Définition

Effet de Coriolis :

Loi expliquant qu'une particule dans l'hémisphère nord va être détournée de sa trajectoire vers la droite, du fait de la rotation de la Terre, et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

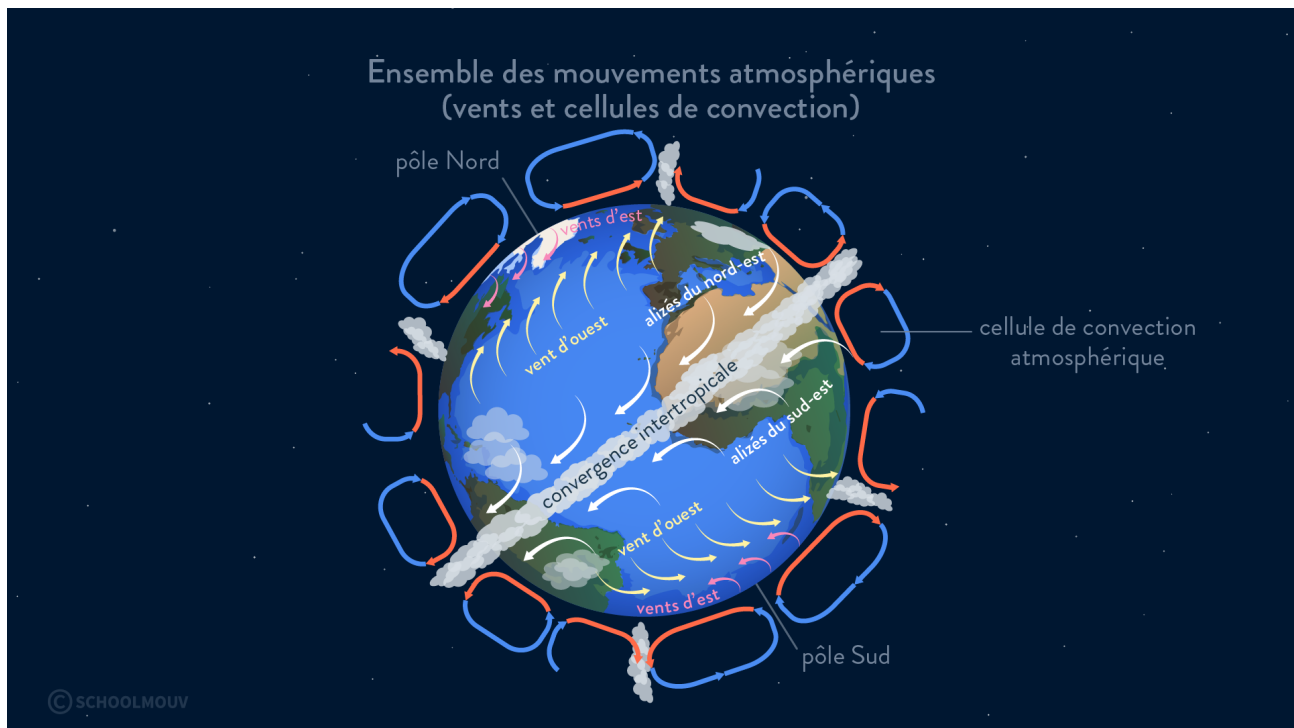
L'observation des masses d'air montre des mouvements importants sur les quinze premiers kilomètres de notre atmosphère, appelés cellules de convection atmosphérique. Des gradients de pression et de température génèrent des mouvements des masses d'air des hautes pressions vers les basses pressions.

Fonctionnement d'une cellule de convection atmosphérique



→ Les mouvements d'air sont dus au Soleil : la Terre, réchauffée par le Soleil, réchauffe alors l'air qui l'entoure. L'air réchauffé s'élève dans l'atmosphère (l'air

chaud est plus léger que l'air froid), se refroidit et la vapeur d'eau se condense pour former des nuages (dépression). L'air froid redescend ensuite vers le sol.



Les mouvements atmosphériques sont un paramètre important en météorologie comme en climatologie.

À présent que nous avons déterminé les paramètres atmosphériques, nous allons nous intéresser aux deux sciences qui les exploitent.

2 | Deux sciences différentes : la climatologie et la météorologie

- a. La météorologie : analyser le temps qu'il fait et qu'il fera à court terme



Météorologie :

La météorologie désigne l'étude des phénomènes atmosphériques sur une zone géographique définie et limité dans le temps (quelques heures à quelques jours).

Les tendances météorologiques pour les jours à venir sont obtenues à

l'aide de modélisations numériques prenant en compte de nombreux paramètres.

Les phénomènes météorologiques sont appréciés à l'aide des paramètres mesurés (température, humidité, pluviométrie et pression atmosphérique principalement), mais aussi par observations (observation directe ou au radar/satellite), notamment en ce qui concerne la nébulosité et le vent.

- Le relevé de température se fait heure par heure dans les **stations météorologiques**.

→ Cela permet de voir l'évolution au cours de la journée et d'affiner les tendances pour les jours à venir. Ces délais sont propres à la météorologie.

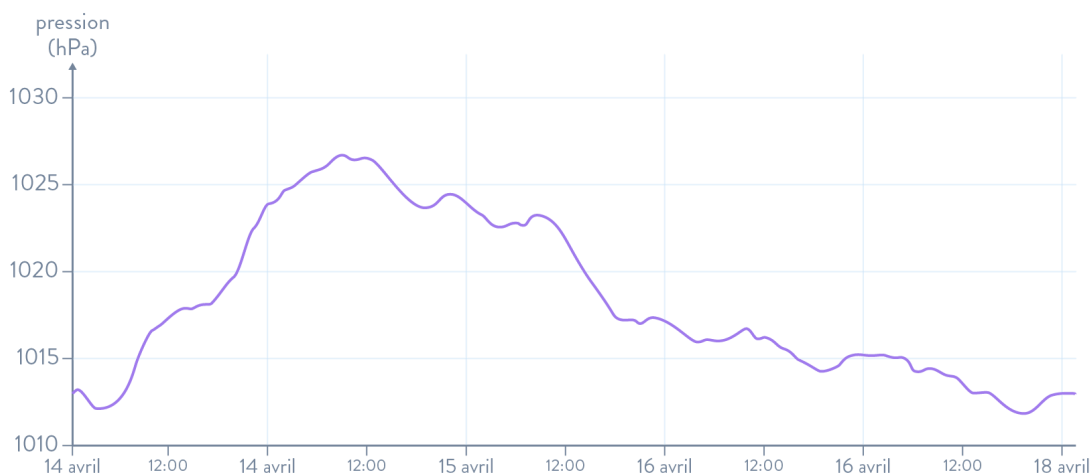
Il y a une **variation circadienne de la température** (il fait plus chaud la journée et plus froid la nuit).

L'humidité relative est dépendante des températures et se trouve donc corrélée aux variations circadiennes de la température avec un décalage. Le maximum d'humidité est atteint au moment des températures les plus basses, vers 8 heures. C'est pour cela qu'on peut observer de la rosée ou du brouillard, particulièrement le matin.

- La pression atmosphérique varie quant à elle sans rythme particulier au fil des jours.

Variation des pressions atmosphériques

Paris-Montsouris, du 13 avril au 18 avril 2020

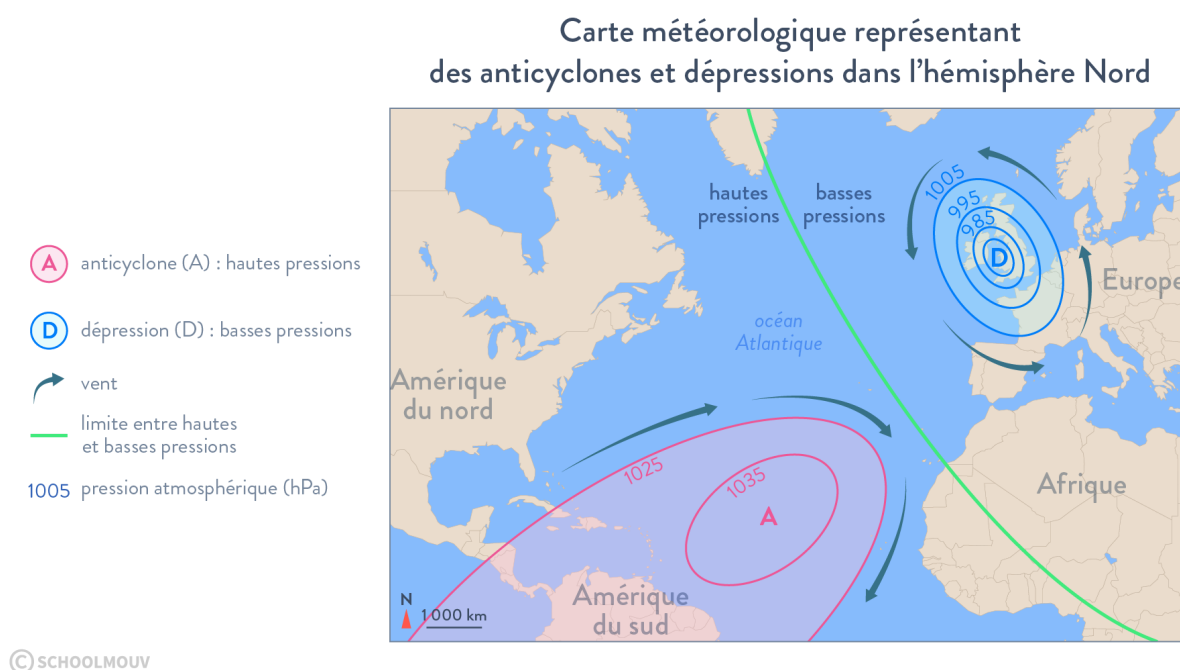


© SCHOOLMOUV

Source : infoclimat.fr

Lors d'une diminution de la pression, les météorologues parlent de **dépression**. Cette dépression est associée à des vents en sens inverse des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord. Au contraire, lorsque les valeurs dépassent **1 015 hPa**, on est au cœur d'un **anticyclone**, associé à des vents allant dans le sens des aiguilles d'une montre, toujours dans l'hémisphère nord.

- C'est un paramètre uniquement météorologique. Nous ne pouvons pas connaître la pression du climat passé de manière directe. Elle ne peut être évaluée que par calcul à partir de la composition des gaz atmosphériques et de la température à la surface de la Terre.



- En météorologie, les vents créés par les dépressions et les anticyclones vont permettre d'**anticiper le mouvement des masses d'air**.

 **À retenir**

Si la météorologie utilise bien des données atmosphériques, il s'agit d'une science s'intéressant uniquement au court terme : le but est d'analyser le temps qu'il fait (météo) dans une zone géographique précise et d'établir des prévisions sur quelques jours.

La climatologie n'a pas le même objectif ou la même démarche.



b. La climatologie : analyser les climats sur le long terme

Le climat décrit les conditions atmosphériques issues de valeurs moyennes sur plusieurs années.

→ Ainsi, le climat correspond à un raisonnement sur le long terme permettant de lisser les valeurs extrêmes de température survenues sur de courtes durées.



Définition

Climatologie :

La climatologie désigne l'étude des climats et de leurs variations au niveau local ou global et pour du moyen terme et du long terme (années, siècles, millénaires).

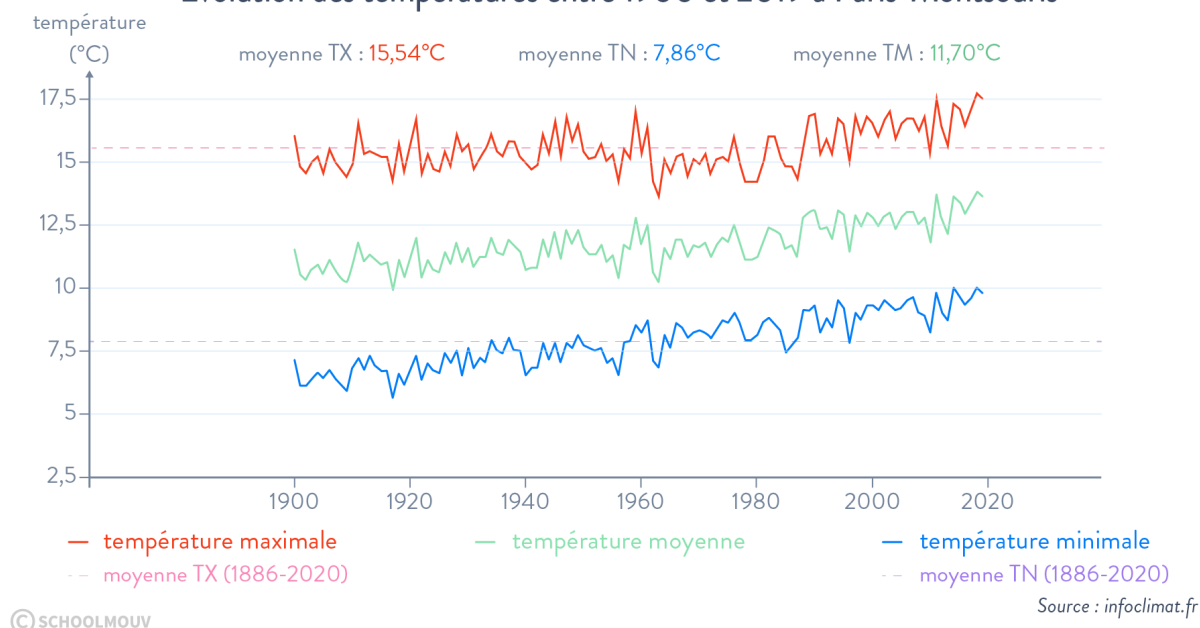
Avec plus de 30 années de données cohérentes, les satellites météorologiques constituent un atout précieux pour la surveillance du climat et la compréhension de son évolution, et sont voués à jouer un rôle de plus en plus important à l'avenir, via les prochaines générations de systèmes.

Ils surveillent de nombreux indicateurs climatiques (température, vents, précipitation, niveau des mers...).

Toutefois, pour étudier les climats, et notamment les climats du passé, les climatologues ont aussi besoin de s'appuyer sur des données plus anciennes.

L'**accumulation des données de températures** sur des durées plus longues (10, 50, 100 ans...) sert ainsi de support à la climatologie :

Évolution des températures entre 1900 et 2019 à Paris-Montsouris



→ Ici, on note donc une tendance au réchauffement : en 1900, la température annuelle moyenne était d'environ 11,5 °C, elle est en 2019 de 13,8 °C. On voit donc sur 120 ans, un décalage des températures d'environ 2 °C en moyenne.

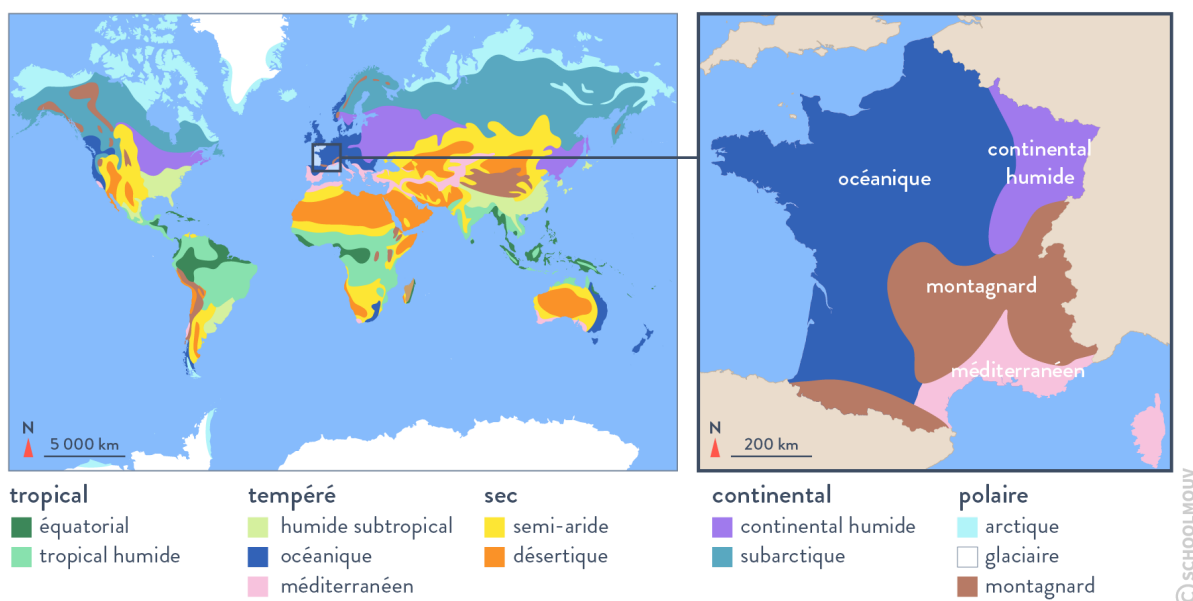


L'accumulation des données de températures sur des durées plus longues permet de dégager des **tendances climatiques (réchauffement ou refroidissement)**.

L'accumulation de données gomme en revanche les exceptions d'un froid inhabituel au mois de mai par exemple ou d'une forte chaleur en novembre.

L'accumulation de données météorologiques conduit ainsi à des informations climatiques sur des échelles géographiques régionales, voire continentales.

Carte des climats à l'échelle mondiale et à l'échelle de la France



→ Géographiquement, le climat est appréhendé par des cartes de zones climatiques (climat océanique, climat continental, climat polaire, etc.) et des cartes de biomes correspondant à ces zones (forêt tempérée, toundra, désert, etc.).

| | | |
|------------------------|-----------------|--|
| Climat tropical | Équatorial | <ul style="list-style-type: none"> • Températures hautes • Précipitations abondantes • Saisons peu marquées • Végétation de type forêt dense |
| | Tropical humide | <ul style="list-style-type: none"> • Alternance de saisons sèches et humides • Saisons peu marquées |
| Climat sec | Semi-aride | <ul style="list-style-type: none"> • Températures très élevées avec une amplitude annuelle et diurne |

| | | |
|---------------------------|--------------------|---|
| | Aride | <ul style="list-style-type: none"> • Deux saisons : chaude et froide • Précipitations faibles et irrégulières |
| Climat tempéré | Méditerranéen | <ul style="list-style-type: none"> • Étés chauds et hivers doux • Précipitations annuelles faibles mais pluies violentes • Végétation : garrigue et maquis |
| | Humide subtropical | <ul style="list-style-type: none"> • Étés chauds et hivers doux |
| | Océanique | <ul style="list-style-type: none"> • Températures moyennes constantes • Saisons peu marquées • Végétation : lande, prairie et forêt |
| | | |
| Climat continental | Continental humide | <ul style="list-style-type: none"> • Fortes amplitudes de température • Végétation : taïga, steppe et prairie |
| | Subarctique | <ul style="list-style-type: none"> • Végétation : lande, prairie et forêt |
| Climat polaire | Arctique | <ul style="list-style-type: none"> • Températures négatives • Vents très forts • Étés très courts et froids |
| | Glaciaire | |
| | Montagnard | <ul style="list-style-type: none"> • Hivers froids • Étés frais et humides |

- | | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none">• Température basse en altitude |
|--|---|

Mais alors, comment obtenir des données de température par exemple sur des périodes de temps qui excèdent la capacité des outils météorologiques actuels ?



À retenir

La température à des échelles de temps géologiques va être calculée par des outils comme le **delta de l'oxygène 18** ($\delta^{18}\text{O}$) des glaces (molécules d'eau H_2O) ou des carbonates (molécules de CaCO_3). Les phénomènes physiques tel que la condensation ou la précipitation vont fractionner les **isotopes de l'oxygène**, autrement dit les isotopes plus légers ^{16}O va s'évaporer plus facilement que l'isotope plus lourd ^{18}O qui, lui, va précipiter plus facilement. C'est en réalité le rapport de l'isotope 18 de l'oxygène et de l'isotope 16 de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) qui va être un indicateur des paléotempératures notées $\delta^{18}\text{O}$:

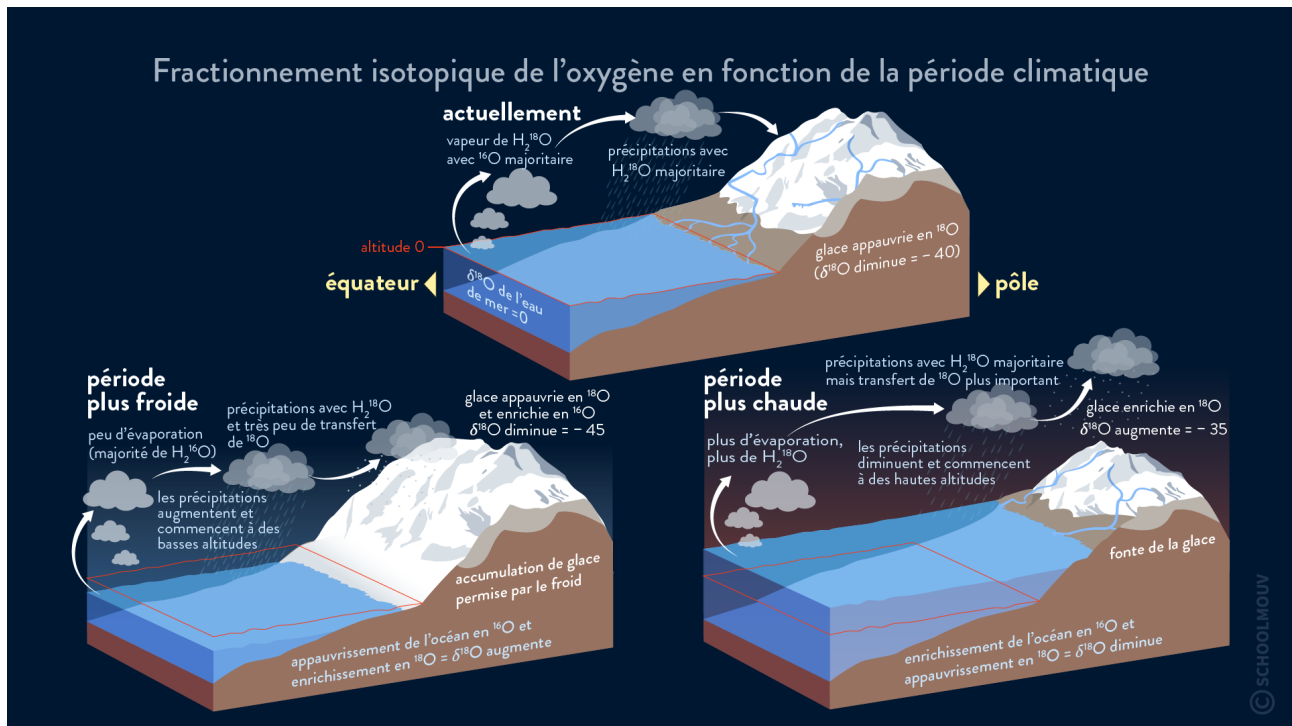
$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \right)_{\text{échantillon}} - \left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \right)_{\text{standard}} \right] \times 10^3$$



Rappel

L'oxygène est un atome ayant de nombreux isotopes. La forme la plus courante est le ^{16}O , c'est-à-dire que le numéro atomique est de **16** et qu'il y a donc **8** protons et **8** neutrons. L'isotope qui est couramment utilisé en paléoclimatologie est l'isotope ^{18}O , c'est-à-dire qu'il y a **8** protons et **10** neutrons.

Voici une analyse du delta de l'oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O}$) des **glaces** (molécules d'eau H_2O) :



- L'évaporation majoritaire à l'équateur enrichit l'atmosphère en ^{16}O . Lorsqu'il y a des précipitations, de l' ^{18}O va être perdu. En arrivant aux pôles, le $\delta^{18}\text{O}$ est donc négatif.
- Lors de périodes froides, l'évaporation sera moins importante et les précipitations plus importantes à des latitudes plus basses. L' ^{16}O ne va pas être très important dans l'atmosphère mais le ^{18}O sera à des proportions encore plus faibles. Donc le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires sera très négatif.
- *A contrario*, lors de périodes chaudes, la forte évaporation entraîne beaucoup d' ^{16}O . Les précipitations sont moins importantes et se produisent à des latitudes plus hautes. Donc le $\delta^{18}\text{O}$ va devenir moins négatif.

Nous venons de voir l'analyse isotopique des glaces. Mais la température peut aussi être appréhendée avec l'analyse isotopique de l'oxygène des **carbonates** (molécules de CaCO_3) issus des tests de foraminifères (micro-organismes marins).

En effet, la composition isotopique des carbonates ($\delta^{18}\text{O}$ de CaCO_3) dépend de la température de l'eau et de la composition isotopique de la mer ($\delta^{18}\text{O}$ de H_2O).



Les ions carbonates et calciques s'associent pour former des carbonates, du dioxyde de carbone et de l'eau. Cette équation est équilibrée d'un point de vue isotopique.

→ Plus la température de l'eau augmente, plus le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates diminue.

Ce phénomène est accentué par le fait que l'eau de mer est relativement plus pauvre en ^{18}O en période de réchauffement, donc le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer et des carbonates va diminuer d'autant plus.

Les températures ne sont pas le seul paramètre atmosphérique étudié par la climatologie : nous l'avons vu, chacun des paramètres est lié aux autres et permet donc de construire une vision d'ensemble des climats.

Ainsi, si les nuages (nébulosité) ont indéniablement un rôle à jouer dans la météorologie, ils vont aussi par exemple influencer le climat *via* un paramètre essentiellement climatique : l'**albédo**.



Exemple

Avec une forte nébulosité, l'albédo augmente et donc les températures baissent.



Rappel

L'albédo correspond à la quantité de lumière du soleil réfléchi par une surface. C'est une grandeur sans dimension exprimée par un pourcentage ou une valeur entre 0 et 1. Sur 100 % de rayonnement solaire reçu, 30 % va être réfléchi (25 % par l'atmosphère et 5 % par les surfaces terrestres).

Quant au système des mouvements atmosphériques par exemple, il va jouer un rôle important dans la répartition de la chaleur sur Terre et donc sur le climat.

En effet, la chaleur équatoriale va pouvoir être dispersée par les cellules de convection, mais aussi par les grands vents (vents d'Ouest, alizés) sur l'ensemble du globe. Ces derniers contribuent à la répartition de la chaleur entre les continents et les océans.

Le rôle des océans est d'ailleurs capital dans l'étude climatique, comme nous le verrons dans le cours suivant.



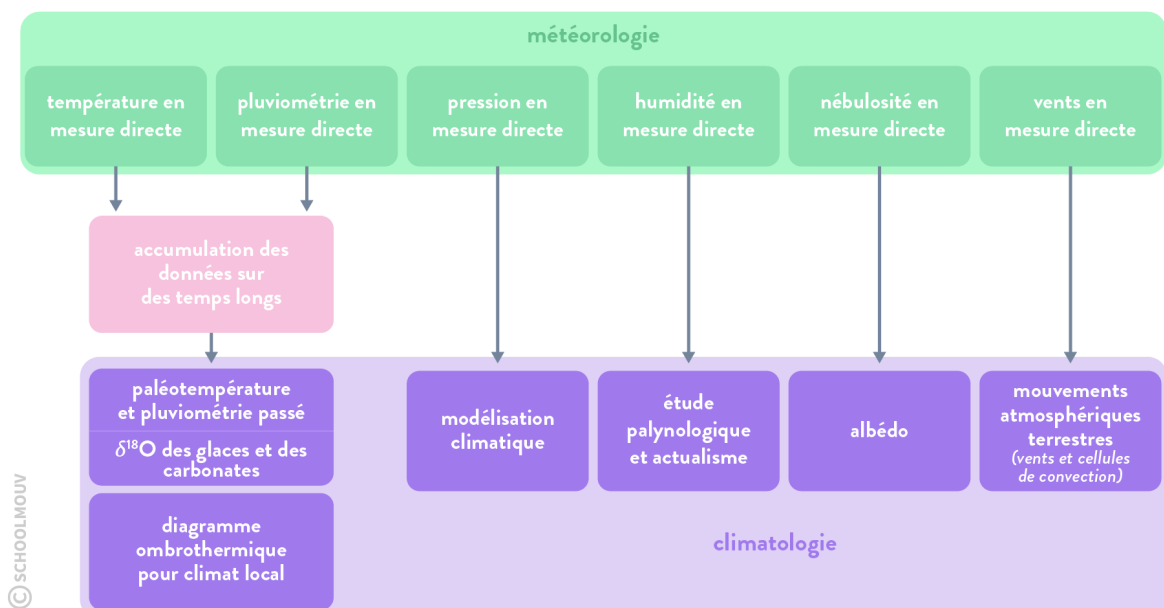
La climatologie s'intéresse aux caractéristiques climatiques sur le moyen/long terme.

Les **paléoclimatologues** parviennent ainsi à analyser les climats du passé, permettant ainsi de dégager les tendances globales (réchauffement, refroidissement) et la reconstitution de **paléoenvironnement** (à l'échelle de régions, de continents, etc.).

Les climatologues s'appuient sur les données disponibles depuis 1850 pour créer des **projections à moyen et long terme** mais aussi sur des données du passé pour mettre en évidence les interactions visibles sur de grandes échelles de temps (delta de l'oxygène 18, palynologie).

Conclusion :

L'étude de l'atmosphère repose sur de nombreux paramètres qui seront exploités de différentes façons selon le point de vue scientifique adopté (angle de la météorologie ou angle de la climatologie).



Le climat est un système complexe qui est lui-même une composante d'un ensemble plus large : le système-Terre. Ce système définit les



échanges entre les différentes couches externes de la planète (atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère).