

Le système climatique

Le temps (qu'il fait) / la météo

Dans le langage de tous les jours, le temps (qu'il fait) ou la météo désignent l'état de l'atmosphère et des processus qui lui sont liés à un moment précis et pour un endroit donné.¹

Une situation météorologique

Cette expression est utilisée pour désigner les conditions atmosphériques régnant en un endroit donné sur une durée de quelques jours. Les situations de fœhn ou de bise en sont des exemples typiques en Suisse.

Le climat

Au sens le plus courant du terme, le mot climat désigne les conditions moyennes de l'atmosphère pour une région donnée sur une longue période (par convention au moins 30 ans).² Les paramètres suivants sont pris en considération pour définir le climat: rayonnement, température, pression atmosphérique, vent, humidité de l'air, évaporation, précipitations, nébulosité.³

Le système climatique naturel de la Terre

Le système climatique naturel de la Terre est composé de plusieurs **sous-systèmes** (ou sphères) en interaction. On distingue les sous-systèmes suivants:

- l'atmosphère (sous-système relatif à l'air),
- l'hydrosphère (sous-système relatif à l'eau),
- la cryosphère (sous-système relatif à la glace – il s'agit de la partie gelée de l'hydrosphère),
- la pédosphère (sous-système relatif au sol),
- la lithosphère (sous-système relatif aux roches et au sous-sol),
- et la biosphère (sous-système relatif à la faune et à la végétation).⁴

Ces sous-systèmes sont étroitement liés par des flux de matière et d'énergie (par exemple le cycle de l'eau ou le cycle du carbone) et réagissent aux changements à des vitesses différentes.

Des processus physiques se déroulent à la surface de la Terre et dans l'atmosphère, tels que le rayonnement solaire direct et sa réflexion (voir la fig. 1 ci-après, numéros 1 et 2), la conversion de l'énergie solaire incidente en rayonnement thermique (4), l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire incident par des particules ou des gaz (3), l'action des gaz à effet de serre (6) qui renvoient une partie du rayonnement thermique (5) vers la Terre, les vents (7) ou encore l'évaporation (8).

¹ Le français courant est moins précis que l'allemand ou l'anglais, qui font la différence entre *Zeit* et *Wetter* ou *Time* et *Weather*, alors que le mot *temps* recouvre en français ces sens différents. De même, l'allemand distingue entre *Wetter* et *Witterung*, ce que l'on peut plus ou moins transposer en français avec la différence – néanmoins discutable – entre *temps* et *situation météorologique*.

² <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/climat-de-la-suisse/normes-climatologiques.html>

³ Hasler (2016), p. 62.

⁴ Brönnimann (2018), p. 23. Voir aussi Trompette (2004), pp. 167 et 270, qui procède à une catégorisation reposant sur des principes similaires, mais qui regroupe certains de ces sous-systèmes dans des ensembles plus vastes (p. ex. la géosphère, qui regroupe lithosphère et pédosphère).

L'atmosphère, l'hydroosphère et la cryosphère sont reliées par les précipitations et l'évaporation, processus qui se déroulent au contact et au-dessus des surfaces d'eau et de glace (7, 9). Le ruissellement (écoulement des cours d'eau, 11) et les courants marins (12) sont des processus caractéristiques de l'hydroosphère. L'atmosphère et la biosphère terrestre ou aquatique (16-22) sont reliées par les échanges de carbone et d'oxygène, à travers les processus de la respiration et de la photosynthèse. Le carbone circule aussi dans la pédosphère et la lithosphère (23-26). De très nombreux autres processus existent au sein de chaque sous-système ou dans les interactions de plusieurs sous-systèmes: on peut citer par exemple la formation des nappes d'eau souterraines (nappes phréatiques, aquifères), les mouvements des plaques tectoniques (25), le volcanisme (26) ou la formation des chaînes de montagnes (24). Plus rarement, les impacts de météorites (27) peuvent également avoir une influence sur le système climatique.

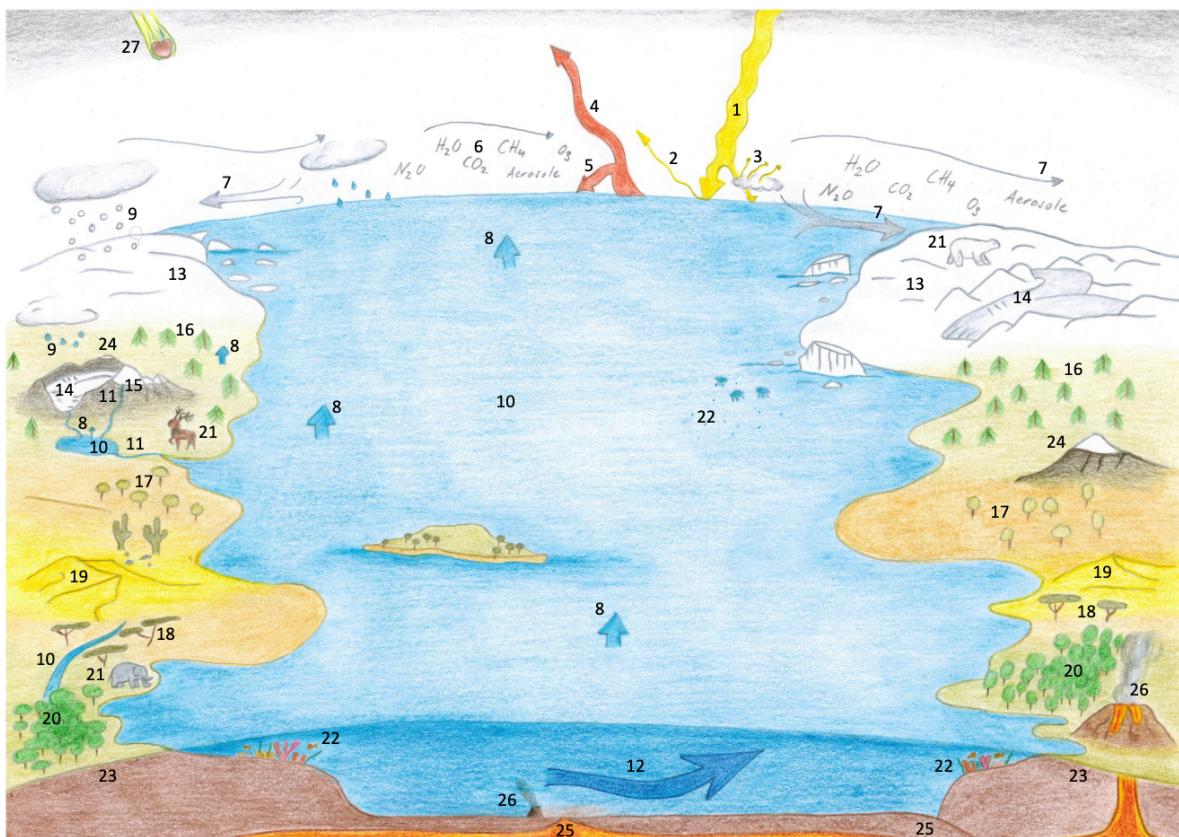


Fig. 1. Le système climatique naturel de la Terre, avec des éléments des divers sous-systèmes (sphères). Croquis original projet CCESO II. Dessin: Michelle Walz.

Atmosphère	Biosphère
1. Rayonnement solaire incident (ondes courtes)	16. Forêt de conifères
2. Rayonnement solaire réfléchi (ondes courtes)	17. Forêts de feuillus et forêts mixtes
3. Dispersion / diffusion (rayonnement à ondes courtes)	18. Steppe
4. Rayonnement thermique émis par la Terre (ondes longues)	19. Désert
5. Rayonnement thermique «en retour» (ondes longues)	20. Forêt pluviale
6. Gaz à effet de serre*	21. Faune
7. Vent (et jetstreams)	22. Zone côtière / littoral (incluant la biosphère marine ou lacustre)
8. Evaporation	
Hydroosphère et Cryosphère	
9. Précipitations (pluie, neige)	
10. Lac / cours d'eau / mer / océan	
11. Ruissellement (écoulement des cours d'eau)	
12. Courant marin	
13. Régions englacées (glaces continentales; banquise)	
14. Glacier	
15. Permafrost (pergélisol)	
*Principaux gaz à effet de serre: vapeur d'eau (H_2O), gaz carbonique (dioxyde de carbone, CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote ou gaz hilarant (N_2O), ozone (O_3).	
	Pédosphère
	23. Sol
	Lithosphère
	24. Montagnes
	25. Tectonique des plaques (plaques convergentes / divergentes; formation des chaînes de montagnes)
	26. Volcan
	Exosphère, espace interplanétaire
	27. Impact de météorite

*Principaux gaz à effet de serre: vapeur d'eau (H_2O), gaz carbonique (dioxyde de carbone, CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote ou gaz hilarant (N_2O), ozone (O_3).

Les mécanismes naturels et anthropiques du système climatique

Les processus fondamentaux du système climatique naturel sont induits par le Soleil. A proximité des pôles, l'angle d'incidence du rayonnement solaire est relativement faible et le trajet à travers l'atmosphère relativement long (fig. 2). La quantité d'énergie solaire par unité de surface est donc plutôt faible et les températures sont par conséquent basses. A proximité de l'équateur par contre, l'angle d'incidence est plus fort et la traversée de l'atmosphère plus courte. La quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface est donc sensiblement plus importante et les températures plus élevées.⁵ Les mouvements naturels de la Terre (rotation, orbite autour du Soleil, légères oscillations de l'axe des pôles), les variations des paramètres de l'orbite et l'inclinaison de l'axe de la Terre (axe des pôles) déterminent les différences d'intensité du rayonnement solaire et de conditions de température qui caractérisent tel ou tel lieu à la surface de la Terre.

Les éruptions volcaniques, l'activité solaire et les gaz à effet de serre naturellement présents dans l'atmosphère sont d'autres facteurs qui influencent le climat. Les principaux facteurs anthropiques qui ont un impact sur le système climatique sont les émissions de gaz à effet de serre (voir le feuillet d'information consacré à ce phénomène), les aérosols et les modifications des différentes formes d'utilisation du sol (des surfaces foncées absorbent plus de rayonnement solaire que des surfaces claires). Tous ces facteurs, qu'ils soient naturels ou anthropiques, ont des effets sur un ou plusieurs des sous-systèmes, sur les interactions entre ces sous-systèmes, et au final sur le système climatique considéré dans son ensemble⁶.

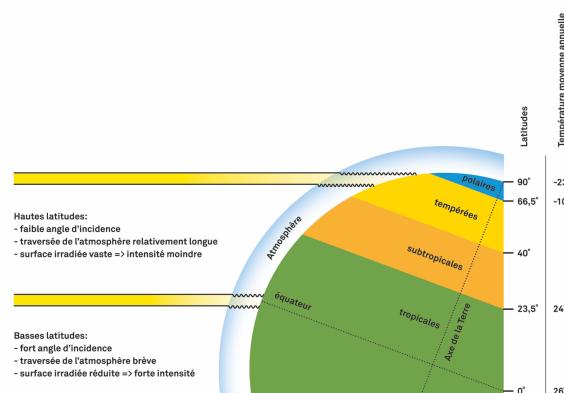


Fig. 2. Rayonnement solaire, latitudes et températures.

Anthropique: qui est en rapport avec l'espèce humaine; qui a une cause humaine ou résulte d'une influence humaine. Les textes de ce dossier thématique sur le changement climatique feront par exemple souvent la distinction entre facteurs naturels et facteurs anthropiques.

Aérosol: particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (ou plus généralement dans un gaz). Exemples: particules de suie; cendres; poussières du Sahara.

Les échanges d'énergie et de chaleur entre l'atmosphère et les océans

Le système climatique tente constamment d'équilibrer les différences de température entre les régions équatoriales et les pôles. Ce transport de chaleur et donc d'énergie en direction des pôles se fait environ à parts égales dans l'atmosphère et dans les océans. Les échanges de chaleur sont plus rapides dans l'atmosphère (par les vents) que dans les océans (par l'intermédiaire des courants océaniques). Les océans stockent la chaleur bien plus longtemps que l'air. Ce sont donc d'énormes réservoirs de chaleur, qui ne la restituent à l'atmosphère qu'avec un certain retard.⁷

Les échanges dans l'atmosphère

Le processus global d'échange des masses d'air dans l'atmosphère est appelé **circulation générale de l'atmosphère (CGA)**, ou plus simplement circulation atmosphérique. De grandes zones de circulation des vents peuvent être identifiées dans les deux hémisphères.⁸

⁵ Trompette (2004), pp. 176-177.

⁶ Wanner (2016), p. 59; Vigneau (2005), pp. 104 et suivantes.

⁷ Trompette (2004), pp. 168-169; Delmas *et al.* (2007), pp. 21 et suivantes.

⁸ Delmas *et al.* (2007), pp. 21-24; Trompette (2004), pp. 168-169; Vigneau (2005), pp. 23 et suivantes.

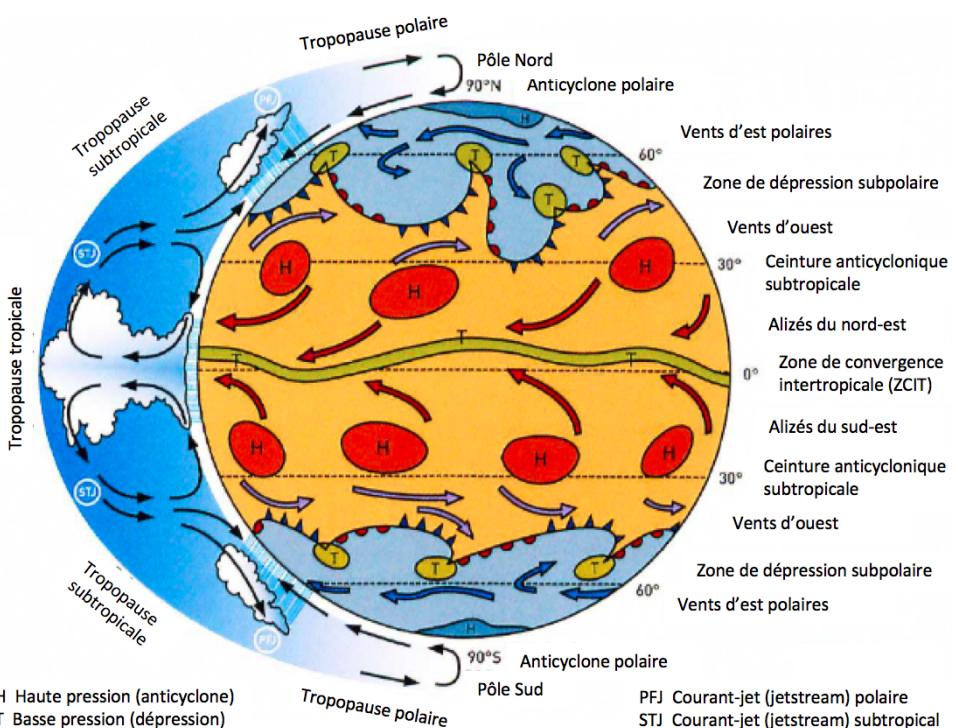


Fig. 3. La circulation générale de l'atmosphère (schéma tiré de Hasler, 2016, hep Verlag; trad. Ph. Hertig).

La forte intensité du rayonnement solaire à l'équateur (voir la fig. 2) implique des températures élevées au sol et dans les basses couches de l'atmosphère. Cet air chaud s'élève et il se forme une ceinture de basses pressions, appelée zone de convergence intertropicale (ZCIT). En s'élargissant, l'air se refroidit avec l'altitude et s'éloigne de la ZCIT en s'écoulant en direction du nord et du sud près de la tropopause (fig. 3).

A environ 30° de latitude Nord et Sud, les masses d'air redescendent en se réchauffant et forment les ceintures anticycloniques subtropicales⁹. Les masses d'air qui s'écoulent en direction de l'équateur constituent les alizés, qui se rencontrent dans les régions équatoriales; ce sont les flux convergents des alizés du nord-est et du sud-est qui donnent naissance à la ZCIT. De part et d'autre de l'équateur, les zones des alizés se caractérisent par des régimes de vent en général réguliers. Quant aux masses d'air qui s'écoulent des ceintures anticycloniques subtropicales en direction des pôles, elles forment des vents¹⁰ de sud-ouest et d'ouest; la zone où ils soufflent est souvent appelée zone des vents d'ouest des latitudes moyennes¹¹. Ces vents d'ouest rencontrent les froids vents d'est polaires dans la zone des dépressions subpolaires.

Composition de l'air et pression atmosphérique

L'atmosphère terrestre est un mélange gazeux composé d'azote (78,1 %), d'oxygène (20,9 %) et d'argon (0,93 %). Le reste, soit moins de 1%, contient des gaz à l'état de traces, parmi lesquels le gaz carbonique (dioxyde de carbone, CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (ou oxyde nitreux, ou encore gaz hilarant, N₂O) et l'ozone (O₃). Ces quatre composants sont des gaz à effet

Tropopause

Couche constituant la limite entre la troposphère et la stratosphère. L'altitude de la tropopause varie selon la latitude: elle est à environ 8 km au-dessus des pôles et 16 km au-dessus de l'équateur. Elle se caractérise par un net changement de l'évolution verticale de la température (décroissante avec l'altitude dans la troposphère, stable dans la tropopause).

⁹ Il s'agit donc de hautes pressions.

¹⁰ On comprendra donc que le vent, fondamentalement, correspond à un déplacement d'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression.

¹¹ Delmas *et al.* (2007), p. 101.

de serre présents naturellement dans l'atmosphère et qui ont un impact important sur le système climatique (voir le feuillet d'information sur l'effet de serre).

Une masse d'air située directement au-dessus d'une petite surface au sol peut être imaginée comme une colonne d'air haute de plusieurs kilomètres. Cette colonne d'air exerce une pression à la surface de la Terre. Cette pression est appelée **pression atmosphérique**.¹²

La pression atmosphérique normale au niveau de la mer est de 1013,25 hectopascals (hPa)¹³ sur une surface de 1 m² à la température de 0°C. Cela correspond à la pression qu'exercerait sur cette surface une colonne d'eau haute de 10,1325 m.

Dans le langage populaire, on dit que l'air est rare en montagne. Ce n'est pas complètement faux: la pression atmosphérique à l'altitude de 5500 m n'est que la moitié de celle que l'on mesure au niveau de la mer; la diminution de la pression atmosphérique n'est cependant pas uniforme avec l'altitude.¹⁴

L'altitude n'est d'ailleurs pas le seul paramètre qui influence la pression atmosphérique: la température joue aussi un rôle notable, ce que l'exemple des brises de mer et de terre montre bien.

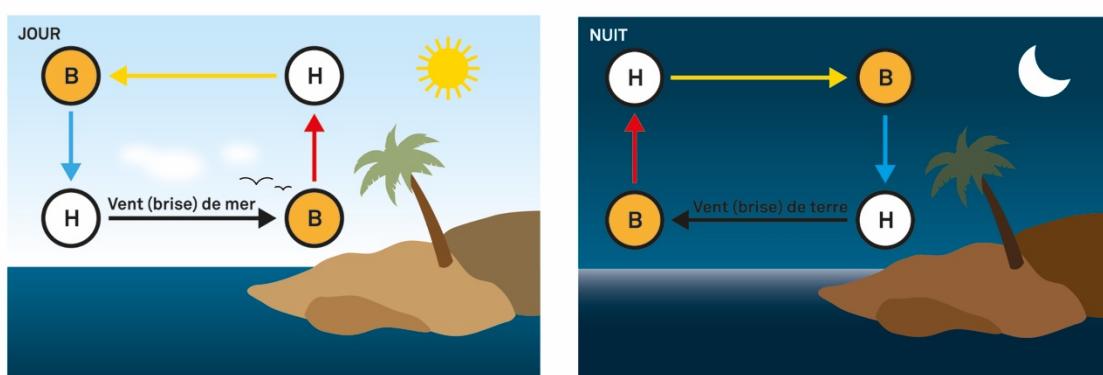


Fig. 4. Schématisation des situations de brise de mer et de brise de terre.

Pendant la journée et sous l'effet du rayonnement solaire, la terre ferme se réchauffe plus vite qu'une étendue d'eau; il fait donc plus chaud au-dessus de la terre qu'au-dessus de l'eau. L'air chaud s'élève, ce qui a pour effet de créer une (petite) zone de basse pression (B sur le schéma ci-dessus) à proximité du sol. Un vent (une brise) se lève alors et souffle depuis l'endroit moins chaud, au-dessus de l'eau, où la pression est un peu plus élevée (H de gauche dans le schéma de gauche de la fig. 4 ci-dessus), en direction de la terre. C'est la brise (ou vent) de mer (le même phénomène peut être ressenti au bord d'un lac).

Le phénomène inverse se produit pendant la nuit (schéma de droite ci-dessus). La terre ferme se refroidit plus vite que l'étendue d'eau. L'air situé au-dessus de l'eau est donc plus chaud et s'élève, formant ainsi une (petite) dépression locale, qui «attire» l'air plus frais situé au-dessus de la terre. Le vent souffle alors de la terre vers la mer – on parle de brise (ou de vent) de terre. Dans ces conditions, le sens du vent change donc entre le jour et la nuit.¹⁵

¹² Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse:

<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/valeurs-mesurees.html?param=messwerte-luftdruck-qfe-10min>

Voir aussi le glossaire sur le site de MétéoFrance:

<http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/153331-pression-atmospherique-normale>

¹³ Par convention, cette valeur est en général arrondie à 1015 hPa. Les cartes de pression sont habituellement construites avec des lignes isobares tracées de 5 en 5 hPa. En allant vers les pressions plus élevées (1020 hPa, 1025 hPa, 1030 hPa, etc.), on cerne les zones de haute pression ou anticycloniques. A l'inverse, les pressions inférieures à la normale (1010 hPa, 1005 hPa, 1000 hPa, 995 hPa, etc.) définissent une zone de basse pression ou dépressionnaire.

Remarque : on entend encore parfois l'expression « millibar » (mbar) comme unité de mesure de la pression atmosphérique. Cette ancienne unité a été remplacée par l'hectopascal, qui a une valeur équivalente (1015 mbar = 1015 hPa) et qui est désormais l'unité de pression officielle du Système international d'unités de mesure (SI).

¹⁴ Hasler (2016), p. 71.

¹⁵ Delmas *et al.* (2007), pp. 107-109; Hasler (2016), p. 72.

Echanges dans les océans

En dehors des marées, les océans sont affectés par des mouvements de grande ampleur, les courants océaniques. Les courants dits de surface (profondeur maximale de 100 à 700 m) sont générés par le vent; la circulation océanique de surface est donc couplée à la circulation atmosphérique.¹⁶ Les courants plus profonds sont liés aux différences de température et de salinité des masses d'eau – on parle de la circulation thermohaline.¹⁷ Un exemple classique de ces grands courants océaniques liés à la circulation thermohaline est le Gulf Stream, que l'on devrait plus précisément désigner par son vrai nom, le courant de dérive nord-atlantique. Les eaux chaudes du Golfe du Mexique et de la mer des Caraïbes alimentent ce courant chaud de surface qui traverse tout l'Atlantique Nord et vient longer les côtes de l'Europe jusqu'au nord de la Norvège. L'eau se refroidit dans ces régions polaires, devient alors plus dense et plus «lourde» et plonge dans les profondeurs pour retourner en direction sud.

Deux grands cycles étroitement liés au système climatique naturel

Il existe des échanges constants de matière et d'énergie entre les sous-systèmes (sphères) du système climatique. La circulation atmosphérique générale et la circulation océanique s'influencent par exemple mutuellement. Les courants atmosphériques (donc les vents) génèrent les courants océaniques de surface; ils apportent aussi aux océans du carbone atmosphérique et de l'eau par le biais des précipitations. Les océans libèrent de la chaleur et, par évaporation, de l'humidité dans l'atmosphère.¹⁸ Dans les régions proches de l'équateur, l'atmosphère chauffe la surface des océans, alors que l'eau des océans réchauffe les couches d'air proches de la surface dans les régions polaires.

Parmi les grands cycles naturels (appelés aussi cycles biogéochimiques), le cycle de l'eau et le cycle du carbone ont une importance fondamentale pour le système climatique de la Terre, dont ils relient plusieurs sous-systèmes.¹⁹

Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau englobe les échanges entre l'atmosphère, les océans et les mers, les eaux continentales, les surfaces terrestres, la cryosphère et la biosphère.²⁰ L'eau est répartie de manière très inégale entre les différents «réservoirs» à travers lesquels elle circule. 96.5% de l'eau se trouvent dans les océans et les mers, et 0.9% sont des eaux souterraines salées (97.4% du volume d'eau total sont donc constitués d'eau salée). Les eaux douces représentent 2.6% du volume total, dont 1.7% se trouve sous la forme de glace ou de neige, 0.8% sous la forme d'eaux souterraines et moins de 0.1% se trouve dans les lacs et les cours d'eau de surface.²¹ L'atmosphère ne contient que 0.001% du volume total d'eau.

Les capacités de stockage des «réservoirs» que sont l'atmosphère, les océans et les mers, les surfaces continentales ou les zones souterraines sont donc très différentes. Le temps que passe chaque molécule d'eau est également très différent d'un réservoir à l'autre: le temps de résidence dans les océans est de l'ordre de 3000 ans, alors qu'il n'est que de 9 jours environ dans

¹⁶ Trompette (2004), pp. 204-209; Delmas *et al.* (2007), pp. 133-138.

¹⁷ Delmas *et al.* (2007), pp. 142-146 ; Trompette (2004), pp. 209-212 ; Wanner (2016), p. 35.

¹⁸ Wanner (2016), p. 159.

¹⁹ Delmas *et al.* (2007), pp. 57 et suivantes, ainsi que pp. 154-156; Brönnimann (2018), p. 11.

²⁰ Delmas *et al.* (2007), pp. 57-58.

²¹ Selon les données de l'US-Geological Survey: <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>

l'atmosphère.²² La majeure partie de l'eau qui s'évapore au-dessus des mers et des océans y retombe sous la forme de précipitations.

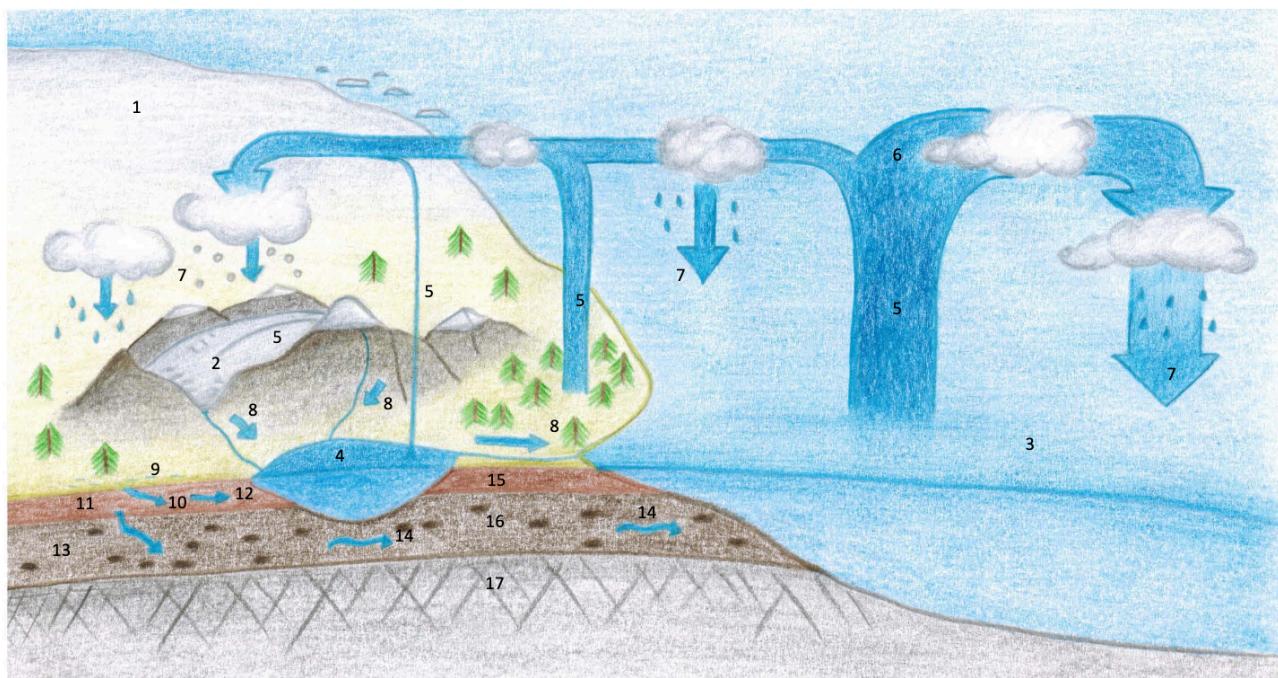


Fig. 5. Le cycle de l'eau (croquis original projet CCESO II. Dessin: Michelle Walz).

Composantes du cycle de l'eau

- | | | |
|----------------------------------|---|--|
| (1) Région englacée | (7) Précipitations (pluie et neige) | (13) Réservoir d'eau souterraine |
| (2) Glacier / neige | (8) Ecoulement des cours d'eau (*) | (14) Ecoulement souterrain |
| (3) Océan | (9) Zone marécageuse | (15) Sol |
| (4) Lac | (10) Infiltration | (16) Roche meuble |
| (5) Evaporation / sublimation | (11) Stockage de l'humidité du sol | (17) Roche en place |
| (6) Transport de la vapeur d'eau | (12) Ecoulement dans le sol (percolation) | (*) on parle aussi de <i>ruissellement</i> |

La cryosphère (calottes polaires, glaciers, neige, banquise) joue un rôle important dans le cycle de l'eau en tant que réservoir et isolant. La neige et la glace couvrent en moyenne 10 % de la surface terrestre et stockent environ les trois quarts de l'eau douce.²³ La majeure partie de la glace se trouve en Antarctique et au Groenland. La glace de mer qui constitue la banquise a un effet isolant: à la manière d'une couche isolante sise entre l'océan et l'atmosphère dans les régions polaires, elle empêche le transport de chaleur et l'évaporation des océans dans l'atmosphère. D'autre part, la glace réfléchit une grande partie du rayonnement solaire à ondes courtes, qui ne peut pas être absorbé par l'eau et converti en chaleur.²⁴

Le cycle du carbone

Le cycle du carbone exerce également une influence majeure sur le système climatique. Les composés de carbone tels que le dioxyde de carbone (CO_2 , gaz carbonique) ou le méthane (CH_4) sont des gaz à effet de serre qui ont un impact direct sur le climat (voir le feuillet d'information

²² Brönnimann (2018), p. 38; Delmas *et al.* (2007), p. 58.

²³ Wanner (2016), pp. 37 et suivantes.

²⁴ Wanner (2016), p. 40; Brönnimann (2018), pp. 205 et suivantes.

consacré à l'effet de serre).²⁵ De très grandes quantités de composés de carbone sont stockées dans les océans, les sols et la végétation. Les océans contiennent environ 50 fois plus de carbone que l'atmosphère. Les océans fonctionnent donc là aussi comme un réservoir important en absorbant du CO₂ de l'atmosphère. Par contre, l'atmosphère stocke relativement peu de gaz carbonique. La végétation absorbe une partie du gaz carbonique atmosphérique, qui est ainsi temporairement stockée par la biosphère. Une grande partie du CO₂ émis par l'Homme et de ce fait introduit dans le système climatique atteint d'abord l'atmosphère, puis passe dans l'hydroosphère.

Cycle du carbone

- | | | |
|-------------------------------------|--|--|
| 1. Végétation | 6. Plancton, algues | 10. Utilisation des terres / évolution de l'utilisation des terres / Agriculture |
| 2. Sol | 7. Industrie / transport / combustion d'énergies fossiles | 11. Déforestation, feux de forêt, brûlis |
| 3. Gisements fossiles | 8. Volcans océaniques ou continentaux, îles | 12. Sédiments / dépôts de sédiments |
| 4. Eaux superficielles (océan, mer) | 9. Extraction / production / combustion d'énergies fossiles (pétrole, charbon) | 13. Photosynthèse / respiration |
| 5. Eaux profondes (océan, mer) | | |

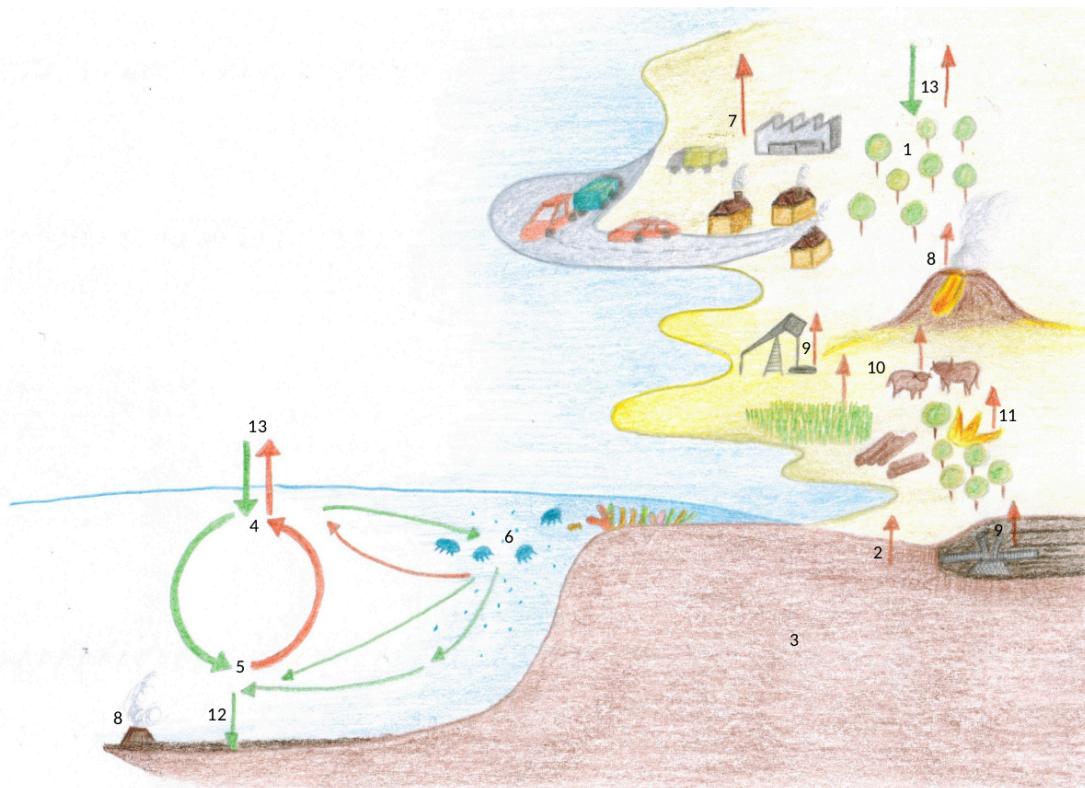


Fig. 6. Le cycle du carbone (croquis original projet CCESO II. Dessin Michelle Walz).

²⁵ Delmas *et al.* (2007), pp. 154-156, Wanner (2016), pp. 47 et suivantes; Brönnimann (2018), p. 39.

Références

- Brönnimann, S. (2018). *Klimatologie*. Berne: Haupt Verlag.
- Delmas, R., Chauzy, S., Verstraete, J.-M. & Ferré, H. (2007). *Atmosphère, océan et climat*. Paris: Belin.
- Hasler, M. (2016). Wetter und Klima. In H.-R. Egli, M. Hasler, & M. Probst (Ed.), *Geografie - Wissen und verstehen* (pp. 61-84). Berne: hep Verlag.
- Trompette, R. (2004). *La Terre. Une planète singulière*. Paris: Belin.
- Vigneau, J.-P. (2005). *Climatologie*. Paris: Armand Colin.
- Wanner, H. (2016). *Klima und Mensch - Eine 12'000-jährige Geschichte*. Berne: Haupt Verlag.