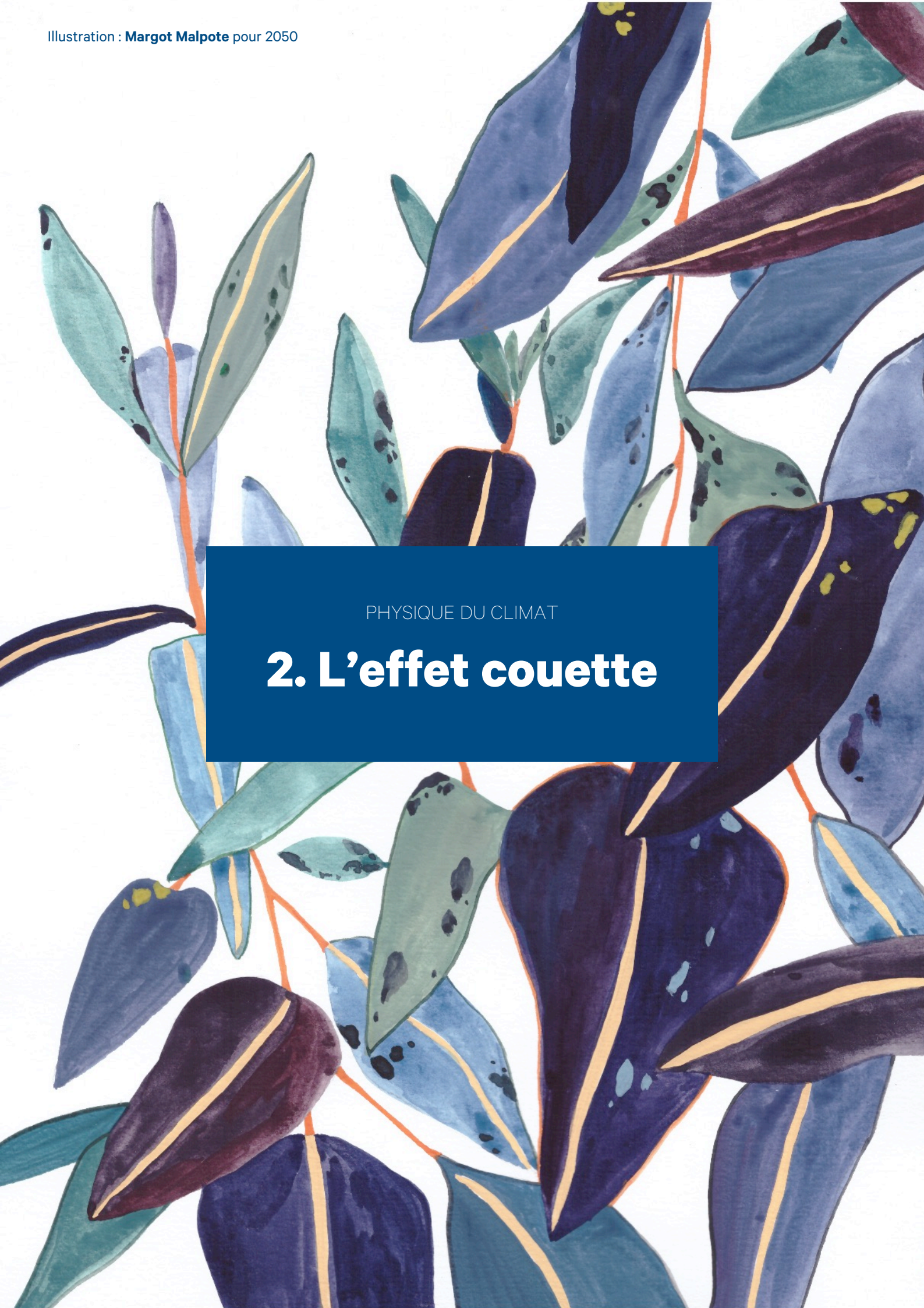


PHYSIQUE DU CLIMAT

2. L'effet couette





Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, co-auteur.e.s, ont souhaité faire de cette leçon un bien commun en le plaçant sous licence libre *Creative Commons CC-BY-SA 4.0*. Cela signifie que vous pouvez réutiliser, distribuer, citer, modifier et adapter les contenus de cette leçon comme bon vous semble, y compris à des fins commerciales, tant que :

- 1) Vous l'attribuez de la manière suivante : *“Ivar Ekeland et Aïcha Ben Dhia, avec le soutien de l'Université Paris-Dauphine, la Fondation Madeleine et la société 2050”* ;
- 2) Le contenu que vous créez sur la base de celui-ci est placé sous une licence similaire, c'est-à-dire qu'il n'interdit à personne de réutiliser vos améliorations.

Pour plus de détails, nous vous invitons à consulter la licence complète :
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fr>

Cette licence ne concerne toutefois pas les illustrations en couverture de chaque leçon ou les travaux référencés, qui demeurent placés sous leur mention légale d'origine.

Introduction

« Lorsque vous partez camper, n'oubliez pas votre sac de couchage. Si vous n'en avez pas, vous aurez trop froid pour dormir : la chaleur de votre corps va rayonner autour de vous, au mieux elle réchauffera la tente si vous en avez une, mais pour vous elle sera perdue. Si vous en avez un, il vous renverra une grande partie de la chaleur que vous émettez, et c'est comme cela que vous aurez chaud. Eh bien, notre planète aussi a un sac de couchage : c'est son atmosphère. Elle empêche la chaleur émise par la Terre de rayonner dans l'espace. On appelle cela traditionnellement l'effet de serre, mais on ferait mieux de l'appeler effet sac de couchage ou effet couette.

La comparaison va plus loin encore. Vous savez que les sacs de couchage sont plus ou moins chauds suivant leur épaisseur et la qualité de ce qui est à

l'intérieur : les sacs les plus chauds et les plus chers sont rembourrés en plumes de canard. Eh bien, ce qui remplace les plumes de canard, dans le cas de l'atmosphère, ce sont certaines molécules qui retiennent très bien la chaleur. Ce sont ces gaz qu'on appelle gaz à effet de serre : ceux que vous connaissez (le gaz carbonique, le méthane...) et un autre auquel vous ne pensez peut-être pas : la vapeur d'eau.

Plus il y en a, plus l'atmosphère est chaude. Rajouter des gaz à effet de serre dans l'air, c'est comme rajouter des plumes de canard dans le sac : cela réchauffe la Terre. Le problème, c'est qu'on peut facilement retirer les plumes d'un sac de couchage, mais qu'on ne sait pas retirer facilement le gaz carbonique de l'atmosphère. S'il fait déjà trop chaud aujourd'hui, il fera encore plus chaud demain. »

Objectifs de la leçon

À l'issue de cette leçon, vous serez capable de :

- Relier la chaleur d'un objet et l'émission d'ondes lumineuses
- Comprendre le principe des lunettes infrarouges
- Comparer les caractéristiques des ondes émises par le Soleil et par la Terre
- Déduire de la stabilité du climat terrestre les échanges lumineux
- Expliquer le rôle de l'atmosphère dans le climat terrestre et ce qu'on appelle l'effet de serre
- Nommer les principaux gaz à effet de serre
- Définir le forçage radiatif

1

L'effet de serre

1.1. Le rayonnement des corps chauds

La surface du Soleil est à une température de l'ordre de 5700 degrés Celsius. C'est une chaleur considérable ! D'après vous, est-ce que cette chaleur a quelque chose à voir avec la lumière que le Soleil nous renvoie ? Eh bien oui ! C'est même exactement parce qu'il chauffe que le Soleil nous envoie des rayons lumineux. Plus étonnant encore : ce principe est vrai pour tout objet. Si un objet (votre montre, votre orteil, un brin d'herbe) chauffe, il rayonne.

Vous répondrez sans doute quand votre bouilloire chauffe, elle ne se met pas à illuminer la cuisine. D'un autre côté, vous avez aussi entendu parler des lunettes infra-rouges. Ces lunettes d'agents secrets permettent de détecter des corps humains dans le noir parce qu'ils sont plus chauds que le reste des objets dans la pièce. Eh bien, si vous chaussez vos lunettes infrarouges en vous faisant un thé, vous verrez aussi votre bouilloire dans le noir ! Pourquoi ? Il serait compliqué d'entrer dans le détail de cette grande loi de la physique moderne. Alors nous allons nous en faire une représentation imagée et simplifiée.

Lorsqu'un ou une DJ « chauffe » la salle en soirée ou en discothèque, que se passe-t-il ? Les gens s'agitent et dansent de plus en plus. Eh bien la même chose est vraie pour tout objet de matière (un morceau de bois, votre main, de la vapeur d'eau) : le chauffer, c'est créer de l'agitation des atomes à l'intérieur

par s'éparpiller dans toute la cuisine, ce que l'on appelle de la vapeur d'eau. Avant même d'atteindre 100 degrés Celsius, le fait de chauffer de l'eau liquide crée de l'agitation à l'intérieur.

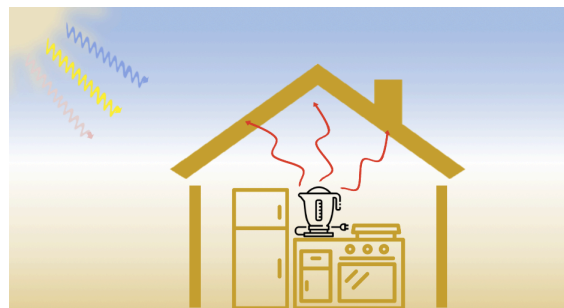
Plus mystérieux : lorsqu'un atome (ou une molécule) s'agit, il peut se décharger de son énergie en envoyant des ondes lumineuses. Le Soleil est extrêmement chaud. Il est donc composé d'atomes très agités, et ces atomes ne demandent qu'à se décharger d'une partie de leur énergie en renvoyant de la lumière partout dans le système solaire. C'est une des grandes lois de la physique, qui a été décrite au XXème siècle.

Revenons à la bouilloire : pourquoi dans ce cas n'est-elle pas la boule à facettes de votre cuisine ? D'abord parce qu'une onde lumineuse, comme une onde de vagues sur la mer, peut avoir plusieurs formes : certaines sont très étalées (les « sommets » de chaque vague sont très espacés), d'autres sont très compactes. On dit qu'une onde peut avoir une grande longueur d'onde (sommets très espacés) ou une petite longueur d'onde (sommets très rapprochés). Il n'y a pas de relation entre la vitesse d'une onde et sa longueur d'onde. Une surfeuse postée sur une vague peut aller vite aussi bien sur une onde étalée que sur une onde compacte. Ensuite, parce que notre œil humain réagit à certaines formes d'ondes, mais pas à toutes. Ainsi, nous sommes très sensibles aux ondes envoyées par le Soleil, mais pas du tout à celles de la bouilloire, et encore moins au rayonnement des poissons panés dans notre congélateur, même si eux aussi rayonnent un peu !

Est-ce qu'il vaut mieux mettre, de l'eau chaude ou de l'eau froide, sur votre thé pour qu'il infuse dans toute la tasse ?

Réponse : de l'eau chaude bien sûr, parce que l'agitation intérieure due à la chaleur permet à toutes les molécules d'eau d'imbiber les feuilles de thé et de les faire voyager dans le reste de la tasse.

Dans la précédente leçon, nous avons vu que si l'on chauffe de l'eau liquide, les molécules d'eau commencent à s'agiter dans la casserole et finissent



Plus un objet est chaud, plus il rayonne des ondes lumineuses compactes, c'est-à-dire à courtes longueurs d'onde, et plus ces ondes seront nombreuses. Le Soleil étant très chaud, il émet principalement des ondes lumineuses à très courtes longueurs d'onde et il en émet énormément. Celles que notre œil s'est habitué à détecter ont une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre (un micromètre est 100 000 fois plus petit qu'un mètre). C'est ce qu'on appelle couramment la lumière visible. La bouilloire, elle, est beaucoup moins chaude que le Soleil : elle émet donc des rayons lumineux à plus grandes longueurs d'onde et elle en émet beaucoup moins.

L'objet chaud perd une partie de son énergie en émettant des ondes lumineuses. Les ondes sont donc chargées d'énergie, et en arrivant au contact

d'un nouvel atome, sur Terre par exemple, elles peuvent lui transmettre cette énergie

En résumé

Un objet plus chaud qu'un autre est un objet où les molécules s'agitent davantage.

Les molécules agitées peuvent décharger une partie de leur énergie en émettant des ondes lumineuses.

Les ondes lumineuses vont toutes à la même vitesse mais peuvent avoir des longueurs d'onde plus ou moins grandes.

Au fur et à mesure de l'évolution, l'œil humain a appris à percevoir les ondes lumineuses uniquement pour certaines longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 micromètre.

Plus un objet est chaud, plus il émet d'ondes et plus ces ondes ont des courtes longueurs d'onde.

Les ondes lumineuses transportent de l'énergie qu'elles peuvent transmettre aux objets qu'elles atteignent et qui, en conséquence, se réchauffent.

1.2. Le rayonnement de la Terre et les conditions d'équilibre

C'est donc l'énergie transportée par le rayonnement solaire qui va réchauffer les objets célestes qu'il rencontre, et notamment la Terre. Celle-ci étant ainsi réchauffée, elle va réémettre à son tour du rayonnement, comme tous les corps chauds. La Terre reçoit donc de l'énergie (le rayonnement solaire), et en émet (son propre rayonnement). Mais dans quelles quantités ? Lequel de ces deux rayonnements est le plus chargé en énergie ?

Raisonnons... Nous avons vu dans la leçon précédente qu'au cours des 10000 dernières années, la température sur Terre était très stable. Si le rayonnement que la Terre recevait au cours d'une année était supérieur à celui qu'elle renvoyait, que se passerait-il ? La Terre aurait alors un « surplus » d'énergie, donc un surplus de chaleur ! La Terre se mettrait donc à chauffer, tous les ans un peu plus,

ce qui n'est pas ce qu'on observe sur les 10000 ans de l'holocène.

Quiz

À votre tour ! Si le rayonnement que la Terre émet au cours d'une année était plus chargé en énergie que celui qu'elle recevait, que se passerait-il ?

Réponse : Dans ce cas, comme une étoile qui s'éteint, elle verrait son niveau d'agitation interne baisser, c'est-à-dire qu'elle se refroidirait. À nouveau, cela n'est pas compatible avec nos observations.

La Lune est aussi un objet de matière, et on peut lui appliquer le même raisonnement. Appelons S l'énergie reçue du Soleil et T celle qu'elle reçoit de la Terre. Enfin appelons L l'énergie lumineuse que la Lune renvoie vers l'espace et supposons

que nous ayons des relevés de températures qui nous indiquent que la Lune a gardé une température constante depuis plusieurs dizaines de milliers d'années.

Quiz

Qu'en déduira-t-on sur la relation entre S , T et L ?

Réponse : $S+T = L$

En résumé

Pour rester à l'équilibre thermique, la Terre ne peut qu'émettre exactement la même quantité d'énergie qu'elle reçoit.

1.3. Le rôle de l'atmosphère et l'effet de serre

Les physiciens ont beaucoup étudié le rayonnement émis par un corps chaud et ont trouvé une équation qui prédit parfaitement la forme des ondes lumineuses émises par un corps chaud en fonction de sa température. Dans le cas du Soleil, à 5700°C , la plupart des ondes lumineuses émises ont une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètres (c'est-à-dire la lumière visible, entre le rouge et le violet). Comme la température du sol terrestre est beaucoup plus faible que celle de la surface solaire, le rayonnement émis par le sol de la Terre est décalé vers les grandes longueurs d'onde. Il se situe dans ce qu'on appelle l'infrarouge, avec des longueurs d'ondes autour de 10 micromètres, bien loin de la lumière visible par l'œil humain.

Ce rayonnement terrestre échappe donc à notre vision... mais pas à l'atmosphère ! Ou plutôt : pas à

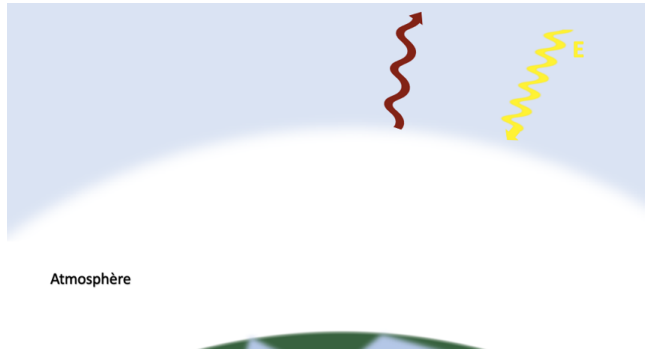
toutes les molécules de l'atmosphère. En effet, certaines grosses molécules de l'air (le CO_2 , l' H_2O ,...) sont particulièrement sensibles aux ondes à grandes longueurs d'ondes émises par la Terre. Plutôt que de les laisser passer (comme une bouée dans la mer laisse passer les vagues ou comme une vitre laisse passer la lumière du Soleil), elles réussissent à absorber l'énergie portée par les ondes lumineuses terrestres, s'agitent, et finissent par se décharger elles aussi, en renvoyant des ondes lumineuses dans toutes les directions.

Au bilan, cela signifie que l'atmosphère crée une sorte de miroir partiel tout autour de la Terre. La Terre ne reçoit donc pas seulement le rayonnement direct du Soleil, mais aussi celui qui lui est partiellement réfléchi par l'atmosphère. Comme un sac de couchage retient la chaleur de votre corps quand vous dormez, l'atmosphère retient une partie de la chaleur de la Terre.

Exercice d'application

S'il n'y avait pas d'atmosphère, les physiciens calculent que la température (moyenne) de la Terre devrait être de -19°C . Or elle est de 15°C , soit une différence de 34°C . Ce n'est pas rien ! Essayons de comprendre comme ils sont arrivés à cette conclusion.

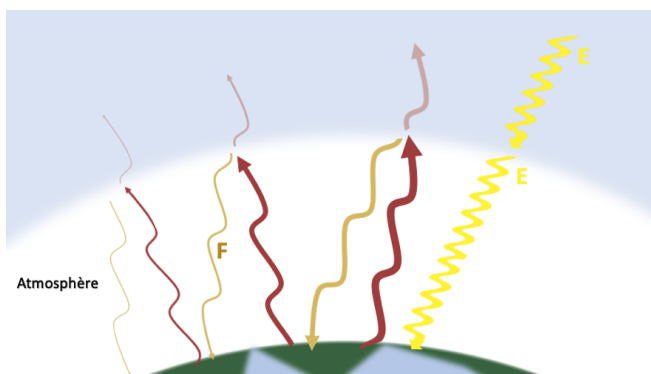
Le système Terre + Atmosphère reçoit à chaque instant une quantité E d'énergie solaire.



Q1 : Si l'on suppose que la température du système est stable, combien le système doit-il renvoyer d'énergie à chaque instant ?

Décomposons à présent la Terre d'une part et l'Atmosphère d'autre part. S'il n'y avait pas d'atmosphère, cette énergie solaire arriverait directement au sol terrestre, qui la renverrait, et le tour serait joué. Mais il y a une atmosphère, qui est insensible aux très courtes longueurs d'onde et laisse entièrement passer les rayons solaires mais ne va laisser passer dans l'espace qu'une partie de l'énergie émise par la Terre, et renverra l'autre partie vers le sol. Le sol est donc chauffé de deux manières : par le soleil, d'une part, et par la couette atmosphérique, d'autre part.

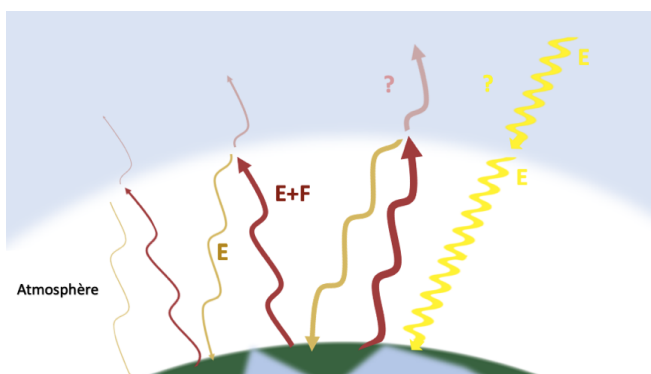
Appelons F le rayonnement total envoyé par l'atmosphère vers le sol terrestre.



Q2 Quelle est la quantité totale de rayonnement reçue par le sol, venant du Soleil et de l'atmosphère ?

Q3 Le sol est à l'équilibre (sa température est stable). Quelle quantité d'énergie le sol terrestre doit-il renvoyer pour rester à l'équilibre ?

Les physiciens ont mesuré que l'atmosphère terrestre intercepte 40 % de l'énergie émise par le sol. Pour simplifier nos calculs, nous allons arrondir et supposer que l'atmosphère renvoie exactement la moitié des flux énergétiques venant de la Terre (en réalité).



Q4 Si le sol renvoie $E+F$ vers l'atmosphère, combien repart dans l'espace sans être intercepté par l'atmosphère ?

Q5 Il est temps de boucler la boucle : rappelez-vous de la condition d'équilibre du système Terre + Atmosphère recevant une quantité E du Soleil. Que déduisez-vous de notre réponse à la question Q4 ?

Q6 Qu'est-ce que cela implique sur E et F ?

Réponses

R1 E. Le système doit renvoyer exactement la même quantité. Si ce n'était pas le cas, comme on l'a vu dans la section précédente, Terre et atmosphère chaufferaient, et leur température augmenteraient indéfiniment.

R2 E pour le soleil et E+F pour soleil + atmosphère. En effet, il faut se rappeler que les molécules de l'atmosphère laissent entièrement passer le rayonnement solaire, à très courtes longueurs d'onde.

R3 E+F

R4 (E+F)x 50%, c'est-à-dire (E+F)/2

R5 (E+F)/2= E

R6 E=F Cela veut dire que le sol reçoit autant de chaleur de l'atmosphère que du Soleil ! C'est comme si la Terre avait un Soleil de plus pour la chauffer. Voilà l'effet de serre.

En résumé

L'atmosphère est responsable de l'« effet de serre », que l'on ferait mieux d'appeler l'effet sac de couchage ou l'effet couette, et qui réchauffe la Terre.

Cela est dû à quelques molécules spécifiques qui agissent comme des miroirs partiels, absorbant et ré-émettant vers la Terre les ondes de grandes longueurs d'onde.

2

Les gaz à effet de serre (GES)

L'air, c'est-à-dire l'atmosphère, est un mélange de différentes molécules : il comporte essentiellement du diazote N₂ (78%) et du dioxygène O₂ (21%). L'un et l'autre sont composés de deux atomes et sont insensibles aux ondes de grande longueur d'ondes. Elles ne participent donc pas à l'effet de serre.

C'est dans le 1% restant que se joue toute l'action. L'effet de serre est dû exclusivement aux autres gaz, dont les molécules sont au moins composées de trois atomes et qui sont présents dans des quantités infimes (quelques dixièmes de pourcents pour la vapeur d'eau, moins de 0,1% pour les autres). Ils sont donc faiblement concentrés dans l'air, mais cela ne les empêche pas d'être d'une redoutable efficacité en matière d'effet couette.

La principale molécule responsable de l'effet de serre est la vapeur d'eau, H₂O. Sa concentration dans l'atmosphère varie beaucoup : elle est mesurée par l'humidité relative, qui va de 0 à 100 %. Quand on atteint une humidité de 100 %, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes, et on obtient des nuages,

qui finissent par retomber en pluie, en neige ou même en grêle.

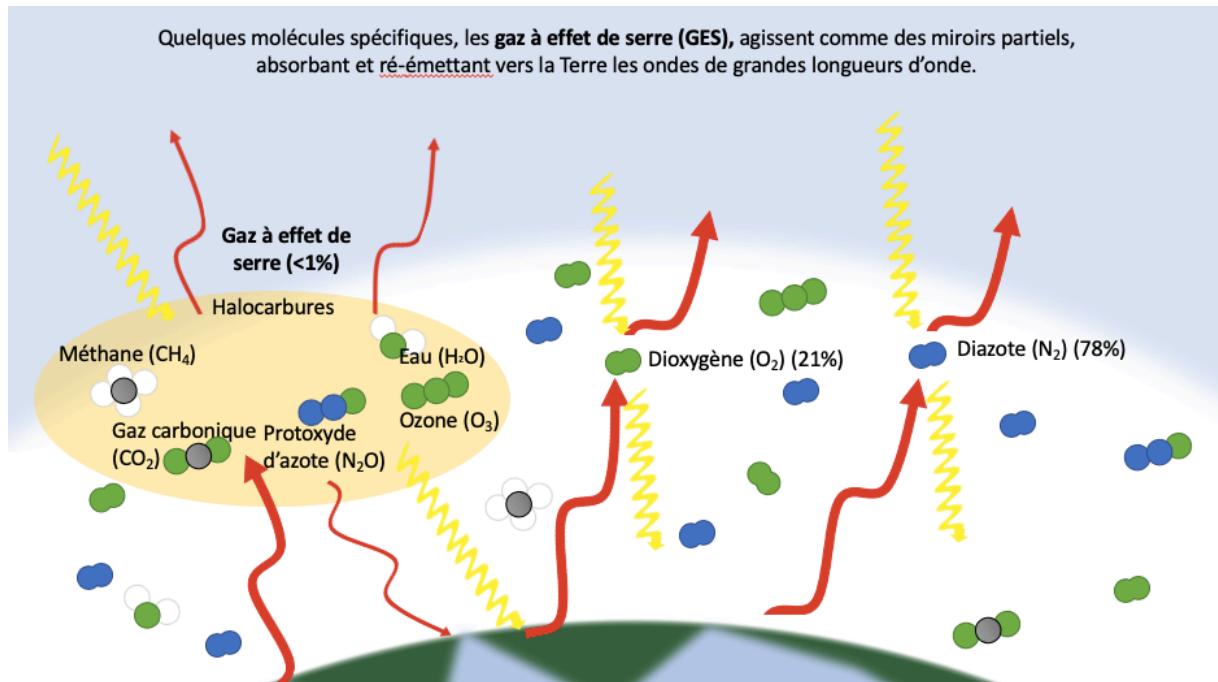
Occupons-nous des autres gaz à effet de serre (GES), c'est-à-dire de l'air sec. Les GES restants sont, par ordre d'importance¹ :

- le gaz carbonique, CO₂, concentration actuelle 415ppm, mais en augmentation constante, responsable de 65 % de l'effet de serre restant (c'est-à-dire hors vapeur d'eau)
- le méthane, CH₄, concentration actuelle 2ppm, responsable de 15 % de l'effet de serre restant
- les halocarbures :
 - Ce sont des gaz exclusivement d'origine industrielle, comme les fréons, qui se sont illustrés en détruisant la couche d'ozone de l'atmosphère.
 - Ils sont 16 000 fois plus absorbants des ondes lumineuses terrestres que le CO₂, et en dépit d'une très faible

¹ <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/effet-de-serre.xml>

concentration représentent au moins
10 % de l'effet de serre hors H₂O.

- l'ozone O₃, pour 10 %
- le protoxyde d'azote N₂O pour 5 %



3

Le forçage radiatif

L'eau, sous forme gazeuse, est un gaz à effet de serre, mais sous forme liquide ou solide, elle a un autre effet : elle réfléchit la lumière. Une partie du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère n'est pas absorbée par le sol, mais renvoyée directement par la neige, la glace ou les nuages.

Il faut donc modifier légèrement le bilan énergétique de la Terre, qui se présente finalement comme suit (l'unité est le Watt par mètre carré) :

- reçu du Soleil : 342
- réfléchi : 107
- parvient au sol : 235
- émis par le sol : 390
- traverse l'atmosphère : 235

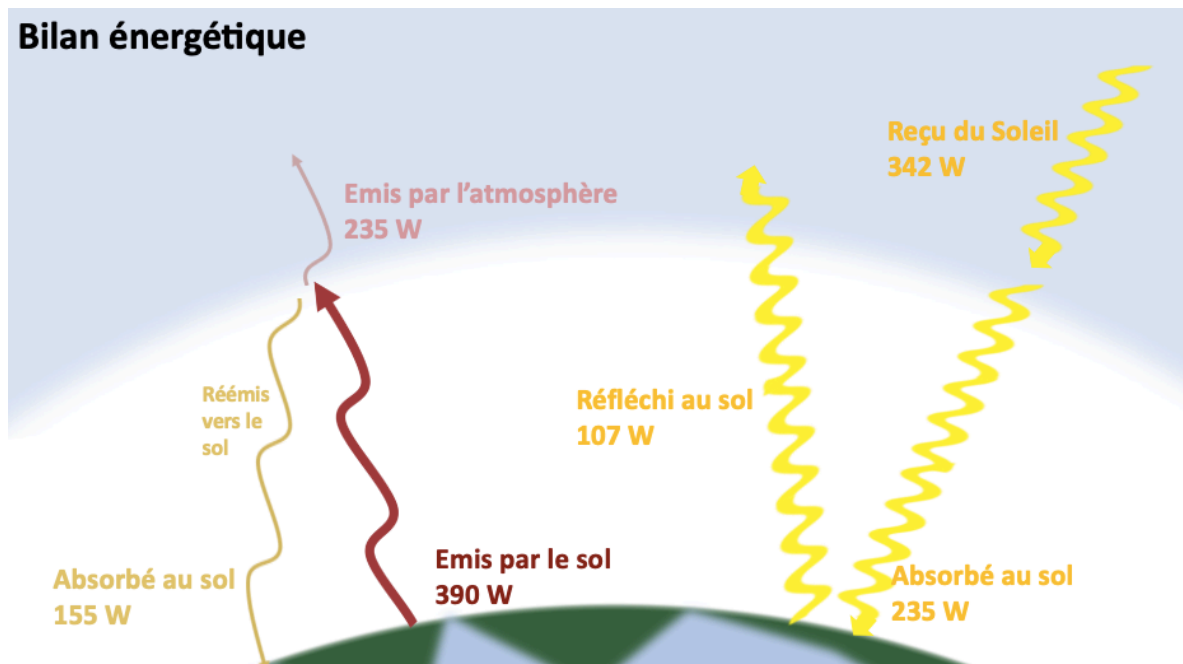
Ainsi qu'on l'a expliqué, ce bilan énergétique est en équilibre et la température de la Terre est stable.

Ce sont les mêmes flux qui prévalaient en 1750, en 1515, en -52 ou aux temps des pharaons. Flux entrants et sortants sont égaux.

Mais depuis deux siècles l'équilibre est rompu: la Terre n'évacue plus toute l'énergie qu'elle reçoit. La différence entre l'énergie reçue et l'énergie évacuée est appelée **le forçage radiatif**.

Le terme de forçage renvoie à l'idée que cela pousse la Terre hors de son équilibre. Il est exprimé en Watt par mètre carré (W/m^2). En 2016, elle est estimée à $3 W/m^2$ (nous reviendrons sur les mesures d'énergie et de puissance dans une prochaine leçon)².

L'énergie en « surplus » va donc mécaniquement réchauffer la Terre et nous verrons qu'effectivement les températures moyennes augmentent depuis 1750. Et comme quand on allume le feu sous une casserole : la température de l'eau augmente, mais ce n'est pas tout : le liquide commence à s'agiter. En ce qui concerne la Terre, il faut s'attendre à ce que l'atmosphère se réchauffe, et soit traversée de courants plus violents.



² https://en.wikipedia.org/wiki/Radiative_forcing

Rappel sur la matière

Comme nous l'avons vu dans la précédente leçon, la matière est faite d'atomes. Ces atomes se regroupent d'abord en petites unités très soudées, les molécules : la molécule d'eau, par exemple, est constituée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. C'est valable pour la glace, pour l'eau liquide et pour la vapeur d'eau : c'est toujours de l'eau, mais sous trois formes différentes (solide, liquide, gazeuse). Les physiciens appellent cela des « phases ».

Le mode d'organisation le plus ordonné correspond à la forme solide : c'est le cas du glaçon par exemple, où les molécules d'eau sont arrangées dans un réseau hexagonal. C'est grâce à cet ordre que le solide est si rigide.

Que se passe-t-il si l'on chauffe un glaçon ? Les molécules dans le solide commencent à vibrer et à s'agiter. Si l'on fait augmenter la température, il y a un seuil critique où rester organisés dans un ordre parfait devient trop pénible pour ces molécules qui gigotent et elles prennent un peu plus de liberté : c'est le passage à la forme liquide. Au stade liquide, c'est un peu comme si les molécules se tenaient la main pour danser. Elles restent proches les unes des autres (c'est pour cela que si vous déposez une goutte d'eau sur une table, elle garde une forme de goutte et les molécules d'eau ne s'éparpillent pas dans toute la pièce) mais elles peuvent s'organiser plus souples les unes par rapport aux autres (c'est pour cela que peu importe la bouteille, si vous y versez de l'eau liquide, elle en prendra la forme).

Et que se passe-t-il enfin si l'on chauffe cette eau liquide ? À partir d'une certaine température, elle se vaporise, c'est-à-dire que les molécules d'eau se lâchent complètement la main et qu'elles vont vivre leur vie où bon leur semble. C'est l'état gazeux et dans le langage courant on parle de « vapeur d'eau ».

La conclusion de cette histoire de l'eau, c'est que la chaleur est un synonyme d'agitation et d'énergie.

Conclusion

- Un objet plus chaud qu'un autre est un objet où les molécules s'agitent davantage.
- Les molécules agitées peuvent décharger une partie de leur énergie en émettant des ondes lumineuses.
- Les ondes lumineuses vont toutes à la même vitesse mais peuvent avoir des longueurs d'onde plus ou moins grandes.
- Plus un objet est chaud, plus il émet d'ondes et plus ces ondes ont des courtes longueurs d'onde.
- Les ondes lumineuses transportent de l'énergie qu'elles peuvent transmettre aux objets qu'elles atteignent et qui, en conséquence, se réchauffent.
- Au fur et à mesure de l'évolution, l'œil humain a appris à percevoir les ondes lumineuses uniquement pour certaines longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 micromètre.
- Pour rester à l'équilibre thermique, la Terre ne peut qu'émettre exactement la même quantité d'énergie qu'elle reçoit.
- L'atmosphère est responsable de l'« effet de serre », que l'on ferait mieux d'appeler effet couette, et qui réchauffe la Terre.
- Cela est dû à quelques molécules spécifiques qui agissent comme des miroirs partiels, absorbant et réémettant vers la Terre les ondes de grandes longueurs d'onde.
- La conclusion de cette histoire de l'eau, c'est que la chaleur est un synonyme d'agitation et d'énergie.

Pour en savoir plus

Ce principe qui relie chaleur et rayonnement lumineux est un principe fondateur de la physique, qui a permis de comprendre un grand nombre de phénomènes. Avant de revenir au climat et au lien avec l'effet de serre, quelques devinettes :

La Terre émet-elle des ondes lumineuses avec des longueurs d'onde plus petites ou plus grandes que celles émises par le Soleil ?

Le Soleil peut-il continuer indéfiniment de renvoyer des ondes lumineuses vers l'extérieur ? Que se passera-t-il pour sa température si l'on attend très longtemps ?

Certains animaux vivent la nuit, plutôt que le jour. Au fil de l'évolution naturelle, leur vision s'est adaptée pour voir certaines ondes lumineuses mieux que nous. Pensez-vous qu'ils voient mieux les ondes à grandes longueurs d'onde ou à faibles longueur d'onde ?

Plus difficile : est-ce que ces animaux voient les mêmes arcs-en-ciel que nous ?