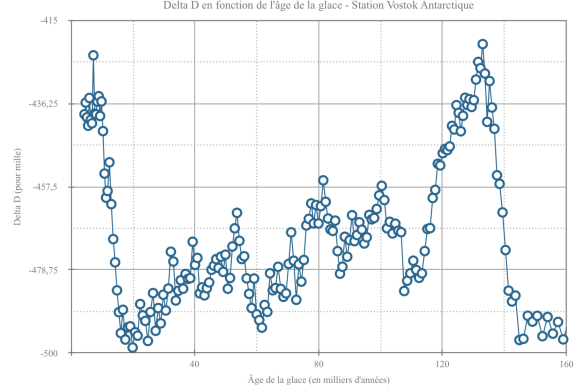
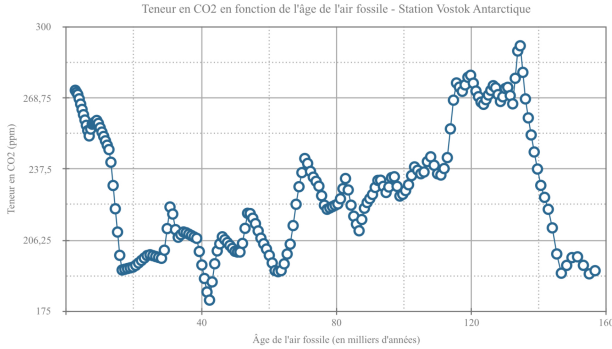


Les relations CO₂ - climats

Des études réalisées sur une carotte de glace à Vostok.

Les cristaux de neige, en s'accumulant, piègent entre eux un peu d'air. Quand le tassement est suffisamment important, les pores de la neige se referment et des bulles d'air se retrouvent incluses dans la glace. L'analyse de ces bulles d'air permet de déterminer la composition de cet air fossile.

Le δD et la concentration en CO₂ de l'air fossile ont été mesurés dans différents échantillons datés de la carotte:



On observe que les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique et de la température (déduite du $\delta^{18}O$ ou du δD) sont synchrones et de même sens. Cela suggère qu'il y aurait une corrélation positive entre la température et la teneur en CO₂ atmosphérique.

Il faut donc s'interroger sur le ou les sens de cette corrélation. Comme pour toutes corrélation, il existe 3 sens hypothétiques possibles:

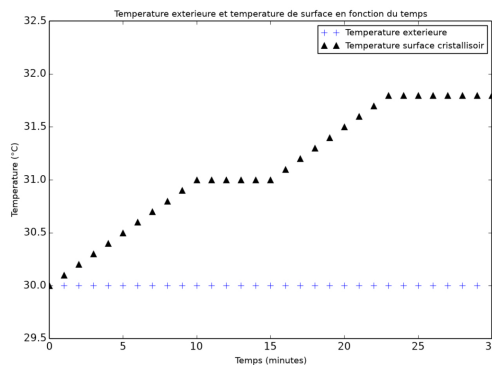
- H1: Les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique induiraient les variations de températures.
- H2: Les variations de températures induiraient les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique
- H3: Les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique induiraient des variations de températures qui induiraient en retour des variations de la concentration en CO₂ atmosphérique. (Double sens)

Si H1 et H2 sont vérifiées alors H3 est aussi vérifiée. Si H1 ou H2 est réfutée alors H3 est réfutée aussi.

Si H3 est vérifiée (et donc H1 et H2 aussi), alors on en déduira qu'il existe une rétroaction entre la concentration en CO₂ atmosphérique et la température. De plus, les augmentations de la concentration en CO₂ atmosphérique étant corrélées à des augmentations de températures, cette rétroaction sera alors positive.

Expérience 1 : Les variations de la concentration en CO₂ gazeux induiraient les variations de la température. (Hypothèse 1)

Un cristalliseur dont le fond est recouvert de Canson noir [surface assimilée à un corps noir] est placé à t₀ sous un spot lumineux (distance fixe durant toute l'expérience). On mesure la température extérieure au cristalliseur, et la température de surface dans le cristalliseur au cours du temps. 15 minutes après le début des mesures, on ajoute du CO₂ dans le cristalliseur, et on maintient sa concentration constante durant les 15 dernières minutes de l'expérience.

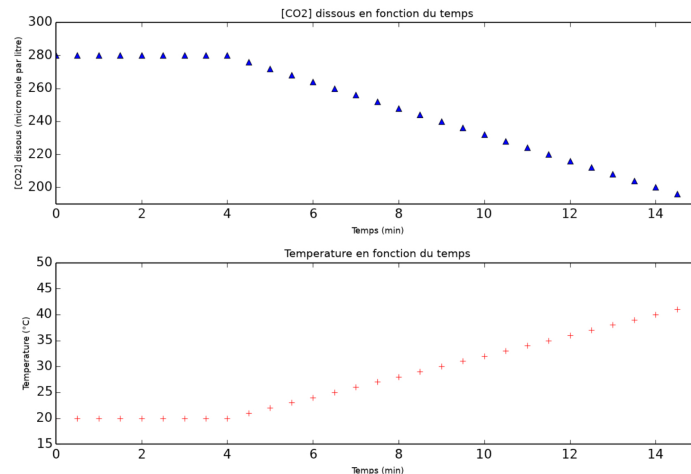


On observe que après l'ajout de CO₂ gazeux, la température d'équilibre de l'enceinte augmente (elle passe de 31°C à 31,8°C), alors que la température extérieure est restée constante.

On en déduit que l'hypothèse est vérifiée: les variations de la concentration en CO₂ gazeux (atmosphérique) induisent des variations de température. Une augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique induit une augmentation de la température d'équilibre de la planète et inversement.

Expérience 2 : Les variations de la température induiraient les variations de la concentration en CO₂ gazeux. (Hypothèse 2)

Une enceinte hermétique, à moitié remplie d'eau, est placée dans un bain Marie. On installe une sonde à CO_2 dans la partie liquide de l'enceinte de manière à mesurer la concentration en CO_2 dissous en fonction de la température de l'eau que l'on fait varier durant l'expérience. Les résultats sont indiqués ci dessous.



L'enceinte étant hermétiquement close, une diminution de la concentration en CO_2 dissous implique une augmentation de la concentration en CO_2 gazeux = dégazage

On observe que:

- Lorsque la température reste constante: la concentration en CO_2 dissous reste elle aussi constante (donc la concentration en CO_2 gazeux aussi)
- Lorsque la température augmente: la concentration en CO_2 dissous diminue, donc la concentration en CO_2 gazeux augmente (dégazage)

On en déduit que l'hypothèse est vérifiée: les variations de la température induisent des variations de la concentration en CO_2 gazeux (atmosphérique).

Une augmentation de la température induit une augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique (dégazage) tandis qu'une diminution de la température induit une diminution de la concentration en CO_2 atmosphérique et donc une augmentation de la concentration en CO_2 dissous (dissolution).

Les interactions rayonnement / matière.

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique [atteint un objet](#), certaines longueurs d'onde sont absorbées tandis que d'autres sont réfléchies par l'objet. Une partie du rayonnement peut éventuellement être transmise à travers l'objet si celui-ci est plus ou moins transparent, avec un changement de direction de la propagation du à la réfraction.

La partie du rayonnement qui est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet et produit de la l'énergie thermique qui sera ré-émise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde. Ainsi, lorsqu'une molécule de gaz absorbe un photon infra-rouge, elle s'échauffe et ré-émet à son tour un photon dont la longueur d'onde dépend de la température de la molécule de gaz (selon la loi de Wien les molécules de gaz atmosphériques ré-émettent dans l'infra-rouge).

Cette ré-émission se faisant dans une direction aléatoire, la moitié des photons sont ré-émis vers l'espace, l'autre moitié des photons sont ré-émis vers la surface de la planète.

À l'équilibre thermique, l'intensité du rayonnement absorbé est égale à l'intensité du rayonnement ré-émis.

La notion de corps noir.

Toute substance, quelle que soit sa température, émet de la lumière, sauf à 0°K. Le fait que les corps chauds émettent de la lumière visible et les corps froids de l'infrarouge indique qu'il existe une relation entre longueur d'onde émise et température. En examinant le rayonnement émis par un objet, on peut donc déterminer la température de l'objet émetteur.

Pour décrire les caractéristiques du rayonnement émis par un objet à une température T (énergie rayonnée), on doit s'assurer que la lumière ambiante réfléchi par l'objet ne vienne pas s'ajouter à celle émise par l'objet en raison de sa température. Pour cela, on considère un objet qui absorbe parfaitement, sans réflexion, toute la lumière incidente. Les astronomes appellent un tel objet corps noir.

La plupart des corps étudiés en astronomie sont considérés en première approximation comme des corps noirs. Ils émettent de la lumière autour d'une longueur d'onde privilégiée. Le spectre d'émission d'un corps noir est en forme de cloche. La longueur d'onde privilégiée L (en m) émise par un corps noir est liée à la température par la loi de Wien, 1893 :

$$L = 2,898 \times 10^{-3} / T \text{ (Avec L en mètres, et T en kelvin)}$$

Plus la température du corps noir est élevée, plus la longueur d'onde du pic d'émissivité est faible. En considérant les étoiles comme des corps noirs presque parfaits, on peut calculer leur température de surface à partir du spectre d'émission.

Pour le Soleil, le pic d'émissivité se situe à une longueur d'onde correspondant à 0,5 microns. D'après la loi de Wien, on en déduit une température de surface de 5800°K.

De la même manière, la température de surface de la Terre étant de 288°K, on en déduit que l'essentiel du rayonnement tellurique se fait dans l'infrarouge (avec un maximum d'émission vers 10 micromètres).

Les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique induisent des variations de la température: l'effet de serre.

Le [spectre du rayonnement solaire](#) incident visible mesuré à la surface de la terre est quasiment identique à celui mesuré au sommet de l'atmosphère, on en déduit que les gaz atmosphériques absorbent très peu les longueurs d'ondes visibles: l'atmosphère est transparente (elle transmet) les longueurs d'ondes visibles. Ce rayonnement incident visible traverse l'atmosphère et atteint la surface de la terre qui l'absorbe et s'échauffe. La surface ré émet alors un rayonnement dans le domaine de l'IR.

La majeure partie de l'énergie rayonnée par le Soleil se situe dans des longueurs d'ondes auxquelles l'atmosphère est transparente (c'est-à-dire entre 0,2 et 0,5 micromètres).

Le [spectre du rayonnement IR](#) mesuré au sommet de l'atmosphère est beaucoup plus faible que celui mesuré à la surface de la terre; on en déduit que l'atmosphère absorbe une grande partie du rayonnement IR.

Certains gaz atmosphériques sont particulièrement impliqués de cette absorption dans l'IR:

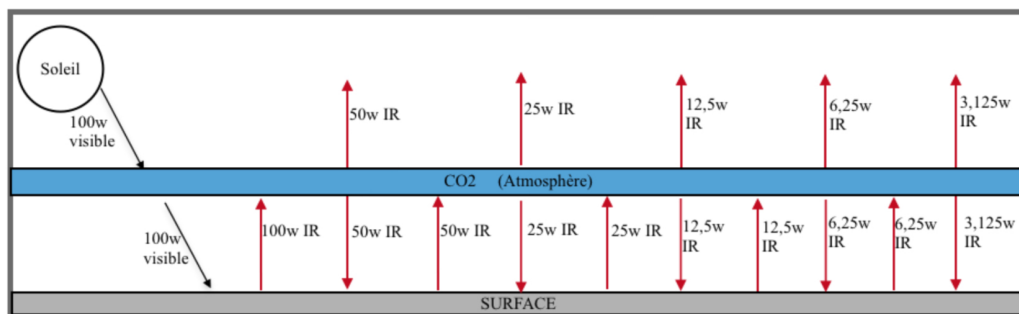
l'H₂O gazeux qui absorbe près de 100% du rayonnement IR

le CO₂ qui absorbe près de 100% du rayonnement IR entre 10 et 20 micromètres

mais aussi le CH₄, le N₂O, et l'O₃.... On qualifie ces gaz de gaz à effet de serre (GES).

Une planète rayonne principalement dans les longueurs d'onde de l'infrarouge, entre 4 et 12 micromètres. Ces longueurs d'onde sont fortement absorbées par les gaz à effet de serre de l'atmosphère.

Comme évoqué précédemment, lorsqu'une molécule de gaz absorbe un photon infrarouge, elle le ré-émet rapidement. Cette ré-émission se fait dans une direction aléatoire. Ainsi, environ la moitié du rayonnement infrarouge émis par la surface de la planète repart dans l'espace (la part ré-émise par l'atmosphère vers le haut), tandis que l'autre moitié retourne à la surface (la part ré-émise par l'atmosphère vers le bas).

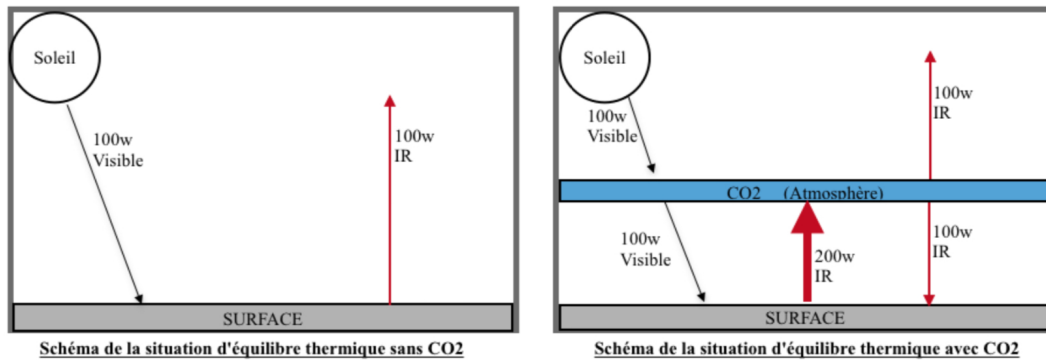


Lorsque le soleil émet 100w dans le visible, les 100w traversent l'atmosphère (qui transmet les longueurs d'ondes visibles) et atteignent la surface de la terre. Celle-ci, étant assimilée à un corps noir, absorbe les 100w, s'échauffe et ré-émet vers l'atmosphère 100w à une longueur d'onde plus grande dans l'infrarouge afin de maintenir son équilibre thermique.

Lorsqu'une molécule de CO₂ (ou d'un autre GES) absorbe un rayonnement IR, elle s'échauffe à son tour et ré émet dans l'IR (loi de Wien). Cette ré émission se faisant dans une direction aléatoire, statistiquement 50% du rayonnement est ré émis vers l'espace, les 50% qui restent étant ré émis vers la surface où ils participent alors à l'échauffement de la surface...

Lorsque la surface absorbe un flux incident de 100w visibles elle absorbe alors en plus 50 + 25 + 12,5 + 6,25 + 3,125 + de flux IR ré émis par l'atmosphère vers la surface.

Le flux total absorbé obéit à une [série géométrique](#) de raison $q = 1/2$. La somme des termes de cette suite est $S = V_0 \cdot [(1 - q^{n+1}) / (1 - q)]$. Le flux total absorbé tend donc vers 200 w lorsque le flux initial absorbé V_0 (flux incident visible) est de 100 w



Dans ce modèle (terre assimilée à un corps noir), en présence de CO₂, la surface absorbe et ré émet deux fois plus d'énergie qu'en l'absence de CO₂ ce qui provoque un décalage de l'équilibre thermique: la température d'équilibre est plus élevée en présence de CO₂ qu'en l'absence de CO₂.

Les variations de températures induisent des variations de la teneur en CO₂ atmosphérique: Les mécanismes de dégazage / dissolution du CO₂.

La solubilité du CO₂ dépend de la température:

- Une augmentation de température induit le dégazage CO₂ et donc une augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique.
- Une diminution de la température induit la dissolution du CO₂ et donc une diminution de la concentration en CO₂ atmosphérique.

Le CO₂ amplifie les variations climatiques selon un mécanisme de rétroaction positive:

Lors d'une période de [réchauffement](#) climatique, la baisse de solubilité du CO₂ dans l'eau, entraîne une augmentation de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère (dégazage) et donc une accentuation de l'élévation de température moyenne de l'atmosphère par effet de serre. Le réchauffement climatique est amplifié.

Lors d'une période de [refroidissement](#), l'augmentation de la solubilité du CO₂ dans l'eau, entraîne une diminution de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère (dissolution) et donc une diminution de l'effet de serre. Le refroidissement climatique est amplifié.