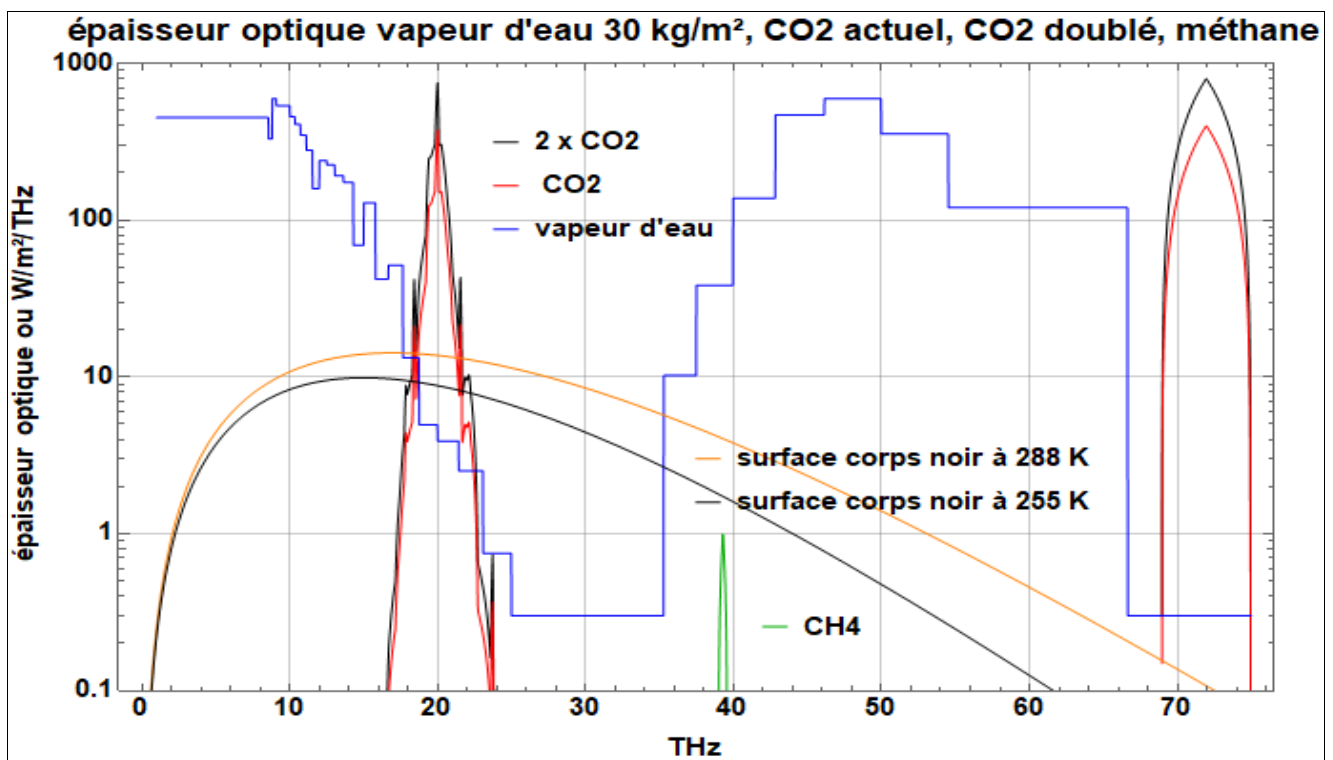




La Physique du Climat

*Oubliez l' "Effet de Serre"
et revenez aux fondamentaux*



Cet ebook a été publié sur www.bookelis.com

© Jacques-Marie Moranne, 2019-2024

L'auteur autorise la reproduction de parties de cet ouvrage, sous réserves d'en indiquer clairement la provenance.

Sommaire

Préface de François Gervais.....	5
Résumé	7
1. Présentation	8
1.1. Pourquoi cet ouvrage ?	8
1.2. Démarche	10
1.3. L'auteur	10
2. Introduction et généralités.....	11
2.1. Equilibre radiatif et climat	11
2.2. Simplifications.....	11
3. Rappels sur le rayonnement électromagnétique	13
3.1. Lois physiques du rayonnement thermique.....	13
3.2. Emissivité, absorptivité	15
3.3. Echanges d'énergie (chaleur) par rayonnement dans le vide	16
3.4. Echanges de chaleur par rayonnement dans un milieu	17
3.4.1. Transparence, Absorption, Opacité	17
3.4.2. Réflexion	18
3.4.3. Diffusion, rétrodiffusion	18
3.5. Rayonnement dans les gaz (et dans l'air)	18
3.6. Mesure de l'opacité : l'Epaisseur optique	19
3.7. Approche corpusculaire.....	20
4. L'atmosphère terrestre	21
4.1. Généralités	21
4.2. Pression atmosphérique et relation avec l'altitude	21
4.3. Structure en couches.....	21
4.4. Courants atmosphériques et courants océaniques	22
4.5. Composition.....	23
4.6. Comportement du rayonnement à l'intérieur de l'atmosphère	24
4.7. Les nuages	25
5. Suivi des rayonnements à partir du Soleil.....	26
5.1. Point de départ : le rayonnement issu du Soleil	26
5.2. Déduction de la part rétrodiffusée par la Terre : l'Albédo.....	27
5.3. En déduire une température moyenne de la Terre ?	28
6. Suite du parcours : traversée de l'atmosphère	30
6.1. Obstacle n°1 : l'oxygène et l'ozone stratosphériques.....	30
6.2. Dans la troposphère : absorption par les nuages, la vapeur d'eau, et le gaz carbonique de l'air.....	30
6.3. Solde parvenant à la surface de la Terre	31
6.4. Il en manque	32
6.5. Revenons donc quand même sur le mythique "Effet de Serre atmosphérique"	32
7. Le Gradient Thermique Gravitationnel (Lapse Rate en anglais)	35
7.1. La théorie physique (en air sec)	35
7.2. En pratique, en atmosphère humide (cas général sur Terre)	35
7.3. Nota : le cas de Venus	37
7.4. Incidences du Gradient Thermique Gravitationnel	38
8. Retour sur Terre : restitution de l'énergie radiative solaire reçue	39
8.1. Au niveau de la surface : 161 W/m ² (en moyenne journalière).....	39
8.1.1. Généralités.....	39
8.1.2. Transferts de chaleur par rayonnement direct à partir du sol : la "fenêtre atmosphérique"	40
8.1.3. Transferts de chaleur par évaporation et précipitations	43
8.1.4. Transferts de chaleur par Convection.....	44
8.1.5. Bilan global et régulation à la surface terrestre	45
8.1.6. Nota :	45
8.2. En haut de l'atmosphère : 240 W/m ²	45
8.2.1. Altitudes de libération.....	45
8.2.2. Traduction en réchauffement/refroidissement	46
8.2.3. Quantification : le spectre OLR (Outgoing Longwave Radiation)	47
8.2.4. Régulation en haut de l'atmosphère	49
8.3. Bilan global	49
9. Et le CO ₂ dans tout ça ?.....	50
10. La sensibilité climatique au CO ₂	51
10.1. Généralités	51
10.2. Le CO ₂ tout seul	51
10.2.1. Impact sur le rayonnement solaire.....	52

10.2.2. Impact sur le rayonnement infra-rouge thermique renvoyé "en haut du CO ₂ "	53
10.2.3. Impact sur le rayonnement infra-rouge "en bas du CO ₂ ", de l'air vers la surface.	53
10.2.4. Impact sur le rayonnement dans la Fenêtre atmosphérique.	55
10.2.5. Au global	56
10.3. Calcul de la sensibilité climatique.....	56
10.3.1. Evacuer 1 W/m ² à la surface du sol.....	56
10.3.2. Evacuer 3,1 W/m ² en haut de l'atmosphère	57
10.4. Valeur plafonnée de la sensibilité climatique	57
10.5. Résumé	57
10.6. Conclusion	58
11. La physique du climat revisitée	59
11.1. Les températures s'élèvent plus vite au niveau du sol qu'en altitude	59
11.2. L'OLR a augmenté de façon sensible : 4 W/m ² depuis 1980.....	60
11.3. L'insolation au niveau du sol augmente depuis les années 1980 : 7 W/m ²	60
11.4. La couverture nuageuse décroît.....	61
11.5. Conclusion	61
12. Les cycles climatiques	62
12.1. Les cycles de Milankovitch	62
12.2. Les cycles solaires	64
12.2.1. La théorie de Svensmark	64
12.2.2. La théorie de G.A. Zherebtsov.....	65
12.3. Les oscillations océaniques (ou autres) (ex. : cycle de 60 ans).....	65
12.4. Conclusions sur les cycles	65
13. Le climat est chaotique	67
14. Conclusions.....	68
Relecteurs	69

Préface de François Gervais

À la base de ce qu'il est convenu d'appeler l'effet de serre atmosphérique, sont incontournables l'absorption et l'émission d'un rayonnement thermique par les vibrations d'une molécule gazeuse. Dans le cadre d'une description quantique, on parlera de l'absorption et de l'émission d'un photon. Ces phénomènes relèvent de la Physique. Les molécules de l'air comportant au moins deux atomes différents, par exemple oxygène et hydrogène dans le cas de la molécule de vapeur d'eau, carbone et oxygène dans le cas de la molécule de dioxyde de carbone CO₂, carbone et hydrogène dans le cas du méthane, sont ainsi le siège de vibrations atomiques capables d'absorber et d'émettre un rayonnement thermique. Ces vibrations s'observent dans la gamme infrarouge du spectre électromagnétique. Cet ouvrage décrit en détail ces mécanismes, essentiels pour comprendre la physique de l'atmosphère et ses implications dans le climat. A l'inverse et fort étrangement, on ne trouve pas trace de spectre infrarouge de l'atmosphère dans les quelque 1500 pages du dernier rapport AR5 du GIEC... De ce point de vue, cet ouvrage pallie une grave lacune.

*La climatologie devrait-elle rester réservée aux climatologues comme l'insinuent certains media qui ont trop souvent tendance à la monter en épingle dans le cadre d'un débat non plus scientifique mais largement politisé ? Le mot-clé « climatologie » est l'un des 55 qui définissent le champ d'application des enseignements et des recherches dans le cadre de la section 23 « Géographie physique, humaine, économique et régionale » du Conseil National des Universités. Autant les universités savent définir pour éventuellement le recruter les compétences d'un mathématicien, d'un physicien, d'un chimiste, d'un biologiste, d'un géographe, autant la climatologie apparaît-elle ainsi à sa vraie place, une sous-discipline de la Géographie parmi 54 autres. Combien d'auteurs des rapports du GIEC, le Groupe d'Experts (traduction un peu pompeuse du titre anglais « Panel ») Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, justifient-ils d'une thèse en climatologie ? En tous cas, ni son Président actuel, ni le précédent. Les auteurs du GIEC ont généralement fait leur thèse dans d'autres disciplines et ont pris en marche le train du climat, devenu très politisé, promesse de crédits, de budgets, de contrats, de voyages, d'honneurs et de promotions. Arrhenius, lauréat du Prix Nobel de **Chimie** en 1903, à qui l'on attribue généralement la paternité de l'effet de serre atmosphérique, était-il « climatologue » ?*

On reconnaît la griffe de Camille Veyres dans certaines portions de ce texte et certaines figures. J'ai rencontré Camille en 2014 pour réaliser que, sans se concerter, l'un comme l'autre avions développé une recherche parallèle aux conclusions assez similaires. Cette rencontre dans un café près du Palais Brongniart à l'invitation du Groupement HEC Alumni Géostratégies préludera à la formation du groupe des « Grogniarts du CO₂ », aujourd'hui considérablement élargi et devenu l'Association des climato-réalistes. J'ai pour ma part publié ces conclusions dans l'International Journal of Modern Physics puis dans Earth Science Reviews.

Cet ouvrage, plus détaillé et plus pédagogique que le caractère parfois un peu abscons d'articles scientifiques en anglais, est ainsi le bienvenu. Il devrait intéresser ceux qui savent lire une courbe, un graphique, une équation, donc encore beaucoup de monde, et fort heureusement. Espérons en ce sens qu'il contribuera à combattre une désaffection grandissante et dommageable pour la Culture scientifique.

L'éclosion du printemps est un ravissement. Dans notre hémisphère, durant les saisons printanière et estivale, il s'accompagne d'une chute de quelque 55 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère, nourrissant une végétation en pleine croissance. C'est l'oscillation saisonnière de Keeling, mesurée précisément par spectrométrie infrarouge. L'amplitude de cette chute s'accroît plus vite à La Jolla en Californie que le taux de CO₂ dans l'air, témoignant d'une végétation encore sous-alimentée. Aussi indispensable à la végétation qu'irremplaçable, le CO₂ est tout le contraire d'un polluant, c'est un fertilisant.

Ignorant ou occultant ce bénéfique, les marchands de peur vivent au dépend des anxieux qui les écoutent. Un matraquage médiatique devenu proprement insupportable amplifie cette inquiétude insidieusement entretenue. Comment résister à une telle propagande ? Comment se prémunir contre une peur devenue instrument de pouvoir ? Un excellent remède est de s'informer sur la Physique du climat grâce à cet ouvrage.

Son tour de force est de toujours rester accessible sans pour autant tomber dans le travers d'une vulgarisation exagérément simplifiée, au point qu'elle pourrait en devenir trompeuse. On ne peut qu'encourager le lecteur à la petite gymnastique intellectuelle consistant à se plonger dans cette présentation, puis, si comme nous l'espérons il en a tiré le bénéfice souhaité, à la faire connaître et à la diffuser.

François Gervais

Professeur émérite à l'Université de Tours

Ancien Directeur de Recherche CNRS au Centre de Recherche sur la Physique des Hautes Températures, Orléans

Ancien Directeur de l'UMR CNRS 6157

Expert Reviewer du rapport AR5 du GIEC

28 mars 2019

Résumé

Une fois déduit l'albédo, la Terre reçoit du soleil un rayonnement très insuffisant (en application de la Loi de Stefan Boltzmann) pour justifier sa température moyenne de 15°C : la Lune, à la même distance du soleil que la Terre, a une température moyenne de l'ordre de - 80°C ; et la surface du sol, là où se joue finalement notre climat, n'en reçoit elle-même ensuite que les 2/3, l'atmosphère prélevant sa part au passage.

Dans l'autre sens, pour maintenir son équilibre énergétique et thermique, la Terre doit restituer au cosmos l'énergie qu'elle reçoit en permanence du Soleil ; et elle ne peut échanger avec le cosmos que par rayonnement.

Du fait de sa température, la surface du sol terrestre rayonne dans une gamme d'ondes (les infra-rouges dits "lointains" ou "thermiques") où l'air, jusqu'à plusieurs milliers de mètres d'altitude, est totalement opacifié par les bandes d'absorption du CO₂ et surtout de la vapeur d'eau, à l'exception d'une étroite bande de fréquences qu'on appelle « Fenêtre atmosphérique ».

Cette opacité empêche la surface de la Terre de restituer par rayonnement toute l'énergie qu'elle reçoit, et il se crée donc un **déséquilibre radiatif** : la surface de la Terre reçoit plus qu'elle ne peut renvoyer, et donc s'échauffe.

Depuis la surface, l'évacuation de cette chaleur emprunte alors plusieurs voies :

- la "Fenêtre Atmosphérique" permet d'en évacuer une petite partie par rayonnement direct depuis la surface du sol et des océans au cosmos.
- mais l'essentiel est emporté par l'évaporation des océans et l'évapo-transpiration des plantes et des sols, qui, comme au moyen d'un caloduc qui by-passerait la couche opaque, transfère, par convection, une énergie considérable (chaleur latente de vaporisation/condensation) de la surface du sol au sommet des nuages où elle est récupérée par condensation, et s'évacue alors par rayonnement (la vapeur d'eau, raréfiée, n'y faisant plus obstacle). Plus il fait chaud, plus ce caloduc débite : **c'est le principal régulateur du climat.**
- une partie importante de l'air chaud terrestre est également remontée par la convection naturelle, jusqu'au dessus des nuages, où elle peut également rayonner..
- le solde du rayonnement, dans la bande d'absorption du CO₂, n'est libéré pour l'essentiel que dans la stratosphère, où le CO₂ est suffisamment raréfié pour ne plus y faire obstacle : du fait de l'étroitesse de cette bande, et de l'altitude (et donc de la température) où il se déploie, sa part est très faible.

La température de la surface du sol se stabilise lorsqu'elle est suffisante pour que l'évaporation (évacuation de chaleur latente) et la convection (évacuation de chaleur sensible) compensent son déséquilibre radiatif : cette température « moyenne » se situant alors aux environs de 15°C.

Ceci démontre au passage le rôle régulateur (et non pas amplificateur) de l'évaporation (et donc de la vapeur d'eau), sans lequel le réchauffement, du fait du déséquilibre radiatif, serait insupportable.

Les facteurs d'équilibre avec les océans et la végétation rendent peu probable ou lointain un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ ; mais si un tel doublement devait néanmoins intervenir, il aurait un impact mineur sur la bande d'absorption du CO₂, déjà saturée et très étroite, et sur l'élévation de température qu'il pourrait causer ; et cet impact serait largement contrebalancé par une augmentation de débit du caloduc de la vapeur d'eau : au total, l'élévation de température ne pourrait pas dépasser 0,65°C.

Il faut donc chercher ailleurs les causes du réchauffement climatique actuel, d'autant que les dernières observations semblent plutôt incriminer l'insolation, via, sans doute, une diminution de l'albédo, dont on ne connaît pas les raisons de façon sûre.

Par ailleurs, le climat suit des cycles, qui sont eux-mêmes assez mal connus, mais dont l'amplitude peut être plus importante que l'augmentation que nous subissons.

Enfin, il ne faut pas oublier que le climat est chaotique, et que faire des simulations précises du climat à tel endroit dans 50 ans ou plus relève du doigt mouillé.

1. Présentation

1.1. Pourquoi cet ouvrage ?

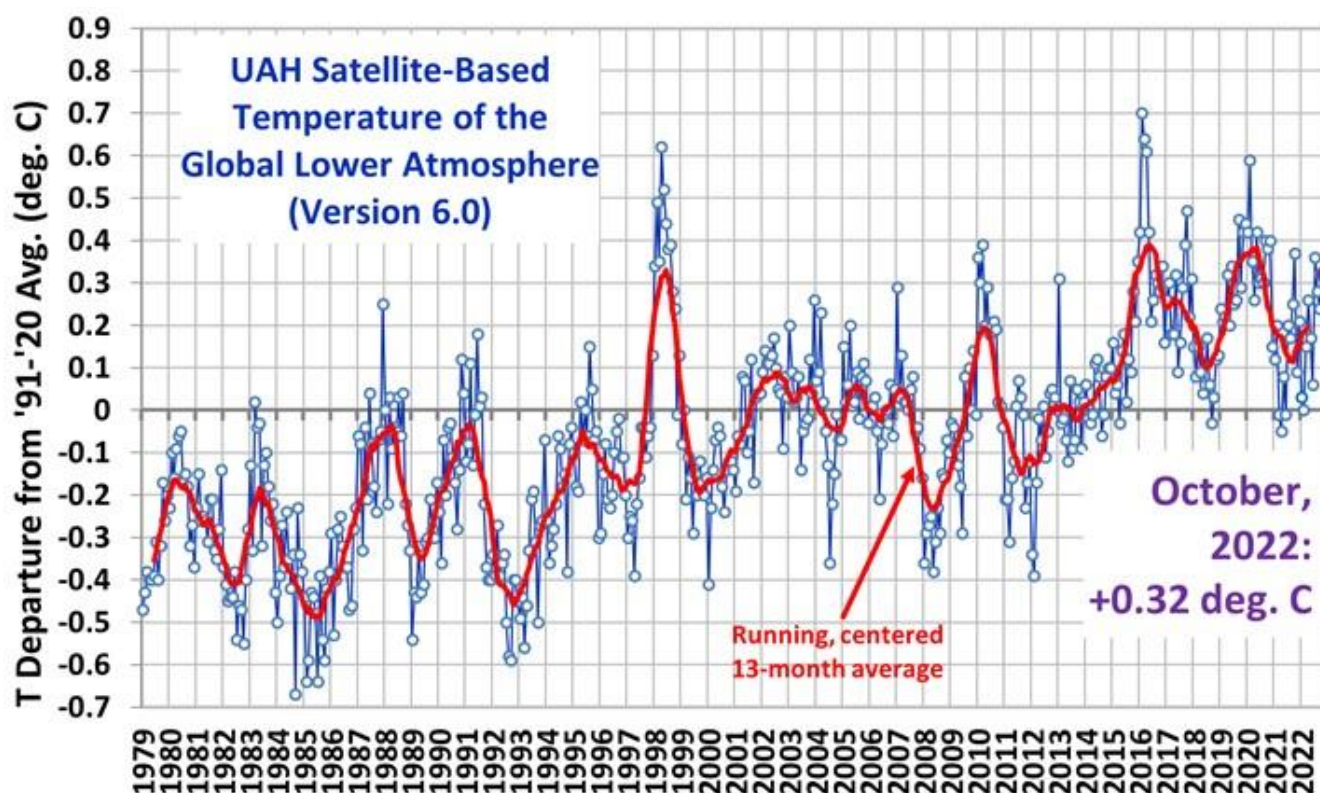
Lorsque le suédois Svante Arrhenius (prix Nobel de chimie 1903) théorisa l'Effet de Serre Atmosphérique, dans un article intitulé « *De l'influence de l'acide carbonique dans l'air sur la température au sol* », publié en 1896, on croyait encore que les ondes électro-magnétiques se propageaient dans un "Ether solide".

Il faut noter qu'Arrhenius, lui, n'y voyait que des effets positifs, les périodes chaudes ayant toujours été des périodes prospères, et le CO₂ ne pouvant qu'être bénéfique à l'agriculture (alors que nous n'y voyons, nous, que des effets négatifs, au point de considérer le CO₂ comme un "polluant" : les temps changent).

A l'époque, il estime qu'un doublement du taux de CO₂ causerait un réchauffement d'environ 5 °C (soit un peu plus que les prévisions de 2 à 4,5 °C faites par le GIEC plus de cent ans plus tard, en 2007, sur la base de cette même théorie). Mais les spectres d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone employés par Arrhenius étaient, aux longueurs d'onde de l'infrarouge thermique extrêmement erronés ; avec les spectres corrects connus depuis les années 1920 les calculs d'Arrhenius donnent +0,2°C (plus deux dixièmes de degré Celsius) pour un doublement des teneurs de l'air en dioxyde de carbone.

Paradoxalement, un siècle plus tard, on ne croit, bien entendu, plus à l' "Ether solide", mais on n'a jamais remis en question les fondements de cette théorie de l'Effet de Serre atmosphérique, qui est à la base de l'explication actuelle du réchauffement climatique d'origine humaine.

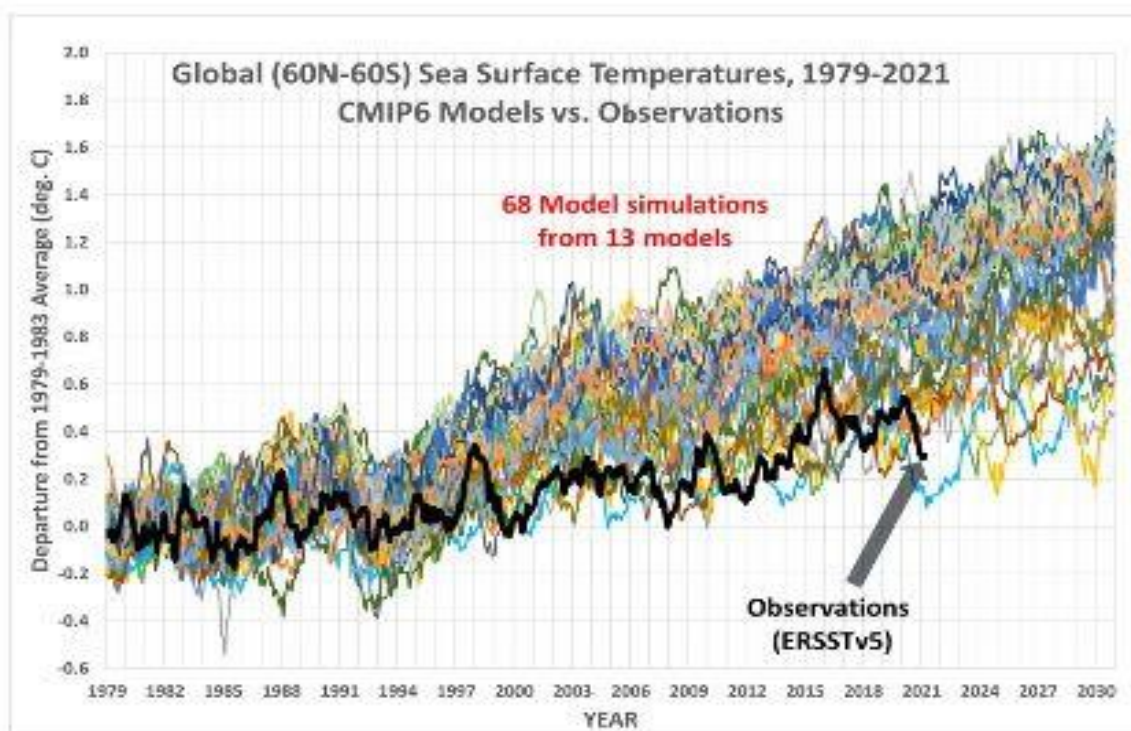
Bien sûr, personne ne peut nier que la température se soit élevée au cours des 50 dernières années (auparavant, dans les années 70, on croyait plutôt à un refroidissement, voire une nouvelle glaciation) :



Moyenne sur tout le globe de moyennes mensuelles de températures mesurées de la basse troposphère entre la surface et 2 km depuis 1978 par des appareils observant le rayonnement infrarouge des molécules d'oxygène, appareils embarqués sur divers satellites ; cette moyenne est exprimée en écart, mois par mois, de la température moyenne du mois par rapport à la moyenne du même mois calculée sur 1980-2022.

Source : <http://www.drroyspencer.com/>

... Néanmoins, pas aussi vite que les modèles informatiques de calcul du climat le laissent prévoir :



(Source ERSST V5 : <https://www.ncei.noaa.gov/products/extended-reconstructed-sst>)

Lorsque la réalité s'écarte significativement des modèles, deux attitudes sont possibles :

- considérer que, la science étant "établie", l'écart est transitoire (voire faux), et que la réalité rattrapera les modèles (autrement dit, accorder plus de foi aux modèles qu'à la réalité) : c'est l'attitude politico-médiatique et quasi-religieuse de certains pays comme la France ;
- considérer, comme le ferait n'importe quel scientifique, que cet écart nécessite à tout le moins une explication, et donc une remise en cause possible des modèles, voire de la physique qui les sous-tend, d'autant que le climat a montré dans le passé qu'il était soumis à des variations significatives (Optimum Médiéval autour de l'an 1000, petit âge glaciaire 1300 à 1850).

En fait, personne ne sait exactement comment sont faits les programmes informatiques de modélisation du climat : certains prétendent que ce sont des extrapolations des programmes de modélisation de la météo, mais ces derniers, conçus pour prévoir le temps localement sur des durées de quelques jours, ne sont pas qualifiés pour intégrer des variations annuelles de concentration du CO₂, considéré comme l'acteur principal du réchauffement climatique, ni des cycles climatiques, également pluri-annuels, ni les îlots de chaleur urbains qui se constituent en plusieurs dizaines d'années.

Et donc, il nous est apparu important de remettre les choses à plat : notre but est d'expliquer le fonctionnement du Climat (et non pas de la météo), en nous appuyant sur le bon sens, et en repartant des Lois physiques et chimiques de base de la **Thermodynamique**, qu'on apprend dès le lycée et qui reposent sur des théories validées par l'expérience, et auxquelles la climatologie ne saurait déroger.

Par ailleurs, même si nous y consacrons un paragraphe, nous éviterons délibérément de parler d'"*Effet de Serre*", de "*rétroaction*", de "*forçage*", termes qui s'apparentent plus à des slogans, et qui peuvent laisser présupposer l'existence d'une théorie climatique particulière qui permettrait de faire abstraction de la physique fondamentale : s'il existe un "*Effet de Serre*", il s'appuie nécessairement sur des fondements physiques, sans qu'on ait besoin de le nommer ; par ailleurs, une serre conventionnelle fonctionne essentiellement par blocage de la convection, ce qui va à l'encontre du fonctionnement de l'atmosphère : l'analogie est très mal venue.

De même, nous éviterons de parler de "*gaz à effet de serre*", pour qualifier les gaz qui ont la propriété d'absorber tout ou partie des Infra-rouges thermiques émis par des corps aux températures terrestres : ces gaz agissent en effet de façon fort différente les uns des autres, et les classer dans une même catégorie n'a pas beaucoup de sens.

Enfin, on y verra que les lois physiques remettent en question un certain nombre d'idées reçues, et même bien ancrées, ... ce qui n'a rien d'étonnant : la Climatologie est à l'origine une activité purement descriptive, qui relève essentiellement des Sciences naturelles et de la Géographie, et non pas de la Physique.

1.2. Démarche

Le présent ouvrage est destiné à un public aussi large que possible : il nécessite des connaissances de base de thermodynamique, mais c'est un ouvrage de vulgarisation qui devrait intéresser ceux qui sont intéressés par les mécanismes, qui y trouveront des explications exprimées en langage que nous avons souhaité simple et compréhensible.

1.3. L'auteur

Le présent ouvrage est le résultat d'un travail d'équipe ; la rédaction en a été effectuée par Jacques-Marie Moranne.

Jacques-Marie Moranne est ingénieur de l'Ecole Centrale de Lille (1969).

Il a pratiqué la plupart des métiers d'ingénieur, depuis l'engineering (génie chimique), jusqu'à la création et la direction d'une société d'informatique, en passant par la maintenance, l'organisation et les méthodes, la CAO, les Bases de Données associées, aussi bien dans des grandes sociétés (Air Liquide, Elf, Areva, Saint-Gobain), que des petites.

Jacques-Marie Moranne était au départ, et jusqu'à la COP de Copenhage, climato-alarmiste, mais les contradictions, à la fois factuelles, et physiques, ont éveillé son esprit critique, et l'ont progressivement amené à douter, puis à creuser la physique sous-jacente, avec l'aide de spécialistes indéniables, à l'instar de **Camille Veyres**, qui a fourni l'essentiel de la matière de cet ouvrage, et qui est l'auteur des annexes techniques auquel il est adossé.

Jacques-Marie Moranne est membre de l'Association des Climato-Réalistes, et de l'Association Climat et Vérité (<https://climatetverite.net>).

Jacques-Marie Moranne ne se prétend pas climatologue, mais la Physique du Climat, c'est avant tout de la Thermodynamique appliquée ; et la formation d'ingénieur en fournit toutes les bases nécessaires.

2. Introduction et généralités

2.1. Equilibre radiatif et climat

La Terre, avec son atmosphère, se trouve dans le vide interstellaire ; elle ne peut échanger d'énergie (ou de chaleur) qu'avec le cosmos, et donc que par rayonnement, car il n'y a pas d'autre mode d'échange possible dans le vide.

Et par ailleurs, pour maintenir son équilibre thermique, la Terre rayonne vers l'espace (en moyenne sur l'année, car les sols et les océans stockent de la chaleur de jour ou en été et la restituent la nuit et en hiver) une énergie nécessairement égale à celle qu'elle reçoit du Soleil, sinon elle se réchaufferait sans limite.

Mais ce qui se passe aux frontières supérieures de l'atmosphère ne nous intéresse que de façon très indirecte : pour ce qui nous concerne, le climat se joue dans la "troposphère" (en moyenne entre 0 et une douzaine de km d'altitude, à plus de 0,2 bar de pression atmosphérique), et surtout à la surface de la Terre, où ce rayonnement contribue au fonctionnement thermodynamique de l'atmosphère et des océans, avant d'être renvoyé dans l'espace.

La transformation du rayonnement solaire en énergie, les échanges thermodynamiques à l'intérieur de l'atmosphère et avec les océans, et la re-transformation de cette énergie en rayonnement, fondent la science climatologique, qui relève donc directement, et exclusivement, de Lois Physiques.

En effet, même si le rayonnement tient une place importante (tous les corps rayonnent), et peut servir de fil directeur dans la compréhension du climat (au point que nous lui consacrerons un chapitre entier), d'autres lois physico-chimiques sont mises en jeu dans les échanges thermiques qui impactent la température :

- mélange : convection (circulation verticale) et advection (circulation horizontale) de l'air,
- changement d'état physique (évaporation-condensation, fusion-congélation),
- changement d'état chimique : réactions exo- ou endo-thermiques,
- compression-détente.

Chacun de ces phénomènes traduit une relation spécifique chaleur (ou énergie) <> température : ainsi, par exemple, l'évaporation se fait sans changement de température, mais consomme une énergie (chaleur latente) très importante.

Les lois en seront rappelées dans les chapitres où elles interviennent.

2.2. Simplifications

Cet ouvrage se veut être accessible au plus grand nombre. De ce fait, il se permet un certain nombre de simplifications et d'approximations, sans pour autant s'affranchir de la physique sous-jacente :

Sur la Terre :

1. On négligera la chaleur issue du noyau de la Terre (moins de 0,07 à 0,08 W/m²), de la radioactivité naturelle, et des déformations liées aux marées, négligeables par rapport à notre propos, stables et non sujettes à évolution pour raisons "anthropiques" (c'est-à-dire du fait de l'homme) ;
2. On bornera l'atmosphère à une altitude où l'air est suffisamment raréfié pour que la température ne soit plus corrélée à l'agitation moléculaire, et où le rayonnement le traverse et s'en échappe librement, c'est-à-dire en haut de la stratosphère (vers 50 km) ;
3. On considérera également que ce Système est en régime établi, en particulier on fera abstraction de tout phénomène
 - . temporaire, tel qu'une éruption volcanique ou un épisode El Niño, qui vienne le perturber,
 - . ou transitoire (passage d'un état A à un état B) : on comparera dans ce cas les deux états successifs à l'équilibre.

Sur les calculs :

1. Les lois physiques mises en jeu ne sont généralement pas linéaires (par exemple, on verra que la température d'un corps isolé dans l'espace est proportionnelle à la racine quatrième de l'énergie de rayonnement reçue), et beaucoup de calculs sont trop complexes pour avoir leur place dans ce document ; on sera donc amené à

raisonner sur des moyennes, tout en ayant conscience des limites et des dangers de tels raisonnements, mais qui permettent quand même :

- . de donner des ordres de grandeur, qu'on peut considérer comme représentatifs ;
 - . de faire des comparaisons,
 - . de mesurer l'impact de tel ou tel paramètre ("anthropique" ou non), sur le climat vu d'un point de vue global, ce qui, in fine, est notre but.
2. La Terre est sphérique, tourne autour du soleil sur une orbite elliptique (de faible excentricité), et sur elle-même autour d'un axe incliné, et ses constituants de surface (océans, déserts, forêts, ...) sont eux-mêmes de nature et de répartition hétérogène : cela rend certains calculs beaucoup trop complexes pour être réalisés en détails dans ce document ;
 3. Certains phénomènes physiques sont chaotiques (chacun sait qu'il est impossible de prévoir la météo, c'est-à-dire le climat à un endroit donné, au-delà de quelques jours) : on en dira un mot en fin d'ouvrage ;
 4. On sait que certains phénomènes sont cycliques, avec des impacts qui peuvent être très significatifs en termes de températures ex. : les phénomènes El Niño) : on en fera abstraction dans le corps de l'ouvrage, mais on en citera quelques-uns à titre d'exemples ;
 5. Enfin, beaucoup de chiffres donnés ici ne sont pas directement calculables ni mesurables de façon précise, et sont donc contestables (on peut d'ailleurs en trouver des valeurs différentes sur Internet, sur des sites "sérieux") : notre propos ne s'attache pas aux valeurs précises, mais aux raisonnements, aux ordres de grandeur (disons à 5% près), et aux variations en fonctions de critères.

3. Rappels sur le rayonnement électromagnétique

3.1. Lois physiques du rayonnement thermique

Les températures notées T sont exprimées en K (degrés Kelvin), sachant que :

- 0 K est le zéro absolu (rien ne peut être plus froid)
- la température en K est égale à la température en °C + 273,15 (ainsi, 288,15 K = 15°C ; 0 K = -273,15°C)

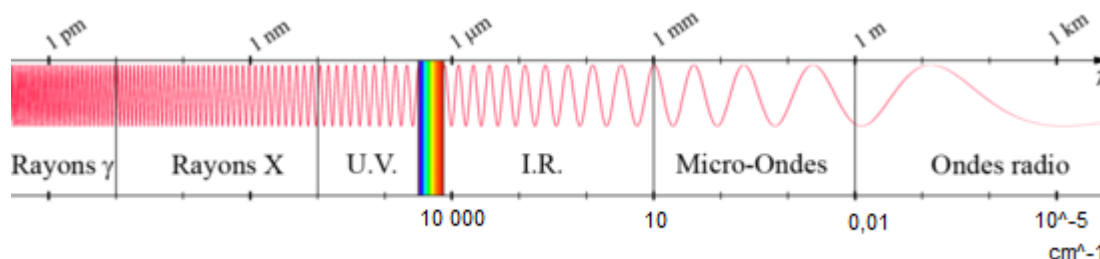
Commençons par le début : la Terre, en limite de l'atmosphère, reçoit toute son énergie par rayonnement (du Soleil), et la restitue au cosmos également en totalité par rayonnement.

Il est donc logique de consacrer un chapitre entier à ce mode d'échange de chaleur (ou d'énergie), sachant qu'il en existe d'autres dont on comprendra l'intérêt un peu plus loin. Ce chapitre ne prétend pas à l'exhaustivité ; il s'agit essentiellement de rappeler les principes de base et les Lois physiques qui intéressent notre sujet.

Le rayonnement est une vibration électromagnétique caractérisée par :

- l'amplitude de ses ondes (ou la puissance qu'elles transportent),
- leur longueur d'onde λ , souvent exprimée en μm ou en nm, qui s'étend des ondes métriques (radio) aux rayons gamma (10^{-7} à 10^{-9} μm), en passant, dans l'ordre par les micro-ondes, les infra-rouges, le visible (qui n'occupe qu'une très étroite bande de longueurs d'ondes : 0,4 à 0,7 μm), les ultra-violets, et les rayons X.

Rayons ultra-violets, X, et gamma sont des rayonnements ionisants : étant plus énergiques, ils ont la capacité de modifier la structure des atomes et des molécules (mutations de notre ADN pour ce qui nous concerne, mais aussi de molécules plus petites telles que les molécules d'ozone : on en parlera un peu plus loin).



(I.R. = infra-rouge ; U.V. = ultra-violet)

Nota : dans le domaine de longueurs d'ondes qui nous concerne, au lieu de longueur d'ondes (une grandeur plutôt utilisée par les opticiens), les spécialistes des rayonnements électromagnétiques raisonnent plutôt en fréquence, exprimée le plus souvent en cm^{-1} (nombre d'ondes par cm) ($\nu_{\text{cm}^{-1}} = 10\,000 / \lambda_{\mu\text{m}}$), mais aussi en GHz (Giga-Hertz), ou THz (Téra-Hertz). L'échelle horizontale est alors inversée.

Longueur d'onde	1 nm	100 nm	1 μm	1 mm	1 m	1 km
Fréquence (Hz)	300 000 THz	3000 THz	300 THz	300 GHz	300 MHz	300 kHz
Fréquence (cm^{-1})	10^7 cm^{-1}	10^5 cm^{-1}	$10\,000 \text{ cm}^{-1}$	10 cm^{-1}	$0,01 \text{ cm}^{-1}$	10^{-5} cm^{-1}
$h\nu$ (eV)	1241	12,4	1,24	0,0124	0,000124	

Raisonner en fréquence présente un intérêt dans le domaine énergétique qui nous intéresse, l'énergie d'un photon étant proportionnelle à sa fréquence de rayonnement :

$$P=h\nu, \text{ avec } h = \text{Constante de Planck} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Joule / Hz, et } \nu \text{ en Hz}$$

Si on faisait une analogie avec le son, les ondes radio correspondraient aux infrasons, et les ultra-violets aux ultrasons, sachant que l'homme n'en perçoit qu'une partie (entre 20 et 20 000 Hz pour le son, environ 400 à 790 THz pour la lumière : les couleurs de l'arc en ciel).

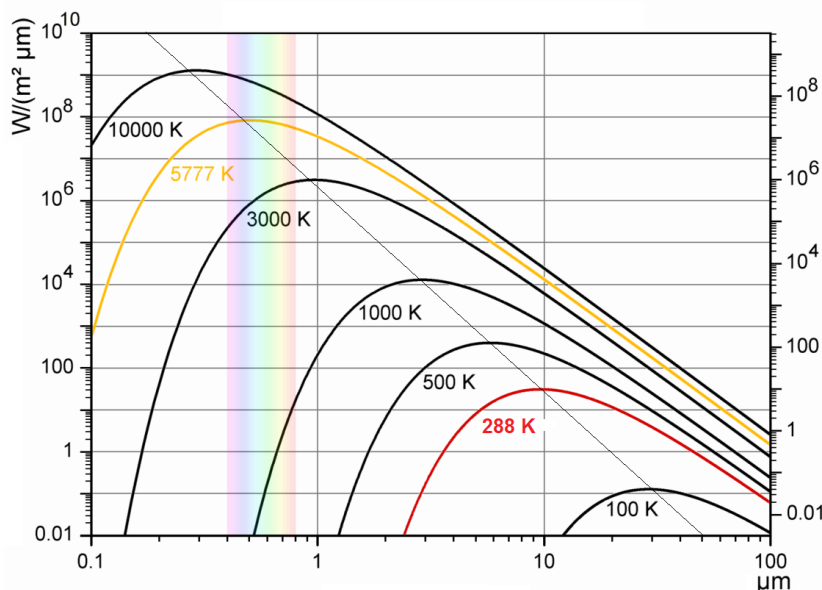
Un rayonnement monochromatique a une seule longueur d'onde (ou une seule "couleur" s'il est dans le Visible). En son, cela correspondrait à une note sinusoïdale pure.

Mais dans la nature, tous les corps rayonnent, en fonction de leur température, selon un **Spectre** qui couvre toute une gamme de longueurs d'ondes. Par exemple :

- un fer chauffé au rouge, vers 750 °C, émet dans le visible rouge, mais également dans l'infra-rouge (non perceptible à l'œil humain).
- un fer chauffé à blanc, vers 1250 °C, émet dans toute une gamme d'ondes comprises entre l'infra-rouge et le violet, et comprenant toute la gamme visible (la couleur blanche résultant du mélange des couleurs de l'arc en ciel).

Dans le vide (c'est-à-dire quand le corps ne peut échanger sa chaleur que par rayonnement), et pour un corps rayonnant parfait (corps "noir"), la distribution en fréquence et en intensité du Spectre **dépend uniquement de sa température** ; elle est donnée par la **Loi de Planck**¹, qui donne, pour chaque longueur d'onde (ou fréquence), la puissance rayonnée par m² de surface et par unité de fréquence ou de longueur d'onde ; elle est traduite par les courbes ci-dessous (où les deux échelles, horizontale et verticale, sont logarithmiques).

Les températures sont exprimées en K (degrés Kelvin) :



Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Planck

Là encore, si on faisait l'analogie avec les sons, cela correspondrait à un corps émettant du bruit (un mélange de sons), d'autant plus fort et d'autant plus aigu que le corps émetteur serait puissant.

Les spectres sont les uns sous les autres et décalés vers de plus grandes longueurs d'ondes en fonction de leur température (décroissante). La **loi de Wien** définit la courbe des maxima de ces spectres (droite dans la figure ci-dessus en échelles logarithmiques).

Par ailleurs, la **Loi de Stefan Boltzmann** définit le flux radiatif (c-à-d la puissance énergétique totale émise par m² de **surface** de la source chaude), pour un "corps noir" idéal, comme étant proportionnel à sa température absolue de peau à la puissance 4 :

$$M = \sigma T^4$$

- M est exprimé en Watts/m² de surface
- T en Kelvin (K) (ajouter 273 à la température en °C),
- σ (sigma) est la constante de Stefan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$. (facile à retenir : suite des chiffres 5,6,7,8)

Dans le graphe, on notera particulièrement :

- le spectre du soleil (5777 K : température de surface du Soleil), dont le maximum est dans le domaine visible (la nature est bien faite !) (on parle de température de surface, sachant que les températures à l'intérieur du Soleil sont beaucoup plus élevées) ;

¹ La loi de Planck pour **une surface** rayonnant vers un demi-espace s'écrit : $(0,04632 f^3) / (e^{(48 f / T)} - 1)$

où f est la fréquence en THz et T la température en Kelvins ; exemple : à f = 20 THz et T = 288 K le rayonnement émis par la surface « corps noir » sur une bande de 1 THz vaut 13,7 W/m²/THz.

- la courbe 288 K, correspondant à un corps à 15°C, soit le rayonnement moyen de la surface terrestre à 15°C : on notera que ce spectre est entièrement inclus sous le spectre du Soleil, mais très décalé du côté infra-rouge (l'échelle logarithmique du graphe écrase ce décalage, mais il est de 1 à 162 000 en intensité : $5777^4/288^4$) : on parlera d'infra-rouge "thermique" ou "lointain", invisible à l'œil nu, par opposition à l'infra-rouge "solaire" globalement très proche du visible.

Le spectre émis par chaque étoile permet ainsi de connaître sa température de surface (ex. : 3000 °C pour Bételgeuse, 11 000 °C pour Sirius).

Par rapport à la Loi de Planck, la Loi de Stefan Boltzmann exprime la surface limitée par la courbe de Planck (intégrale sur la fréquence ou la longueur d'onde).

Cette loi est fondamentale pour notre sujet, puisqu'elle traduit en température l'énergie reçue (ou émise) par rayonnement. Elle est remarquable, car elle fonctionne dans les deux sens :

- une surface "corps noir" (dans le vide) qui reçoit et absorbe une énergie M se stabilise à la température T (il ne s'échauffe donc pas indéfiniment).
- une surface "corps noir" (dans le vide) à la température T émet (rayonne) une énergie égale à M .
- T est une température d'équilibre.

Tous les corps (solides, liquides, ou gazeux) rayonnent à leur température.

A noter également : il faut plus de 5 W/m² de rayonnement pour élever la température de surface d'un corps de 15 à 16°C.

3.2. Emissivité, absorptivité

Dans la réalité, aucun corps n'est un "corps noir" parfait, et la distribution en fréquence et en intensité du Spectre suit une courbe perturbée : voir ci-dessous l'exemple des différentes surfaces terrestres (Source : Daniel Feldman PNAS 2014).

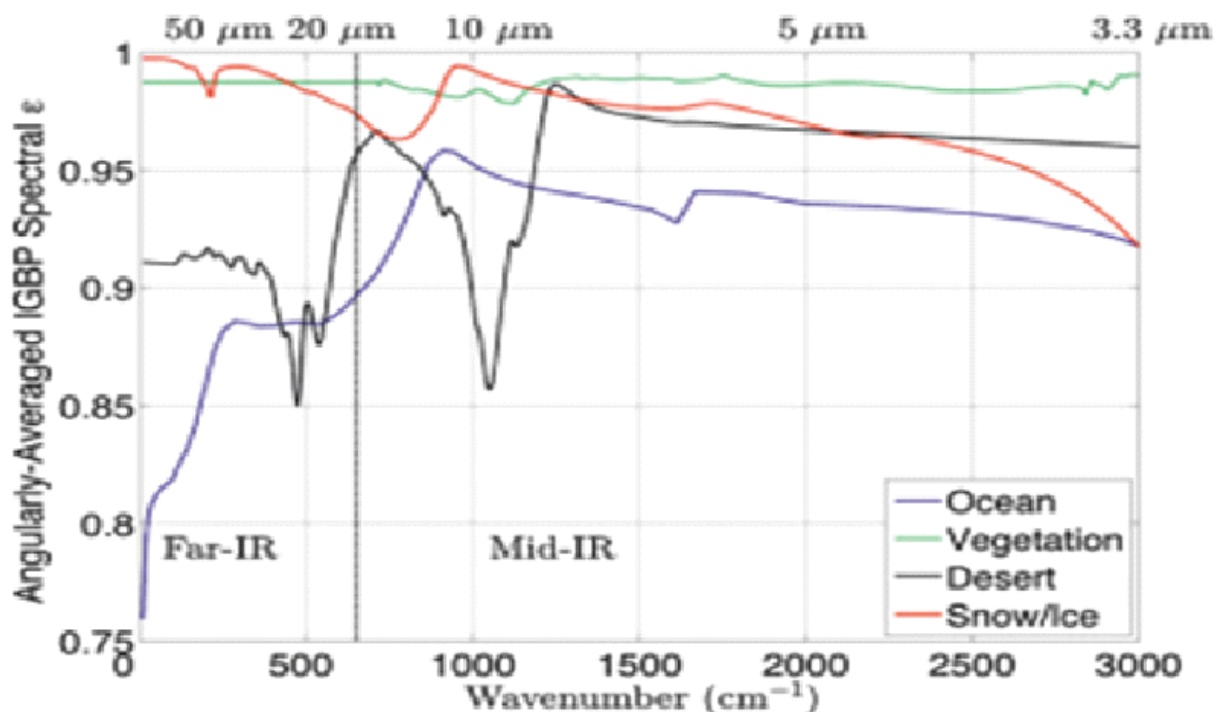


Fig. 3. Angularly averaged, spectrally resolved far-IR surface emissivity for four IGBP land types (ocean, vegetation, desert, and snow) based on 3D radiative transfer calculations and published indices of refraction.

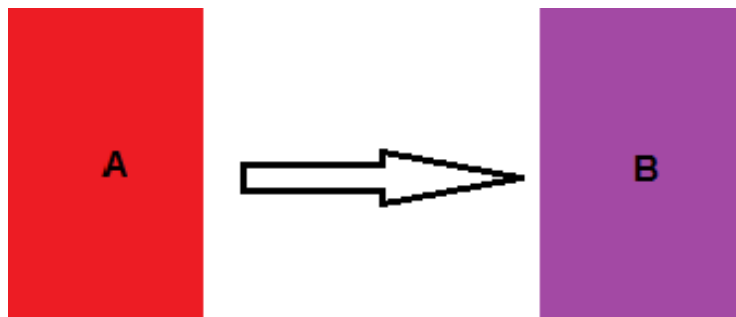
Notre propos n'étant pas de faire un cours spécifique sur le rayonnement, nous ne rentrerons pas dans le détail ici.

Mais, pour simplifier, le flux radiatif est corrigé d'un facteur ϵ (epsilon) (**émissivité**) (compris entre 0 et 1), dépendant à la fois de la nature de la surface de l'émetteur, et de la longueur d'onde (on parle d'**absorptivité** dans l'autre sens pour un corps récepteur, sachant que, pour un même corps, Emissivité = Absorptivité : Loi de Kirchhoff).

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{en supposant } \epsilon \text{ constant sur tout le spectre})$$

Seuls les "corps noirs" ont une émissivité égale à 1 ; on admettra que la Terre a une émissivité de 0,9 environ.

3.3. Echanges d'énergie (chaleur) par rayonnement dans le vide



Lorsque 2 corps sont à des températures différentes, le plus chaud (ici A) rayonne vers le plus froid (ici B) ; mais, bien entendu, B rayonne également, en fonction de sa propre température.

Si A est plus chaud que B, le **transfert de chaleur** se fait uniquement de A vers B et est égal à la différence :

$$M_A - M_B = \epsilon^2 \sigma (T_A^4 - T_B^4) \quad (\text{en supposant la même émissivité pour les deux corps})^2$$

Le transfert de chaleur par voie radiative est, comme entre deux comptes en banque, le bilan net d'un échange : ce que B reçoit effectivement de A moins ce que A reçoit effectivement de B.

En fait, tout se passe comme si A rayonnait, non pas en fonction de sa propre température de surface, mais en fonction de sa différence de T^4 (température à la puissance 4) avec le milieu qui reçoit son rayonnement : 0 K s'il s'agit du cosmos (2,7 K en toute rigueur).

Si A et B sont à la même température, il n'y a aucun transfert de chaleur (donc d'énergie) entre les deux par voie radiative. C'est par exemple le cas entre la surface terrestre et la très basse atmosphère à son contact, qui sont (statistiquement) (presque) à la même température.

Lorsqu'on soumet B au rayonnement de A, si A est plus chaud que B, B absorbe son rayonnement et s'échauffe, mais, du fait de son propre rayonnement lié à sa température, B atteindra lui-même une température d'équilibre, et rayonnera alors selon un spectre qui se situera sous celui de A, et décalé vers des fréquences plus basses (ou des longueurs d'ondes plus longues) que celui de A (selon les lois de Planck et de Wien exposées plus haut).

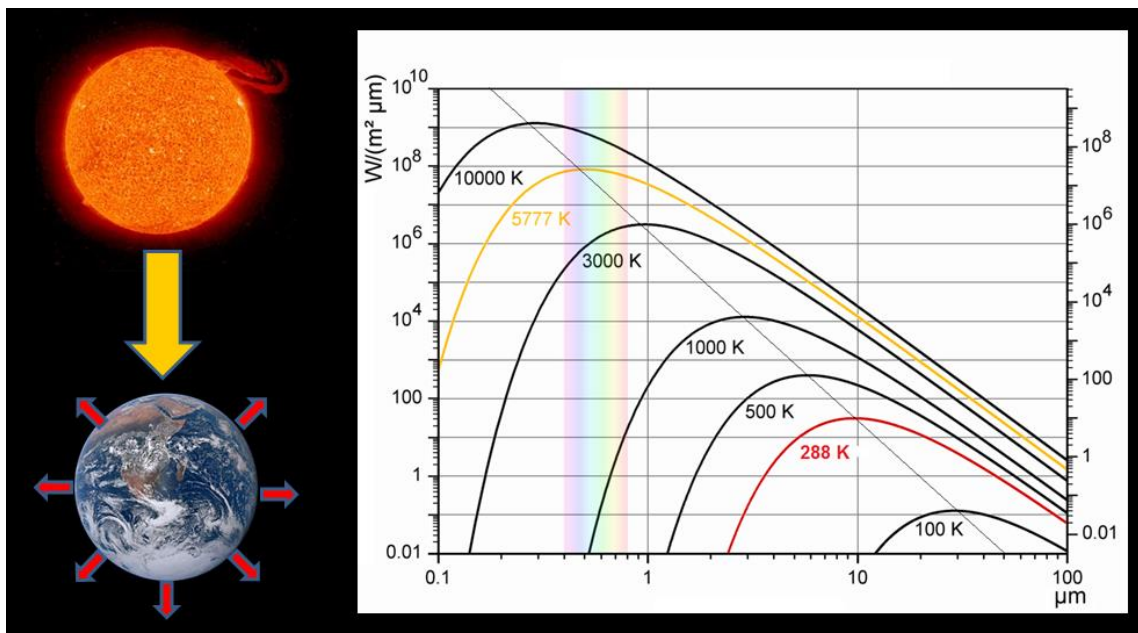
C'est ce qui se passe pour le Soleil et la Terre : typiquement, le rayonnement du Soleil réchauffe la Terre (qui est à température plus basse) par rayonnement.

Mais il faut bien aussi que la Terre évacue l'énergie qu'elle reçoit (sinon, elle s'échaufferait jusqu'à atteindre la température du Soleil) : comme elle est dans le vide, elle ne peut également le faire que par rayonnement vers le cosmos (à 2,7 K), en suivant également les mêmes lois en fonction de sa propre température.

² Plus rigoureusement, si A a une absorptivité de ϵ_A et B une absorptivité de ϵ_B , la puissance totale rayonnée par la surface A vers la surface B est $\epsilon_A \sigma T_A^4$ et B en absorbe ϵ_B soit $\epsilon_B \epsilon_A \sigma T_A^4$ et renvoie le reste $(1 - \epsilon_B) \epsilon_A$ vers A, qui renvoie $(1 - \epsilon_B) \epsilon_A (1 - \epsilon_A)$ dont la fraction ϵ_B sera absorbée et le reste renvoyé ... le transfert net par unité de surface est finalement :

$$\epsilon_{\text{réduit}} 5,67 ((T_A/100)^4 - (T_B/100)^4) \quad \text{avec } 1/\epsilon_{\text{réduit}} = 1/\epsilon_A + 1/\epsilon_B - 1 .$$

Appli. numérique : $\epsilon_A = 0,9 = \epsilon_B$, $T_A = 290$ K, $T_B = 287$ K, $\epsilon_{\text{réduit}} = 1/(2/0,9 - 1) = 0,818$ et $0,818 \times 5,67 \times (2,9^4 - 2,87^4) = 13,4$ W/m²



Ainsi, du fait de sa température plus faible que celle du Soleil, son spectre de réémission se situe sous celui du Soleil, et est décalé vers les infra-rouges "thermiques" (courbe rouge correspondant à 288 K ou 15 °C dans le graphe ci-dessus), par rapport à celui qu'elle reçoit du Soleil.

En fait les choses sont un peu plus compliquées : comme on le verra plus loin, du fait des autres lois physiques mises en jeu, et de l'opacité de certains gaz atmosphériques, le rayonnement de la Terre vers le cosmos est libéré à différentes altitudes, dont les températures (et donc les courbes d'émission) sont généralement encore plus basses et plus décalées.

3.4. Echanges de chaleur par rayonnement dans un milieu

Dans le vide, où le Rayonnement est le seul mode possible d'échange de chaleur, les choses sont simples, mais dès qu'il rencontre un obstacle ou pénètre dans un milieu, le rayonnement est altéré.

3.4.1. Transparence, Absorption, Opacité

Un milieu est dit **transparent** lorsque le rayonnement le traverse de façon totalement libre (sans modification, ni de sa longueur d'onde, ni de son intensité), comme dans le vide.

A l'inverse, un corps dit "noir" **absorbe** la totalité du rayonnement qu'il reçoit. L'absorption se traduit par une **opacité** du milieu.

Mais, dans la nature, aucun corps n'est parfaitement transparent, ni complètement opaque.

En particulier, un même milieu peut être transparent à certaines longueurs d'ondes, et opaque à d'autres :

- c'est le cas, par exemple du verre usuel, transparent dans le domaine visible, mais opaque dans le domaine de l'infra-rouge thermique (IR) ;
- c'est également, comme on le verra plus loin, le cas du CO₂ (dioxyde de carbone), qui a une bande d'absorption entre 17,5 et 23 THz (584 à 767 cm⁻¹), où il est opaque, et de la vapeur d'eau, qui, elle, est opaque dans presque tout l'infra-rouge thermique (rayonnement émis par la Terre) ;
- de même, le corps humain est opaque dans le visible et l'infra-rouge, mais transparent aux rayons X (radiologie).

Nota : Cela pose un vrai problème, car un corps qui recevrait des rayonnements dans un domaine transparent pourrait ne pas pouvoir les réémettre car son spectre de réémission, plus froid que la source, se situerait dans un domaine opaque ; il faudrait alors :

- soit qu'il s'échauffe pour remonter son spectre d'émission dans un domaine de transparence,
- soit qu'il trouve une stratégie de réémission par une autre voie que le rayonnement.

On verra plus loin, par exemple, que c'est le cas des océans, et la façon dont ils s'en sortent.

Les bandes de fréquences auxquelles certains corps sont opaques sont leur(s) **bande(s) d'absorption**.

Dans la réalité, aucun corps n'est totalement opaque, même dans ses bandes d'absorption, et tout corps devient opaque au-delà d'une certaine épaisseur (ou densité) : on parlera un peu plus loin d' "épaisseur optique" pour mesurer l'opacité.

L'eau liquide, par exemple, absorbe tout l'infra-rouge solaire en quelques millimètres, et tout l'infrarouge thermique en quelques dizaines de microns (alors que les UV proches pénètrent dans l'eau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur).

Lorsqu'un corps est opaque, il bloque et **absorbe** le rayonnement qu'il reçoit et s'échauffe, jusqu'à atteindre un équilibre, en fonction de la température du corps émetteur, et de son absorptivité, en application de la Loi de Planck.

De même, en application de cette même loi, il **émet** un rayonnement en fonction de sa propre température et de son émissivité. Mais il ne peut transférer de chaleur que vers un corps plus froid que lui, et proportionnellement à la différence de T^4 (température absolue à la puissance 4).

3.4.2. Réflexion

Un corps **réfléchissant** parfait (miroir) restitue intégralement le rayonnement qu'il reçoit, sans en modifier ni l'intensité, ni le spectre de longueurs d'ondes. Un miroir est un corps réfléchissant (presque) parfait, mais dans la nature, aucun n'est un réflecteur parfait.

3.4.3. Diffusion, rétrodiffusion

Lorsque le milieu contient des aérosols, des gouttelettes, ou des cristaux de glace, ceux-ci **diffusent** ou même **rétrodiffusent** le rayonnement qu'ils reçoivent dans certaines directions, sur une partie du spectre, le flux incident et seule une fraction du rayon lumineux continue selon l'orientation initiale. La diffusion du spectre bleu-violet du flux solaire explique le bleu du ciel.

Alors que le flux infrarouge thermique émis par la Terre est diffus, de par son origine, le flux solaire reçu en surface est en partie diffus et en partie dirigé selon la direction du soleil. Les nuages favorisent le rayonnement diffus et suppriment même souvent le rayonnement direct.

3.5. Rayonnement dans les gaz (et dans l'air)

Tous les gaz sont transparents à l'œil humain dans des conditions normales de température et de pression, même si certains, comme le chlore, sont colorés.

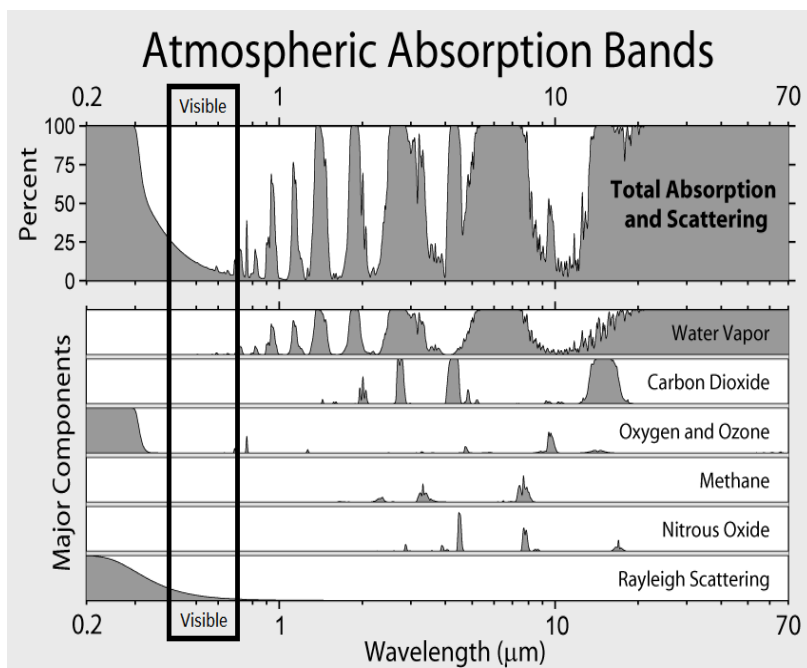
Mais tous les gaz ont, en dehors du domaine visible, un spectre d'absorption, c'est à dire qu'ils absorbent le rayonnement dans certaines raies ou bandes de longueurs d'ondes : ils y sont opaques, et rendent opaque également l'atmosphère qui les contient (plus ou moins en fonction de leur concentration).

Ceci est très contre-intuitif, car notre domaine visible ne se situe pas dans ces longueurs d'ondes, et on n'imagine pas vivre dans une atmosphère opaque : heureusement, là encore, la nature est bien faite.

Mais c'est le cas des gaz comportant des atomes différents, et en particulier, du gaz carbonique (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O), molécules triatomiques présentant un moment dipolaire électrique, et qui absorbent le rayonnement aux fréquences propres des vibrations et des vibrations-rotations de leurs molécules :

- pour le CO_2 , aux environs de 2,7 4,3 et 15 μm
- pour la vapeur d'eau (on parle bien ici d'eau à l'état gazeux, et non pas de nuages), sur de larges bandes réparties entre 0,7 et au delà de 70 μm .

Si notre domaine visible se situait dans ces bandes, nous serions dans le noir complet.



Mais ils rayonnent également, et uniquement, dans ces mêmes bandes, à leur température : en dehors de ces bandes, ils sont transparents.

Le comportement de ce rayonnement pose un problème de compréhension, qui est souvent à l'origine de mauvaises explications de ce qu'on appelle l'"Effet de Serre", et que nous allons clarifier :

A l'intérieur du gaz (atmosphère), au delà d'une certaine concentration des gaz "opaques" (CO₂ et vapeur d'eau), il n'y a pas de transfert thermique (ou d'échange de chaleur) par rayonnement, car :

- dans le domaine transparent, un gaz n'émet pas de rayonnement, ni n'en absorbe, par définition,
- dans les bandes d'absorption, il est vite opaque, et, également par définition, il n'y a pas de transfert de chaleur par rayonnement au travers d'un corps opaque.

La question se pose donc uniquement en "surface" du gaz, c'est-à-dire à une interface entre le gaz et le monde extérieur, et aux longueurs d'ondes correspondant à ses bandes d'absorption.

S'agissant de la Terre, l'atmosphère n'a que 2 interfaces :

- **la surface terrestre**, où le rayonnement émis par la surface est progressivement absorbé, dans leurs bandes d'absorption IR, par les gaz opaques de l'atmosphère (CO₂ et vapeur d'eau), sur quelques dizaines ou centaines de mètres (selon les fréquences), et donc à la même température : **l'échange thermique est négligeable**, car l'écart de température est pour ainsi dire nul (statistiquement) :
- **le haut de l'atmosphère**, à un niveau où elle devient, du fait de sa raréfaction en altitude, de moins en moins opaque, et laisse donc alors du rayonnement sortir, aux longueurs d'ondes de ses bandes d'absorption :
 - à la descente, s'agissant du rayonnement solaire, jusqu'à ce qu'il soit bloqué plus bas (en réchauffant l'atmosphère) (entre 1 et 4 μm),
 - à la remontée (infra-rouge thermique), en le libérant vers le cosmos à partir de l'altitude où la concentration de ces gaz "opaques" devient insuffisante pour retenir leur rayonnement, avec une puissance correspondant à la température à cette altitude (= la différence de température avec le cosmos vers lequel elle rayonne).

3.6. Mesure de l'opacité : l'Épaisseur optique

Cette notion est fondamentale pour bien comprendre le fonctionnement du climat (ou du moins sa part "rayonnement"), car elle permet de donner une valeur numérique à ce que certains appellent (à tort) l'"Effet de Serre" atmosphérique.

En physique, la transparence (ou son inverse l'opacité) est mesurée par l'**Épaisseur Optique t** (thickness), nombre sans dimension qui caractérise, lors de la traversée d'un média, le rapport entre l'intensité lumineuse (ou le flux radiatif) récupérée **M** à la sortie et l'intensité reçue **M₀** (à une fréquence donnée) :

$$t = - \text{Ln}(M/M_0) \quad (\text{Ln} = \text{logarithme népérien})$$

$$\text{ou à l'inverse, } M/M_0 = e^{-t}$$

Pour un rayonnement diffus (partant dans toutes les directions comme c'est le cas dans les gaz), le rapport vaut : $2 E_3(t)$, où $E_3(t)$ est une fonction spéciale dite exponentielle-intégrale d'indice trois. $2 E_3(t)$ est approchée par :

$$M/M_0 = e^{-t} / (1 + 0,65 t)$$

L'absorption $1-2 E_3(t)$ vaut 50%, 80%, 94% et 98,2%, respectivement pour $t= 0,42, 1,07, 2$ et 3 . (ou, plus simplement, **une épaisseur optique de 1,07 absorbe 80% du rayonnement, une épaisseur de 2 absorbe 94%** : plus l'épaisseur optique est grande, plus le gaz est opaque.

Une façon simple de se représenter l'épaisseur optique est la feuille de papier : une épaisseur d'une feuille correspond à une épaisseur optique de 1, 2 feuilles de 2, 3 feuilles de 3, ... et ainsi de suite : une ramette de papier correspond à une épaisseur optique de 500.

L'épaisseur optique t est nulle aux longueurs d'ondes où le gaz est transparent ; elle n'a de signification que dans les bandes d'absorption du gaz ; elle dépend alors, pour une concentration donnée de ce gaz et une distance traversée, de la fréquence du rayonnement.

Mais on verra plus loin que dans certaines bandes de fréquence, l'épaisseur optique de l'atmosphère est de plusieurs centaines : c'est dire si l'atmosphère y est opaque.

Dans la suite du document, on repèrera, pour chaque fréquence de rayonnement, l'altitude où l'épaisseur optique est égale à 1, en considérant que c'est à cette altitude que se situe la "surface" des gaz opaques en haut de l'atmosphère, c'est-à-dire le niveau où ils se raréfient suffisamment pour laisser passer progressivement leur propre rayonnement vers le cosmos (c'est l'interface radiatif entre l'atmosphère et le cosmos).

L'épaisseur optique de l'air à une fréquence donnée est la somme des épaisseurs optiques, à cette même fréquence, de tous les gaz qu'il contient : l'air n'est parfaitement transparent qu'entre les bandes d'absorption des différents gaz qu'il contient.

3.7. Approche corpusculaire

Toutes les notions que nous avons exposées ci-dessus trouvent leur explication dans une approche corpusculaire (le rayonnement considéré comme un ensemble de photons au lieu d'être considéré comme une vibration) :

Toute molécule qui absorbe un rayonnement à une certaine fréquence rayonne à cette fréquence mais à sa température propre qui, pour un gaz atmosphérique, est celle de l'air.

On a donc des chocs de H_2O ou CO_2 ou autres avec des molécules (N_2, O_2, Ar) plus ou moins rapides et des chocs plus ou moins efficaces pour exciter des vibrations ou des rotations de la structure de la molécule.

Près du sol : pression forte, température élevée, grandes vitesses "moyennes" : des milliards de collisions par seconde : après une collision qui excite un mode de vibration, la probabilité d'émettre un photon avant la collision suivante qui va lui retirer son énergie de vibration-rotation est très faible : les molécules qui absorbent un photon émis par la surface ou émis par une molécule de l'air au-dessus ou au-dessous sont presque immédiatement désexcitées par une collision qui transfère l'énergie de vibration-rotation aux molécules majoritaires N_2, O_2, Ar sous forme d'énergie cinétique (agitation moléculaire = température).

En haut de l'atmosphère, moins de collisions excitatrices car concentration et température plus faibles, donc la molécule excitée a "en moyenne" plus de temps pour se désexciter en rayonnant : c'est là que les gaz "opaques" rayonnent vers le cosmos.

Les molécules émettent bien dans toutes les directions, mais ce n'est pas parce qu'elles ont absorbé un photon venant de la surface, mais parce qu'**elles émettent à leur température** (celle du gaz dans lequel elles se trouvent).

4. L'atmosphère terrestre

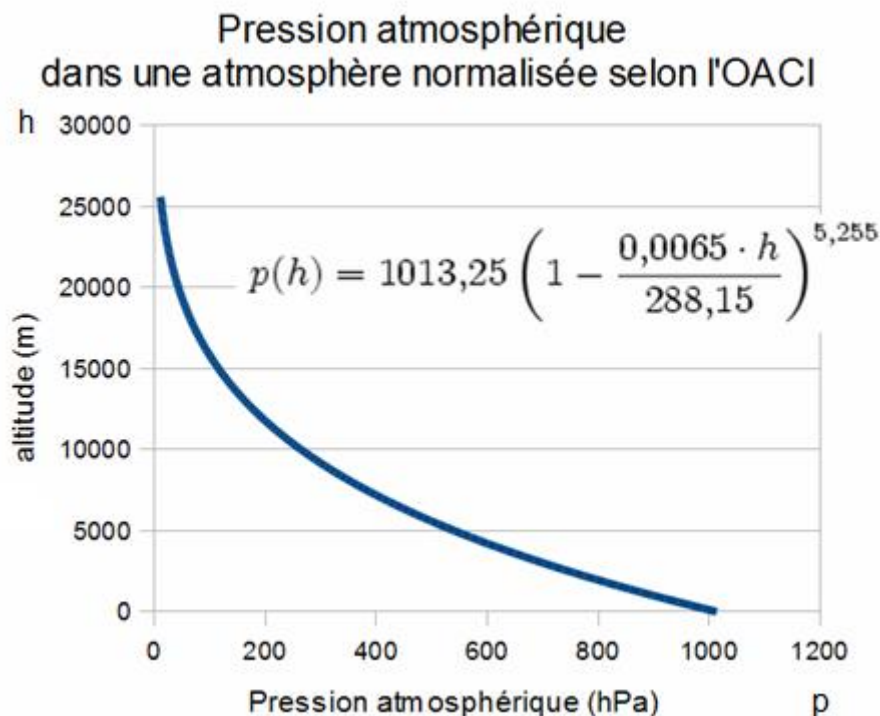
4.1. Généralités

L'atmosphère est traversée à la fois par les rayonnements solaires qui atteignent la Terre, mais aussi, dans l'autre sens, par les rayonnements infra-rouges "thermiques" émis par la Terre vers le cosmos. Et donc, avant d'analyser le parcours de ces rayonnements dans l'atmosphère, il est bon de s'attarder un peu sur sa constitution et sa structure.

4.2. Pression atmosphérique et relation avec l'altitude

Chaque m² de surface de la Terre est surplombé de 10 tonnes d'air (1 kg/cm²) ; mais l'atmosphère est compressible, sous l'effet de son propre poids, ce qui explique que sa pression décroît en fonction de l'altitude.

(Dans certains graphiques de la suite, on exprimera souvent l'altitude en pression, car beaucoup de propriétés dépendent plus de la pression que de l'altitude elle-même : il faudra garder en mémoire l'existence de cette relation).

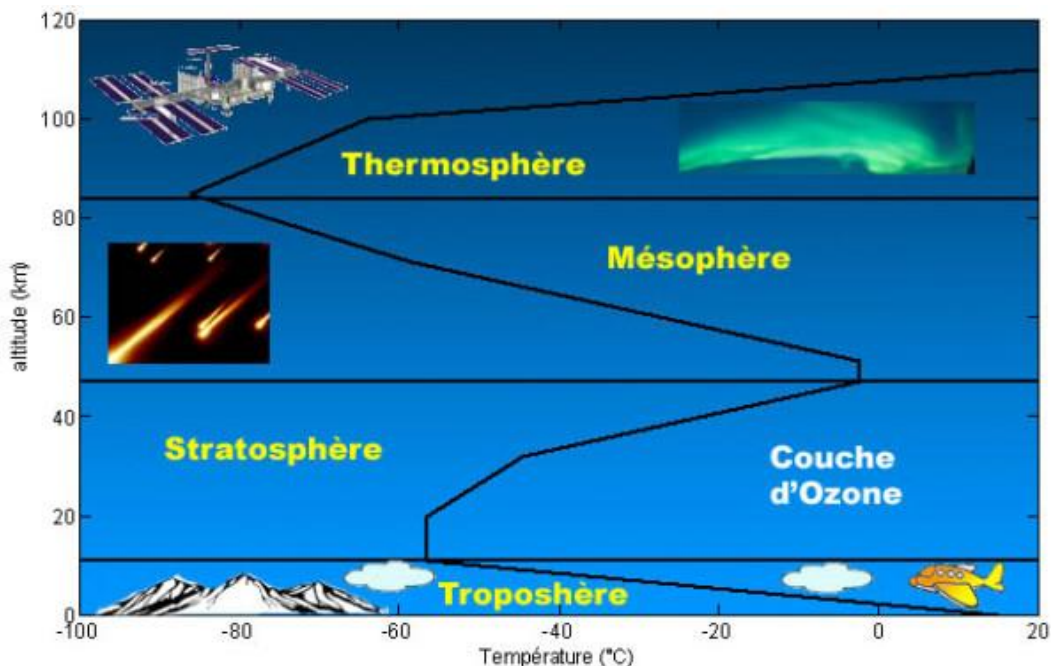


Ou, à proximité de la surface du sol : $h = 10 (1000 - P)$ (h en mètres, P en hPa)

4.3. Structure en couches

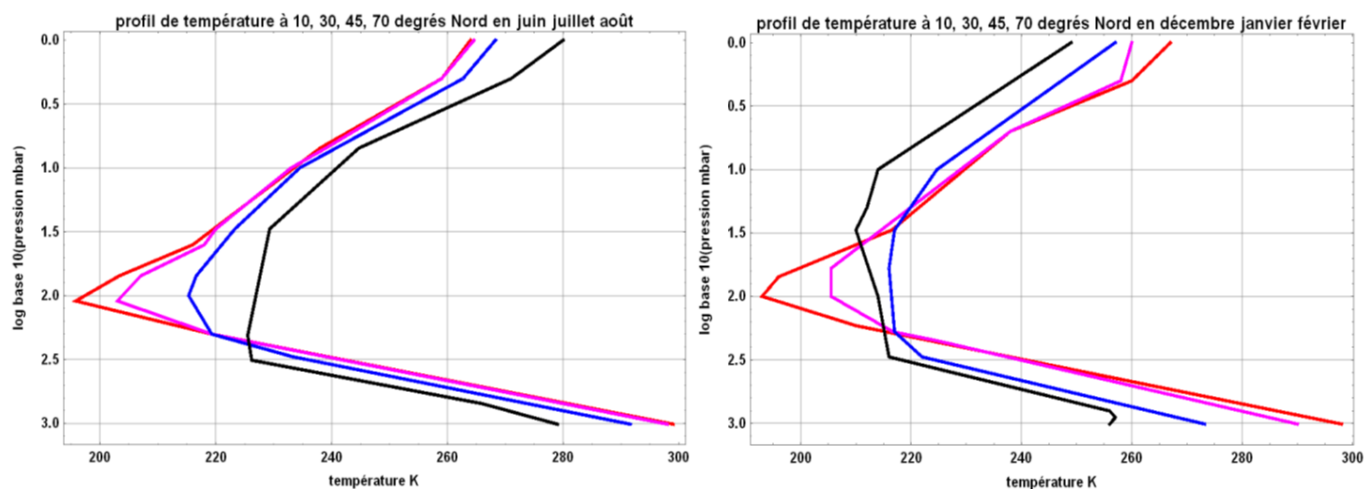
L'atmosphère est constituée de plusieurs couches : en partant du sol :

- la **troposphère** (jusqu'à environ 12 km d'altitude ou 200 mb de pression) : c'est l'atmosphère dans laquelle nous vivons : elle est caractérisée par un gradient moyen de température négatif : plus on monte en altitude, plus la température baisse, jusqu'aux environs de -50 à -60°C (210 à 220 K), ce qui entretient une forte convection, dont on verra l'importance plus loin ;
- la **stratosphère**, où la température, au contraire, remonte jusqu'à -3°C, vers 40 km d'altitude, siège de la couche d'ozone, et qui est donc en **inversion de température, ce qui empêche toute convection** : cette portion de l'atmosphère est en conséquence "stratifiée", d'où son nom ;
- la **mésosphère**, jusqu'à environ 80 km, où l'air reprend son refroidissement jusqu'aux alentours de -80 à -100 °C
- puis enfin la **thermosphère**, où l'air est tellement raréfié et ionisé qu'il ne participe pas au climat : ces 2 dernières couches peuvent donc être négligées.



La frontière entre la troposphère et la stratosphère s'appelle la **tropopause** : elle se situe, par définition, à l'altitude à laquelle le gradient de température de la troposphère s'inverse ou subit une très forte discontinuité, ou, autrement dit, à l'altitude où la convection s'interrompt.

Une des difficultés réside dans le fait que cette altitude n'est pas fixée : la tropopause penche entre la zone intertropicale où elle est bien calée, haute (16 km) et froide (-90 °C) (cheminée équatoriale : courbes rouges ci-dessous), et la zone sub-polaire où elle est plus floue, basse (8 km) et chaude (relativement : -50 °C) (courbes noires ci-dessous), comme le montrent les graphes ci-dessous, issus de relevés par ballons-sondes :



*L'ordonnée est exprimée en logarithme de la pression en mb :
3 correspond à 1000 mb (ou 1 atm), soit le niveau du sol
2 correspond à 100 mb (ou 0,1 atm), soit une altitude de 16 km environ*

On verra plus loin les causes de ce profil de température dans la troposphère et de cette température minimale au niveau de la Tropopause.

4.4. Courants atmosphériques et courants océaniques

D'une part les océans :

- ont une inertie thermique considérable,
- sont le siège de courants qui transportent de grandes quantités de chaleur (ex. : Gulf Stream),
- constituent une source et une réserve potentielle quasi infinie, à la fois de CO₂ dissous et de vapeur d'eau (bien sûr !), dont on verra plus loin l'importance pour le climat,

- mais surtout s'évaporent en évacuant des quantités considérables de chaleur latente de changement d'état (vaporisation).

L'atmosphère est également le siège de mouvements très importants (convection et advection) qui assurent le transport et le mélange de quantités de chaleur très importantes :

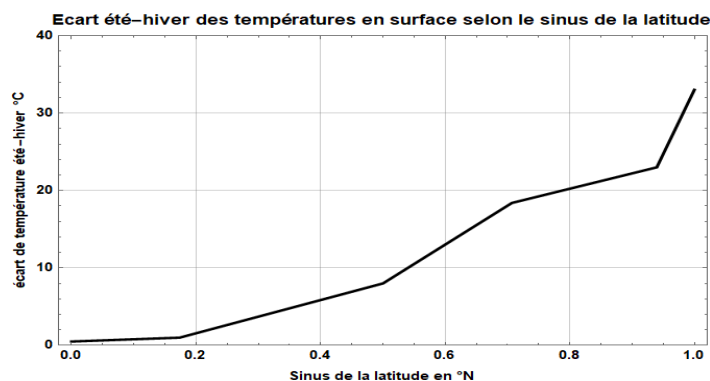
- chaleur sensible (capacité calorifique) (1,005 kJ/kg/K pour l'air),
- et surtout chaleur latente de vaporisation-condensation sous forme de vapeur d'eau, transportée par convection entre la surface terrestre et les nuages où elle se condense : on en verra l'importance (2500 kJ/kg/K).

Tous ces transports d'énergie, qui nivellent et moyennent les températures à la surface de la Terre, n'ont rien à voir avec les températures régnant par exemple à la surface de la Lune, notre voisine, où les écarts de température, dans le temps et géographiquement, peuvent atteindre 300°C.

Sur Terre, les températures atmosphériques moyennes en zone intertropicale varient fort peu entre les mois d'été et les mois d'hiver alors qu'elles varient de 35°C (et parfois 50°C en Sibérie) près du cercle arctique ; 35°C et plus aussi entre le jour et la nuit dans les zones désertiques chaudes.

La figure suivante présente l'écart été hiver en fonction du sinus de la latitude ; ceci pour rendre compte de la surface du globe comprise entre les différents parallèles : $\sin(30^\circ) = 0,5$ limite la moitié de la surface du globe, la zone tropicale proprement dite allant jusqu'à $23^\circ 27'$ avec $\sin(23^\circ 27') = 0,398$ et donc 40% de la surface du globe entre les Tropiques du Cancer et du Capricorne.

Le sinus de la latitude donne une idée de la surface du globe concernée : 40% du globe a moins de 6°C de différence entre été et hiver, quelques pour-cent en ont 30°C et plus.



Nota : le fait qu'en zone tropicale la différence des moyennes des mois d'été et d'hiver soit faible n'empêche pas que dans des zones continentales désertiques proches de ces latitudes, la différence des températures entre le maximum de jour l'après-midi et la fin de la nuit puisse atteindre 30°C ou plus. Pour mémoire, Paris se situe à 48,2 ° de latitude.

4.5. Composition

Chaque m² de terre est surplombé de 10 tonnes d'air (1 bar = 1 kg/cm²), principalement des gaz presque parfaitement transparents :

- 7,55 tonnes d'azote,
- 2,32 tonnes d'oxygène
- 0,13 tonne d'Argon

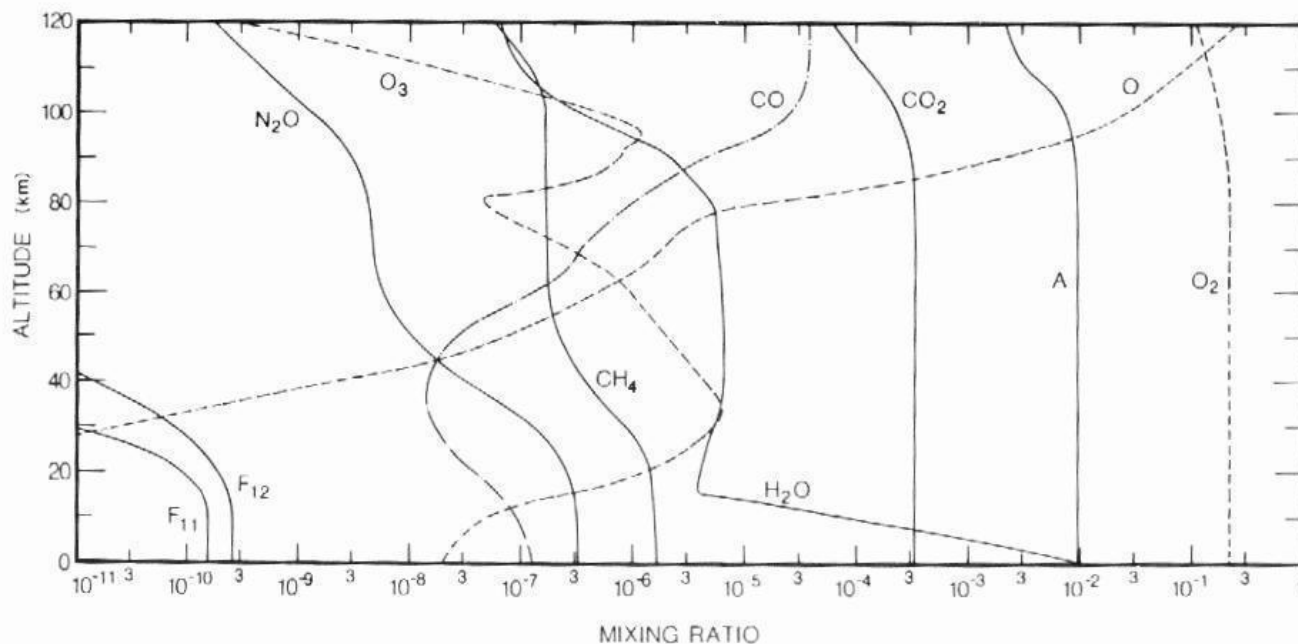
... mais également d'autres gaz minoritaires (gaz traces), dont la proportion peut varier en fonction de différents facteurs, dont, en particulier l'altitude, et qui, du fait de leur constitution triatomique, ont des bandes d'absorption qui vont opacifier l'atmosphère dans certaines bandes de fréquences :

- 5 à 80 kg/m² de vapeur d'eau (moyenne 25 kg/m²), présente, mais **en proportion décroissante** de la surface à la tropopause, qui a de nombreuses bandes d'absorption dans le spectre solaire, et qui est quasiment opaque dans l'infra-rouge thermique (au delà de 4,5 µm de longueur d'onde, ou moins de 66 THz),
- 6,3 kg/m² de gaz carbonique (CO₂) (soit 400 ppm en proportion volumique ou moléculaire), en **proportion quasi-uniforme dans toute l'atmosphère**, qui a quelques bandes d'absorption dans le spectre solaire, et une importante dans l'infra-rouge thermique, dont on verra l'incidence,

- 6 g d'ozone, **essentiellement dans le haut de la stratosphère** (voir ci-dessous), opaque aux ultra-violets, et dans une bande de fréquences l'infra-rouge thermique,
- des traces d'autres gaz (CH_4 , N_2O , ...).

La figure ci-dessous montre la répartition des différents gaz en fonction de l'altitude (l'altitude qui nous intéresse se limite à environ 50 km : haut de la stratosphère) ; on constate en particulier, en fonction de l'altitude :

- une parfaite constance de la concentration en CO_2 (la figure, assez ancienne montre un peu plus de 300 ppm, alors qu'elle est aujourd'hui supérieure à 400 ppm),
- une très forte décroissance de la proportion de vapeur d'eau (de 1,6% au sol à 3 ppm à la tropopause (où la courbe H_2O rebrousse)),
- une proportion croissante d'ozone jusqu'à un maximum en haut de la **stratosphère** (vers 40 km).



4.6. Comportement du rayonnement à l'intérieur de l'atmosphère

La figure ci-dessous montre en superposition :

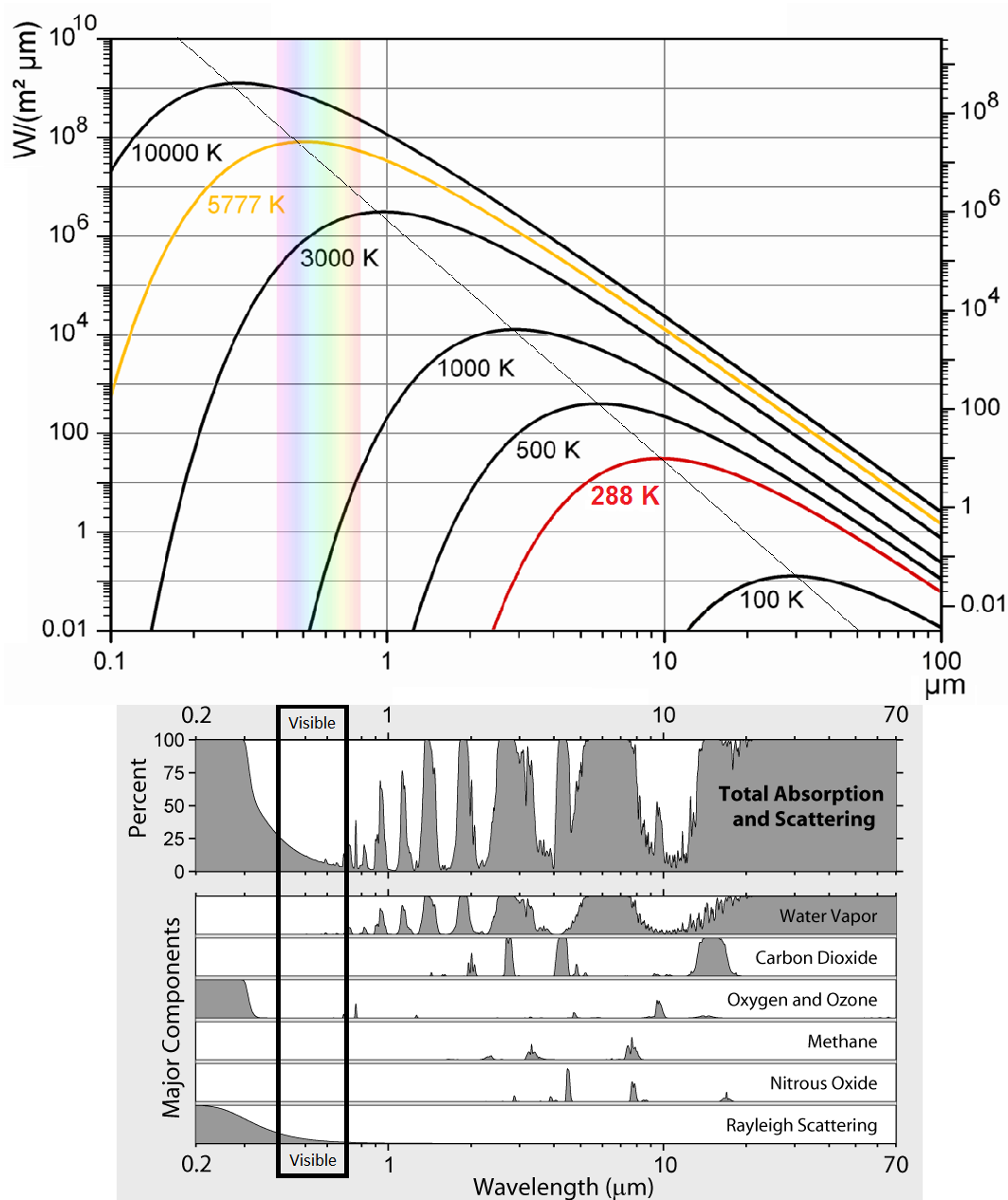
- Les courbes de rayonnement :
 - . jaune pour le rayonnement du soleil (à 5777 K)
 - . rouge pour le rayonnement terrestre au niveau du sol (moyenne à 15°C soit 288 K)
- Les bandes d'absorption des différents gaz (traces) contenus dans l'atmosphère, en fonction de la longueur d'ondes.

Avec leur double échelle logarithmique, les courbes peuvent tromper sur les ordres de grandeur, mais on ne parle pas de la même chose entre les infra-rouges "solaires" (ceux de la courbe 5777 K) et les infra-rouges terrestres, ou "thermiques" ou "lointains" émis par la Terre à 288 K (15°C à la surface terrestre en moyenne) :

- les premiers tiennent une part relativement importante par rapport au rayonnement reçu du soleil,
- les seconds sont négligeables dans le (et par rapport au) rayonnement solaire, mais prépondérants dans le rayonnement réémis par la Terre.

On constate qu'une partie du Rayonnement solaire et/ou terrestre est absorbée par des bandes d'absorption :

- de l'ozone et de l'oxygène (essentiellement stratosphérique) dans les UVs,
- de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère (surtout : bandes d'absorption entre 1 et 4 μm),
- du CO_2 (bandes d'absorption à 2,7 et 4,3 μm),
- et d'autres gaz à l'état de traces : Méthane (CH_4), Protoxyde d'azote (N_2O), ...



Ces absorptions du flux solaire contribuent, bien entendu, au réchauffement de l'atmosphère, à l'altitude où elles interviennent, aussi bien pour les rayonnements descendants (solaires) que remontants (thermiques).

4.7. Les nuages

Les nuages, constitués de fines gouttelettes d'eau sphériques baignant dans une atmosphère saturée d'humidité, combinent tous les comportements, dont ils fournissent un bon exemple :

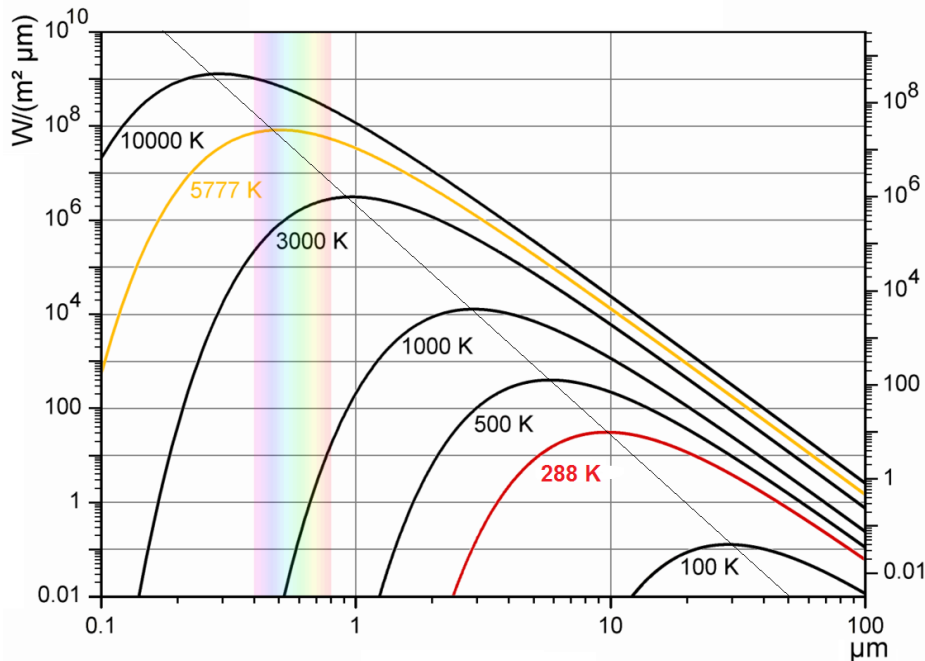
- ils sont partiellement **transparents** : nous percevons la lumière du soleil à travers eux ;
- constitués d'eau liquide, ils **absorbent** une part très importante du rayonnement solaire, infra-rouge proche, ce qui contribue à réchauffer l'atmosphère qui les entoure, mais à priver la surface terrestre de cette chaleur ;
- baignant dans de la vapeur d'eau à saturation, ils **absorbent** la plus grande partie du rayonnement l'infra-rouge thermique (émis par la surface de la Terre) ;
- ils **rétrodiffusent** vers l'espace une autre partie des rayons en provenance du soleil, et contribuent ainsi à l'Albédo, dont on verra un peu plus loin l'importance sur Terre.

5. Suivi des rayonnements à partir du Soleil

Abordons maintenant le vif du sujet.

5.1. Point de départ : le rayonnement issu du Soleil

L'énergie thermique reçue par la Terre et son atmosphère **provient en totalité du Soleil**, sans aucun amortissement ni aucune modification de longueur d'onde : on est dans le vide, et **il n'y a pas d'autre source de chaleur** significative : les autres étoiles sont trop loin, et la géothermie est une source négligeable.



Le soleil rayonne à 5 777 K (courbe jaune ci-dessus).

En application de la Loi de Stefan Boltzmann ($M = \sigma T^4$), l'énergie émise par la surface du Soleil (à une température de 5777 K) est égale à :

$$M_{\text{soleil}} = 5,67 \times 10^{-8} \times 5777^4 = 6,32 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

Le Soleil a un rayon R_0 de 695 600 km et se situe à une distance moyenne $R = 150\,000\,000$ de km de la Terre.

$$M_{\text{terre}} = M_{\text{soleil}} (R_0/R)^2 = 1\,360 \text{ W par m}^2 \text{ de surface perpendiculaire à la direction du Soleil}$$

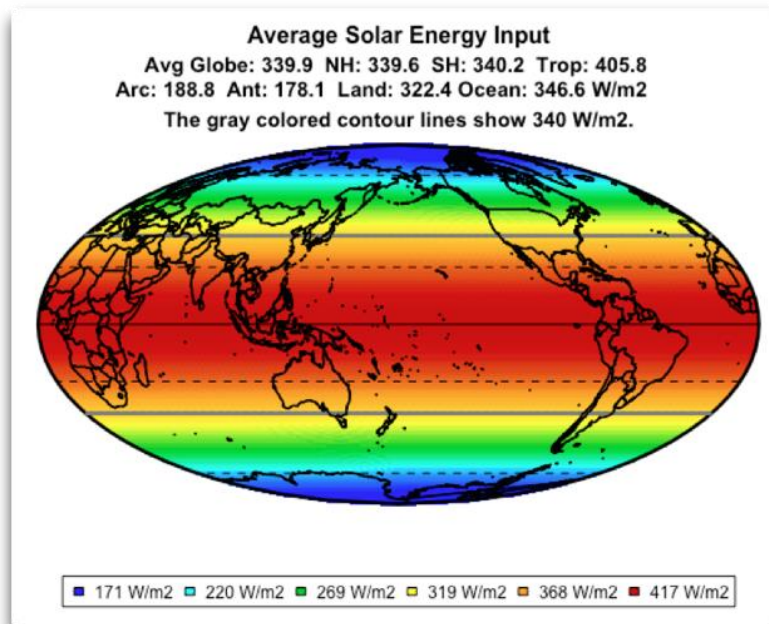
En fait, il s'agit là d'une valeur moyenne entre aphélie (en juillet : 1321 W/m^2) et périhélie (en janvier : 1417 W/m^2) de la Terre, dont l'orbite a une excentricité (actuelle) de 0,0167.

La surface de la Terre (sphère) est égale à 4 fois la surface du disque qu'elle présente au soleil ($4\pi R^2$ au lieu de πR^2), donc :

$$M_{\text{terre}} = 1\,360 / 4 = 340 \text{ W/m}^2 \text{ de surface réelle de Terre (sphère)}$$

Il s'agit encore là, bien entendu, d'une valeur moyenne, communément admise, mais :

- dont les valeurs locales s'étendent de 0 (face obscure de la Terre) à 1 360 (soleil au zénith),
- dont la répartition en fréquences est environ :
 - 10% en ultra-violet (UV)
 - 43% en visible (0,4 à 0,7 μm)
 - 47% en infra-rouge (IR) "proche" ou "solaire"
 - négligeable en infra-rouge (IR) "lointain"
- dont les moyennes en latitude se répartissent comme ci-dessous :



(Données CERES sur 15 ans, de 2000 à 2015 : les lignes grises horizontales correspondent à la valeur moyenne de 340 W/m²)

5.2. Déduction de la part rétrodiffusée par la Terre : l'Albédo

Si on voit depuis l'espace la Terre dans le visible, mais aussi en infrarouge, c'est parce qu'elle réfléchit ou diffuse une partie du rayonnement solaire :

- en altitude par les nuages, qui en sont le facteur principal,
- à la surface de la Terre, par les glaces terrestres et polaires, mais aussi par tous les milieux terrestres qui réfléchissent une partie de la lumière qu'ils reçoivent : déserts, forêts, océans, ...

La proportion de lumière réfléchiée par rapport à la lumière incidente définit l'**albédo**.

L'albédo de la Terre est difficile à mesurer de façon exacte, car il varie et est très différent selon le positionnement des nuages au dessus de surfaces terrestres normalement peu ou très réfléchissantes (auxquelles ils se substituent en terme d'Albédo), en particulier selon la proportion de nuages positionnés au dessus des océans ou au dessus des terres ; or, leur positionnement varie énormément dans le temps et dans l'espace, et il faut donc beaucoup de mesures pour établir une moyenne fiable.

L'albédo est plus important dans l'hémisphère nord (dont les surfaces terrestres sont plus réfléchissantes), que dans l'hémisphère sud, essentiellement océanique et moins réfléchissant. Néanmoins, il est communément globalement évalué en moyenne à **30% du rayonnement solaire, soit 100 W/m²** (la valeur exacte importe peu dans notre débat, dès lors qu'on la considère comme constante).

L'essentiel de l'albédo provient des nuages : soit environ **75 W/m²**.

Le reste des 30% d'albédo total, soit environ **25 W/m²**, est rétrodiffusé par la surface terrestre en se répartissant de la façon suivante :

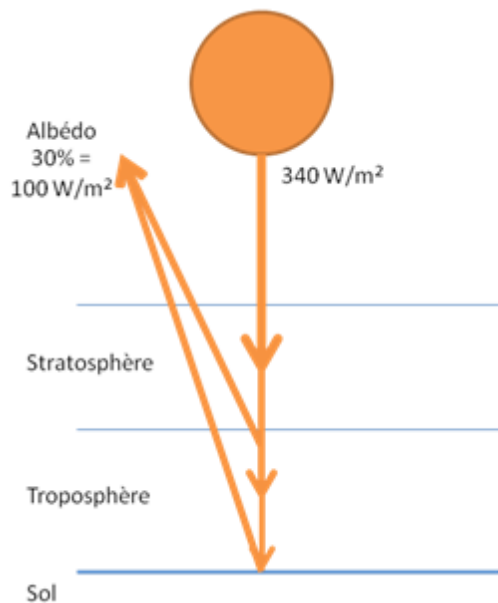
- les océans, qui occupent 71% de la surface terrestre, ont un albédo faible : généralement compris entre 5 et 10% (selon l'angle d'incidence des rayons) ;
- le sable entre 25 et 40% ;
- la glace environ 60% ;
- la neige épaisse et fraîche jusqu'à 90%.

Mais les glaces polaires, bien que très réfléchissantes, jouent un rôle secondaire, du fait :

- de l'incidence rasante des rayons du Soleil qui fait qu'elles sont peu éclairées,
- qu'elles sont souvent couvertes de nuages, ... déjà comptés.

Bien sûr, ce ne serait pas le cas si les glaces polaires descendaient en latitude (comme cela a pu être le cas aux périodes de glaciation, par exemple il y a 20 000 ans où la température était plus froide de 8 à 10°C à 45° Nord, avec une végétation à Paris de type toundra polaire) : dans ce cas, l'albédo serait beaucoup plus important (ce qui n'arrangerait rien en terme de froid).

De même, si la couverture nuageuse devait varier, l'impact sur l'albédo pourrait être très sensible.

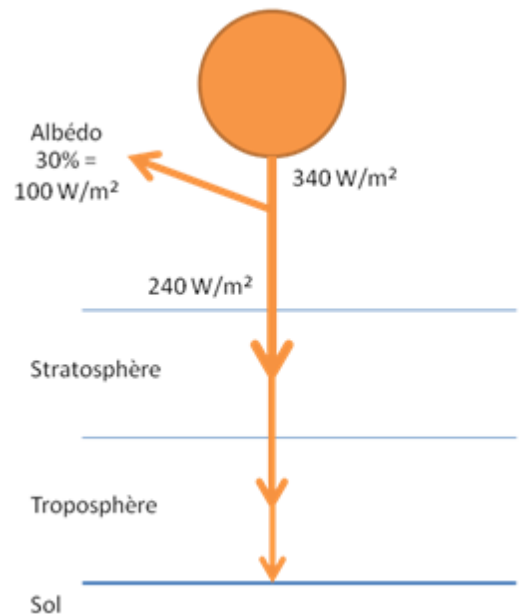


beaucoup plus faible.

Le fait que l'albédo résulte de réflexions à différents niveaux (essentiellement sommet des nuages et surface terrestre (et maritime)) n'a aucune incidence sur le bilan thermique à ces différents niveaux : cette énergie ne fait qu'entrer et sortir du système sans le modifier : d'un point de vue climatique, c'est comme si elle n'existait tout simplement pas.

Et donc, pour la suite, nous raisonnerons albédo global déduit, c'est-à-dire sur la base d'un rayonnement solaire total moyen "absorbé" de 240 W/m².

Mais là encore, il s'agit d'une moyenne ; de façon localisée (dans le temps et/ou à la surface de la Terre), l'albédo peut être



5.3. En déduire une température moyenne de la Terre ?

On entend souvent dire que, sans les "Gaz à Effet de Serre", la température moyenne de la Terre serait de -18°C : cette affirmation résulte d'un calcul simpliste, largement repris par les médias, qui suppose que toute la Terre soit développée (mise à plat), et reçoive directement et en permanence tout le rayonnement solaire moyen (240 W/m², si on déduit simplement l'albédo) :

$$M = \sigma T^4$$

$$\text{donc } T = \sqrt[4]{M/\sigma} = \sqrt[4]{240/(5,67 * 10^{-8})} = 255 \text{ K} = \underline{-18 \text{ °C}}$$

Or, ce calcul est mathématiquement faux (et pas qu'un peu !) : on ne peut pas raisonner sur cette moyenne de rayonnement reçu, pour en déduire une température moyenne de la Terre : T est localement proportionnel à $\sqrt[4]{M}$, mais la moyenne des $\sqrt[4]{M}$ locales n'est pas du tout égale à la $\sqrt[4]{M}$ Moyenne des M locaux.

En effet, supposons par exemple une surface, qui, au lieu de recevoir en totalité un rayonnement permanent de 240 W/m², reçoive sur une moitié un rayonnement nul, et sur l'autre un rayonnement de 480 W/m² (ce qui donne la même moyenne de 240 W/m²) :

- Température de la demi-surface recevant un rayonnement nul : 0 K
- Température de la demi-surface recevant un rayonnement de 480 W/m² :

$$T = \sqrt[4]{M/\sigma} = \sqrt[4]{480 / (5,67 * 10^{-8})} = 303 \text{ K}$$

- Température moyenne : 303 / 2 = 151,5 K, soit -122 °C

Nous sommes bien loin des -18°C, pour une même énergie moyenne de rayonnement reçue.

Cela dit, on peut déduire 2 conclusions de ce calcul :

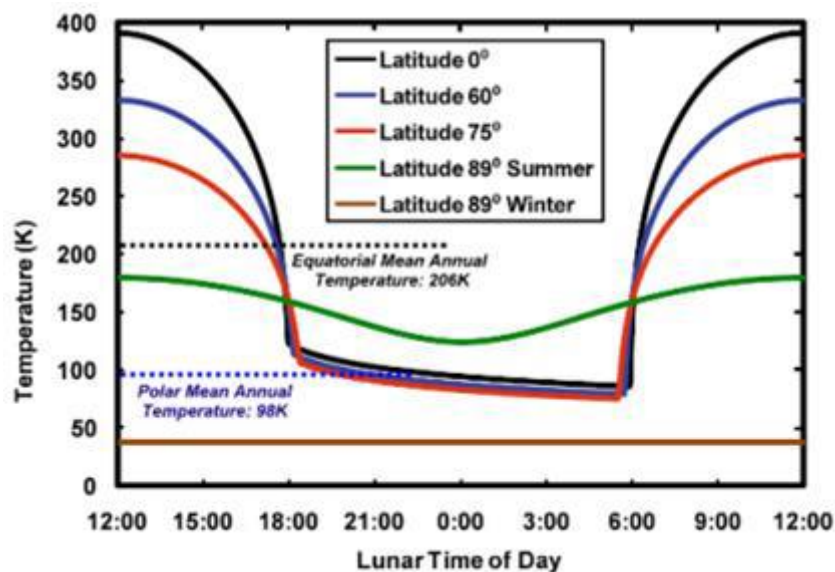
1. La température moyenne d'une Terre sans atmosphère ni océans serait comprise entre ces deux extrêmes (-122°C, -18°C) ;

2. -18°C est la température d'un corps recevant 240 W/m^2 de façon uniforme dans le temps et dans l'espace ; mais toute fluctuation de flux radiatif par rapport à cette moyenne entraîne une température moyenne plus basse : -18°C est une température théorique moyenne maximale.

S'agissant d'une Terre sans atmosphère ni eau, pour obtenir un résultat "exact", il conviendrait de faire le calcul en chaque point, sur la base de sa valeur locale de M (1360 W/m^2 soleil au zénith, 0 côté face obscure, $1360 \cos \theta$ en fonction de l'inclinaison, elle-même fonction de la latitude et du temps). Mais pour la Terre réelle, il faudrait en plus tenir compte de l'inertie thermique de la Terre, de l'atmosphère, ... et surtout des océans, ... et d'un albédo exprimé en terme de probabilité (selon qu'il y ait ou non des nuages).

Bref, c'est une des limites que nous avons mentionnées en introduction.

Cependant, la Lune nous fournit un ordre de grandeur de ce que pourrait être la température moyenne de la Terre sans atmosphère ni océans, puisque, hors albédo, elle reçoit le même flux radiatif moyen que la Terre (340 W/m^2), et un flux maximal (soleil au zénith) de 1360 W/m^2 .



Si on admet que la Lune a un albédo de 7% et une émissivité de 0,975, on en déduit la température maximale (soleil au Zénith) : 389 K , soit 117°C .

Le flux radiatif M en un point de la face éclairée de la Lune est égal (par projection) à $1360 \times (1-7\%) \times \cos(\text{latitude}) \times \cos(\text{longitude})$, et sa température est égale à $\sqrt[4]{M/\epsilon \sigma}$.

L'intégration de 0 à $\pi/2$ en latitude et longitude permet de calculer une température moyenne de la face éclairée : on trouve 311 K (ou 38°C).

Côté face obscure, la température minimale mesurée est 70 K (les zones les plus froides sont à 40 K): on peut, en première approximation considérer cette température comme uniforme sur toute la face obscure : en effet, l'inertie thermique de la Lune est très faible, et la Lune tourne très lentement sur elle-même (28 jours).

Donc on peut considérer que **la température moyenne de la Lune** (pour autant que cela ait un sens), **est d'environ $(311 + 70) / 2 = 190 \text{ K} = -83^{\circ}\text{C}$.**

Compte tenu de son albédo plus important, la température moyenne d'une Terre sans atmosphère ni océans serait encore plus basse.

Et donc, si la température moyenne à la surface de la Terre est de l'ordre de 15°C , et non pas de -83°C , c'est que **l'atmosphère et les océans y jouent nécessairement un rôle très important.**

... car, en plus, malheureusement, d'un point de vue purement radiatif, l'atmosphère n'arrange rien pour la température à la surface de la Terre, puisque, on le verra, elle absorbe elle-même une partie du rayonnement solaire, et n'en laisse arriver qu'une partie au sol.

6. Suite du parcours : traversée de l'atmosphère

On peut maintenant aborder le parcours des rayons solaires, à l'intérieur de l'atmosphère :

6.1. Obstacle n°1 : l'oxygène et l'ozone stratosphériques

Avant de parvenir à la troposphère, les rayons du Soleil traversent la stratosphère.

Nota : il s'agit ici de la totalité du rayonnement solaire, incluant l'albédo : les facteurs d'albédo pour le visible et les infrarouges se situent entre la tropopause et la surface terrestre, et donc plus bas ; mais comme tous les ouvrages raisonnent albédo déduit (sur la base de 240 W/m^2), et que cela a très peu d'incidence dans la stratosphère, nous négligeons cet aspect.

Les conditions régnant dans la stratosphère induisent des phénomènes de dissociation des molécules d'oxygène en atomes, qui, en particulier créent la couche d'ozone qui nous protège des rayonnements ionisants. Selon leur longueur d'onde, les UV :

- dissocient par photolyse les molécules d'oxygène en 2 atomes,
- convertissent les molécules et atomes ainsi libérés en molécules d'ozone,
- re-dissocient les molécules d'ozone en molécules et atomes d'oxygène.

La formation ou reformation continue de O_3 à partir de O_2 et d'atomes O sous l'effet des rayonnements UV de haute énergie du Soleil, est une réaction exothermique, qui, en absorbant ces rayonnements, réchauffe la stratosphère dans sa partie haute.

Il s'agit ici d'un phénomène chimique, et non pas radiatif, qui fait que la température en haut de la stratosphère atteint de l'ordre de 0°C (273 K).

Cette température, en haut de la Stratosphère est relativement stable (en moyenne jour/nuit), car elle résulte in fine uniquement de la concentration d'oxygène et du rayonnement solaire (UV) à cette altitude, peu sujets à variations.

Mais, de ce fait, il existe en haut de la stratosphère une couche chaude, qui rayonne, à sa température, des infra-rouges thermiques, et va transmettre sa chaleur à l'atmosphère, par rayonnement et absorption progressive par le CO_2 stratosphérique (essentiellement), jusqu'à la tropopause.

Et donc, la température baisse d'environ $2^\circ\text{C}/\text{km}$ entre le haut de la stratosphère et la tropopause : on a donc une inversion de température dans la stratosphère, qui y explique l'absence de convection.

La stratosphère a son propre équilibre radiatif : elle restitue directement au cosmos, par rayonnement de son CO_2 , l'énergie qu'elle absorbe pour entretenir ses réactions chimiques, soit environ 17 W/m^2 ; cela semble peu, par rapport à l'échauffement produit (plus de 50°C si on compare le haut et le bas de la stratosphère), mais l'atmosphère est tellement raréfiée à cette altitude, que la masse réchauffée est très faible.

Sur les 240 W/m^2 qui ne sont pas réfléchis par l'albédo, seuls 223 continuent donc leur trajet dans la troposphère.

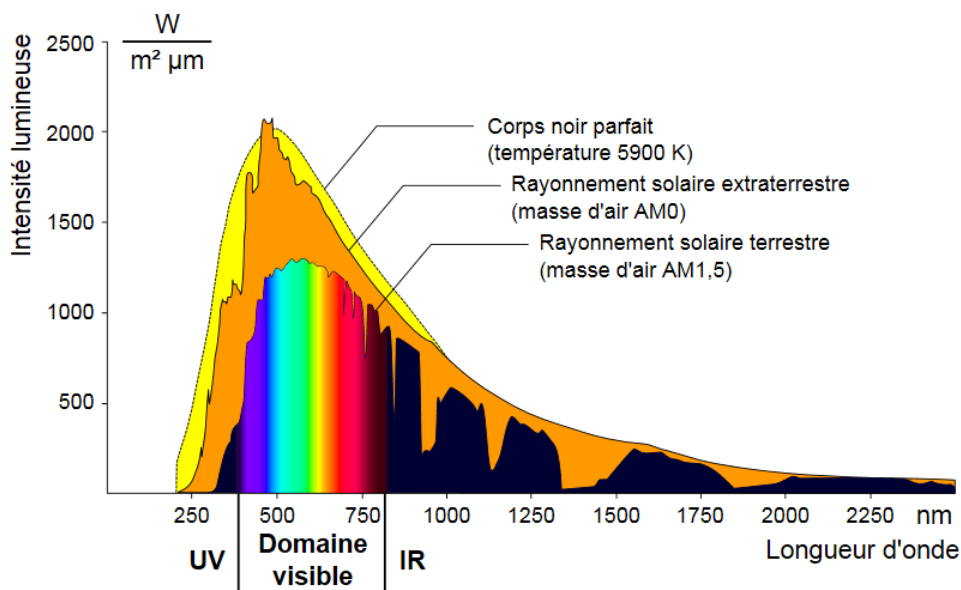
6.2. Dans la troposphère : absorption par les nuages, la vapeur d'eau, et le gaz carbonique de l'air

Comme on l'a vu plus haut, les nuages rétro-diffusent une partie du rayonnement qu'ils reçoivent, et en laissent passer une partie, mais ils absorbent également la quasi-totalité des Infra-rouges solaires (quelques dizaines de microns d'eau absorbent la quasi-totalité des infra-rouges solaires au delà de $1 \mu\text{m}$ de longueur d'onde).

Par ailleurs, la vapeur d'eau (surtout) et de CO_2 (un petit peu) ont des bandes d'absorption dans l'infra-rouge "solaire", mais ce qu'ils absorbent de rayonnement solaire se situe hors de la zone du visible : on n'en a donc pas conscience (là encore, la nature est bien faite).

On peut estimer en moyenne cette absorption dans la troposphère à 62 W/m^2 (en fait, le GIEC, dans son AR5, estime l'absorption globale des rayonnements solaires par l'atmosphère à 79 W/m^2 , sans faire le détail entre stratosphère et troposphère : admettons-le).

Par rapport à sa forme initiale, le Spectre solaire après traversée de l'atmosphère prend la forme suivante, où on voit nettement l'impact de ces bandes d'absorption (ciel sans nuage) (les spectres correspondent à un appareil qui pointe vers le soleil, selon un standard employé pour les appareils photovoltaïques et non pas au flux reçu sur une surface horizontale. La courbe en haut de l'air correspond à peu près à 1360 W/m^2 , la courbe en surface (mais en visant le soleil) à 910 W/m^2)



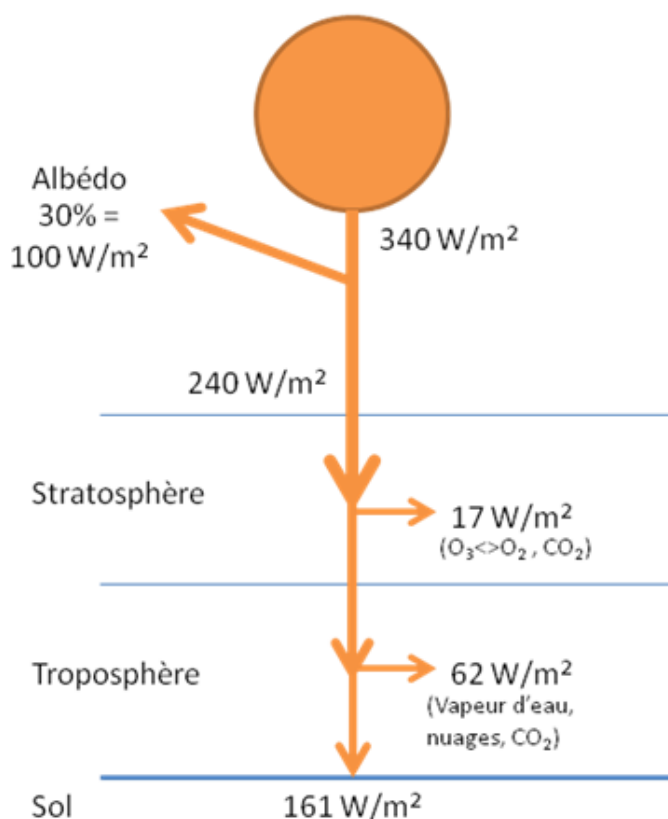
(Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Raies_de_Fraunhofer)

(AM0 signifie à la limite supérieure de l'atmosphère ; AM1,5 signifie selon une trajectoire inclinée qui multiplie le trajet dans l'atmosphère par 1,5 (correspondant à une latitude moyenne))

6.3. Solde parvenant à la surface de la Terre

Au résultat, une fois déduits l'albédo et les différents prélèvements aux différentes couches de l'atmosphère, l'énergie moyenne reçue du Soleil par la surface terrestre est égale à :

$$M = 240 - 17 - 62 = \underline{161 \text{ W/m}^2}$$



Bien sûr, il s'agit là encore d'une moyenne, entre 0 (sur l'hémisphère non éclairé par le soleil), et de l'ordre de 1100 W/m² (maximum observé sur l'océan, soleil au zénith, sans nuage : albédo océanique 5% déduit).

Si cette valeur moyenne s'appliquait partout, avec le même calcul faux qui donne -18°C, **161 W/m²** correspondraient à une température moyenne maximale de 237 K (ou **-36°C**).

Mais si on refait l'analogie avec la Lune (flux radiatif moyen 316 W/m², et température moyenne 189 K) la température à la surface de la Terre devrait être :

$$(M = \epsilon \sigma T^4 \text{ donc } T/T_0 = \sqrt[4]{M/M_0} \text{ donc } T/189 = \sqrt[4]{161/316} = 0,84 \Rightarrow \quad \underline{\underline{T = 159 \text{ K} = -114 \text{ }^\circ\text{C}}})$$

Mais cette analogie n'est pas totalement valable : la Terre tourne 28 fois plus vite sur elle-même que la Lune, et, de plus, les océans lui donnent une inertie thermique que la Lune n'a pas.

De ce fait, la température moyenne (théorique) de la Terre devrait se situer entre ces deux valeurs (-114°C, -36°C)

Bref, on est quand même très loin des -18°C portés par les médias et certains manuels, et encore plus de la réalité (15°C) !

6.4. Il en manque

Il en manque même beaucoup !

En effet, radiativement, pour justifier la température moyenne de la surface terrestre (15°C soit 288 K), avec une émissivité/absorptivité de 0,9, il faudrait qu'elle reçoive en moyenne :

$$M = \epsilon \sigma T^4 = 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 288^4 = \mathbf{350 \text{ W/m}^2}$$

... **soit plus du double** de ce qu'elle reçoit effectivement du Soleil après absorption de son rayonnement par l'atmosphère :

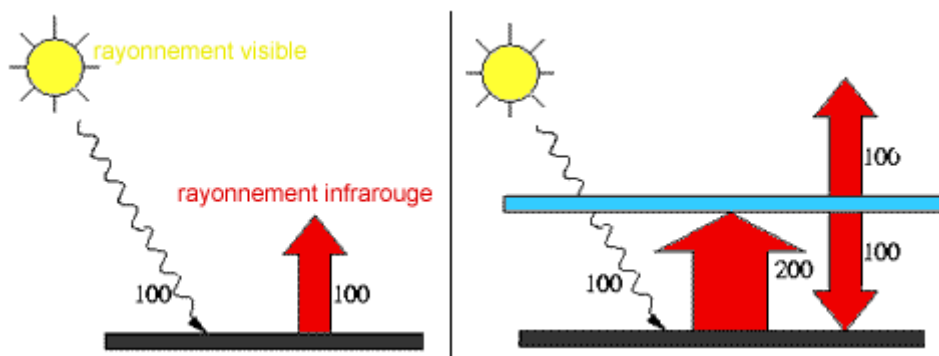
si on raisonne uniquement en radiatif, il manque, en moyenne, 189 W/m²

Or, en radiatif, les transferts thermiques ne peuvent aller que du plus chaud au plus froid ; et donc, pour rehausser la température de la Terre à 15°C, il faudrait nécessairement une source de température supérieure à 15°C ; mais, à part le Soleil, rien n'est plus chaud que la Terre à 15°C, ... et nous avons déjà épuisé cette source.

C'est là qu'est censé intervenir l' "Effet de Serre atmosphérique".

6.5. Revenons donc quand même sur le mythique "Effet de Serre atmosphérique"

Planet-Terre, une émanation de l'Ecole Normale Supérieure (<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/explication-effet-de-serre.xml>) explique l' "Effet de Serre" de la façon suivante :

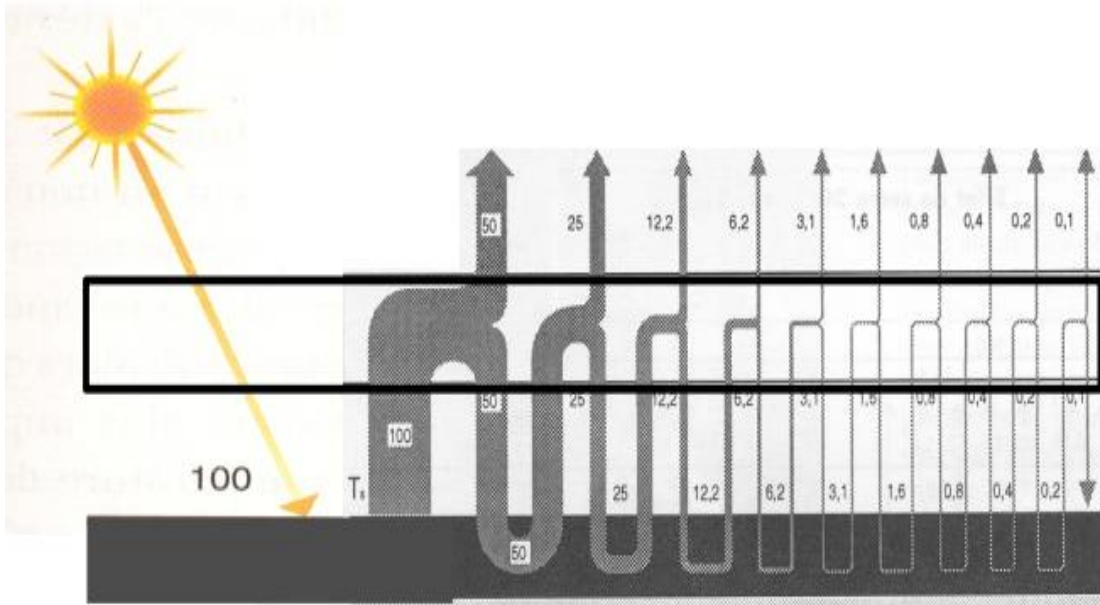


Dans le schéma de gauche, le sol est assimilé à un corps noir : recevant 100 (W/m²), il se stabilise à la température de rayonnement correspondante (selon la Loi de Stefan Boltzmann), et rayonne donc vers le cosmos à cette même température, la même énergie 100 (W/m²).

Dans le schéma de droite, on a placé une lame de verre qui laisse passer le rayonnement solaire, mais absorbe et bloque les Infra-rouges émis par le sol. Pour que l'ensemble s'équilibre, il faut donc que ce soit le verre qui rayonne les 100 reçus du soleil : jusque là, on est d'accord.

Mais continuons le raisonnement : la lame de verre, fine, rayonne nécessairement la même quantité dans les deux sens : si elle rayonne 100 vers le cosmos, elle rayonne aussi 100 vers le sol, ... qui reçoit alors 200 (100 solaires + 100 du verre), ... et donc se réchauffe (par effet de serre) ; ... de ce fait, pour s'équilibrer, le sol rayonne donc 200, ce qui permet d'équilibrer le verre, qui, recevant 200 peut donc émettre 100 vers le cosmos, et 100 vers le sol.

Comme le sol ne reçoit directement que 100, les 100 supplémentaires sont produits par un mécanisme de rebonds successifs, selon le schéma suivant extrait de "Bilan énergétique de la Terre et rôle de l'Effet de Serre" (Jean-Louis Dufresne, CNRS Senior Research Scientist Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)) (http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/IUFM_Creteil/Dufresne_bil_serre_terre.pdf):



Ce raisonnement est spéculaire, car on voit bien qu'on a créé de l'énergie à partir de rien : le verre, plus froid que le sol, ne peut pas le réchauffer par rayonnement sans violer le Second Principe de la Thermodynamique.

... ou alors, si je mets mes deux mains face à face, je vais finir par me brûler : en effet, si ma main droite émet 500 W/m^2 (environ) vers ma main gauche (qui est déjà elle-même à 500 W/m^2), celle-ci va monter à 1000 W/m^2 (ce qui correspond à 95°C selon la loi de Stefan Boltzmann : c'est chaud !).

De même, dans l'atmosphère, **ce mécanisme est un non-sens physique** :

- en radiatif, les flux thermiques vont exclusivement du plus chaud au plus froid : pour réchauffer la surface terrestre, il faudrait donc que les "gaz à effet de serre" de l'atmosphère soient à une température supérieure à celle du sol, et donc que :
 - . soit l'atmosphère qui contient ces gaz soit elle-même à une température supérieure à celle de la surface terrestre, ce qui n'est factuellement pas le cas (la basse atmosphère est en moyenne à la température de surface terrestre, et la haute atmosphère est plus froide 'on verra plus loin pourquoi),
 - . soit que ces gaz, considérés comme isolés, soient eux-mêmes à une température supérieure à celle de l'atmosphère qui les contient, température qu'ils auraient acquise par accumulation du rayonnement reçu du sol : mais on voit mal comment les "gaz à effet de serre" pourraient avoir une température supérieure à l'atmosphère qui les contient.
- par ailleurs, si ces gaz sont opaques aux infra-rouges (épaisseur optique > 1), ils le sont dans les deux sens : s'ils les bloquent à la montée, ils les bloquent nécessairement à la redescente : ils ne peuvent pas rayonner au travers de leur propre opacité (car si l'on suit cette théorie, en ce qui nous concerne, le "verre" n'est pas au dessus de nous : nous sommes dedans) ;
- en admettant même qu'il fonctionne : à chaque rebond on perd plus de la moitié du rayonnement, qui s'en va vers le cosmos ; or, la série $1 + 1/2 + 1/4 + \dots$ est convergente à 2 : on ne peut pas, mathématiquement, plus que doubler le rayonnement initial, ce qui nous amènerait, dans le meilleur des cas, à $161 \times 2 = 322 \text{ W/m}^2$, ce qui est encore insuffisant pour justifier les 15°C (avec une absorptivité de 0,9, il faut 350 W/m^2).

- enfin, même une serre conventionnelle ne fonctionne pas de cette façon, mais essentiellement par confinement de la convection et de l'évaporation, quel que soit le matériau du "verre" : des expériences répétées l'ont prouvé : Wood (1909), Nasif Nahle (2011).

Mais, même si on fait abstraction de cette représentation un peu caricaturale, Gerlich et Tschuschner ont dénombré une dizaine de définitions différentes de l'Effet de Serre atmosphérique invoquées par les scientifiques "climatologues", au point qu'on ne sait plus de quoi on parle, ni sur laquelle de ces théories s'appuient les "Modèles" auxquels "scientifiques", politiques, et médias se réfèrent pour nous convaincre.

Bref, à ce stade, nous allons faire une pause dans la démarche, tout en considérant qu'il existe un processus qui permet de réchauffer la surface de la Terre jusqu'à une moyenne de 15°C ou 288K. Nous expliquerons ce processus au milieu du chapitre 8.

Mais, auparavant, il nous faut parler du Gradient Thermique Gravitationnel.

7. Le Gradient Thermique Gravitationnel (Lapse Rate en anglais)

Même si vous n'en connaissez pas le nom, vous le connaissez : c'est ce qui fait que plus vous montez en altitude, plus il fait froid, et, inversement, plus vous descendez, plus il fait chaud.

7.1. La théorie physique (en air sec)

Tout le monde a fait l'expérience, en gonflant son vélo, de l'échauffement de la pompe, au fur et à mesure que la pression augmente : cela correspond à une transformation de l'énergie musculaire en chaleur : qu'il s'agisse d'énergie ou de chaleur, on peut d'ailleurs les exprimer dans la même unité physique (le Joule).

De même lorsque vous nettoyez votre PC à l'aide d'une bombe à air comprimé, vous constatez que l'air qui s'échappe de la bombe est glacial et que votre bombe se refroidit : c'est le phénomène inverse.

Chaque m² de Terre reçoit, du fait de la gravité, le poids de 10 tonnes d'atmosphère (1 kg/cm²).

Mais la répartition de ces 10 tonnes n'est pas uniforme en fonction de l'altitude, car l'air est un corps compressible, et est donc moins dense en altitude, qu'au sol où il est comprimé sous son propre poids.

La troposphère est le siège permanent de ces phénomènes de compression/détente, liés aux courants de Convection, entre la tropopause (0,1 à 0,3 bar), et la surface terrestre à 1 bar, et inversement, qui se traduisent par une température plus élevée au sol où la pression est 3 à 10 fois celle de la tropopause (selon l'altitude de la Tropopause).

La loi de Laplace (compression et détente adiabatique) s'énonce : $PV^\gamma = Cte$

$$\Rightarrow V^\gamma dP + \gamma P V^{\gamma-1} dV = 0$$

$$\Rightarrow V dP = -\gamma P dV \quad (1)$$

$\gamma = C_p / C_v$ avec (pour l'air) :

C_p = Chaleur spécifique à pression constante (1005 J/(kg.K) pour l'air),

C_v = Chaleur spécifique à volume constant (717 J/(kg.K) pour l'air).

La Loi des gaz parfaits s'exprime : $PV = RT$ (avec $R = C_p - C_v$)

$$\Rightarrow P dV + V dP = R dT = (C_p - C_v) dT$$

$$\Rightarrow (\text{en reportant l'équation (1)}) \quad P dV - \gamma P dV = (C_p - C_v) dT$$

$$\Rightarrow (1 - \gamma) P dV = (C_p - C_v) dT$$

$$\Rightarrow (1 - C_p/C_v) P dV = (C_p - C_v) dT$$

$$\Rightarrow C_v dT = -P dV$$

Donc, pour une masse m d'air (occupant un volume V :

$$\gamma P dV = (C_p/C_v) P dV = -m C_p dT$$

Et en reportant l'équation (1) :

$$V dP = m C_p dT$$

Et par ailleurs, en fonction de l'altitude : $dP = -\rho g dz$ avec densité $\rho = m/V$; donc $V dP = -m g dz$

Et donc :

$$dT / dz = -g / C_p = -9,8 \text{ °C/km}$$

En atmosphère sèche, la température diminue de 9,8°C tous les km d'altitude

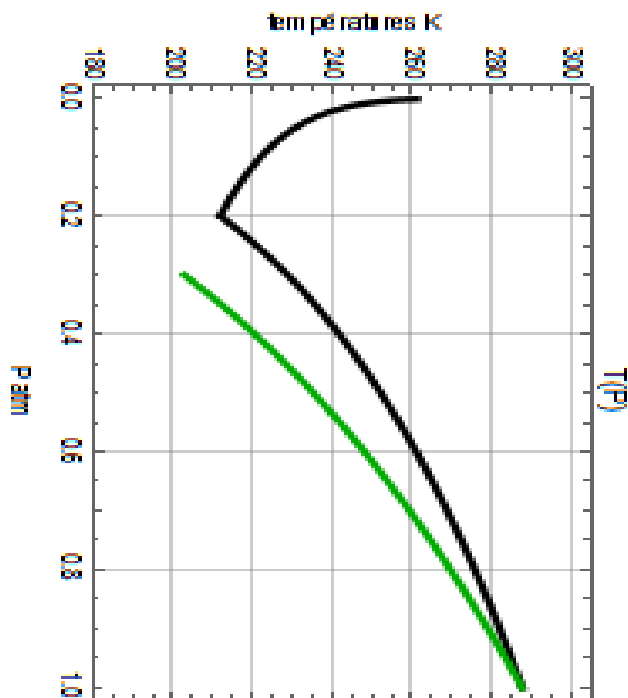
Nota : si on exprime l'altitude en Pression atmosphérique, on peut aussi exprimer le Gradient Thermique Gravitationnel selon la formule : $T = T_{sol} P^{0,19}$ (avec P en atm., T en K).

7.2. En pratique, en atmosphère humide (cas général sur Terre)

Dans la réalité, du fait de la condensation de l'humidité de l'air, d'une part, qui restitue progressivement en altitude de la chaleur latente de condensation, et d'autre part du réchauffement de l'atmosphère dû à l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau qu'elle contient, et par les nuages, le dénominateur est corrigé d'une valeur (négative) C_h , et la formule devient :

$$dT / dz = -g / (C_p - C_h) = -6,5 \text{ °C/km}$$

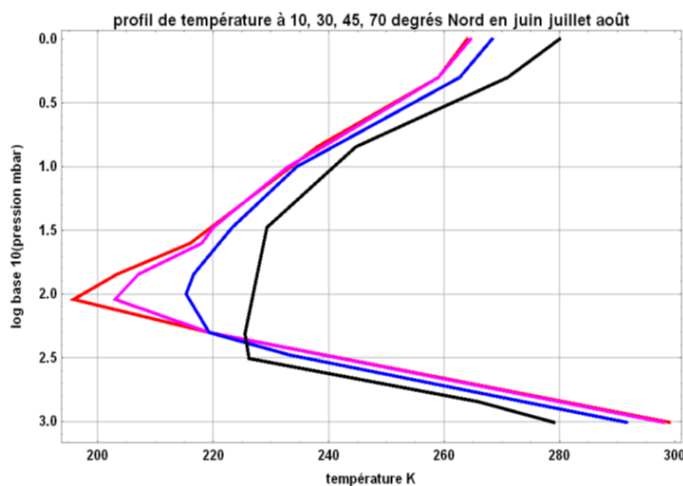
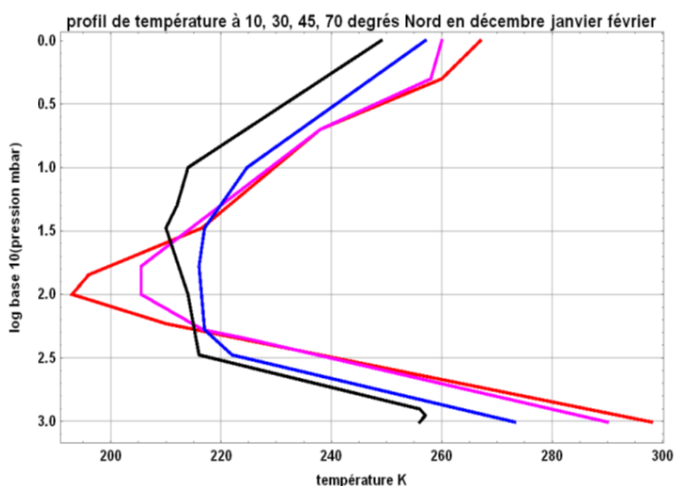
$$(C_h = -509 \text{ J/kg/K})$$



Le gradient est moins important (voir courbe noire (vs verte)) :

Ce Gradient Thermique Gravitationnel est bien connu des alpinistes et surtout des aviateurs : la valeur de **-6,5 °C/km** a été normalisée par l'aviation civile, pour calculer les risques de givrage en altitude.

Ce gradient est parfaitement vérifié, dans la troposphère, par les ballons sondes, jusqu'à la tropopause (où intervient la discontinuité qui la définit) ; en effet, le Gradient Thermique Gravitationnel nécessite que la convection soit possible (c'est le moteur) ; il n'y a pas de convection dans la stratosphère (qui est en inversion de température).



L'ordonnée est exprimée en logarithme de la pression en mb : 3 correspond à 1000 mb (ou 1 atm), soit le niveau du sol, 2 correspond à 100 mb (ou 0,1 atm), soit une altitude de 16 km (altitude de la tropopause en zone intertropicale).

Plus l'air est humide plus la valeur absolue du Gradient diminue : par exemple, dans un nuage, il peut tomber à 5°C/km.

Ex. 1 : en zone intertropicale, en moyenne :

- Sol : 24°C
- Tropopause : 24°C - 6,5 x 16 = -80°C à 16 km d'altitude

Ex. 2 : en zone tempérée, en moyenne :

- Sol : 15°C
- Tropopause : 15°C - 6,5°C/km x 12km = -63°C à 12 km d'altitude (en moyenne)

7.3. Nota : le cas de Venus

On cite souvent Vénus comme exemple de l'Effet de Serre Atmosphérique, avec sa température au sol de 470°C, et son atmosphère dense (92 bars en surface) et essentiellement composée de CO₂ (95%) ; les missions Venera de Venera 1 (1961) à Venera 14 (1981) et les ballons Vega (1984, 1986) ont montré que le flux solaire en surface est négligeable (30 W/m² sur la face éclairée) ; le flux solaire est en effet absorbé et pour l'essentiel rétrodiffusé par des couches de poussières et d'aérosols vers 60 km d'altitude, où règnent des vents violents (300 à 600 km/h) qui égalisent la température de rayonnement de ces couches.

La masse de l'air de Vénus est de mille tonnes par m², cent fois la masse de l'air terrestre.

(Sur Terre les carbonates au fond des océans et dans le manteau sont, en quantité de carbone, comparables au carbone du CO₂ de l'air de Vénus, resté dans l'air faute d'océan)

Mais ce même Gradient Thermique Gravitationnel existe dans la troposphère de **Venus**, mais à 8°C/km au lieu de 10°C/km en air sec, du fait de :

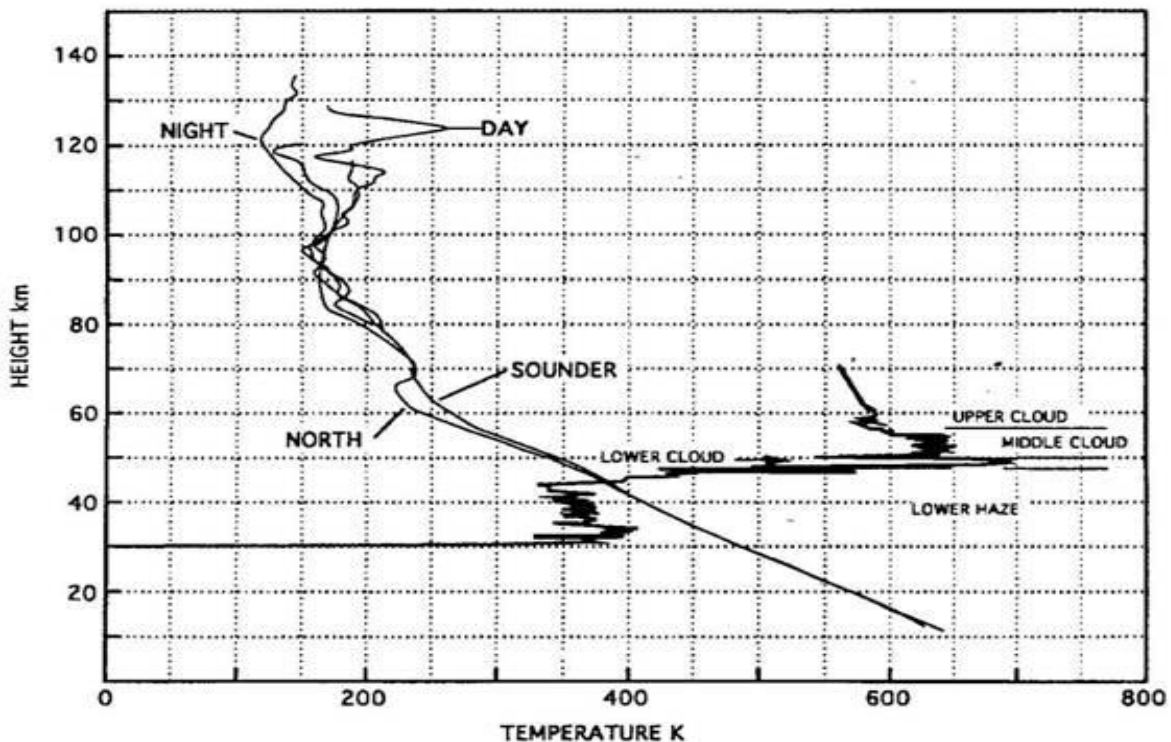
- g = accélération de la pesanteur = 8,87 m/s² pour Venus
- C_p = capacité calorifique = 850 J/kg.K pour le CO₂
- C_h = - 300 J/kg.K

$$dT / dz = - g / (C_p - C_h) = - 8 \text{ °C/km}$$

(on passe de 735K à 230K en 63km (de 92 bar à 0,1bar)

Les nuages, situés à une altitude comprise entre 45 et 70 km, sont constitués de fines gouttelettes d'acide sulfurique en solution aqueuse, constituées à 75% d'acide sulfurique (H₂SO₄) et à 25% d'eau (H₂O). Leur diamètre varie entre quelques dixièmes de mm et dix mm (1 mm = 10⁻³ m). La basse atmosphère de Vénus ne reçoit pas la lumière du soleil aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm. A peine 5% de la lumière visible du soleil atteint la surface.

La figure ci-dessous montre la variation de la température de l'atmosphère de Vénus en fonction de l'altitude, obtenue in situ lors de la descente dans l'atmosphère de quatre sondes automatiques lors de la mission Pioneer-Vénus en 1979 (traits continus).



La température du sol de Venus n'a rien à voir avec un "effet de serre" dû au CO₂ !

7.4. Incidences du Gradient Thermique Gravitationnel

Comme son nom l'indique, le Gradient Thermique Gravitationnel détermine la température de façon différentielle, et non pas de façon absolue : ce n'est donc pas lui qui fixe la température au sol ou à la tropopause ; par contre il fixe l'une en fonction de l'autre, sans qu'on puisse dire, à ce stade, laquelle est la poule et laquelle est l'œuf.

Le Gradient Thermique Gravitationnel nie complètement l'influence du CO₂ et son fameux "effet de serre", car, si on fait abstraction des chaleurs latentes de transformations physiques de l'eau, il est uniquement dû au poids et à la compressibilité de l'atmosphère.

Mais il a une autre incidence, sur le rayonnement émis par la Terre, qui va nous intéresser plus loin : plus ce rayonnement est libéré haut (parce qu'empêché plus bas par l'opacité), plus sa source est froide, et donc moins il est puissant (d'après la Loi de Planck). On dira pour simplifier : "plus haut, plus froid".

Enfin, il a une dernière incidence : c'est ce Gradient qui fixe, par température interposée (loi de Clausius-Clapeyron), la concentration maximale (pression de vapeur saturante) de la vapeur d'eau en fonction de l'altitude.

8. Retour sur Terre : restitution de l'énergie radiative solaire reçue

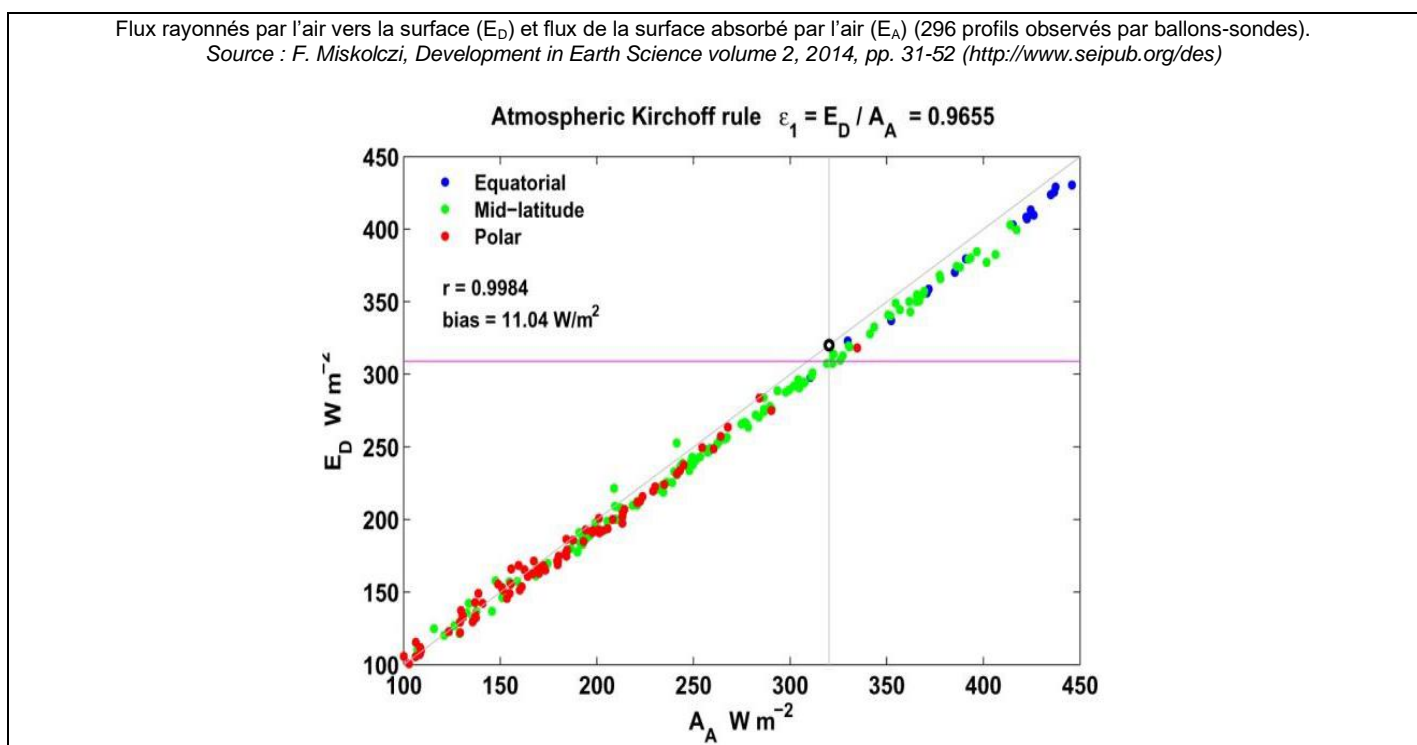
Pour équilibrer son bilan énergétique (équilibre sans lequel elle s'échaufferait indéfiniment), la Terre doit restituer l'énergie qu'elle a reçue, à savoir :

- **161 W/m² au niveau du sol**, pour éviter que le sol ne se réchauffe indéfiniment,
- **240 W/m² en haut de l'atmosphère** (Top Of Atmosphere : TOA) (déduction faite de l'albédo qui ne fait qu'entrer et sortir), pour éviter que l'atmosphère ne se réchauffe indéfiniment, ce qui aurait pour effet indirect, de réchauffer le sol (via le Gradient Thermique Gravitationnel).

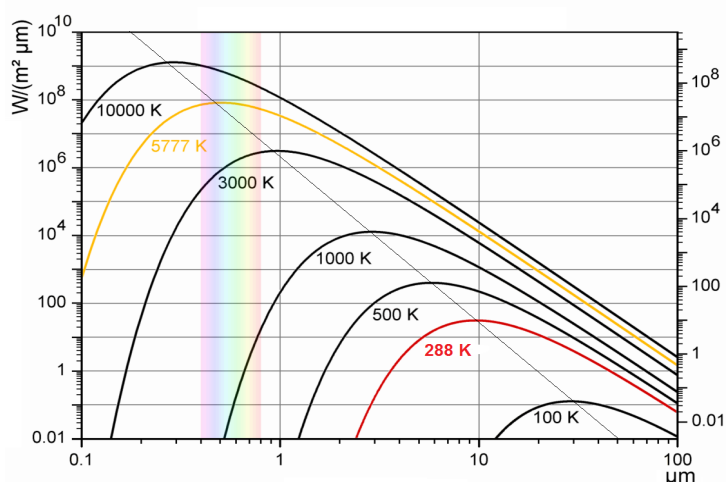
8.1. Au niveau de la surface : 161 W/m² (en moyenne journalière)

8.1.1. Généralités

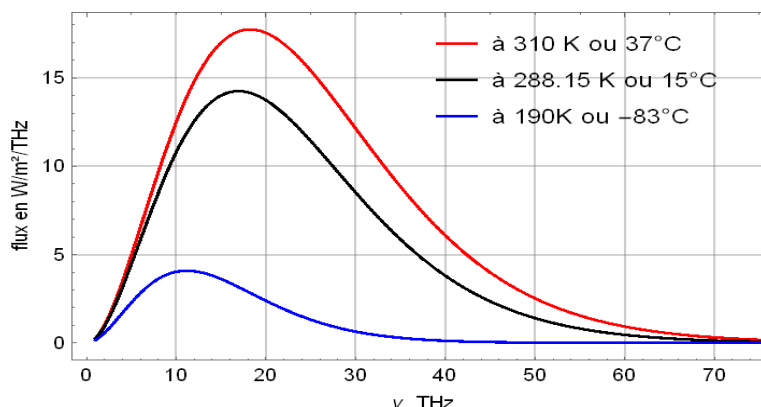
Du fait de la convection, et du stockage transitoire de chaleur par les premiers centimètres ou décimètres des océans et du sol, le jour, **la surface et la basse atmosphère sont en moyenne à la même température (15°C en moyenne mondiale, même si, sur de courtes périodes il y a des écarts, dans l'un ou l'autre sens de quelques degrés par exemple entre le jour et la nuit) ; la surface et la basse atmosphère n'échangent donc, en moyenne sur 24 heures, quasiment pas de chaleur par rayonnement**, et, du point de vue de la température, on peut donc parler indifféremment de l'un comme de l'autre.



La surface de la Terre, qui se trouve en moyenne à 15°C (288K), rayonne donc (en moyenne) à cette température, selon la courbe rouge 288 K ci-dessous :



Mais, pour ce chapitre et les suivants, qui concernent les infra-rouges thermiques "terrestres" (c'est-à-dire les températures inférieures à 288 K), nous raisonnerons en fréquences, et non plus en longueurs d'ondes. Ainsi, une fréquence de 1000 cm^{-1} (soit 30 THz) correspond à une longueur d'onde de $10 \text{ }\mu\text{m}$. L'échelle horizontale est alors inversée, et les maxima des courbes ne se correspondent pas, du fait d'un Flux exprimé aussi en unités inverses.



Si l'atmosphère était un milieu transparent en infrarouge thermique, la **surface** à $T = 288 \text{ K}$ (15°C) avec une émissivité ϵ de 0,9 rayonnerait directement $M = 350 \text{ W/m}^2$ (en application de la Loi de Stefan Boltzmann $M = \epsilon \sigma T^4$) vers le cosmos à 0 K .

Mais ce n'est le cas que dans une bande limitée de fréquences, où l'atmosphère est un peu transparente aux infra-rouges thermiques alors qu'elle est totalement opaque ailleurs.

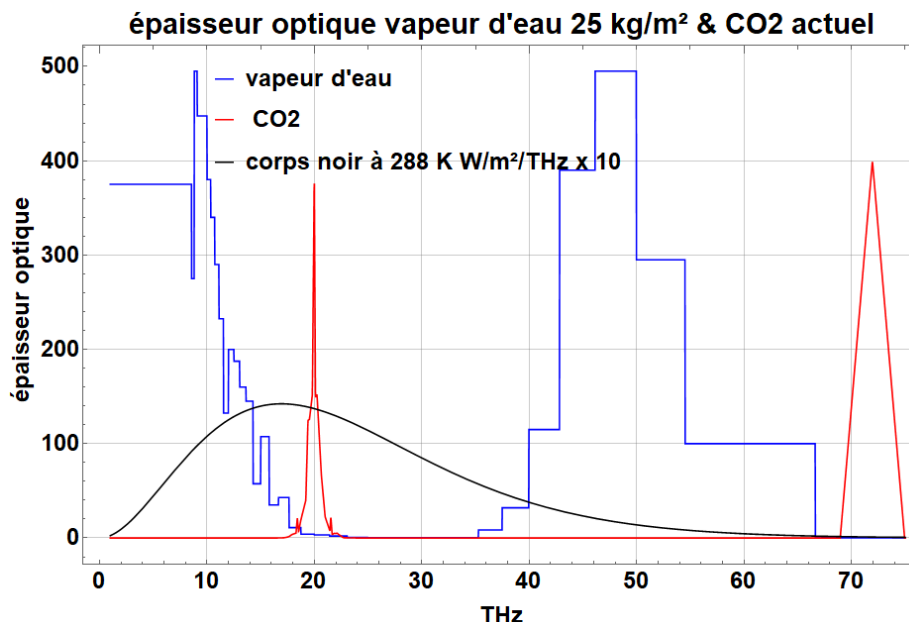
8.1.2. Transferts de chaleur par rayonnement direct à partir du sol : la "fenêtre atmosphérique"

Le graphe ci-dessous traduit l'opacité de l'atmosphère aux infra-rouges terrestres en épaisseur optique, au niveau du sol, entre $4 \text{ }\mu\text{m}$ de longueur d'onde (2500 cm^{-1} en fréquence) et les fréquences radio (10 cm^{-1} ou $0,3 \text{ THz}$), c'est-à-dire globalement sur tout le spectre infra-rouge d'émission de la surface terrestre.

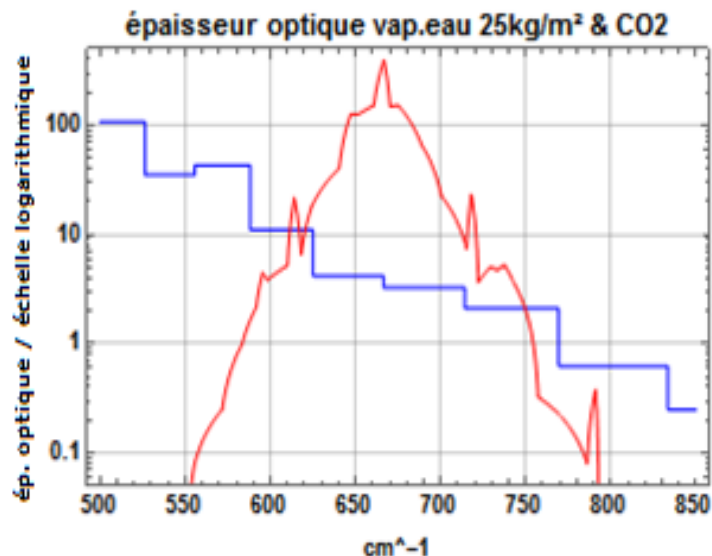
La courbe noire figure l'émission de corps noir à 15°C (288K), c'est-à-dire, en moyenne, au niveau du sol : elle est le pendant en $\text{W/m}^2/\text{THz} \times 10$ (et échelle inversée) de la courbe noire ci-dessus.

Les courbes bleue et rouge figurent respectivement l'épaisseur optique de l'atmosphère dans les bandes d'absorption respectives de la vapeur d'eau et du CO_2 qu'elle contient (données issues respectivement des travaux de Kondratiev et de Petschauer : voir l'Annexe A6).

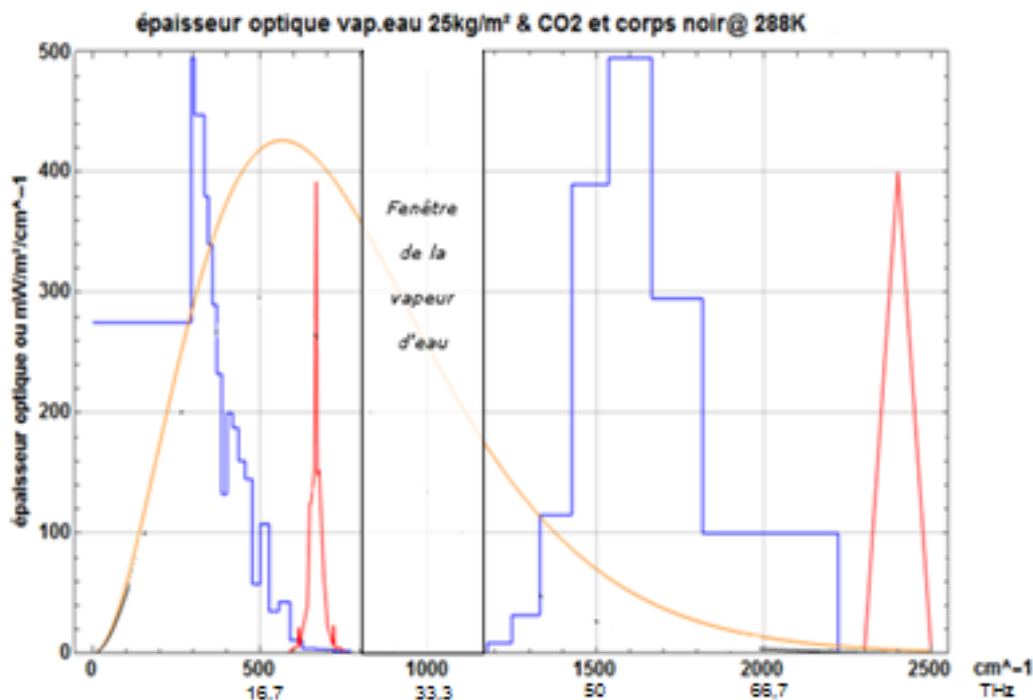
L'épaisseur optique de l'atmosphère est calculable raie par raie d'émission, et corroborée de façon assez précise par les satellites et par les ballons sondes (aux différentes longueurs d'ondes, et aux différentes altitudes). A certaines longueurs d'ondes, elle vaut plusieurs centaines, alors qu'une épaisseur optique de 2 bloque déjà 94% des rayonnements (l'atmosphère y est donc très très opaque).



Le graphe ci-dessous zoome sur la bande d'absorption du CO₂ aux alentours de 20 THz avec une échelle verticale logarithmique : les épaisseurs optiques s'ajoutant, on peut considérer que l'atmosphère est totalement opaque, sauf entre 23 et 35 THz (ou entre 800 et 1150 cm⁻¹) : épaisseur optique de l'ordre de 0,5. (Rappelons qu'une épaisseur optique de 1 bloque déjà 80% du rayonnement).

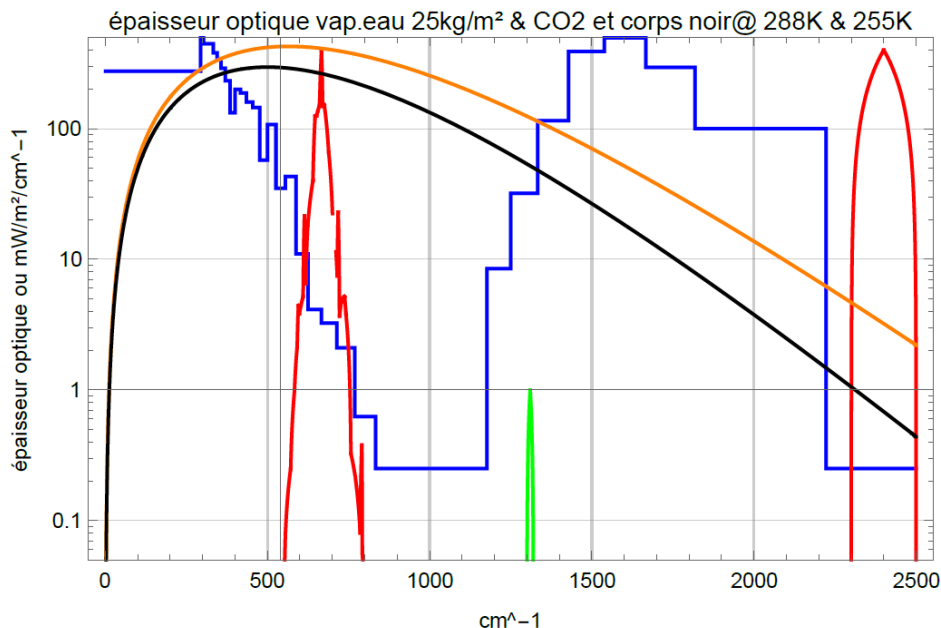


On appelle cette bande de transparence (entre 23 THz et 36 THz ou entre 750 et 1 170 cm⁻¹ ou entre 8,5 μm et 13,3 μm) la "fenêtre atmosphérique" ou "fenêtre de la vapeur d'eau" : c'est la seule bande de fréquences dans laquelle la surface terrestre peut rayonner directement vers le cosmos : ailleurs, l'atmosphère, totalement opaque, bloque et absorbe tout rayonnement direct du sol au cosmos.



Épaisseur optique vapeur d'eau (25 kg/m²) & CO₂, et radiance corps noir à 288 K (W/m²/cm⁻¹)

En fait, cette fenêtre n'est d'ailleurs pas totalement transparente : le "continuum" d'absorption de la vapeur d'eau y maintient une épaisseur optique comprise entre 0,5 et 1 (visible si on prend une échelle verticale logarithmique) :



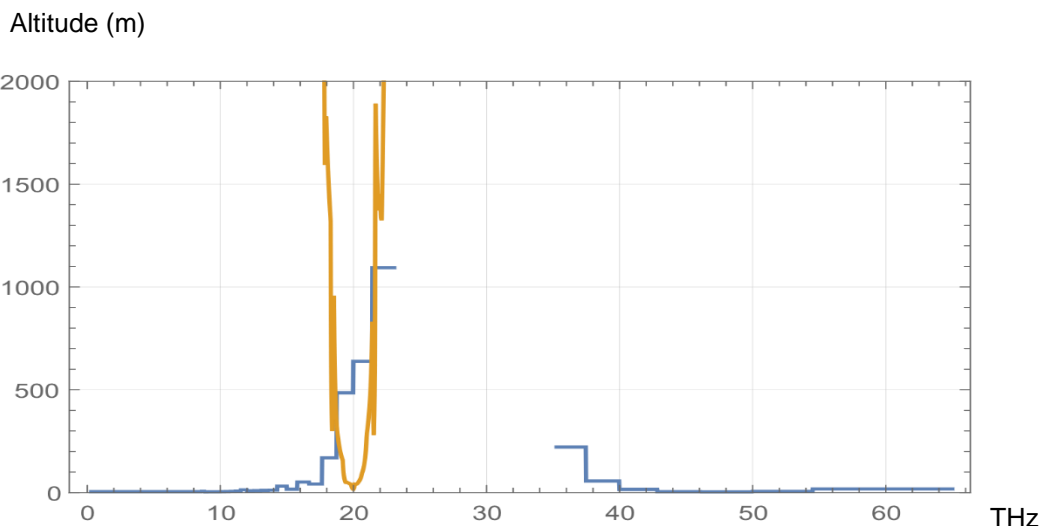
A l'intérieur de cette "fenêtre atmosphérique", soit entre 23 et 35 THz ou 750 et 1170 cm⁻¹, si on raisonne de façon statistique (zone sèche ou humide, ciel clair ou couvert, ...) :

- il est généralement admis que la surface terrestre rayonnerait (à 15°C ou 288 K) environ 110 W/m² vers le cosmos (à 0 K), par ciel clair (épaisseur optique = 0), s'il n'y avait pas ce continuum de la vapeur d'eau ni les nuages ;
- mais dans ce continuum, la vapeur d'eau, avec une épaisseur optique moyenne de 0,5, en bloque la plus grande partie à basse altitude ;
- et, sur ce qui franchit la vapeur d'eau, les nuages en bloquent (statistiquement) 60% (selon qu'ils sont présents ou pas), à environ 2 ou 3 km d'altitude (soit 13 à 20°C de moins que la surface du sol, soit environ 20 W/m² de transfert de chaleur du sol vers l'atmosphère).

En moyenne et en fonction des nuages l'épaisseur optique est égale à 1, et la surface terrestre, à 15°C, rayonne donc :

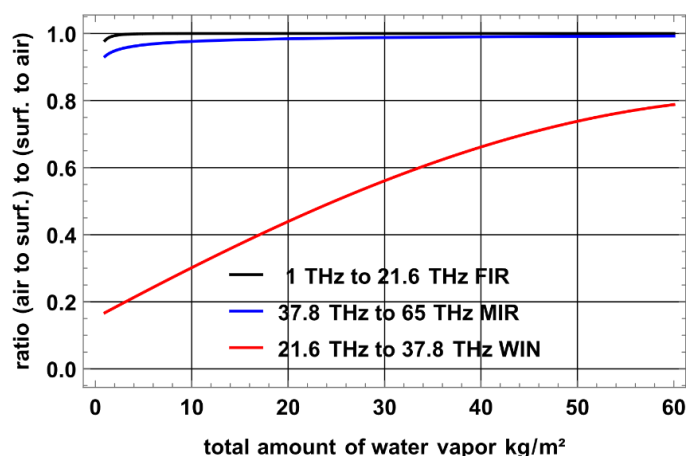
- directement 22 W/m² vers le cosmos,
- et environ 20 W/m² vers l'atmosphère (vapeur d'eau ou nuages).

Mais **en dehors de cette "fenêtre atmosphérique"**, la Terre, au niveau du sol, **ne peut pas évacuer sa chaleur par rayonnement**, puisque **l'atmosphère est totalement opaque** dès quelques mètres ou dizaines de mètres d'altitude (épaisseur optique supérieure à 1). Le graphe ci-dessous montre en effet l'altitude à laquelle le rayonnement terrestre est bloqué (épaisseur optique égale à 1).



Or, le flux thermique est proportionnel à la différence de T^4 entre l'émetteur (la surface du sol) et le récepteur (le gaz opaque, donc l'atmosphère), et cette différence ne repose que sur le Gradient Thermique Gravitationnel, soit quelques petites fractions de °C : en dehors de la Fenêtre Atmosphérique, le transfert de chaleur est totalement négligeable.

Pour le dire autrement, la graphie ci-dessous montre la fraction de rayonnement terrestre bloquée par l'atmosphère, dans les 3 gammes de fréquence, en fonction de la concentration en vapeur d'eau de l'air :



FIR : Far Infrared : moins de 721 cm^{-1}
 WIN : Window Infrared : fenêtre atmosphérique
 MIR : Mid Infrared 1300 à 2500 cm^{-1}

Pour conclure :

La Terre, au niveau de sa surface, est en **déséquilibre radiatif** : elle reçoit 161 W/m^2 , et ne peut en renvoyer que 42.

Si on ne considère que le radiatif, sa surface ne peut donc que s'échauffer.

Et si aucun autre phénomène n'intervenait, il faudrait, pour s'équilibrer, qu'elle s'échauffe jusqu'à ce que ces 42 W/m^2 en deviennent 161, ce qui revient à quadrupler ce flux, ou à multiplier la température par $\sqrt[4]{4} = 1,4$, ce qui nécessiterait une température moyenne de $288 \times 1,4 = 403 \text{ K}$ ou 130°C , au lieu de 15°C .

Heureusement, **elle a deux autres moyens que le rayonnement pour compenser ce déséquilibre ... et réguler sa température :**

- la convection.
- l'évaporation,

8.1.3. Transferts de chaleur par évaporation et précipitations

Les océans sont au cœur du système ; en effet :

- ils reçoivent, comme le reste de la surface terrestre, 161 W/m^2 (en fait même un peu plus, du fait de leur albédo faible), et les absorbent en quasi-totalité en surface sur quelques décimètres d'épaisseur ;
- la température du premier mètre devrait alors augmenter de plus de 3°C par jour (capacité calorifique = $4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$) ;
- comme on vient de le voir, ils ne peuvent réémettre qu'une petite partie de cette énergie par rayonnement, au travers de la fenêtre atmosphérique ;
- ils ne peuvent pas non plus se refroidir par mélange avec les couches plus profondes, car, chauffés par le haut, ils sont en inversion de température (et ce serait de toutes façons reculer pour mieux sauter).

Les océans (et les sols humides et la végétation) utilisent alors une stratégie totalement différente pour stabiliser leur température : **l'évaporation**, ... jusqu'à arriver à un équilibre avec l'air qui les recouvre, ce qui maintient un petit écart de température : en quelque sorte, c'est l'air qui refroidit les océans (et non pas le contraire).

Les changements d'état physique (fusion<>congélation ou vaporisation<>condensation) font intervenir la "**Chaleur latente**" de changement d'état, définie (en Joules) comme l'énergie nécessaire au changement d'état d'un kg de matière.

Compte tenu de l'abondance de l'eau à la surface de la Terre (les océans en occupent 71%) et dans l'atmosphère (en moyenne 25 à 30 kg/m²), ce processus y est très significatif : L'eau consomme en effet **590 fois plus** d'énergie pour se vaporiser (ou s'évaporer), que pour s'élever de 1°C. Et toute cette énergie est restituée lors de sa condensation en nuages, puis en pluie, voire en neige, en altitude.

... car il n'y a pas de pluie qui n'ait été précédée d'une évaporation.

Par ailleurs, plus il fait chaud, plus l'eau s'évapore, à raison de + 7% par °C dans les conditions moyennes terrestres (Loi de Dalton de l'évaporation).

On évalue l'évaporation à la surface de la terre à 502800 km³ d'eau par an (océans) (selon <http://www.planetoscope.com/atmosphere/117-evaporation-de-l-eau-des-océans-dans-l-atmosphere.html>) (495 000 selon <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Water/page2.php>) dont 74 200 km³/an (surfaces terrestres : lacs, forêts, plantes, ...), **disons 500 000 km³/an, soit 15,84 x 10⁹ kg/s.**

La chaleur latente de vaporisation de l'eau (énergie nécessaire) à 15°C est de 2,470 x 10⁶ J/kg

Donc cette évaporation consomme 2,470 x 15,84 x 10¹⁵ = 39,1 x 10¹⁵ W

La surface de la Terre est de 510 000 000 km², soit 510 x 10¹² m²

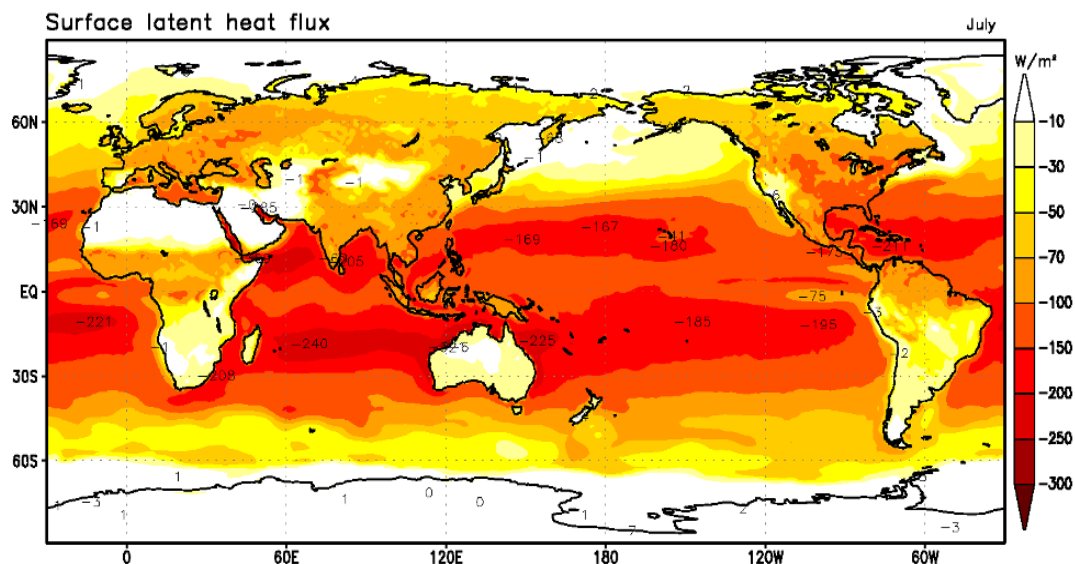
Donc, l'évaporation à la surface de la Terre consomme en moyenne 39 100 / 510 = 76,7 W/m², ce qui correspond à environ 1 m de pluie par an en moyenne.

Ces chiffres ont été récemment revus à la hausse (près de 10%), en particulier sur les océans (observations satellites et augmentation de l'évaporation liée à l'élévation de température : 7% par °C comme on l'a vu plus haut), et il faut aussi tenir compte du fait qu'une partie des précipitations (disons 20%) se fait sous forme de neige, soit avec 15% de chaleur latente en plus.

Au total, on peut donc considérer que ce sont environ 87 W/m² qui contournent l'opacité de la basse atmosphère, et sont directement transférés par convection (comme par une sorte de caloduc), à une altitude où cette vapeur se condense en nuages en y restituant l'énergie qu'elle contient.

On verra plus loin que cette énergie s'évacue ensuite dans le cosmos par rayonnement, à une altitude où la vapeur d'eau ne fait plus obstacle à son propre rayonnement.

Bien sûr, il s'agit là d'une moyenne : globalement, en fonction de la latitude, cette consommation se répartit entre 0 et 250 W/m² :



8.1.4. Transferts de chaleur par Convection

La surface terrestre chaude, transfère aussi une partie de sa chaleur à l'air qui le balaie : cet air plus léger s'élève, emmenant avec lui la vapeur d'eau évaporée, et va réchauffer la troposphère.

Par déduction, on évalue ce transfert à environ **32 W/m²** (ordre de grandeur en absence de mesure et de calcul précis).

8.1.5. Bilan global et régulation à la surface terrestre

Comme on l'a vu précédemment, déduction faite de l'albédo, et après les prélèvements de l'atmosphère, la surface terrestre reçoit environ **161 W/m²** du soleil.

Par rayonnement, elle ne peut restituer que **42 W/m²** :

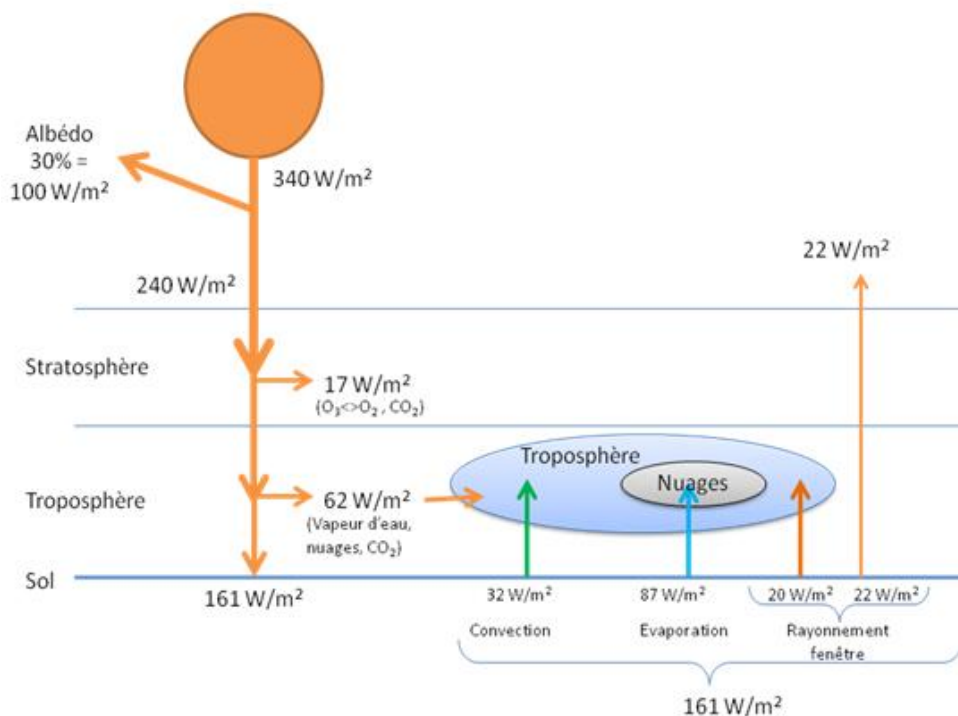
- une partie par rayonnement direct au travers de la "fenêtre atmosphérique", soit **22 W/m²**,
- une partie dans la "fenêtre atmosphérique", mais bloquée par le "continuum" de la vapeur d'eau, soit **20 W/m²**,

Nota : le GIEC fait état plutôt de 56 W/m² au lieu de 42 (qui ressortent d'une étude plus récente), mais le raisonnement reste valable.

Ce déséquilibre radiatif provoque un réchauffement qui entraîne des contre-réactions qui augmentent avec la température, jusqu'à ce qu'elles compensent ce déséquilibre :

- une partie par transfert de chaleur latente d'évaporation des océans et d'évapo-transpiration des plantes, soit environ **87 W/m²**.
- enfin une partie par convection d'air réchauffé à la surface terrestre, soit environ **32 W/m²**.

On verra plus loin que, même si ces chiffres sont contestables (et ils le sont, bien entendu), **ce sont l'évaporation (surtout), et la convection (un peu) qui régulent la température moyenne à la surface de la Terre.**



8.1.6. Nota :

La surface de la Terre, et en particulier des océans, se réchauffe doucement : cela indique que la compensation du déséquilibre n'est pas totale : une partie reste captive.

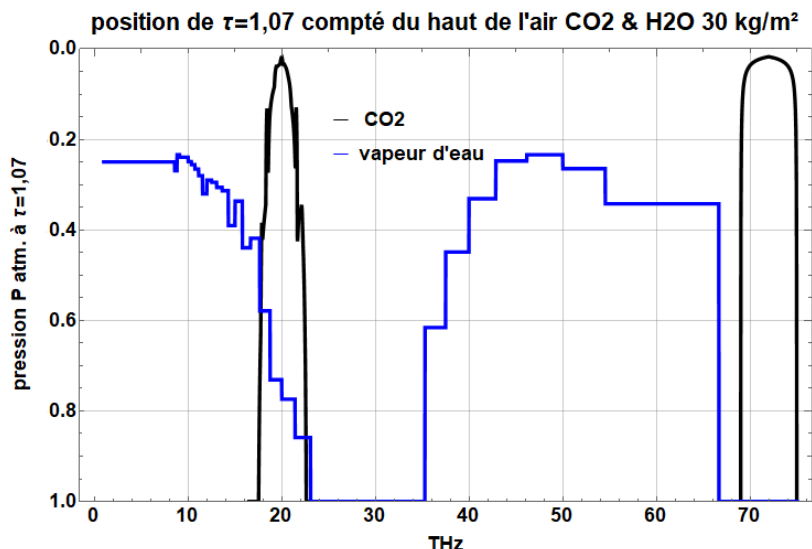
8.2. En haut de l'atmosphère : 240 W/m²

Il ne servirait à rien que le bilan radiatif soit équilibré au sol, et qu'il ne le soit pas en haut de l'atmosphère : en effet, s'il ne l'était pas en haut de l'atmosphère, l'augmentation de température en haut de la troposphère se traduirait au sol, du fait du Gradient Thermique Gravitationnel.

8.2.1. Altitudes de libération

Le graphe ci-dessous donne l'altitude (exprimée en pression atmosphérique) où, l'atmosphère se raréfiant, l'épaisseur optique, vue du cosmos, est égale à 1, altitude à laquelle l'atmosphère commence à rayonner vers le cosmos (en dessous, on peut considérer qu'elle est totalement opaque).

(Pour mémoire, 0,2 atm. correspond à une altitude de 12 km : c'est aussi l'altitude de la tropopause en zone tempérée, à une température moyenne de -60°C ou 213 K).



Toute cette énergie, qui se retrouve dans l'atmosphère (chaleur latente de la vapeur d'eau, rayonnement absorbé à la descente, convection à partir du sol) est progressivement libérée par rayonnement de l'atmosphère en altitude, au fur et à mesure que la fenêtre atmosphérique s'élargit, jusqu'au dessus des nuages, là où la vapeur d'eau est suffisamment raréfiée pour que son épaisseur optique soit inférieure à 1, soit, au maximum :

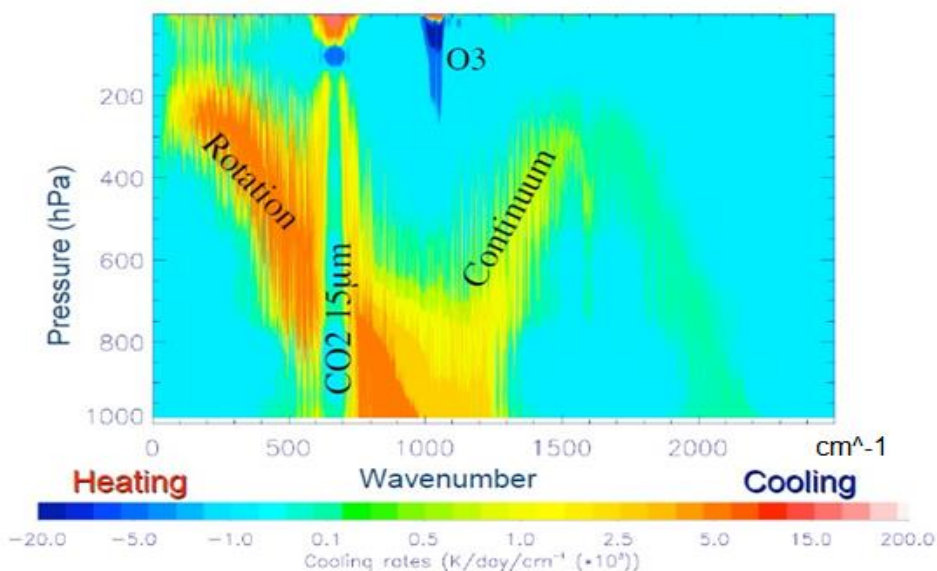
- jusqu'en haut de la troposphère dans les zones chaudes (inter-tropicales) où la tropopause est haute et froide (environ -75°C) (comme on l'a vu au paragraphe sur le Gradient Thermique Gravitationnel),
- jusqu'en bas de la stratosphère dans les zones froides (tempérées et circumpolaires) où la troposphère est basse et chaude (environ -50°C)

... et jusqu'en haut de la Stratosphère dans les fréquences bloquées par le CO_2 , là où le CO_2 (en noir ci-dessus) est suffisamment raréfié pour que son épaisseur optique soit inférieure à 1.

8.2.2. Traduction en réchauffement/refroidissement

Lorsque l'atmosphère rayonne, elle se refroidit ; inversement, lorsqu'elle absorbe du rayonnement, elle se réchauffe.

Le graphe ci-dessous, résultant d'un calcul raie par raie, montre les altitudes (exprimées en pressions atmosphériques) auxquelles la chaleur s'échange, c'est-à-dire où l'atmosphère se refroidit (jaune-rouge) ou s'échauffe (bleu foncé) par rayonnement thermique en fonction de la fréquence de rayonnement (Source : Brindley & Harries 1998 (SPARC 2000)) :



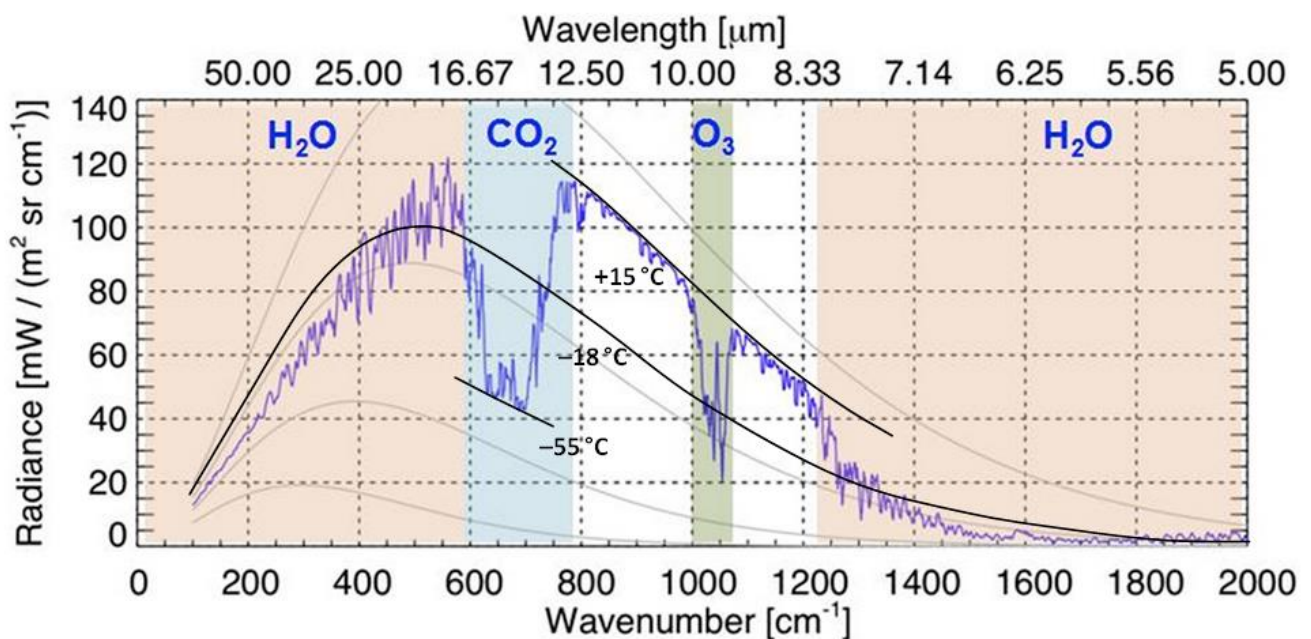
- Dans les zones en bleu ciel, il n'y a aucun échange de chaleur :
 - soit parce que l'atmosphère y est **opaque** (sous les courbes de la vapeur d'eau ou du CO₂ dans le graphe du dessus (épaisseur optique > 1)) : il n'y a pas de transfert d'énergie par rayonnement à l'intérieur d'un corps opaque ;
 - soit au contraire parce que l'atmosphère y est **transparente** (au dessus de ces mêmes courbes) : le rayonnement, d'où qu'il vienne, la traverse librement, sans la réchauffer ;
 - soit parce que le rayonnement y est négligeable (fréquences au delà de 2000 cm⁻¹, où la courbe de rayonnement devient très basse).
- La bande comprise entre 750 et 1170 cm⁻¹ (22,5 à 35,1 THz) correspond à la fenêtre de la vapeur d'eau, où la surface terrestre rayonne dans le continuum : dans cette bande, l'atmosphère se refroidit dès le sol, d'autant plus que le rayonnement y est plus intense (courbe de Planck).
- Les autres zones vermillon et jaunes montrent les altitudes où l'atmosphère rayonne (et donc se refroidit) :
 - au dessus des nuages en ce qui concerne la vapeur d'eau,
 - dans la stratosphère en ce qui concerne le haut du CO₂.
- La zone bleue foncée entre 1000 et 1100 cm⁻¹, correspond à une bande d'absorption du rayonnement de l'ozone du haut de la stratosphère absorbé par l'ozone plus froid de la basse stratosphère ;
- La tâche bleue foncée en haut de la raie du CO₂ (entre 600 et 750 cm⁻¹) correspond à l'absorption par le CO₂ de la tropopause (ici la tropopause tropicale vers 100 millibar ou 100 hecto-Pascal, couche la plus froide de l'atmosphère) du rayonnement du CO₂ des couches plus chaudes en dessous et au-dessus.

8.2.3. Quantification : le spectre OLR (Outgoing Longwave Radiation)

Le Spectre **OLR** (Outgoing Longwave Radiation) de la Terre (graphe ci-dessous) figure la radiance de la Terre, vue du cosmos, en fonction de la fréquence du rayonnement (dans les différentes bandes d'émission) : l'énergie dissipée (en W/m²) est proportionnelle à la surface comprise sous la courbe (ou autrement dit, proportionnelle à l'intégrale de la courbe), la **surface totale correspondant à 240 W/m²**.

Nota 1 : ce graphe est un exemple : selon le lieu et le moment, il peut présenter des valeurs différentes, mais son aspect est toujours le même.

Nota 2 : graphique en W/m²/stéradian/cm⁻¹ multiplier par 3,14 pour passer en W/m² et par la largeur de la bande de fréquence : par exemple le CO₂ stratosphérique fait environ 3,14 x 50 W/m²/sr/cm⁻¹ x 100 cm⁻¹ = 15 W/m²



(Ce spectre est déduit d'un calcul raie par raie ; il est très bien vérifié par les satellites).

Les différentes portions de courbe suivent grossièrement chacune une isotherme (moyenne) correspondant à l'altitude (et donc à la puissance) de rayonnement (radiance) en fonction des différentes bandes d'absorption (ou de rayonnement) :

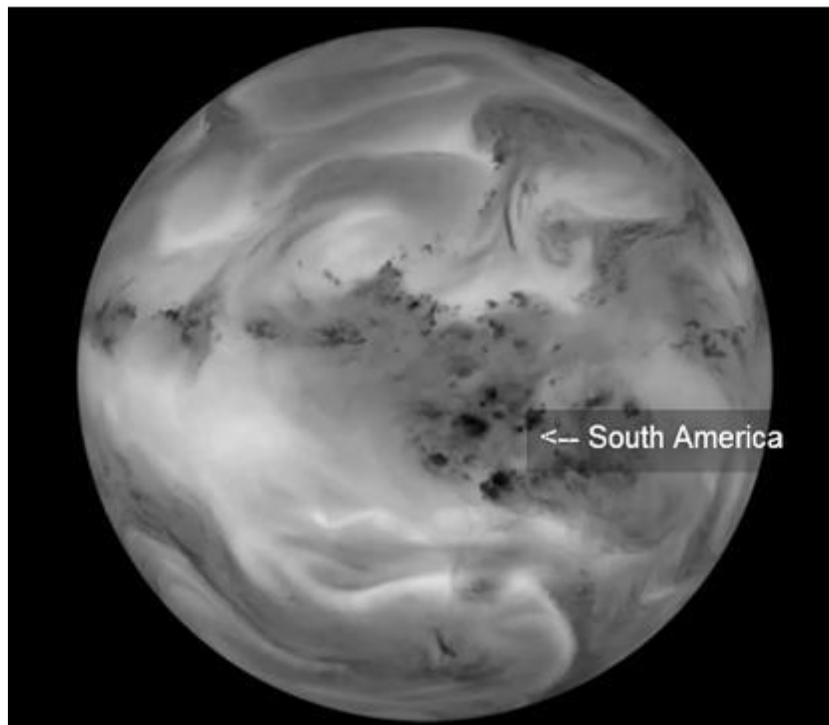
- +15°C (ou 288K) pour le rayonnement direct de la surface terrestre ou de la basse atmosphère (< 2 km) au cosmos (bandes verticales blanches), dans la fenêtre atmosphérique,
- -55°C (ou 228K) pour le rayonnement au niveau de la tropopause (altitude la plus froide, et donc où le rayonnement est le moins puissant) (bande verticale bleue correspondant au CO₂ : on notera le petit redent au centre, dû au fait que le CO₂ rayonne, au milieu de sa bande, dans la stratosphère, qui est plus chaude, ainsi que les deux ergots latéraux, également un peu plus chauds),
- de l'ordre de -18°C (ou 255K) environ, pour le rayonnement :
 - . de la vapeur d'eau à l'altitude moyenne du sommet des nuages (bandes verticales roses) (plutôt -33°C ou 240 K en dessous de 400 cm⁻¹),
 - . mais aussi du sommet de l'ozone (bande d'absorption gris-vert), vers le haut de la stratosphère, où la température est plus élevée qu'à la tropopause.

Le total de l'OLR étant égal à 240 W/m², la Terre les évacue donc vers le cosmos par rayonnement de la façon suivante :

- **17 W/m²** depuis la Stratosphère (bande grise O₃) (la stratosphère a son propre équilibre et restitue ce qu'elle a absorbé),
- **les 22 W/m²** rayonnés directement du sol au cosmos (vus précédemment),
- **190 W/m²** provenant du haut de la vapeur d'eau atmosphérique
 - . une partie dans la bande de la fenêtre atmosphérique (entre 800 et 1200 cm⁻¹), provenant d'assez basse altitude (haut du continuum) à température élevée (bandes blanches),
 - . une partie, à l'extérieur de cette bande, en haut de la vapeur d'eau, donc plus haut, donc plus froid entre 500 millibar et la tropopause, où la vapeur d'eau se condense, voire gèle en restituant la chaleur latente au cosmos sous forme de rayonnement ;
- **10 à 12 W/m²** par le sommet du CO₂ (dans la bande 610-750 cm⁻¹, ou 18 à 22 THz : bande bleue).

(Il s'agit, bien entendu, d'ordres de grandeur, les limites entre bandes n'étant pas franches).

C'est l'ensemble de ces quatre bandes **très différentes** qui font le total de 240 W/m², mais chacune des quatre bandes a sa régulation propre assurée par le mouvement de l'air et le transport de la vapeur d'eau.



Vue infrarouge de la terre (janvier 2015). (les niveaux de gris correspondent aux températures (donc altitudes d'émission vers l'espace. Noir = froid donc haut)

8.2.4. Régulation en haut de l'atmosphère

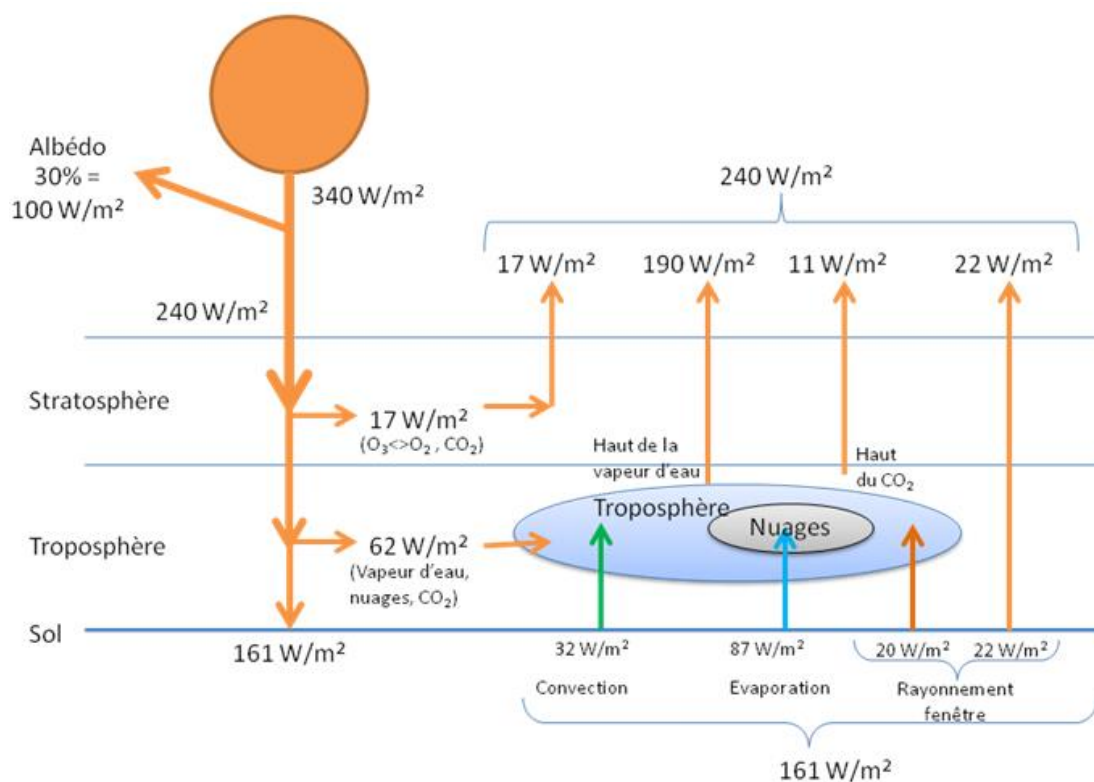
Une grande partie de la vapeur d'eau condensée dans les nuages ne retombe pas jusqu'au sol, se revaporise en dessous des nuages, sous l'effet de l'augmentation de température résultant du Gradient Thermique Gravitationnel, et remonte ensuite, sous l'effet de la convection, en haut des nuages, où elle se recondense ...

On peut ainsi considérer qu'on a 2 cycles de la vapeur d'eau qui se superposent :

- Un cycle « long » entre la surface du sol et le haut des nuages, qui, comme on l'a vu plus haut, régule la température au niveau du sol,
- Un cycle « court », rapide, entre l'atmosphère et le haut des nuages, qui régule la température de l'atmosphère, entre le bas et le haut des nuages, ce cycle s'accélérate si la température augmente.

8.3. Bilan global

On a donc le bilan énergétique global suivant :



9. Et le CO₂ dans tout ça ?

On a vu, dans ce qui précède, que l'influence du CO₂ semble tout-à-fait secondaire :

- il contribue peu à réchauffer la Terre dans le rayonnement issu du Soleil,
- il bloque très peu le rayonnement terrestre vers le cosmos : 11 W/m², soit à peine 5% de l'OLR.

Néanmoins, compte tenu de l'importance que les "climatologues", les médias, et les politiques lui attribuent, on ne peut pas esquiver le sujet.

Deux questions se posent :

1. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente actuellement d'environ 2 ppmv/an : quelle est la part de l'homme dans cette augmentation ? Jusqu'où peut-elle monter ?
2. Quelle serait l'incidence sur la température (et donc le climat) d'un doublement de cette concentration ? C'est en effet une référence du GIEC pour en évaluer la dangerosité.

Au départ, nous souhaitions consacrer un chapitre spécifique au CO₂ et à son cycle pour répondre à la première question.

Mais le sujet s'est révélé trop vaste et complexe pour faire l'objet d'un seul chapitre, et nous avons préféré le traiter dans un ouvrage séparé.

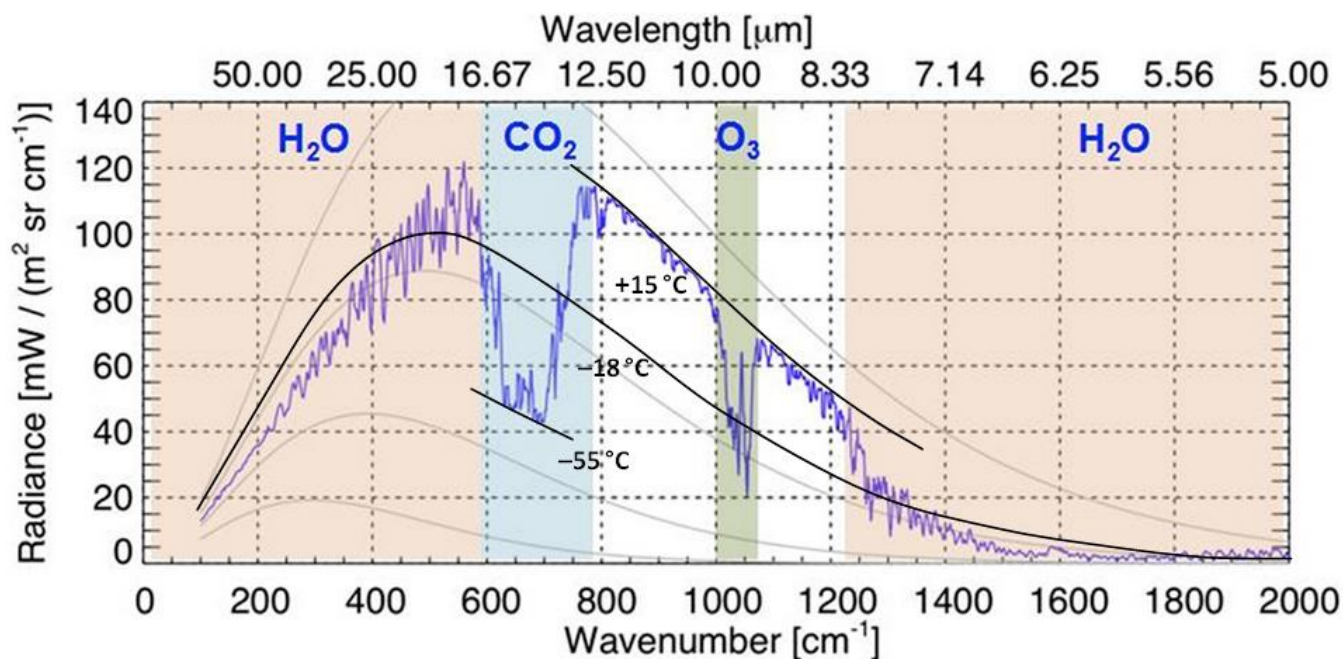
Nous ne traiterons donc ici que de la seconde question, sachant qu'au rythme actuel d'augmentation de 2 ppmv/an, un doublement de concentration prendra 200 ans.

10. La sensibilité climatique au CO₂

Par définition, la sensibilité climatique au CO₂, c'est l'augmentation de température qui résulterait d'un **doublment de la concentration atmosphérique en CO₂**.

10.1. Généralités

Comme on l'a vu, déduction faite de l'albédo, la Terre reçoit en moyenne **240 W/m²**, et les évacue actuellement, pour rester en équilibre, selon le spectre OLR (Outside Longwave Radiation) ci-dessous en exemple :



Si l'albédo ne change pas (et nous ferons abstraction ici d'un tel changement éventuel), **cette valeur de 240 W/m² reste inchangée quelles que soient les modifications atmosphériques de la Terre** : c'est du rayonnement solaire qui doit être rendu au cosmos.

Par contre, la répartition dans ce spectre peut changer, en fonction de la façon :

- dont se redistribuent ces 240 W/m² quand ils traversent l'atmosphère à la descente,
- dont la surface terrestre et l'atmosphère, restituent 240 W/m² au cosmos,
- dont, in fine, s'établit le nouvel équilibre :
 - . au niveau du sol (qui est ce qui nous intéresse au premier chef en tant qu'habitants de la Terre)
 - . mais aussi à chaque altitude remarquable de l'atmosphère, en fonction de ce qui est rayonné à cette altitude.

10.2. Le CO₂ tout seul

Avant d'analyser les autres parties du diagramme OLR, concentrons-nous sur le CO₂ lui-même : dès lors que la concentration en CO₂ double dans l'atmosphère, il se produit deux phénomènes d'absorption :

1. Absorption du rayonnement issu du Soleil,
2. Absorption (ou rétention) du rayonnement infra-rouge terrestre :
 - . en haut de la troposphère,
 - . en bas de la troposphère (près du sol),
 - . en bordure de la Fenêtre Atmosphérique.

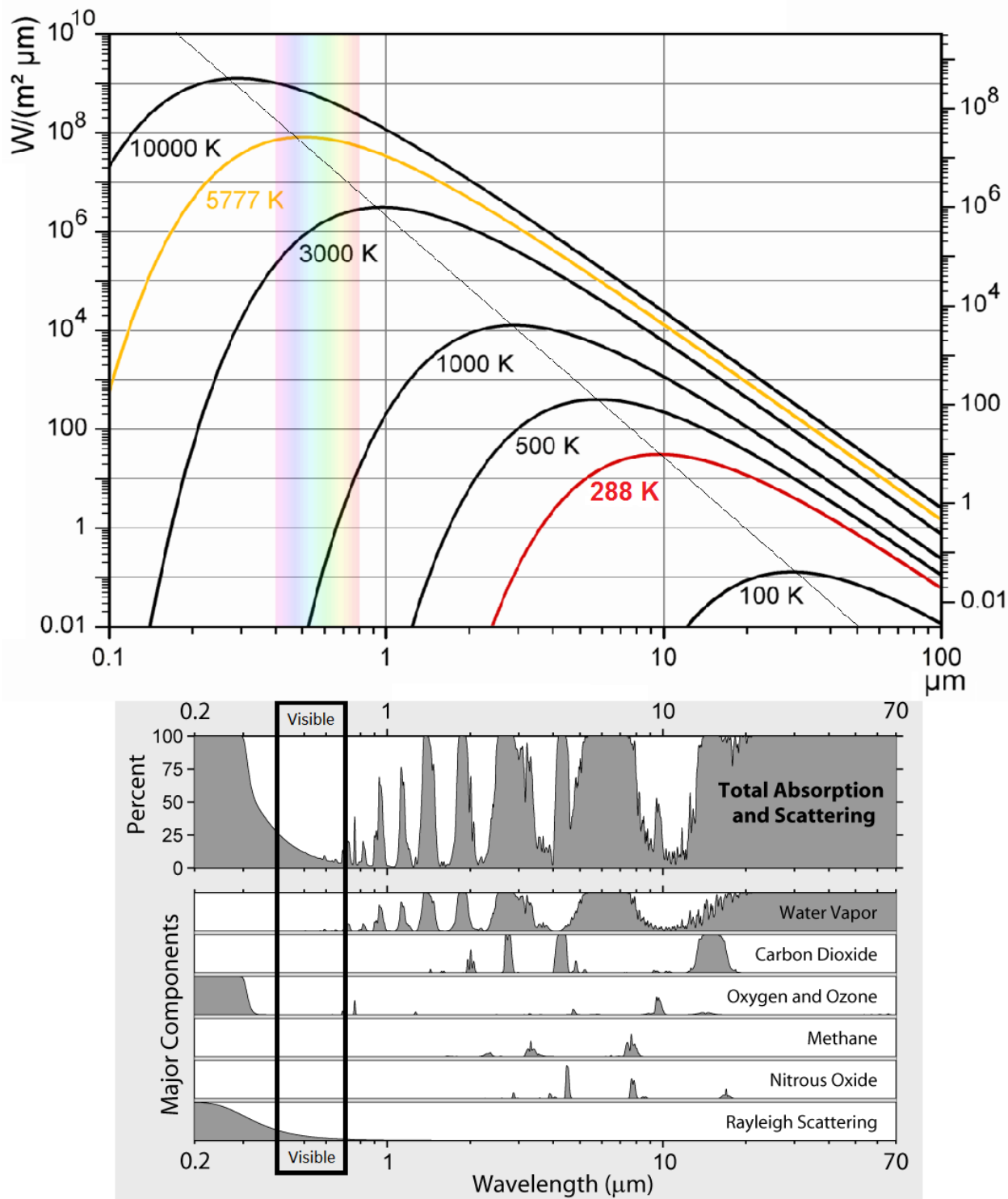
Nous allons analyser ces facteurs successivement :

10.2.1. Impact sur le rayonnement solaire

Les bandes d'absorption du CO₂ situées dans le spectre solaire (courbe jaune 5777 K) (aux alentours de 2, 3, et 5 μm) vont absorber, dans la stratosphère, une part plus importante de son rayonnement, de l'ordre (généralement admis) de **0,4 W/m²** en moyenne journalière, pour un doublement.

Cette absorption va contribuer à réchauffer la stratosphère au lieu de réchauffer la troposphère et la surface.

Et du fait de sa stratification, la stratosphère restituera directement ce supplément par rayonnement

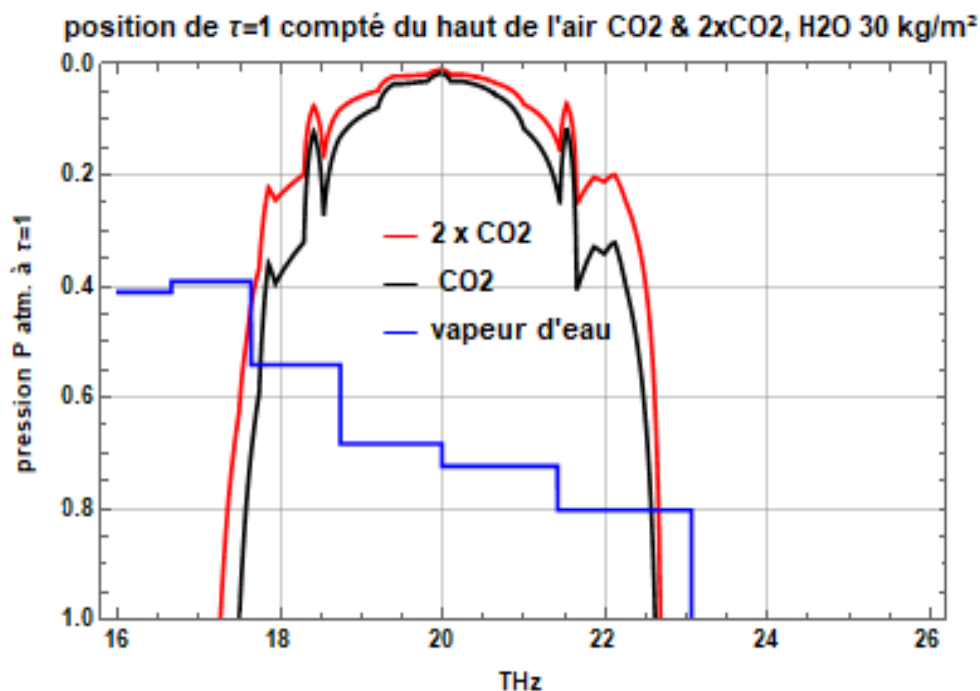


Bilan en rayonnement solaire :

- la stratosphère gagne 0,4 W/m² qu'elle réémet directement
- la troposphère et la surface perdent 0,4 W/m²

10.2.2. Impact sur le rayonnement infra-rouge thermique renvoyé "en haut du CO₂".

La bande principale d'absorption du CO₂ (600-750 cm⁻¹ ou 18 THz à 22,5 THz) se renforce, et donc, "en haut" du CO₂, le rayonnement thermique troposphérique est libéré plus haut :



En zoomant, on voit qu'un doublement affecte essentiellement l'altitude d'émission de deux petits ergots, situés de part et d'autre de la bande d'absorption.

Nota : l'écart sur la bande latérale gauche (17,2 à 17,7 THz) peut être ignoré, car inclus (et donc déjà compté) dans la bande de la vapeur d'eau.

Le rayonnement montant, au dessus des deux ergots de largeur 0,7 THz, est donc libéré plus haut (approximativement de 0,35 à 0,25 atm. (ou de 8 500 à 11 000 m) d'altitude), à une altitude où l'air est plus froid : du fait du Gradient Thermique Gravitationnel, l'évolution de la température T (à partir du sol à 288 K) en fonction de l'altitude exprimée en pression (en atm.), est : $T = 288 P^{0,19}$.

Notons R(f, T) la puissance de rayonnement en W/m²/THz à la fréquence f (en THz) d'une surface à la température T (en Kelvin) :

- Avant doublement : $0,7 (R(18, 288 \times 0,35^{0,19}) + R(22, 288 \times 0,3^{0,19})) = 0,7 (7,1 + 4,9) = 8,4 \text{ W/m}^2$
- Après doublement : $0,7 (R(18, 288 \times 0,25^{0,19}) + R(22, 288 \times 0,2^{0,19})) = 0,7 (5,6 + 3,4) = 6,3 \text{ W/m}^2$

Suite à un doublement (CO₂ seul), la haute troposphère retient donc : $8,4 - 6,3 = 2,1 \text{ W/m}^2$.

Nota : En toute rigueur, les gaz n'étant pas des corps noirs, et leurs bandes d'absorption étant constituées de raies non jointives, un calcul plus précis nécessiterait d'en tenir compte, par exemple en faisant un calcul où l'épaisseur optique est égale à 0,4 au lieu de 1 ; mais cela ne change pas les ordres de grandeur.

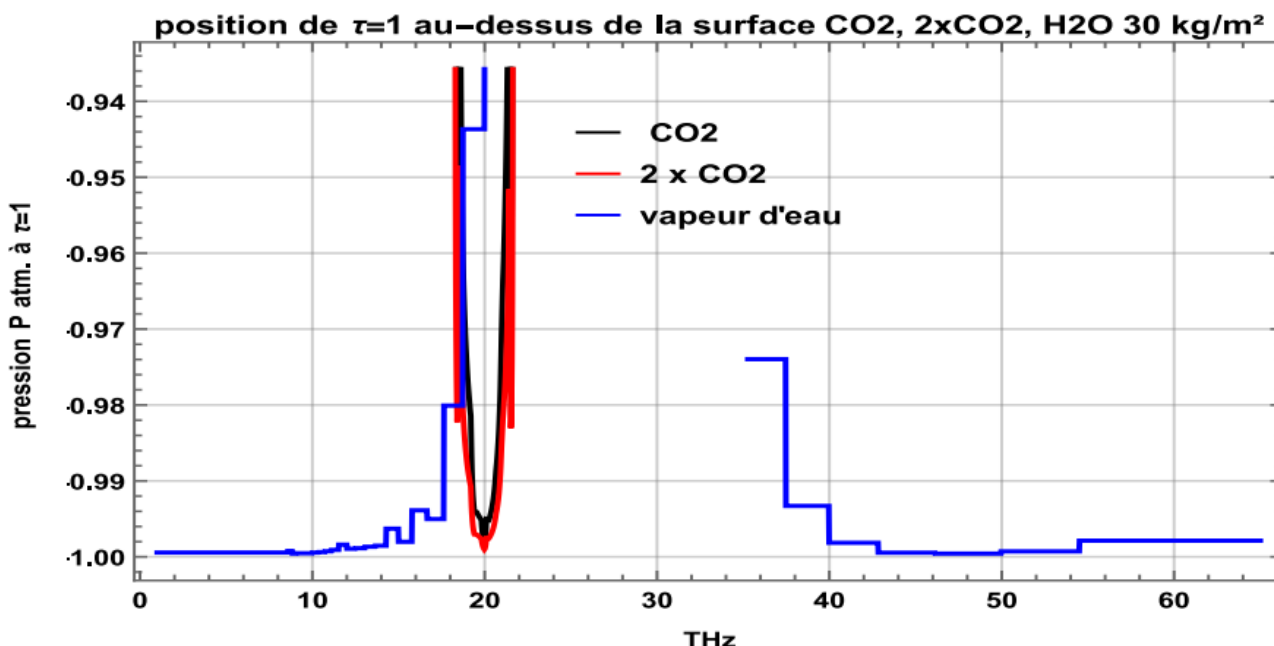
10.2.3. Impact sur le rayonnement infra-rouge "en bas du CO₂", de l'air vers la surface.

Attention : ce rayonnement ne réchauffe pas la surface, à proprement parler, mais il freine le transfert de chaleur de la surface vers l'atmosphère.

Nous avons vu au chapitre 8 que le rayonnement thermique Air \leftrightarrow Surface était équilibré, les deux étant statistiquement à la même température.

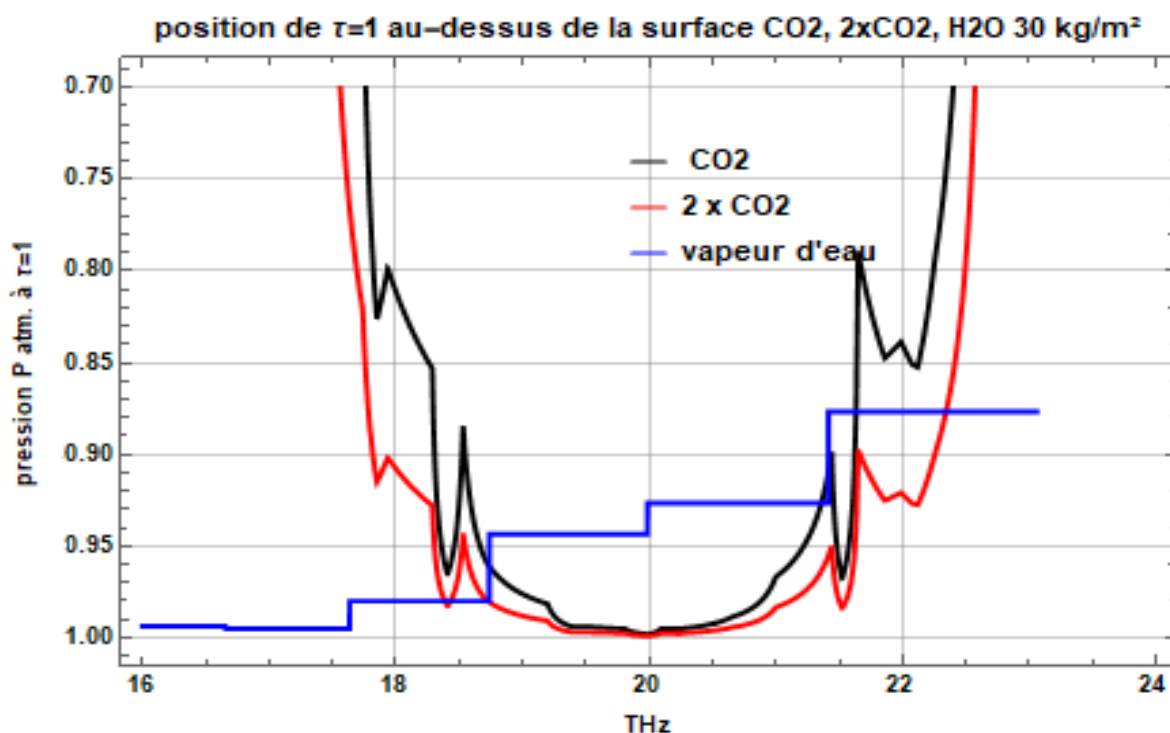
L'air rayonne vers le sol à partir d'une altitude où son épaisseur optique, vue du sol, est égale à 1, définissant en quelque sorte la frontière inférieure de l'opacité de l'atmosphère.

Le graphe ci-dessous illustre cette frontière : en bleu pour la vapeur d'eau, en noir et rouge (après doublement) pour le CO₂ : c'est le pendant, en bas de la troposphère, du graphe précédent en haut : c'est à partir de ces altitudes que l'atmosphère rayonne vers la surface (ou bloque le rayonnement de la surface, ce qui revient au même).



Ou, en altitude (en mètres) : à proximité de la surface du sol : $h = 10 (P-1000)$ (h en mètres, P en hPa)

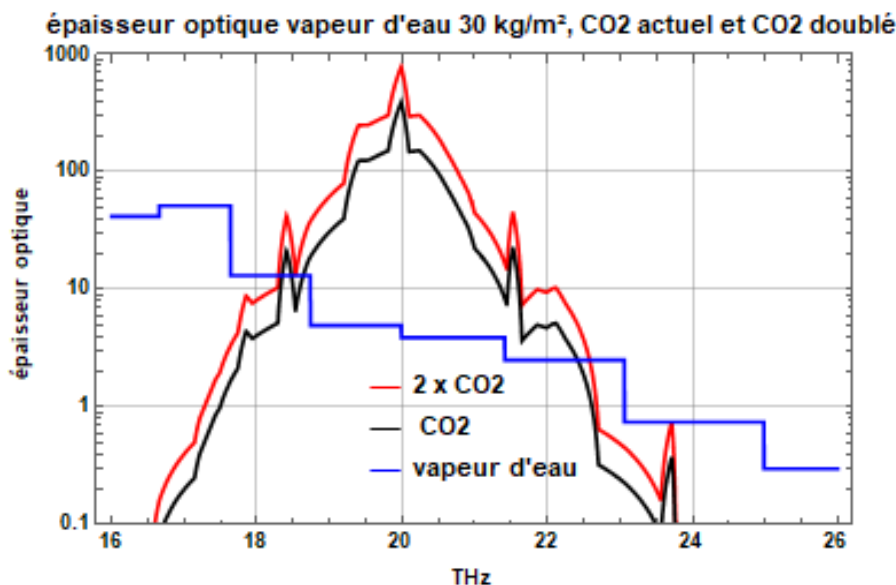
Si la concentration de CO₂ augmente, l' "ergot" du CO₂ à 22 THz passe sous la vapeur d'eau, et rayonnera donc vers la surface depuis plus bas (rouge contre bleu de la vapeur d'eau), ... et donc plus chaud (en application du Gradient Thermique Gravitationnel) (l'autre ergot (18 THz), étant masqué par la vapeur d'eau, n'a pas d'incidence).



Le même calcul qu'au paragraphe précédent donne une évaluation de 1,1 W/m².

Suite à un doublement (CO₂ seul), la surface reçoit donc de ce CO₂ : 1,1 W/m² supplémentaire.

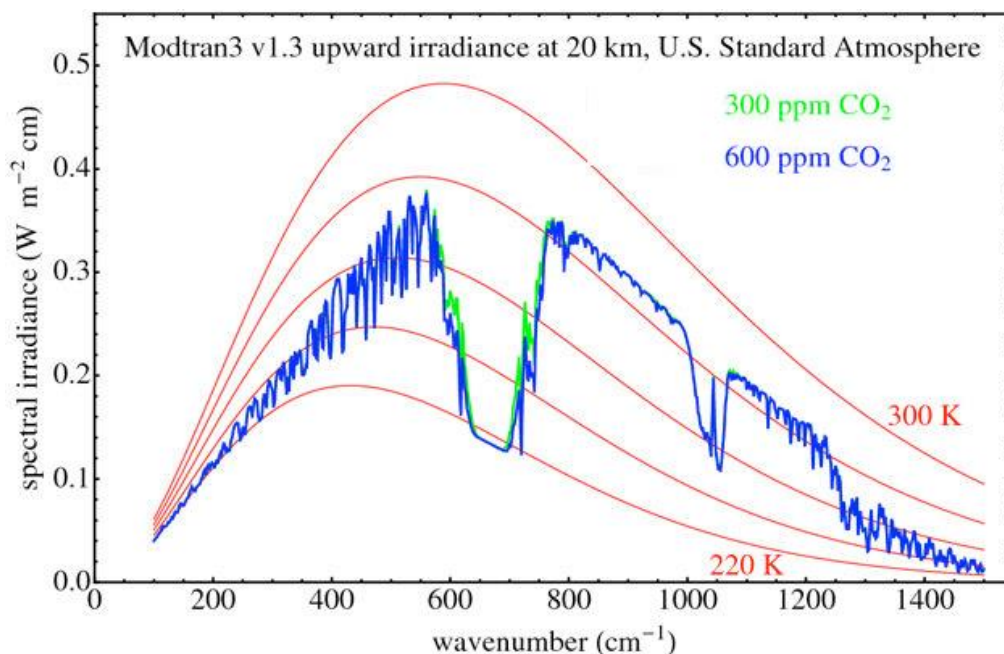
10.2.4. Impact sur le rayonnement dans la Fenêtre atmosphérique.



Aux alentours de 23 à 24 THz (extrême gauche de la fenêtre atmosphérique), la bande d'absorption du CO₂, en s'élargissant, referme une partie de la Fenêtre atmosphérique, ce qui bloque une partie des 22 W/m² de rayonnement direct au cosmos émis par la surface terrestre dans cette Fenêtre : environ 0,8 W/m² par ciel clair sans nuage, soit 0,3 W/m² (en tenant compte des nuages).

Suite à un doublement (CO₂ seul), du fait de la fermeture partielle de la fenêtre atmosphérique, la surface terrestre retient donc 0,3 W/m².

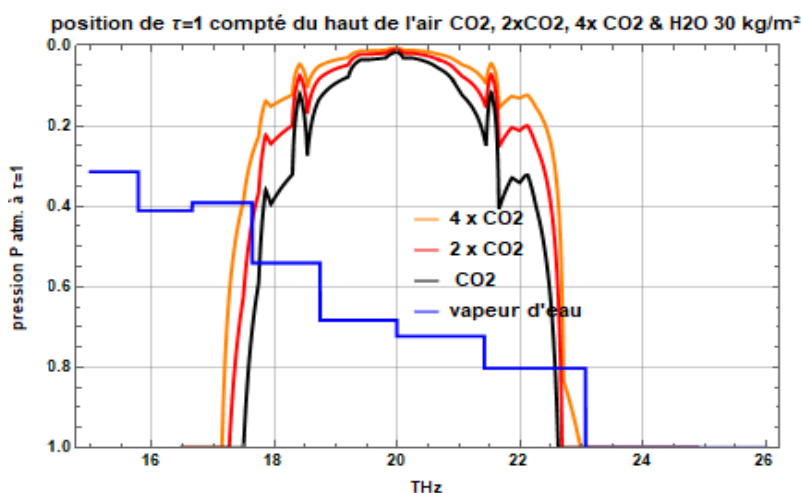
Pour illustrer l'incidence du CO₂, l'OLR (Outgoing Long-wave Radiation) est affecté de la façon suivante (graphe ci-dessous, bleu par rapport à vert) : on voit en particulier l'incidence des deux petits ergots du CO₂ dont on a parlé plus haut.



Nota 1 : l'US Standard Atmosphere, auquel ce graphe fait référence, est relativement moins humide que la moyenne.

Nota 2 : ce graphe (assez ancien) se réfère à un doublement de 300 à 600 ppmv, mais, comme on l'a vu, n'importe quel doublement produit proportionnellement le même effet, encore que ...

... Un nouveau doublement aurait un effet partiellement opposé, car le rayonnement émis "plus haut" se passerait alors dans la stratosphère (altitude au dessus de 0,2 atm.), qui est plus chaude que le haut de la troposphère : il serait donc alors plus chaud (et non pas plus froid), donc plus puissant.



10.2.5. Au global

Pour équilibrer un doublement du CO₂ considéré comme seul facteur incident (chiffres issus de James Hansen, le précurseur de l'alarmisme climatique : en fait, les valeurs exactes importent peu, et on peut trouver des valeurs différentes dans la littérature : mais les ordres de grandeur sont là, et le raisonnement que nous allons suivre vaut pour n'importe quelles valeurs) :

- La surface devra évacuer un supplément de :
 - . 1,1 W/m² (blocage plus bas du rayonnement IR terrestre par le CO₂)
 - . + 0,3 W/m² (fermeture partielle de la fenêtre atmosphérique)
 - . - 0,4 W/m² (rayonnement solaire absorbé par le CO₂ stratosphérique et dont la surface est privée)
 - . **soit un total de 1 W/m²**
- La haute atmosphère devra évacuer un supplément de :
 - . 2,1 W/m² (diminution du rayonnement IR en haut du CO₂ vers le cosmos)
 - . + le 1 W/m² (évacué du sol et récupéré par la troposphère, sous réserve que le sol arrive à les équilibrer)
 - . **soit un total de 3,1 W/m²**

Nota : cette valeur de 3,1 W/m² peut être aujourd'hui contestée : selon François Gervais, l'intégration sur l'ensemble de l'OLR donne 2,6 W/m² ; le GIEC, pour sa part, donne 3,7 W/m² ; mais la valeur réelle importe peu tant qu'on reste dans cet ordre de grandeur : le raisonnement reste tout aussi valable.

10.3. Calcul de la sensibilité climatique

10.3.1. Evacuer 1 W/m² à la surface du sol

On peut considérer a priori que ce 1 W/m² supplémentaire devra s'évacuer de la même façon que les 161 W/m² actuels, à savoir :

- $1 \times 42/161 = 0,26$ W/m² par la fenêtre atmosphérique
- $1 \times 87/161 = 0,54$ W/m² par évaporation
- $1 \times 32/161 = 0,20$ W/m² par convection

Mais, en fait, on voit que si la température augmente simplement de 0,16°C, un petit supplément d'évaporation, à lui seul, peut évacuer ce 1 W/m², en effet : chaque °C d'élévation de température augmente l'évaporation de 7%, soit de $87 \times 7 / 100 = 6,1$ W/m².

Donc, pour évacuer 1 W/m², il suffit d'une élévation de température de $1/6 = 0,16^\circ\text{C}$.

Nota : en fait, ce n'est pas tout-à-fait exact : plus d'évaporation, c'est aussi plus de concentration de vapeur d'eau, donc plus de freinage du rayonnement terrestre, en particulier dans la fenêtre atmosphérique : la fameuse « rétroaction positive » dont parle le GIEC ... en « oubliant » la rétroaction négative de la chaleur latente : 7% d'évaporation en plus, c'est aussi une diminution de 7% de ce rayonnement terrestre dans la part (20 W/m^2) de la fenêtre atmosphérique où la vapeur d'eau intervient, soit $20 \times 7\% = 1,4 \text{ W/m}^2$, qu'il faut, en toute logique, déduire des $6,1 \text{ W/m}^2$ cités plus haut.

... ce qui ramène la sensibilité climatique au CO₂ au niveau du sol à un maximum de :
 $1 / (6,1 - 1,4) = 1 / 4,7 = \underline{0,21 \text{ °C}}$ (au lieu de 0,16)

10.3.2. Evacuer 3,1 W/m² en haut de l'atmosphère

La pression de vapeur saturante de la vapeur d'eau, c'est-à-dire la pression à laquelle la vapeur d'eau se condense, est uniquement fonction de la température, et donc, si l'atmosphère est plus chaude, en fonction du Gradient Thermique, la vapeur d'eau rayonnera de plus haut vers le cosmos, mais à la même température.

et donc, en se condensant, la vapeur d'eau restituera toujours au cosmos l'énergie qu'elle contient, absorbée en s'évaporant, et en particulier ce 1 W/m^2 . : elle le fera seulement un petit peu plus haut de :

$$0,21 \text{ °C} / 6,5 \text{ °C/km} = 32 \text{ mètres plus haut par } \text{W/m}^2.$$

Et cette intensité de rayonnement correspond en totalité, et uniquement, à de la chaleur latente de condensation/solidification (disparition brutale de la vapeur d'eau et donc de son opacité).

Comme on l'a vu plus haut, on a une superposition de deux cycles de la vapeur d'eau :

- Un cycle dit « long » entre le sol et le haut des nuages, qui va prendre en charge le supplément de 1 W/m^2 du niveau du sol,
- Un cycle dit « court », entre le bas et le haut des nuages, qui va prendre en charge les $2,1 \text{ W/m}^2$ supplémentaires du haut de l'atmosphère, avec un mécanisme tout-à-fait similaire se traduisant par une accélération de ce cycle.

Néanmoins, mettons les choses au pire.

10.4. Valeur plafonnée de la sensibilité climatique

Mettons les choses au pire : supposons que le cycle « court » ne puisse pas prendre en charge ces $2,1 \text{ W/m}^2$.

Du fait du Gradient Thermique, le réchauffement dû à ces $2,1 \text{ W/m}^2$ supplémentaires se transmettra au sol, qui devra alors évacuer, non plus 1 W/m^2 , mais $3,1 \text{ W/m}^2$.

Il faudrait alors que l'évaporation augmente pour évacuer ce supplément sous forme de chaleur latente, et pour cela, que la température n'augmente pas simplement de $0,21 \text{ °C}$, mais de :

$$0,21 \times 3,1 = 0,65 \text{ °C}$$

... ce qui nécessite une augmentation de l'évaporation de $7 \times 0,65 = 4,6\%$.

En conclusion, la sensibilité climatique, est tout au plus égale à 0,65°C

10.5. Résumé

Si la concentration atmosphérique en CO₂ devait doubler (ce qui prendrait environ 200 ans, au rythme actuel d'un peu plus de 2 ppmv/an), d'une façon globale, l'atmosphère retiendrait environ $3,5 \text{ W/m}^2$:

- $0,4 \text{ W/m}^2$ au niveau de la stratosphère, qui serait directement restitué par rayonnement direct,
- $3,1 \text{ W/m}^2$ par la troposphère,
- dont 1 W/m^2 au niveau du sol.

Au niveau du sol, ce 1 W/m^2 serait compensé jusqu'au cosmos par une augmentation de température de $0,21 \text{ °C}$ permettant un supplément d'évaporation de $1,5\%$: **la sensibilité climatique au niveau du sol est donc de $0,21 \text{ °C}$.**

En altitude, les 2,1 W/m² restants devraient se compenser par une accélération du cycle de vaporisation/condensation de la vapeur d'eau entre le bas et le haut des nuages, sans effet notable au niveau du sol.

Si ce n'était pas le cas, en mettant les choses au pire, ces 2,1 W/m² se répercuteraient au niveau du sol, entraînant, pour les compenser, un nouveau supplément d'évaporation, et **la sensibilité climatique serait alors, au maximum, de 0,65°C**.

10.6. Conclusion

En un siècle (1917 à 2022), la température a augmenté de 1,1°C et la concentration en CO₂ est passée de 280 à 420 ppm, soit une augmentation de 50%.

Le GIEC considère que l'effet radiatif est approximativement proportionnel au logarithme de la concentration : formule de **Myhre**, empirique aux concentrations qui nous intéressent, et qui donne l'augmentation de l'« effet de serre » du GIEC de 3,7 W/m² (contre nos 3,1) :

$$\Delta M \text{ (W/m}^2\text{)} = 5,35 \text{ Ln}(C/C_0)$$

Donc : pour 50% : $\Delta M = 5,35 \text{ Ln}(1,50) = 2,16 \text{ W/m}^2$,

En mettant les chose au pire, cette augmentation aurait dû entraîner une augmentation de température de :

$$0,65 \times 2,16/3,1 = \mathbf{0,45^\circ\text{C}}$$

Et donc, si la température s'est élevée de l'ordre de 1,1°C depuis cette époque, l'augmentation de concentration du CO₂ ne peut pas en être la cause (ou du moins pas l'unique cause).

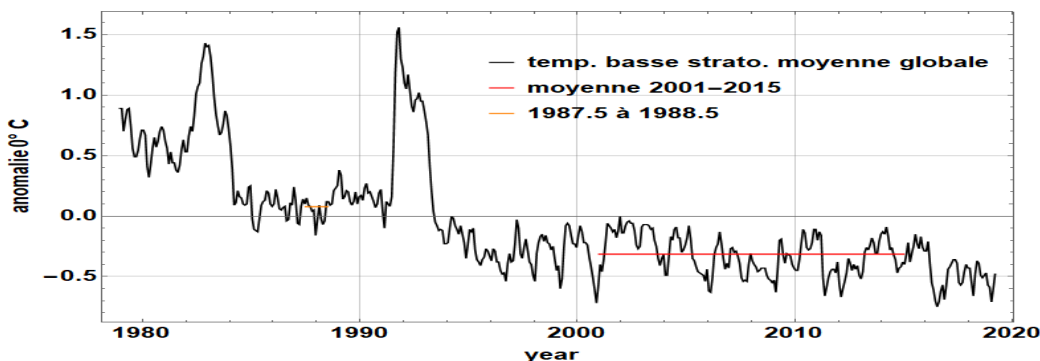
Et donc, l'élévation de température a d'autres causes. Et il faut les rechercher.

11. La physique du climat revisitée

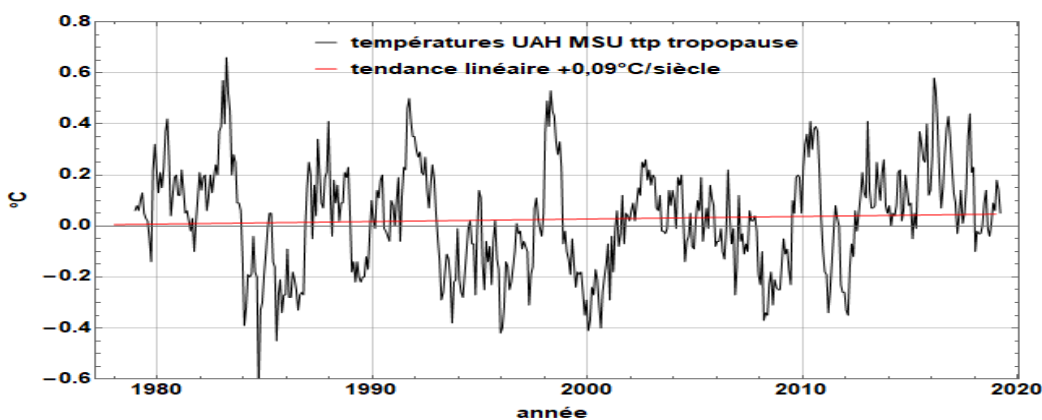
Repartons des observations :

11.1. Les températures s'élèvent plus vite au niveau du sol qu'en altitude

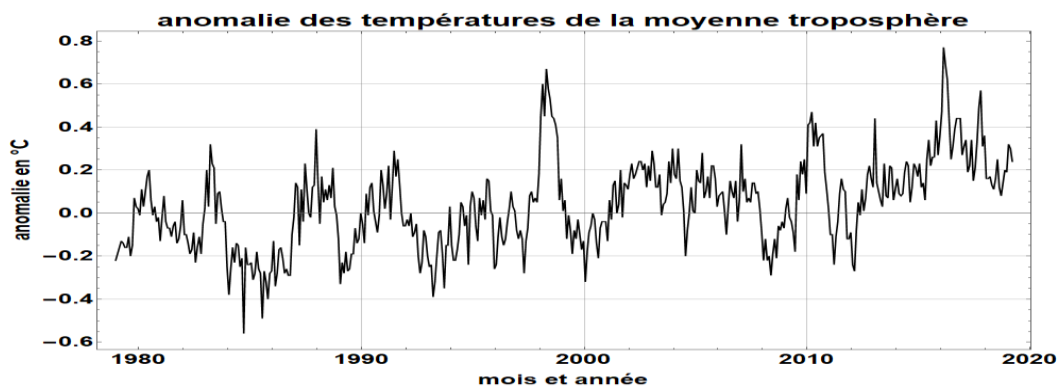
Basse stratosphère :
Reflète les éruptions volcaniques (poussières restant en suspension par manque de convection)



Tropopause :

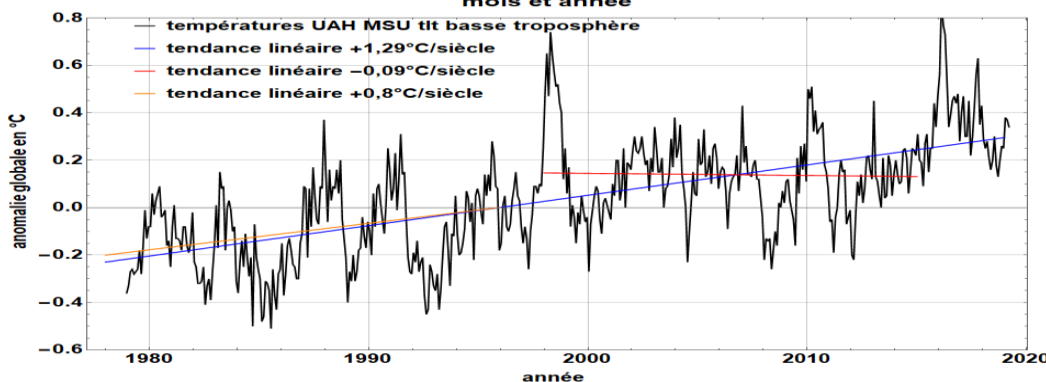


Moyenne Troposphère :



Basse Troposphère :

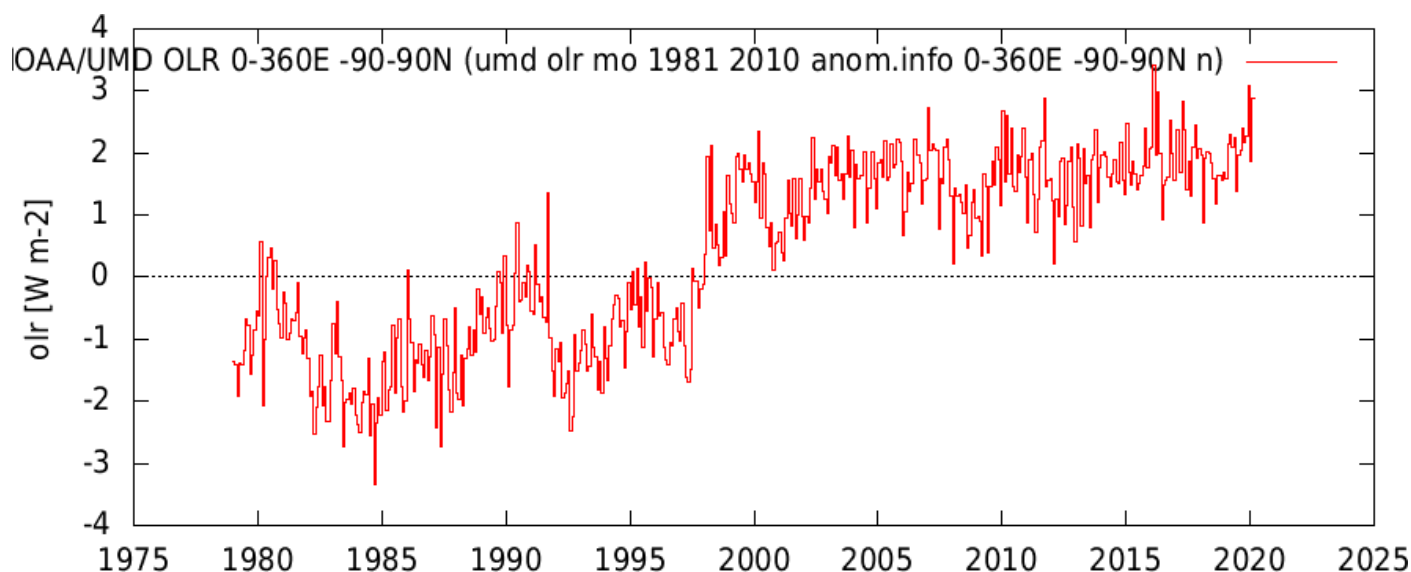
Reflète les phénomènes El Niño (1998 et 2016)



Sources : observations par satellites : https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/xxx/uahncdc_ls_6.0.txt où xxx= tls (basse stratosphère), ttp (tropopause), tmt (moyenne troposphère), tlt (basse troposphère).

Ces observations vont à l'encontre d'un réchauffement radiatif de type "Effet de Serre", tel qu'il devrait résulter d'une augmentation de concentration du CO₂ (les deux ergots latéraux) et de la vapeur d'eau, et tel que les Modèles du GIEC nous l'annoncent : ceux-ci prévoient au contraire l'existence d'un "Hot-Spot", c'est-à-dire d'un réchauffement plus rapide en haut de la troposphère en zone intertropicale).

11.2. L'OLR a augmenté de façon sensible : 4 W/m² depuis 1980



(Source : http://climexp.knmi.nl/get_index.cgi : monthly 1981-2010 anomalies NOAA/UMD OLR 0-360E -90-90N mean)

En régime établi, l'OLR est nécessairement égal au rayonnement reçu par la Terre après déduction de l'albédo (la Terre renvoie l'énergie qu'elle reçoit, ni plus ni moins)

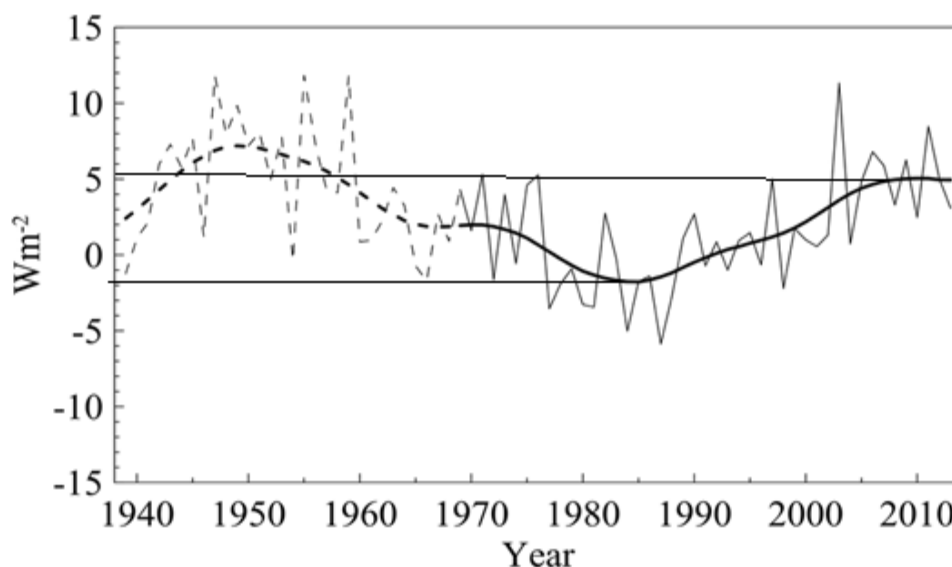
Une telle augmentation ne peut être due :

- ni à une augmentation du rayonnement solaire (dont les variations sont beaucoup plus faibles),
- ni aux "gaz à effet de serre" (CO₂ et vapeur d'eau), dont l'action ne peut pas modifier l'OLR (qui s'équilibre nécessairement dans les deux sens).

La seule explication est une diminution de l'albédo.

11.3. L'insolation au niveau du sol augmente depuis les années 1980 : 7 W/m²

... ce qui corrobore l'augmentation d'OLR.

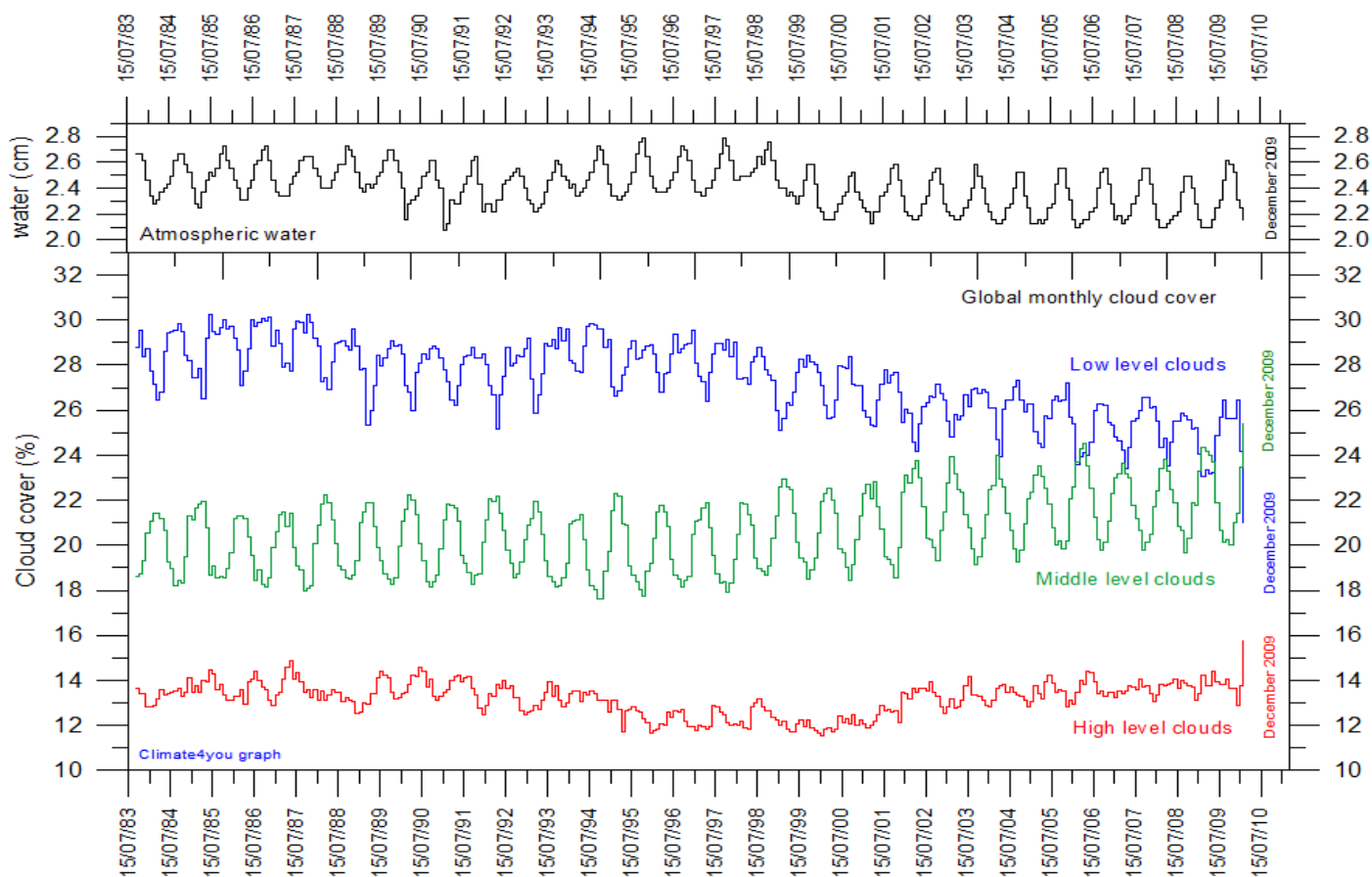


Source : Wild, M. *The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes* https://www.researchgate.net/figure/Composite-of-56-European-GEBA-time-series-of-annual-surface-downward-shortwave-radiation_fig5_319251713

... Mais les cycles solaires ont un impact trop faible pour justifier (directement) de telles amplitudes de variation.

11.4. La couverture nuageuse décroît

... en particulier les nuages bas, qui conditionnent l'essentiel de l'albédo.



... ce qui corrobore donc également une diminution de l'albédo.

Pour mémoire, 1% d'albédo en moins (passage de 31 à 30 % par exemple), c'est 4 W/m^2 en plus qui rentrent dans l'atmosphère, soit $2,7 \text{ W/m}^2$ au niveau du sol.

11.5. Conclusion

D'autres causes sont nécessairement intervenues, qui justifient une augmentation de l'insolation (et donc de l'OLR), et qui expliquent que la température de la basse troposphère (et donc au niveau du sol) augmente plus vite que le reste de l'atmosphère.

Pour en savoir plus, il est nécessaire de poursuivre et d'élargir les observations, sans se focaliser sur le CO_2 , qui ne peut jouer qu'un rôle marginal, et finalement assez simple à évaluer.

12. Les cycles climatiques

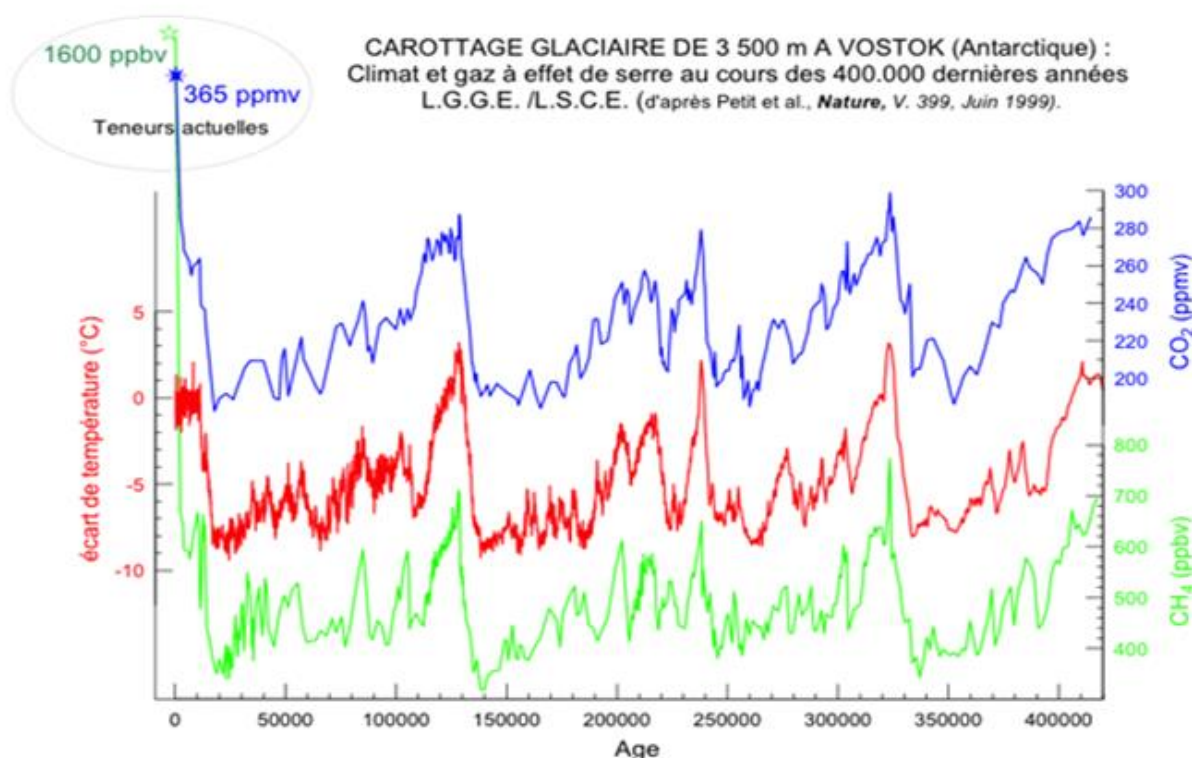
Ce n'est un secret pour personne : le climat suit des cycles. Dans l'état actuel, nous connaissons assez mal ces cycles, car ils se superposent les uns aux autres, avec des périodicités qui peuvent être très différentes, voire variables, qui peuvent aller de quelques jours à quelques dizaines de milliers d'années, avec des amplitudes qui peuvent aussi être différentes.

Nous allons en détailler quelques-uns pour en montrer les effets.

12.1. Les cycles de Milankovitch

Voir : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch.xml>

Les plus connus et les plus amples sont les cycles de Milankovitch, qui ont une amplitude moyenne de 8 à 10 °C (2°C à l'équateur, 30°C au cercle polaire) : il y a 20 000 ans, il y avait 2 km d'épaisseur de glace au dessus de Boston, par exemple ; nous sommes aujourd'hui à un maximum de ces cycles.



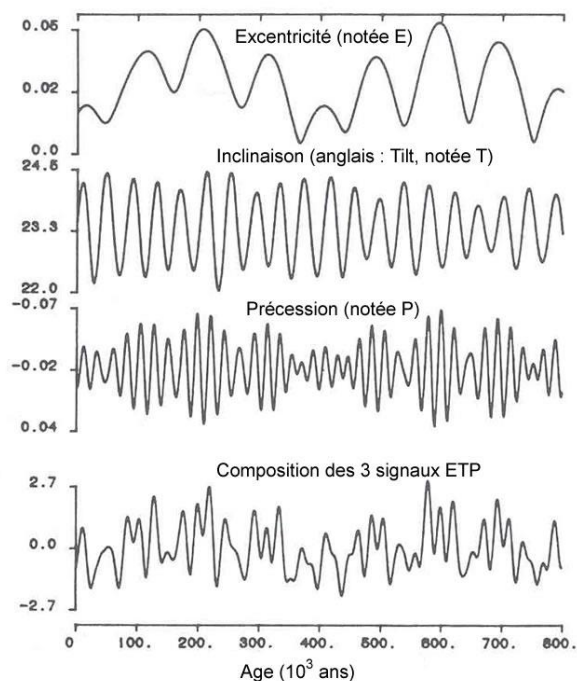
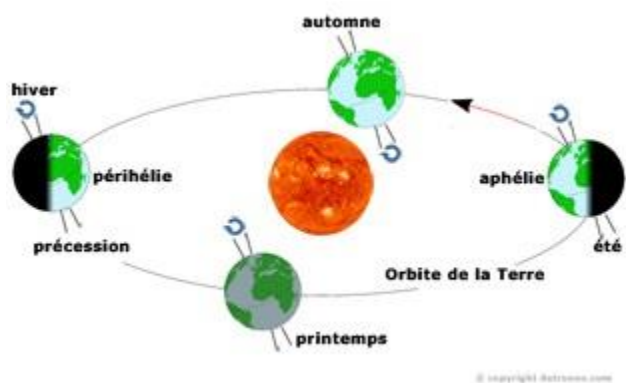
Le graphe ci-dessus montre en particulier les variations de température (en rouge) relatifs à ces cycles.

Mais il a aussi souvent été utilisé comme argument de démonstration de l'effet du CO₂ (en bleu) sur les températures (en rouge) : il faut dire que la corrélation est frappante. Mais quand on a 3 courbes ainsi reliées, si l'une est la cause, les deux autres sont probablement des conséquences ; alors, si la cause est le CO₂, comment le CH₄ peut-il en être la conséquence ?

Dans la réalité, les cycles de Milankovitch sont causés par des variations orbitales de la Terre (et on voit mal le CO₂ influencer sur l'orbite de la Terre) : en fait, quand on zoome sur le graphe, il apparaît assez nettement que c'est le CO₂ et le CH₄ (méthane) qui suivent la température, et non l'inverse, ce qui est cohérent avec le fait que l'océan désorbe quand la température se réchauffe.

Il y a trois composantes principales qui traduisent la variabilité orbitale de la Terre :

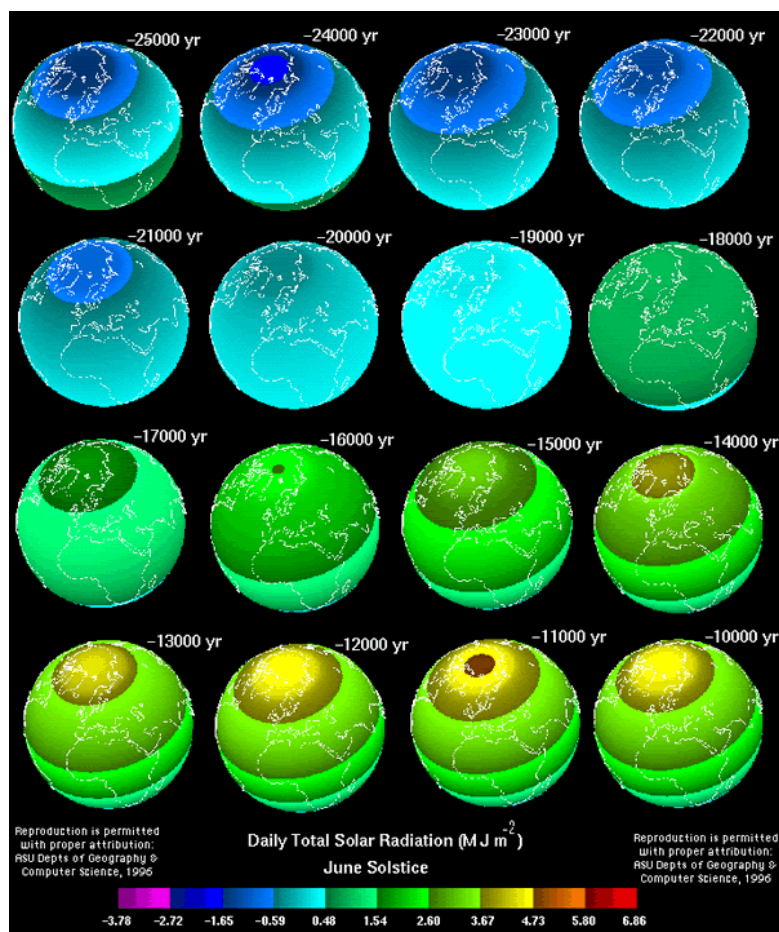
- Excentricité de l'orbite de la Terre (période de 413 000 et 100 000 ans) (0 à 0,053, actuellement 0,016)
- Inclinaison de l'axe des pôles (période de 41 000 ans)
- Précession de l'axe de rotation de la Terre (période de 23 000 et 19 000 ans)



Il ne semble pas exister d'explication "quantifiée" des cycles de Milankovitch, qui puisse expliquer de telles amplitudes de variation des températures. Mais, intuitivement :

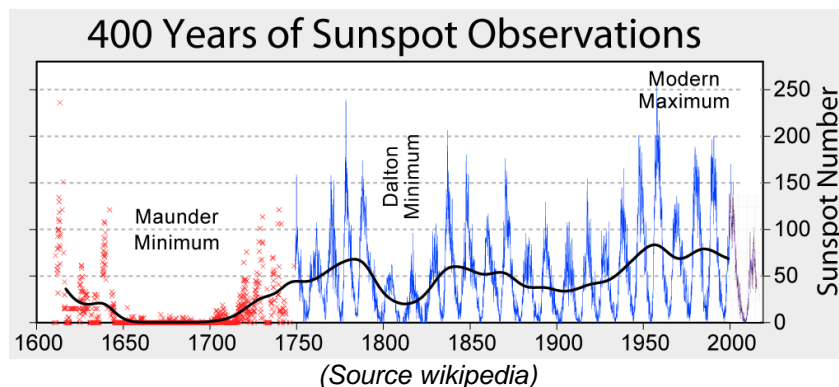
- une augmentation de l'excentricité peut faire qu'une zone circumpolaire reste plus longtemps à l'ombre que l'autre : la glace va alors s'y étendre, et quand elle reviendra au soleil, son albédo aura augmenté, et elle absorbera alors moins le rayonnement du Soleil, ce qui fait qu'elle ne perdra pas toute la glace gagnée.
- une augmentation de l'inclinaison de l'axe de la Terre provoque une extension de la glace polaire de l'hémisphère à l'ombre, et donc encore une augmentation de l'albédo quand il revient au soleil.

Ces deux phénomènes sont cumulatifs, à la fois en eux-mêmes et l'un sur l'autre, sur plusieurs dizaines de milliers d'années :



12.2. Les cycles solaires

Le soleil a lui-même des cycles, matérialisés par le nombre de ses tâches, et qui se traduisent par des variations de rayonnement de quelques W/m^2 :



Ces variations de rayonnement sont insuffisantes en elles-mêmes pour justifier des écarts importants de flux radiatif et donc de température, mais il existe cependant des corrélations assez frappantes, et peut-être une explication faisant intervenir le mode de formation des nuages et l'incidence sur l'albédo :

12.2.1. La théorie de Svensmark

La théorie de Svensmark (exposée dans son livre récent FORCE MAJEURE (The Sun's Role in Climate Change), dont est extrait la figure ci-dessous) est probablement la meilleure explication actuelle de la variation de l'albédo ; elle sera détaillée dans une révision ultérieure : c'est la suivante (billard à plusieurs bandes) :

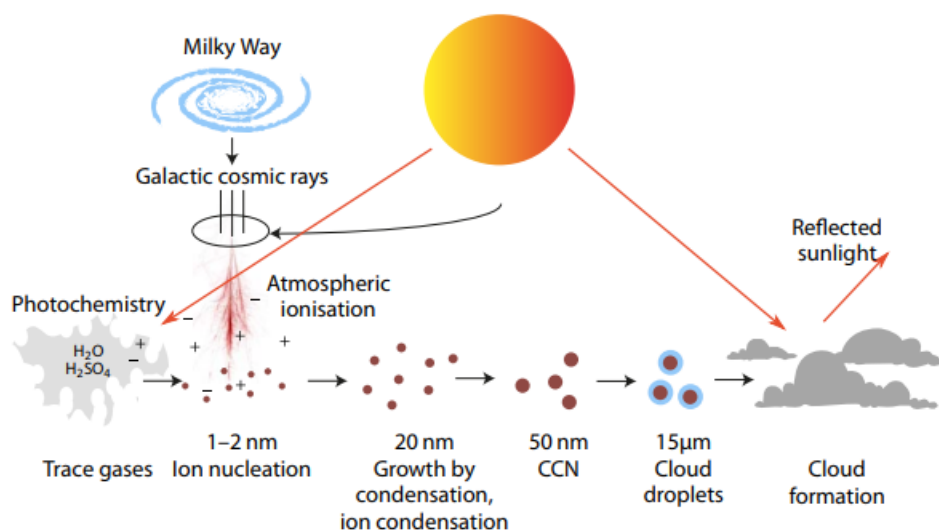


Figure 12: The physical mechanism linking solar activity variations to climate change.

In summary, the link is: (a) a more active Sun, (b) stronger solar wind, (c) fewer cosmic rays, (d) less atmospheric ionisation, (e) less nucleation and slower growth, (f) fewer CCN, (g) clouds with less droplets, (h) less reflectivity, (i) less reflection of sunlight and a warmer Earth.

Un soleil plus actif (plus de taches solaires) entraîne :

- des vents solaires plus puissants,
- qui arrêtent les rayons cosmiques,
- ce qui diminue l'ionisation atmosphérique,
- ce qui freine les mécanismes de nucléation et de croissance des gouttes d'eau,
- ... donc la formation des nuages,
- ce qui diminue l'albédo,
- et augmente donc la température.

12.2.2. La théorie de G.A. Zherebtsov

Source : <http://www.science-climat-energie.be/2019/05/04/un-mecanisme-russe-pour-expliquer-le-rechauffement-global/>

Cette théorie très récente sera développée dans une révision ultérieure de ce livre

12.3. Les oscillations océaniques (ou autres) (ex. : cycle de 60 ans)

Tous les cycles océaniques NAO (North Atlantic oscillation), AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation), PDO (Pacific Decadal Oscillation), ENSO (El Niño Southern Oscillation)...ont pour même principe une variation de la différence de pression atmosphérique sur les bassins océaniques (ex. Lisbonne et Islande, ou Tahiti et Darwin), et de la température de l'océan.

Il en résulte des variations des vents, des courants marins, de la formation des dépressions, etc... Ce qui distingue ces phénomènes, c'est leur période (plus ou moins variable), leur amplitude (souvent variable), leur localisation ainsi que leur zone d'influence ...

Certaines études attribuent ces cycles à un effet de "marée" de la surface solaire, et d'excentricité du Soleil autour du centre de gravité du système solaire, sous l'effet des grosses planètes (Jupiter, Saturne).

Ces oscillations peuvent avoir un impact mondial.

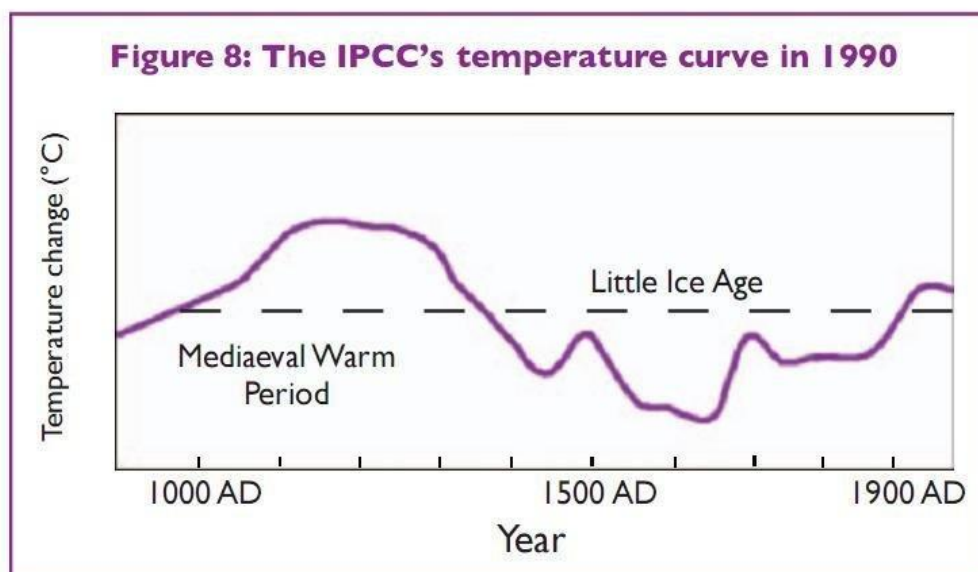
12.4. Conclusions sur les cycles

Les cycles climatiques sont assez mal connus, du moins, insuffisamment pour en déduire des prévisions climatiques fiables.

Il en résulte qu'on les pousse sous le tapis, et qu'ils ne sont pas pris en compte dans les modèles climatiques, ni dans les observations, ni d'ailleurs dans la mission du GIEC :

"Le GIEC a pour mission d'évaluer, ..., les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique ... pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément ...".

Néanmoins, on ne peut pas les ignorer, car ils sont sans doute en cause dans des variations climatiques passées très significatives (en particulier l'Optimum Médiéval et le Petit Age Glaciaire), et sont quand même cités par le GIEC dans son premier rapport :



IPCC 1990

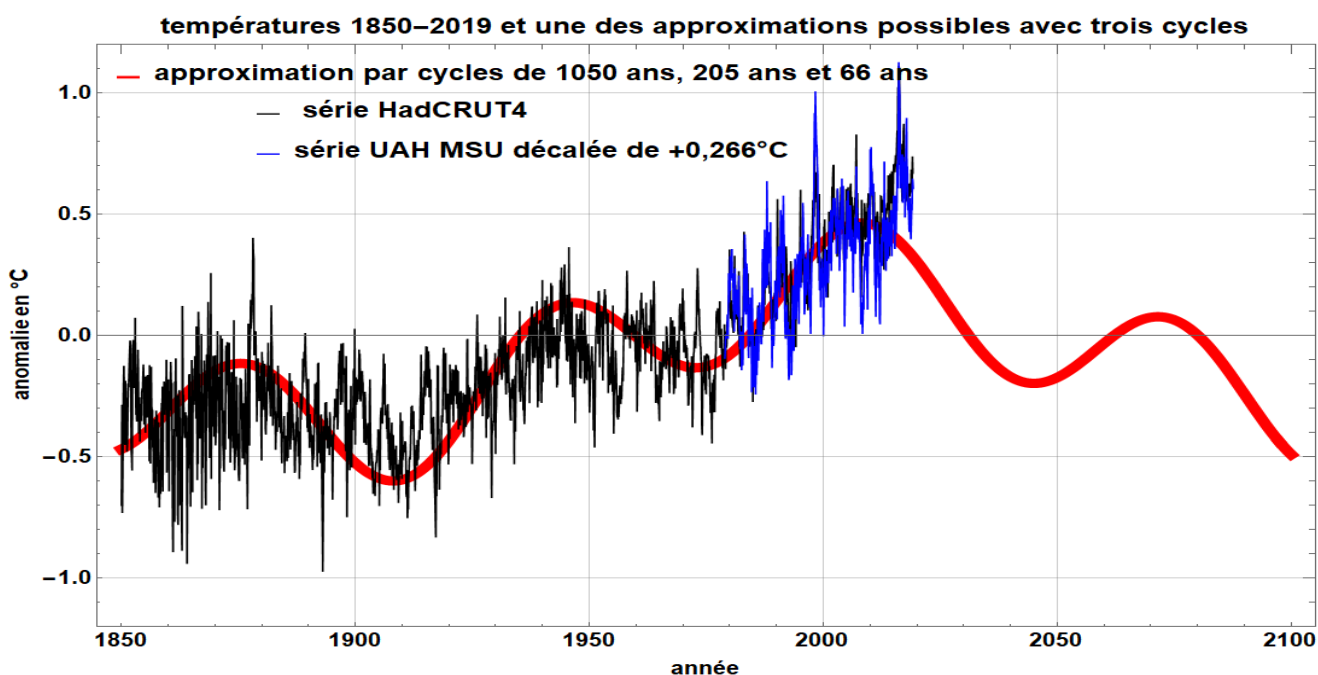
Ce graphe montre que nous pourrions bien être actuellement dans une répétition de l'optimum médiéval.

La figure ci-dessous présente deux séries de températures qui pour les 40 dernières années ne montrent pas de grosses différences : ce sont la série terres + mers (noire) et la série satellitaire d'observations de la basse troposphère (bleue), avec un essai d'approximation par trois sinusoïdes :

- en noir reconstitution du CRU à partir de mesures à terre et en mer,
- en bleu série UAH MSU d'observations satellitaires basse troposphère (TLT) (décalée de $+0,266^{\circ}\text{C}$)
- en rouge une des **multiples approximations « heuristiques » possibles** avec un cycle de 1020 ans (celui du graphe précédent), un cycle de 215 ans et un cycle de 65 ans.

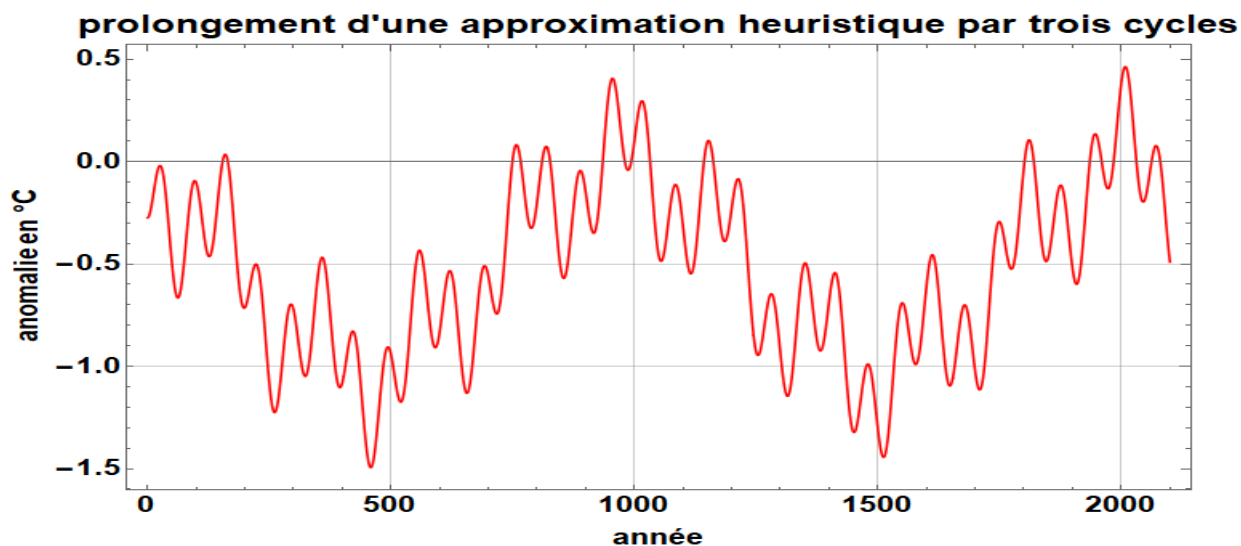
Le cycle de 60 ans (ici 65 ans) est certes très marqué mais les cycles plus longs ne peuvent évidemment pas être calés avec seulement 170 ans d'observations.

Séries des « moyennes mondiales des températures moyennes mensuelles observées en divers points du globe » exprimées en anomalies par rapport aux moyennes du même mois prises sur une période de référence :



A titre de curiosité, cette approximation trop simple redonne les optima climatiques romain et médiéval bien documentés par les historiens ... et les périodes calamiteuses (famines, épidémies, mort de froid et de faim d'une partie notable (jusqu'à la moitié) des habitants de certains pays) des grandes invasions vers 260 - 500 et du petit âge de glace de 1300 à 1700.

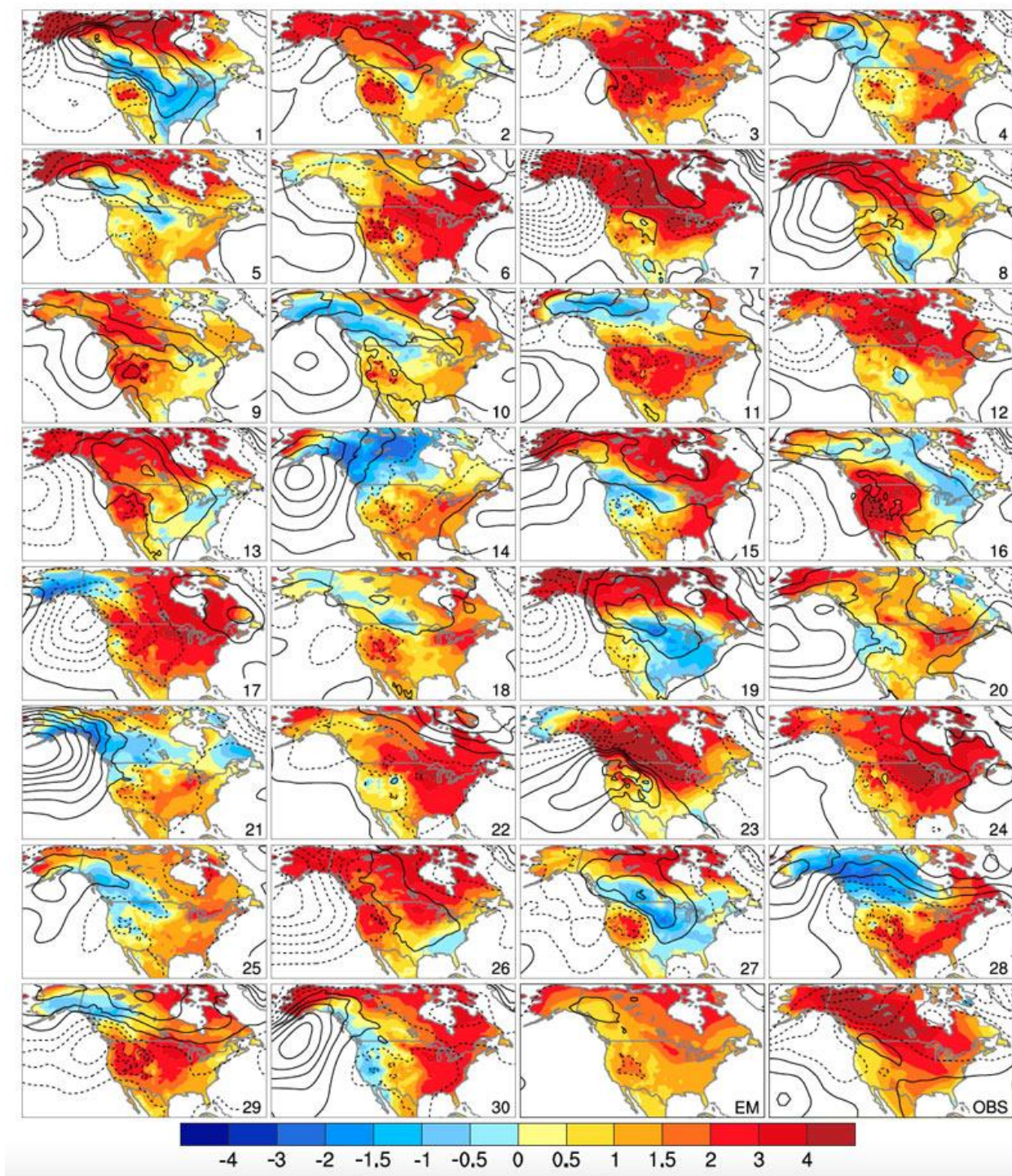
Prolongement sur 1 - 2100 de l'approximation « heuristique » de la figure précédente :



13. Le climat est chaotique

Le dessin ci-dessous représente le résultat en température de 30 modélisations de l'évolution du climat (Community Earth System Model (CESM)), avec un maillage de 1° latitude x 1° longitude, sur 50 ans (exactement), entre 1963 et 2012.

La différence entre ces modélisations est simplement due à une différence de moins d'un milliardième de °C dans les conditions initiales. La figure du bas à droite (marquée OBS) est le résultat des observations réelles.



<https://www2.ucar.edu/sites/default/files/images/2016/atmosnews/perspective/CESM%20LE%20art.png>

Autre source : <https://wattsupwiththat.com/2016/10/22/chaos-climate-part-4-an-attractive-idea/>

C'est d'ailleurs ainsi qu'Edward Lorenz a mis en évidence la Théorie du Chaos (ou l'"Effet Papillon").

Cette prévision doit nous rendre humbles devant la complexité du climat. Elle explique peut-être pourquoi toutes les prévisions alarmistes des climatologues sont faites au conditionnel : "... pourrait ...".

14. Conclusions

La physique (et le bon sens) contredisent un certain nombre d'idées reçues et véhiculées en particulier par la plupart des médias.

En particulier :

- L'Effet de Serre par rayonnement du bas vers le haut, puis rétro-rayonnement du haut vers le bas n'existe pas, que ce soit dans une serre conventionnelle (qui fonctionne par blocage de la convection), ou dans l'atmosphère.
- Les -18°C d'une Terre sans "gaz à effet de serre" sont un mythe : une Terre sans atmosphère aurait une température moyenne beaucoup plus basse (probablement de l'ordre de -50 à -60°C) : la moyenne sur la Lune est de -80°C .
- C'est le déséquilibre radiatif entre énergie radiative reçue et renvoyée par la surface du sol qui provoque le réchauffement.
- C'est l'évaporation qui est le principal régulateur de la température en surface (océanique à 71%) (7%, soit plus de $6,5 \text{ W/m}^2$ par $^{\circ}\text{C}$ d'écart), et qui limite le réchauffement lorsque la chaleur latente évacuée compense ce déséquilibre.
- Si la concentration en CO_2 venait à doubler, il en résulterait une augmentation de température en surface de moins de $0,65^{\circ}\text{C}$: on est très loin des prévisions alarmistes allant jusqu'à 5°C et plus.
- L'évaporation a un effet régulateur (feed-back négatif) et non pas amplificateur ; cet effet est beaucoup plus puissant que le supplément d' « effet de serre » qu'elle génère.
- Si la température s'est élevée de plus de 1°C en un siècle, il faut en rechercher les causes ailleurs que dans la concentration de CO_2 .
- Le climat subit des cycles ; la méconnaissance de ces cycles fausse toutes les conclusions qu'on peut tirer des observations.
- Le climat est chaotique, et il est impossible et totalement hasardeux, pour le Modèles, de tirer des conclusions localisées (augmentation ou diminution de la pluviométrie à tel endroit, par exemple).
- ... Et d'une façon générale, les observations sont encore insuffisantes pour en tirer une théorie du réchauffement climatique indiscutable qui justifie le réchauffement actuellement constaté.

Même s'il est impossible dans un tel ouvrage de pousser les calculs comme le feraient des programmes de simulation, les ordres de grandeur sont là, et une simulation qui donnerait des résultats très différents devrait être remise en cause.

"L'atmosphère terrestre ayant par le passé subi des transformations bien supérieures à celles qui sont envisagées s'est comportée comme un système stable, la biosphère s'est également adaptée, et le catastrophisme médiatique apparaît donc comme irrationnel. Nous ne pouvons combattre une pensée magique par la théorie, seulement par le bon sens. C'est seulement lorsque le dogme prétend s'appuyer sur la science qu'il faut en montrer toutes les insuffisances." (*Lionel Fischer, relecteur*)

Relecteurs

L'auteur remercie chaleureusement tous les relecteurs qui ont contribué à améliorer cet ouvrage, parmi lesquels :

- Reynald Du Berger, ing. FIC, professeur titulaire de géophysique, retraité de l'Université du Québec, Membre du comité scientifique de l'Association des climato-réalistes : *"... ce texte pourra servir à inspirer les rédacteurs des prochains manuels scolaires de science et technologie au Québec (SVT en France). Il est temps de remplacer par de la vraie science la propagande faite par le nounours polaire larmoyant et transpirant sur son glaçon à la dérive et qui prétend enseigner la "science" du climat à nos jeunes."*
- Lionel Fischer, ingénieur ENSCMu 1993, MD, professeur de Physique-Chimie, exégète du dernier rapport du GIEC (AR5) : *"..., je trouve cette initiative de MM. Moranne et Veyres excellente, salutaire, et je ne manquerai pas d'y renvoyer tous les élèves de mon lycée une fois l'oeuvre achevée, en espérant y avoir apporté ma pierre."*
- François Gervais, Professeur émérite à l'Université de Tours ; Ancien Directeur de Recherche CNRS au Centre de Recherche sur la Physique des Hautes Températures, Orléans ; Ancien Directeur de l'UMR CNRS 6157, Membre du comité scientifique de l'Association des climato-réalistes ; *Expert Reviewer* du rapport AR5 du GIEC : *"On ne peut qu'encourager le lecteur à la petite gymnastique intellectuelle consistant à se plonger dans cette présentation, puis, si comme nous l'espérons il en a tiré le bénéfice souhaité, à la faire connaître et à la diffuser."*
- Jean-Claude Gropeaux, Licence de biologie cellulaire et physiologie animale (Dijon), Maitrise de science et technologie du végétal (Dijon), DEA de Biologie du comportement (éthologie) (Villetaneuse/Dijon) ; Professeur de SVT depuis 24 ans, passionné par la climatologie : *"Ce livre est une très bonne initiative car c'est ce que j'aurais aimé trouver lire il y a 3-4 ans lorsque j'ai commencé à m'intéresser à ce sujet."*
- Philippe de Larminat, ingénieur, 1964, Ph. D., 1972 ; ancien professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées (Rennes, France) et à l'École Centrale (Nantes). Auteur de 6 ouvrages et de plus de 100 articles publiés dans des journaux et lors de conférences internationales. Ses intérêts de recherche incluent la modélisation mathématique, l'identification des processus, le traitement de signaux et la théorie du contrôle. Depuis 2012, il poursuit un travail de pionnier sur l'identification du système climatique terrestre : *"Je me suis un peu fait l'avocat du diable, au cours de cette relecture, à laquelle je n'aurais pas consacré tant de temps si je n'avais pas apprécié beaucoup l'ensemble du texte."*
- et bien sûr Camille Veyres, mon mentor dans cette démarche : Polytechnicien (1967-1970), Ingénieur des mines, HEC CPA, Telecom ParisTech, ancien professeur, spécialiste Radio - Rayonnement - Fibre optique (France-Telecom), conférencier et auteur de nombreuses études.