

Il a paru utile de compléter les indications de l'ouvrage intitulé

La physique du climat, à l'usage de ceux qui aiment comprendre

www.laphysiqueduklimat.fr

par un texte plus long et détaillé suivant à peu près le même plan, mais destiné aux lecteurs moins pressés.

Nombre d'illustrations sont communes aux deux textes.

Faits et fables

Partie I : Quelques faits

- 1- Air et atmosphère
- 2- Climats
- 3- Insolation et stockage de chaleur
- 4- "Climat" (au singulier) , moyennes, et moyennes de moyennes
- 5- Rayonnement
- 6- Absorption et émission du rayonnement infrarouge thermique par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone
- 7- Océans, vapeur d'eau, dioxyde de carbone
- 8- Régulation locale et systèmes convectifs, régulation globale et albédo

Partie II : Quelques fables p.77

- 1- La vitre de la serre
- 2- La photosphère de l'étoile
- 3- L'équilibre radiatif
- 4- La formule de Revelle : pression partielle du CO₂ dans l'eau de mer et DIC
- 5- Les réponses impulsionnelles en réponse aux émissions de CO₂ venant de combustibles fossiles
- 6- Les modèles informatiques « du climat » et l'effet Lorenz
- 7- Les modèles informatiques « du climat » et la vapeur d'eau
- 8- Les « corrections » apportées aux observations
- 9- Exemples de désinformation et de « fausses nouvelles »
- 10- Arrhenius et les grands ancêtres

Avertissement

Les bases physiques sont explicitées de façon élémentaire aux chapitres 1,3,5,6,7. Des observations et les notions de climats et celle de « climat » (au singulier) sont présentées aux chapitres 2 et 4.

Rappels sur les unités :

Kilo = 1000, Méga = 1 million, Giga = 1 milliard (10^9), Tera = 10^{12} , Peta = 10^{15} , Exa = 10^{18} , Zetta = 10^{21} sont abrégés en k, M, G, T, P, E, Z : par exemple un Méga Pascal ou 10^6 Pascal d'environ 10 atmosphère femto = 10^{-15} , pico = 10^{-12} , nano = 10^{-9} , micro = 10^{-6} , milli = 10^{-3} ; ces fractions s'écrivent fm, pm, nm, μm et mm, pour le mètre.

Température : la température absolue en Kelvin (K) est liée à la température t en degrés Celsius par $T(\text{K}) = 273,15 + t(^{\circ}\text{C})$; la température en degrés Fahrenheit est convertie en $^{\circ}\text{C}$ par $t(^{\circ}\text{C}) = 5/9 (t(^{\circ}\text{F}) - 32)$; le 0°F est à $-17,8^{\circ}\text{C}$ et 100°F à $37,8^{\circ}\text{C}$. Le Kelvin est défini comme la fraction $1/273,16$ de la température du point triple de l'eau

Pression : c'est le quotient d'une force par une surface exprimé en un Newton / m^2 ou Pascal, ou traditionnellement en atmosphère de 1013,25 millibars ou 101325 pascals ; on rencontre souvent l'hectopascal de 100 pascals ou presque un millibar. Par commodité on emploiera aussi l'atmosphère de 1 atm = 101325 Pa

Rayonnement : le flux est exprimé en W/m^2 / stéradian et en W/m^2 quand on intègre sur toutes les directions.

Quantité de chaleur ou de travail : le Joule = $1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$ est le travail fourni par le déplacement d'un point soumis à une force d'un newton sur un mètre, dans la direction de la force. La calorie de 4,185 Joule réchauffe de 1°C un gramme d'eau de $14,5^{\circ}\text{C}$ à $15,5^{\circ}\text{C}$ sous 101325 Pa ; cette unité de chaleur est périmée et ne devrait plus servir depuis le 31/12/1977 ; les tables internationale de vapeur avaient une calorie de 4,18674 J et il y en avait d'autres encore.

ppm ou parties par million : le nombre de molécules d'un gaz trace (vapeur d'eau H_2O ou dioxyde de carbone CO_2 , 406 ppm) par million de molécules d'air ; **ppb ou partie par billion** ou milliard convient pour le gaz hilarant ou protoxyde d'azote (N_2O , 330 ppb) et le méthane (CH_4 , 1800 ppb).

Rappels sur le globe :

Le rayon équatorial est de 6,37814 Mm (ou $6,37814 \cdot 10^6$ mètres).

Le rayon polaire plus court est $(1-f)$ fois le rayon équatorial où f est l'aplatissement de $1 / 298,183 = 0,003 353$. L'accélération de la pesanteur de $9,780327 \text{ m}/\text{s}^2$ (y compris l'effet de la force centrifuge) à l'équateur passe à $9,832186 \text{ m}/\text{s}^2$ au pôle.

La vitesse de rotation en radian par seconde est $7,292 115 \times 10^{-5} \text{ rad}/\text{s}$ soit 86164.1 secondes par tour complet contre 86400 secondes en moyenne entre deux passages du soleil au méridien.

Dans le temps, 31 556 925 s, d'une révolution autour du soleil -une année-, la terre aura tourné 366,242 fois sur elle-même et le soleil aura paru tourner 365,242 fois autour de la Terre.

La surface de l'ellipsoïde terrestre est de 510 Tm^2 (ou millions de km^2)¹ répartie en océans (361 Tm^2) et en terre ferme (149 Tm^2) dont 10% en glaciers et calottes de glace, 19% en déserts ; le reste (106 Tm^2) est couvert de forêts (39 Tm^2 soit 37% des terres émergées), de plans d'eau et de fleuves ($1,5 \text{ Tm}^2$), autant pour les zones urbanisées, et 12 Tm^2 en zone subdésertique avec de maigres buissons.

Ne restent donc que 52 Tm^2 pour l'agriculture dont 41 Tm^2 en pâturages et 11 Tm^2 en cultures, pour fournir des calories (venant surtout de céréales et plantes comestibles) et des protéines - dont un tiers et plus vient de la viande du gros bétail et des laitages, en particulier pour ces 8 acides aminés « essentiels » que notre corps ne sait pas fabriquer et doit donc ingérer - à une population passée de 2,5 milliards en 1950 à bientôt 8 milliards ; les années 1960-2015 ont vu une multiplication par presque quatre de la production des principales céréales et de la viande, à surface agricole presque constante ; c'est là le bienfait d'une énergie bon marché fournissant à bas prix les engrais nécessaires pour reconstituer le sol après la récolte, surtout l'azote (via la fabrication d'ammoniac, grosse consommatrice d'énergie) et aussi potasse, phosphore et amendements calcaires.

¹ Pour l'ellipsoïde aplati (« oblate ») de demi-axes a , $b = a$, et c , $c/a = 1-f = 1-1/298,183$, et $e^2 = 1 - c^2/a^2 = 1 - (1-f)^2 = 0,081 8294^2$; pour $a = 6,37814 \text{ M m}$, la surface de l'ellipsoïde aplati, $2 \pi a^2 (1 + (1-e^2)/e \text{ ArgTanh}(e)) = 4 \pi a^2 0,99776$ vaut 510 Tm^2

Les 0,16 ha de cultures par humain, à 6 tonnes de blé par hectare, font 98 kg de blé, 72 kg de farine et 116 kg de pain.

Partie I Quelques faits

1- Air et atmosphère

Ce chapitre présente les températures, pressions et quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère de la Terre ; la vapeur d'eau assure 90% du rayonnement vers le cosmos de la troposphère et de la surface (pris ensemble) et régule finement, vers 10 km, la réémission vers le cosmos de la chaleur que le globe (hors stratosphère) reçoit du soleil.

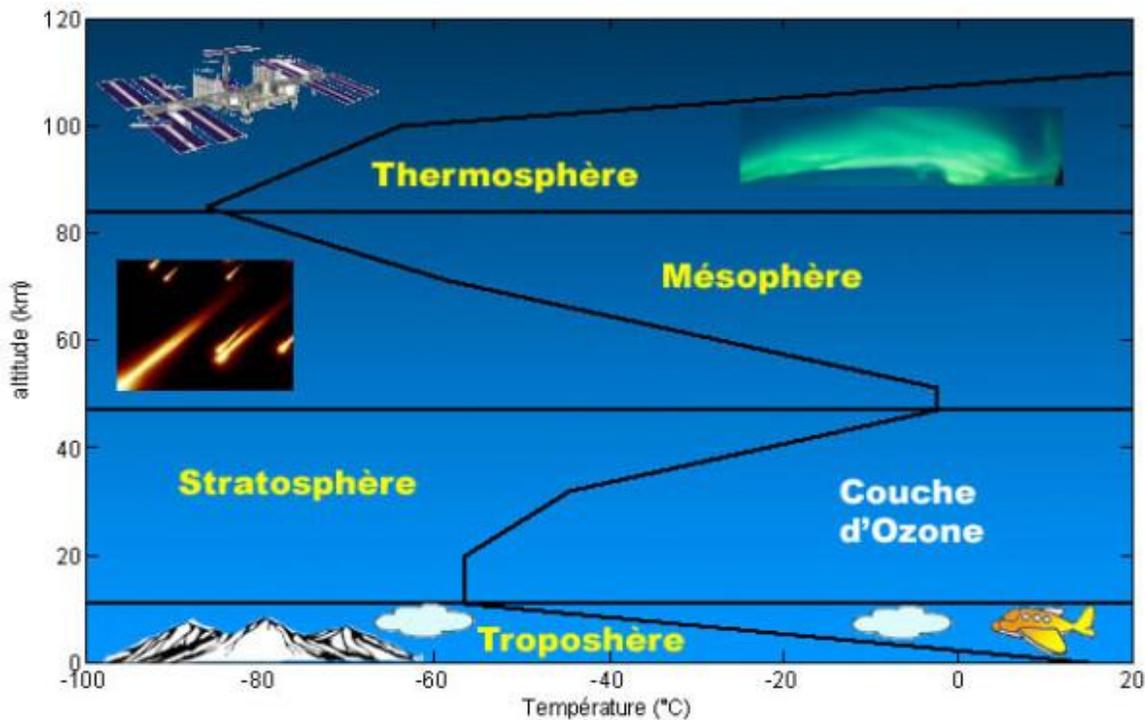
1-1 Introduction

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

- la **troposphère** (jusqu'à environ 12 km d'altitude aux moyennes latitudes, 17 km à l'équateur) : c'est l'atmosphère dans laquelle nous vivons ; elle est caractérisée par un gradient de température négatif : plus on monte en altitude, plus la température baisse, jusqu'aux environs de -50°C à -70°C (220 K à 200 K) ;
- la **stratosphère**, où la température, au contraire, remonte jusqu'à -3°C , vers 40 km d'altitude, siège de la couche d'ozone, est 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 : l'air s'y refroidit jusqu'aux alentours de -80 à -100°C à 90 km
- enfin la **thermosphère**, où l'air est très raréfié et ionisé

Les 2 dernières couches peuvent être, ici, négligées.

Figure 1-1



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 forte discontinuité, ou, autrement dit, à l'altitude où la convection s'interrompt.

L'altitude de la tropopause n'est pas fixée : elle diminue de la zone intertropicale où elle est très nette et haute (16 km) et froide (-80°C à -90°C), et la zone polaire où elle est plus floue, basse (8 km) et chaude (vers -40°C en et -60°C en hiver), comme le montrent à la figure 2 ci-dessous des graphiques tirés de relevés par ballons-sondes.

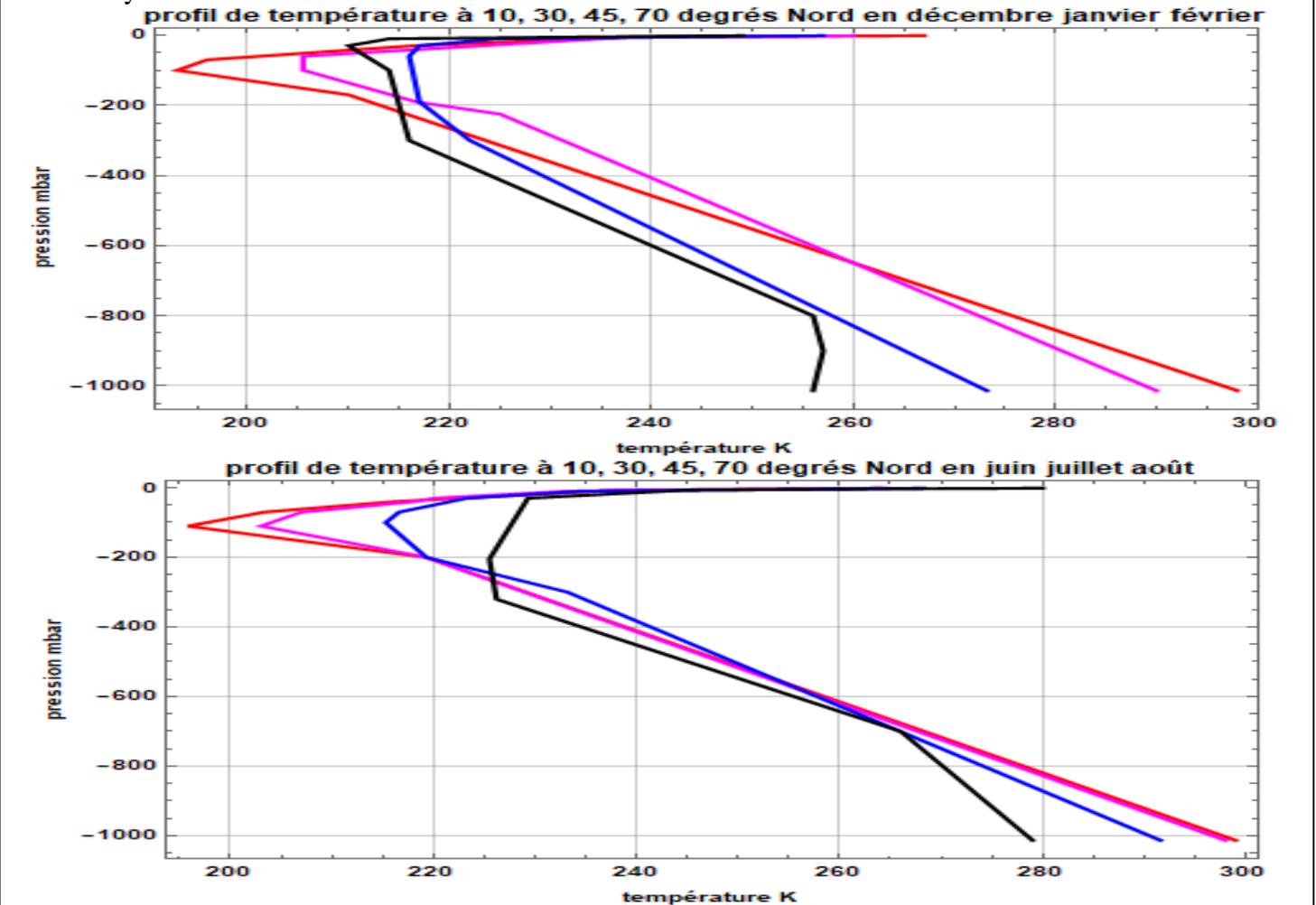
1-2 Température et humidité en fonction de la pression

Voir figure 2 ; y noter :

- (1) que plus la température en surface est froide, plus la tropopause est chaude et basse ; l'explication simple de ce fait est donnée plus loin.
- (2) l'inversion de température à 70°N en hiver entre la surface et 900 mbar : l'apport de chaleur se fait là en altitude par le mouvement de l'air qui entre 800 mbar et 900 mbar apporte de la chaleur sensible (air à une température supérieure à celle du sol) et latente (ou cachée, c'est à dire de la vapeur d'eau à condenser) ; cette zone à 70°N ne reçoit, en hiver, pratiquement aucun ensoleillement (figure 3-2).

Figure 1-2 Représentation très schématique de profils de température en fonction de la pression atmosphérique en millibar, en hiver et en été, pour les latitudes 10°N, 30°N, 45°N et 70°N.

Source : Sylvie Malardrel ²



Ces schémas sont précisés à la figure 3 par des profils types ³ « standards » de température et d'humidité en kg de vapeur d'eau par kilogramme d'air pour cinq cas : tropical (41% de la surface du globe), été des moyennes latitudes (23% de la surface du globe), été subarctique (6% de la surface du globe), hiver des moyennes latitudes (23% de la surface) et hiver subarctique (6% de la surface).

La température de la troposphère décroît en $P^{0,185}$ ou $P^{0,19}$ et la quantité de vapeur d'eau kg par kg d'air en $P^{3,2}$ où P est la pression prise à 1 en surface (1 atmosphère) et à 0 en haut de l'atmosphère.

Quelques points dans la thermosphère correspondent au pic, pour nous sans importance, observé près de $P = 0$. Les quantités de vapeur d'eau en surface, exprimées en kg de vapeur d'eau par tonne d'air sont :

² Sylvie Malardrel *Fondamentaux de Météorologie - A l'école du temps* Cepadues, 2009 (2^{ème} édition), 728 pages

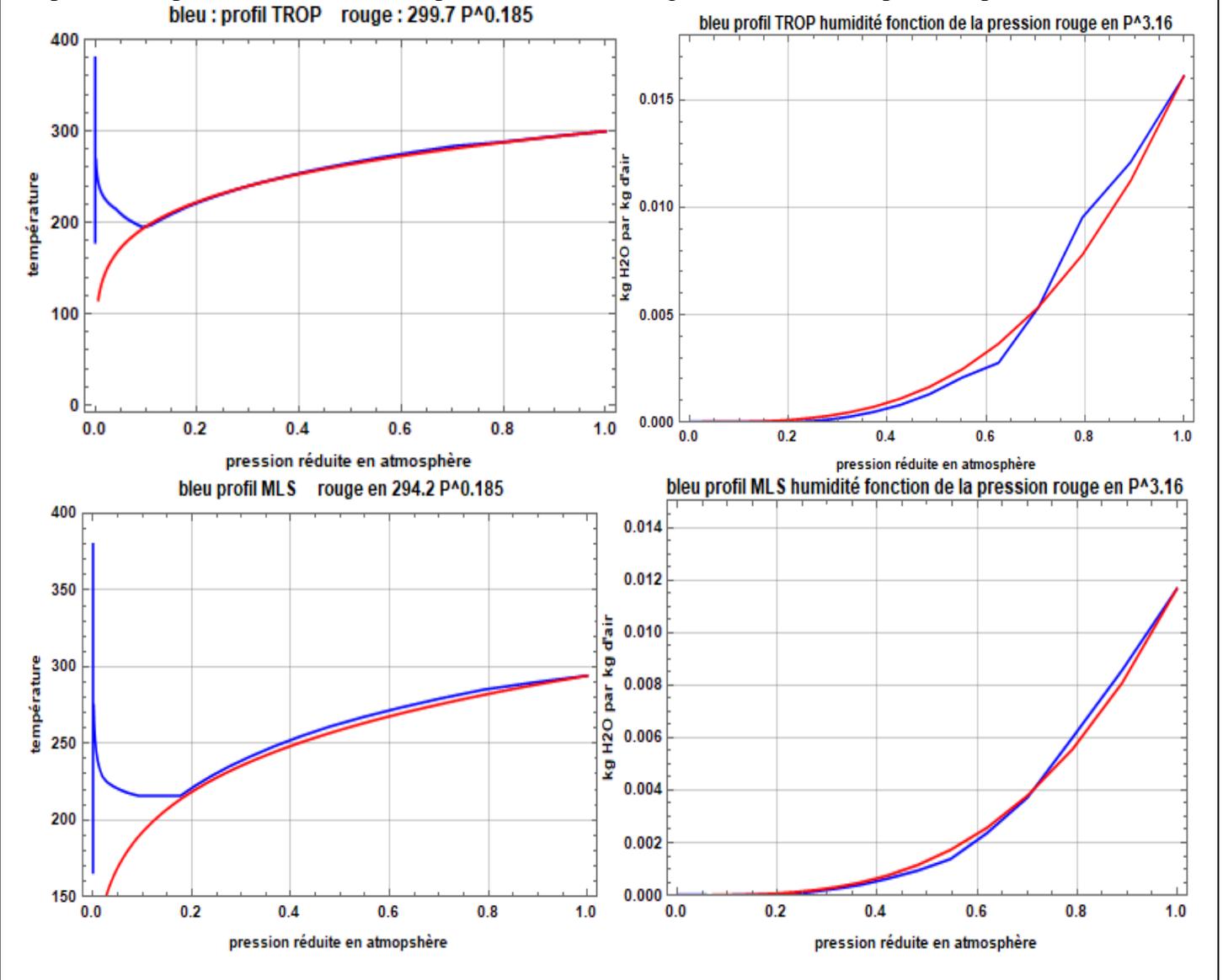
³ <http://eodg.atm.ox.ac.uk/RFM/atm/mls.atm> et analogue en remplaçant mls par trop, mlw, sas ou saw ; ces profils sont standardisés en vue de la comparaison de programmes de calculs de rayonnements

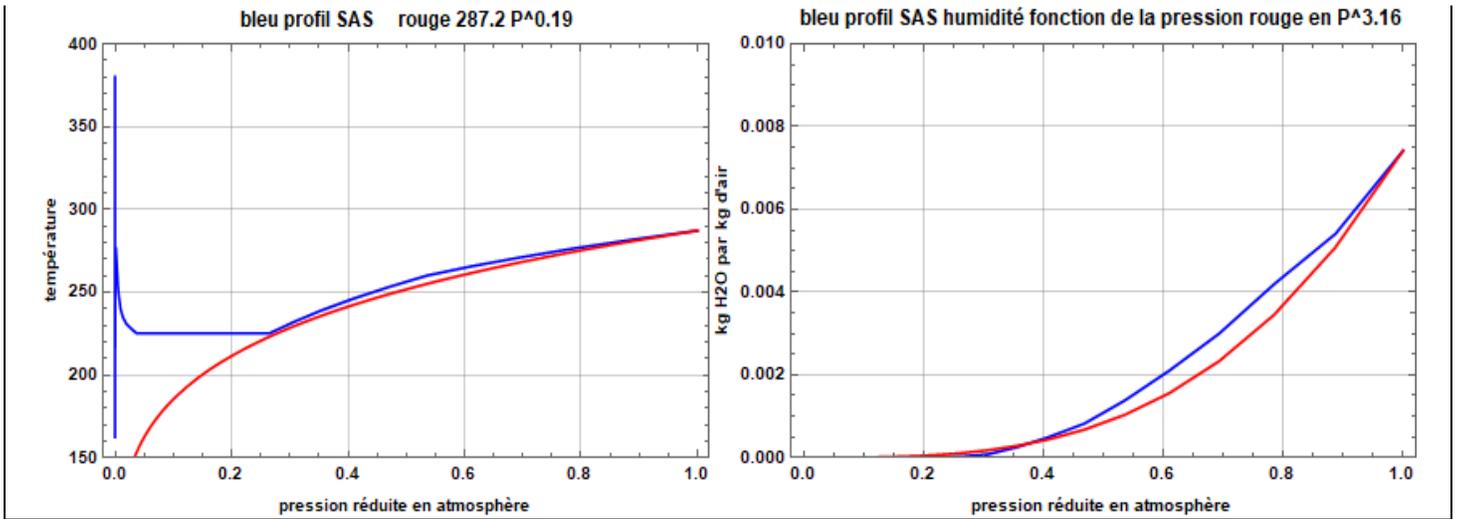
16 kg/t en tropical, 11,5 kg/t en été des moyennes latitudes et 7,5 kg/t en été subarctique.

Le cumul de la vapeur d'eau sur toute la troposphère est, pour ces trois cas, respectivement, 40,6 kg/m², 29 kg/m² et 20,7 kg/m².

Figure 1-3 Profils de température et d'humidité cas types tropical (TROP), été des moyennes latitudes (MLS) et été subarctique (SAS). En bleu valeurs observées moyennes, en rouge approximation simple en puissance de la pression exprimée en atmosphère avec $P=1$ en surface de la mer.

Les pics de température dans la thermosphère vers 100 km (figure 1) sont sans importance pour nous.



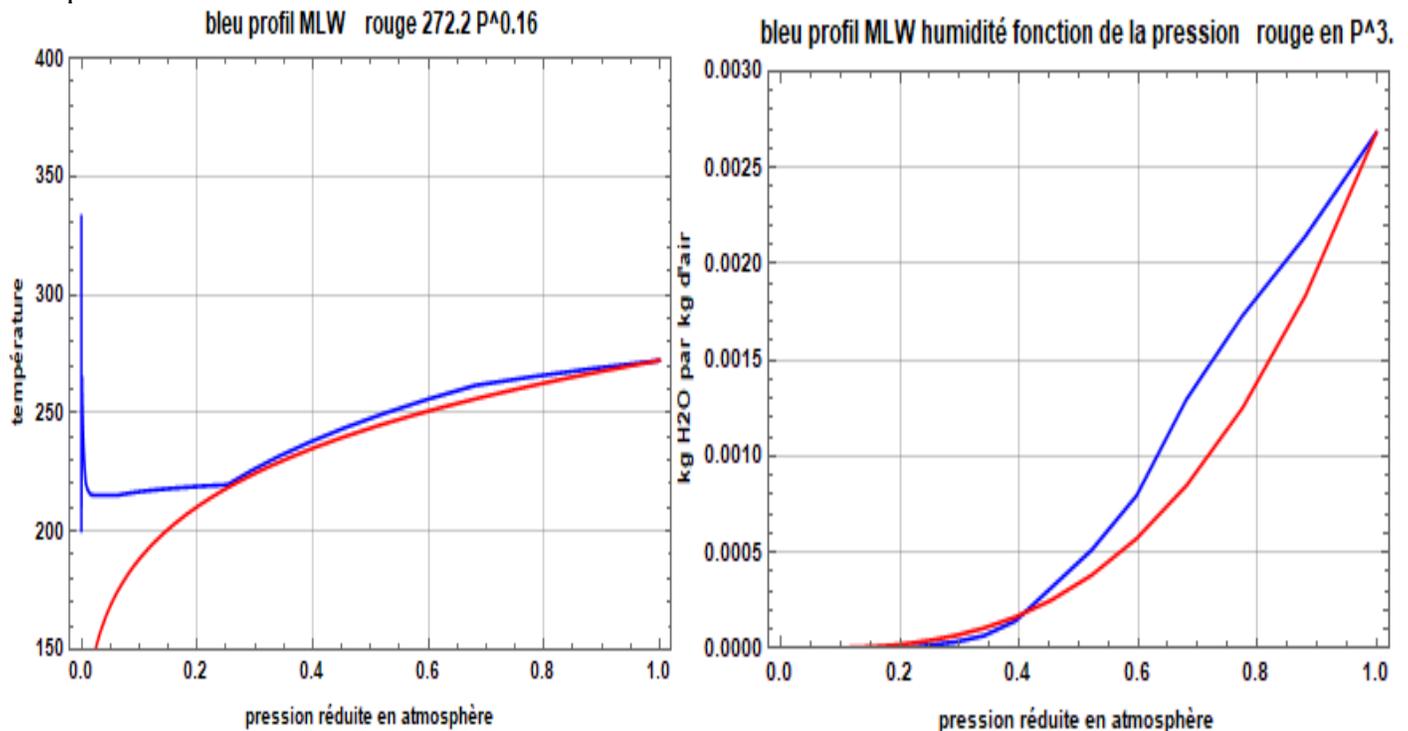


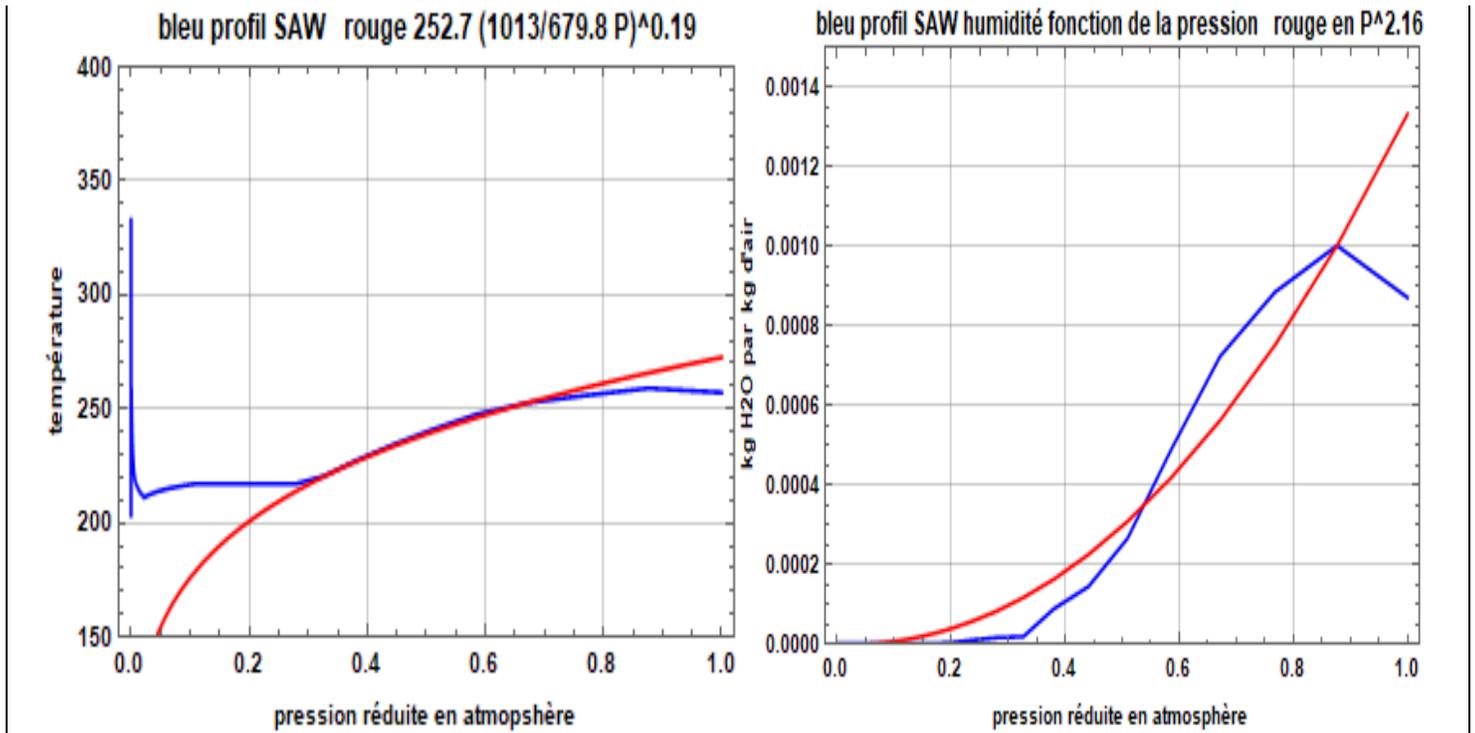
Les profils en hiver (figure 4) montrent que le **transport de la vapeur d'eau par le mouvement de l'air supplée l'absence d'insolation**, avec condensation de la vapeur d'eau et apport de chaleur, en altitude entre 900 mbar et 600 mbar.

Les quantités de vapeur d'eau sont, pour ces « profils-types » d'hiver, en surface ou près de la surface et en kg par tonne d'air, 2,5 kg/t aux moyennes latitudes et 1 kg/t en zone subarctique.

Le cumul de la vapeur d'eau sur toute la hauteur de la troposphère est alors 8,5 kg/m² aux moyennes latitudes et 4,3 kg/m² en zone subarctique.

Figure 1-4 Profils de température et d'humidité, cas types hiver des moyennes latitudes et hiver subarctique. En bleu valeurs observées moyennes, en rouge approximation simple en puissance de la pression exprimée en atmosphère avec $P=1$ en surface de la mer.





1-3 Justification des profils de température et d'humidité en fonction de la pression

La relation entre température et pression $T(p) / T_0 = (p / p_0)^{R/(C_p - C_h)} = (p/p_0)^{0,19}$ sur Terre est rigoureusement équivalente à la décroissance de la température avec l'altitude en $dT/dz = -g / (C_p - C_h)$ que l'aviation civile a standardisée à $-6,5 \text{ °C/km}$; g est l'accélération de la pesanteur $9,81 \text{ m/s}^2$, C_p la chaleur massique de l'air sec à pression constante 1005 J/kg/K , C_h l'apport de chaleur par degré d'environ -509 J/kg/K ; $d'Q = C_h dT$ positif si $dT < 0$. Le gradient (« lapse rate » en anglais) est $-9,81 / (1005 + 509) = -0,00647 \text{ K/m}$.

Démonstration :

La relation des gaz parfaits est $p = \rho RT$ où p est la pression en Pascal, T la température absolue, ρ la masse volumique en kg/m^3 et $R = 8,314 \text{ J/k} / (\text{masse molaire de l'air de } 28,96 \text{ grammes}) = 287 \text{ J/mole/K}$; la relation barométrique s'écrit $dp = -\rho g dz$, g accélération de la pesanteur. La variation de l'enthalpie est $dH = T dS + V dp = C_p dT$.

De $T dS = d'Q = C_h dT = C_p dT - R T dp/p$, et de $dp = -\rho g dz$ il vient $dp/p = -g/(R T_v) dz$ d'où $dp/p = R/(C_p - C_h) dT / T$ qui s'intègre en $T(p) / T_0 = (p / p_0)^{R/(C_p - C_h)}$ et le gradient vaut $dT/dz = -g / (C_p - C_h)$.

Sur Terre en partant de la haute troposphère :

$$288 \text{ K en surface} = 223 \text{ K} + 10 \text{ km} \times 6,5 \text{ K/km} = 223 \text{ K} (1 \text{ atm} / 0,26 \text{ atm})^{0,19}$$

Sur Vénus en partant de la tropopause vers 0,1 atmosphère et 230 K :

$$735 \text{ K en surface} = 230 \text{ K} + 65 \text{ km} \times 7,7 \text{ K/km} = 735 \text{ K} = 230 \text{ K} (92 \text{ atm} / 0,1 \text{ atm})^{0,17}$$

Sur Vénus, le gros de l'air est du dioxyde de carbone de masse molaire 44 grammes : $g = 8,87 \text{ m/s}^2$,

$C_p = 850 \text{ J/kg}$ pour le CO_2 (fortement variable avec la température), $R = 8,314 / 0,042 = 197$;

le gradient vaut $8,87 / (860 + 309) = 0,00765 \text{ K/m}$ et l'exposant $R / (C_p - C_h)$ vaut $197 / (850 + 309) = 0,17$.

Dans un nuage de pluie la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur d'eau augmente $|C_h|$ et diminue le gradient à, par exemple, $5,5 \text{ K/km}$ et C_h passe de -509 J/kg/K à -784 J/kg/K et, dans l'épaisseur du nuage, la température diminue moins vite avec l'altitude.

Au-dessus du nuage l'air est souvent bien plus sec et $|C_h|$ plus petit ce qui compense.

La pression partielle de la vapeur d'eau saturante par rapport à un plan d'eau liquide est, en pascal de 1 N/m^2 : $1,33108 \cdot 10^{26} \exp[-6816 / T] (1/T)^{5,1309}$.

Cette formule dit 611 pascal pour T= 273.15 K ou 0°C, 2334 Pa à 20°C et 4231 Pa à 30°C.

Une formule plus compliquée :

$$(6.7906 \cdot 10^{25} \exp[58,0697 \exp[-2999.92/T]] - 68640.4 \exp[-0.0699382 T] - 6790,24 / T) / T^{5.028}$$

dit bien 101 325 Pa pour t = 100°C.

Sur de la glace, la pression partielle de la vapeur d'eau vaut $611,2 \exp[17,62 (T - 273,15)/(T - 30,03)]$ Pa, soit approximativement $(T / 273,15)^{2,45}$ fois la pression partielle au-dessus de l'eau liquide surfondue entre 220 K (-53°C) et 0°C. En présence de cristaux de glace, l'eau surfondue, en dessous de 0°C, passera, à travers la phase vapeur, des gouttes aux cristaux.

Remplacer l'air de la Terre par du CO₂ sans modification du profil de la vapeur d'eau, remplacerait C_p de 1005 par un C_p d'environ 850 J / kg / K, et le gradient de -6,5 K / km par un gradient de -7,2 K / km, ce qui **diminuerait** la température de surface de 7°C environ.

1-4 Expressions simples des températures, pressions, masses volumiques et altitudes dans la troposphère

De $\rho = p / (R T)$, $T/T_0 = (p/p_0)^{R/\gamma}$, $C_p - C_h = g/\gamma$ en prenant T₀, p₀, ρ₀ en surface à z = 0, il vient des expressions simples de T, p, ρ (masse volumique) et z (altitude) en fonction des autres paramètres

Grandeur	T	p	ρ	z
fonction de z	T ₀ - γ z	p ₀ (1 - γ z / T ₀) ^{g/(R γ)}	ρ ₀ (1 - γ z / T ₀) ^{g/(R γ) - 1}	z
fonction de p	T ₀ (p/p ₀) ^{(R γ)/g}	p	ρ ₀ (p/p ₀) ^{1 - (R γ)/g}	T ₀ / γ (1 - (p/p ₀) ^{(R γ)/g})
fonction de T	T	p ₀ (T/T ₀) ^{g/(R γ)}	ρ ₀ (T/T ₀) ^{-1 + g/(R γ)}	(T ₀ - T) / γ

Et numériquement avec

$$\gamma = g/(C_p - C_h) = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m}, R = 287, g/(R \gamma) = 5,259, (R \gamma)/g = 0,19, g/(R \gamma) - 1 = 4,259, 1 - R \gamma / g = 0,809$$

Grandeur	T	p	ρ	z
fonction de z	T ₀ - 6.5 10 ⁻³ z	p ₀ (1 - γ z / T ₀) ^{5,259}	ρ ₀ (1 - γ z / T ₀) ^{4,259}	z
fonction de p	T ₀ (p/p ₀) ^{0,19}	P	ρ ₀ (p/p ₀) ^{0,809}	T ₀ / γ (1 - (p/p ₀) ^{0,19})
fonction de T	T	p ₀ (T/T ₀) ^{5,259}	ρ ₀ (T/T ₀) ^{4,259}	(T ₀ - T) / γ

La pression d'un mélange de gaz est la somme des pressions partielles p_i de ces gaz p_i = N_i k_B T, avec N_i nombre de molécules du gaz i par unité de volume, k_B = 1,380658 10⁻²³ J/K ; dans les conditions « standard » de température et de pression (T = 273,15 K, p=101 325 Pa), N_A = 6,022137 10²³ molécules par mole occupent 22,4141 litres soit N_L = 2,68676 10²⁵ molécules par m³ : N_A nombre d'Avogadro, N_L nombre de Loschmidt.

Exercice 1-4-1

A titre d'exercice voyons pourquoi la tropopause est plus haute et plus froide quand la surface est plus chaude. Dans une zone (la basse stratosphère) à température presque constante entre la tropopause et l'altitude h (20 km), comme le montrent les figures 1, 3 et 4, à la température T(h), les deux relations :

$$dp = - \rho g dz, g \text{ accélération de la pesanteur, équation barométrique,}$$

$$p = (R T) / \rho \text{ équation des gaz parfaits,}$$

font que $dp/p = - g dz / (R T)$ et avec T(h) et p(h) = p_h donnés, et

$$p(z) = p_h \exp[- g (z - h) / (R T(h))]$$

Nous supposons h = 20 km et p_h = 53,4 mbar indépendamment de la latitude (voir figures 3 et 4).

Dans la troposphère $T(z) = T_{\text{surface}} (p(z) / p_{\text{surface}})^{(R \gamma)/g} = T_{\text{surface}} - \gamma z$, où γ est le gradient de température de 6,5°C/km ; cette relation s'écrit aussi $p(z) = p_{\text{surface}} g / (R \gamma) \ln[1 - \gamma z / T_{\text{surface}}]$

Le point d'intersection des deux courbes p(z) est à l'altitude z₁ solution de

$$p_h \exp[- g (z_1 - h) / (R T(h))] = p_{\text{surface}} g / (R \gamma) \ln[1 - \gamma z_1 / T_{\text{surface}}] \text{ et } T(h) = T_{\text{surface}} - \gamma z_1$$

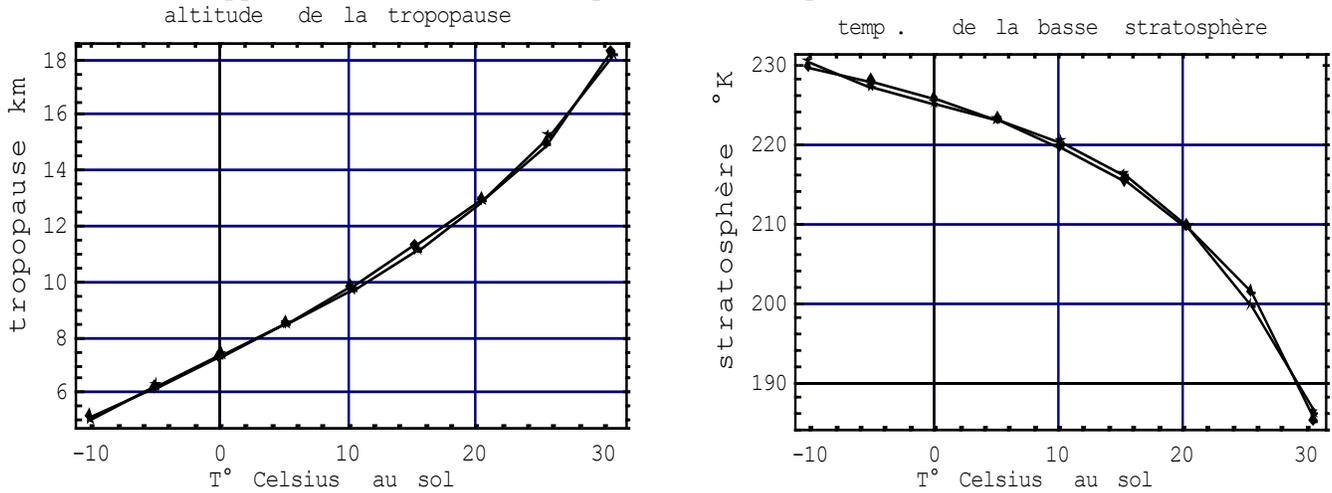
La solution est approchée numériquement par les fonctions, tracées à la figure 5, de la température de surface t exprimée en degrés Celsius,

$$T_{\text{tropopause}}(t_{\text{surface}}(\text{°C})) = 225,12 - 0,377 t + 0,00144 t^2 - 0,001 t^3$$

$$z_1 (t_{\text{surface}}(^{\circ}\text{C})) = 7,35 + 0,212 t - 0,0003 t^2 + 0,00015 t^3 \text{ en km}$$

Au-dessus de régions chaudes (et/ou humides car l'air humide est plus léger), la basse stratosphère est plus haute et froide (et lourde) ; au-dessus de régions polaires, la basse stratosphère est plus basse et chaude (et légère).

Figure 1-5 Altitude et température de la tropopause en fonction de la température de surface (atmosphère standard) : formules approchées et solution exacte pour $h = 20 \text{ km}$, $p_h = 53,4 \text{ mbar}$.



Exercice 1-4-2

Dans l'expression de la pression de vapeur d'eau saturante

$$p_{\text{vap sat}}(T) = 1,33108 \cdot 10^{26} \exp[-6816 / T] (1/T)^{5,1309}$$

remplacer T par son expression $T_{\text{surface}} P^{0,19}$ où P en atmosphère varie entre 0 (en haut de l'air) et 1 en surface donne approximativement :

$$p_{\text{vap sat}}(P) = p_{\text{vap sat}}(T_{\text{surface}}) P^{**}(-0,97487 + 1451,84 / T_{\text{surface}})$$

où la notation P^{**x} signifie P à la puissance x, ou P^x .

Les rapports $p_{\text{vap sat}}(P) / p_{\text{vap sat}}(T_{\text{surface}})$ pour une surface à 280 K et à 300 K sont, en fonction de P, tracés figure 6 à gauche en échelle logarithmique.

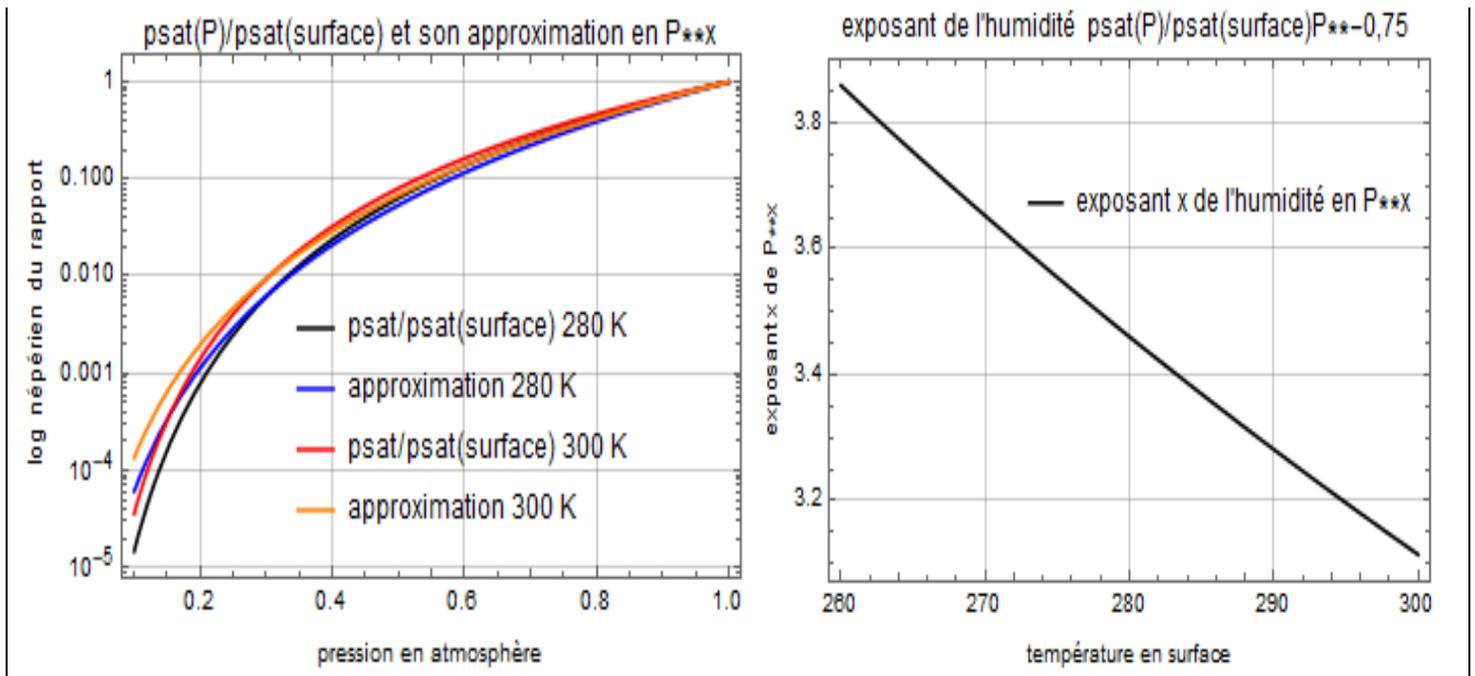
Noter la décroissance d'un facteur mille de la pression de vapeur saturante entre la surface et 200 mbar.

L'humidité **observée** sur les profils types des figures 3 et 4 est le produit de la pression de vapeur d'eau saturante par l'**humidité relative** (notée RH pour *Relative Humidity*) qui varie à peu près comme $0,8 P^{-0,75}$ ou $0,8 P$ comme on va le voir au paragraphe suivant (figure 7).

L'exposant qui décrit la décroissance de l'humidité effective avec la pression est tracé figure 6, vignette de droite.

Les trois cas d'exposant voisin de 3,2 à la figure 4 correspondent à $41\% + 23\% + 6\% = 70\%$ de la surface du globe avec, pour ces trois profils types, des températures de surface de 299,7 K, 294,2 K et 287,2 K.

Figure 1-6 Approximation de la vapeur d'eau à saturation et de la vapeur d'eau réelle en fonction de P (atm) en supposant une variation de l'humidité relative en $80\% P^{0,75}$



La vignette de droite de la figure 1-6 justifie que l'on prenne par la suite, pour des calculs simples, une **variation de la teneur en vapeur d'eau en P^{3,2}** donc un cumul de la vapeur d'eau en P^{4,2} à partir du haut de l'air.

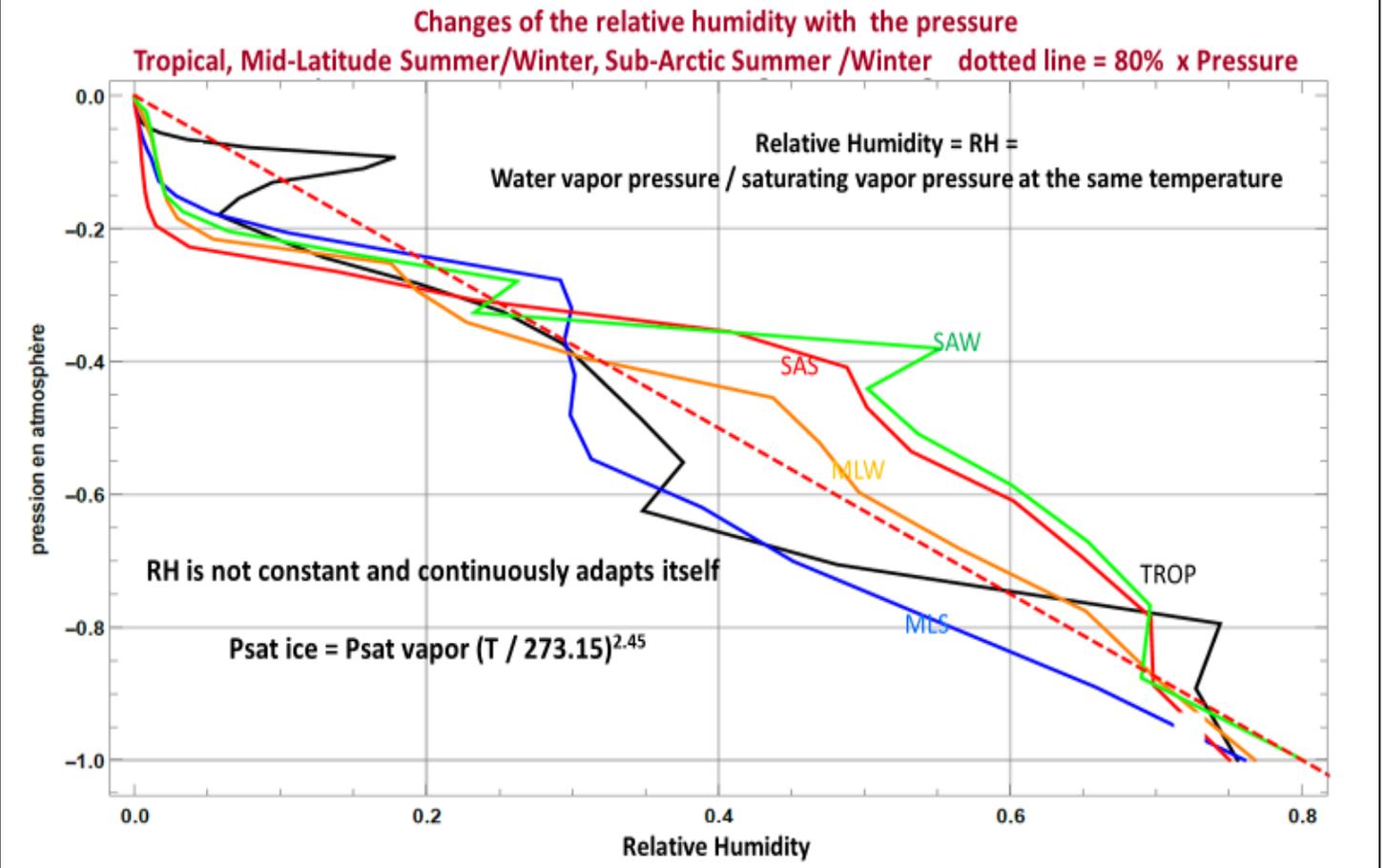
1-5 Humidité relative : RH

Les profils types des figures 3 et 4 permettent de calculer le rapport de la pression observée à la pression de vapeur saturante déterminée par la température à la même altitude ou pression ; ce rapport est appelé humidité relative, et noté RH (*Relative Humidity*).

En dessous de 500 mbar la température de surface dicte l'humidité ; au-dessus l'humidité relative est extrêmement variable, est une conséquence du mouvement de l'air, et n'est pas du tout corrélée avec la température de surface.

Nous verrons que c'est là au-dessus de 500 mbar que se fait la régulation du rayonnement du globe vers le cosmos, qui, sur l'année, emporte exactement le flux solaire absorbé.

Figure 1-7 Grande variabilité de l'humidité relative au-dessus de 500 mbar et une approximation (ligne en tirets rouges) en 80% P(atm)



1-6 Humidité spécifique, point de rosée

La masse d'une mole d'air sec est 28,966 grammes/mole, celle de la vapeur d'eau 18 grammes/mole.

Un air sec a à 25°C une masse volumique $\rho_{\text{sec}} = p / (R T) = 101325 \text{ Pa} / (287 (273,15 + 25)) = 1,18 \text{ kg/m}^3$

La pression partielle saturante de vapeur d'eau à 25°C est 3160 Pa à 25°C.

Le rapport de mélange en masse en kg de vapeur d'eau par kg d'air sec est $\omega = \rho_{\text{vapeur}} / \rho_{\text{air sec}}$

$$\omega = (p_{\text{vapeur}} / R_{\text{vapeur}}) / (p_{\text{air sec}} / R_{\text{air sec}}) = (18 / 28,896) p_{\text{vapeur}} / p_{\text{air sec}} = \mathbf{0,622 (p_{\text{vapeur}} / p_{\text{air sec}})}$$

L'humidité relative est selon l'OMM,

RH = $\omega / \omega_{\text{saturation}} = (p_{\text{vapeur}} / p_{\text{vapeur saturante}}) (p_{\text{air}} - p_{\text{vapeur saturante}}) / (p_{\text{air}} - p_{\text{vapeur}})$ exprimé en pour cent et était auparavant simplement **($p_{\text{vapeur}} / p_{\text{vapeur saturante}}$)**.

La loi de Dalton d'addition des pressions partielles et la relation $R_i = 8,314 / (\text{masse molaire du gaz } i)$ avec

$R_{\text{air sec}} = 287$ et $R_{\text{vapeur d'eau}} = 461,9$ amène $p = p_{\text{air sec}} + p_{\text{vapeur}}$

$$p = p_{\text{air sec}} R_{\text{air sec}} T + p_{\text{vapeur}} R_{\text{vapeur}} T = (p_{\text{air sec}} R_{\text{air sec}} T) (1 + (28,896 / 18) \rho_{\text{vapeur}} / \rho_{\text{air sec}})$$

L'humidité spécifique en kg de vapeur d'eau par kg d'air humide est notée q

$$q = \omega / (1 + \omega) = \rho_{\text{vapeur}} / (\rho_{\text{air sec}} + \rho_{\text{vapeur}}) = (p_{\text{vapeur}} / R_{\text{vapeur}}) / (p_{\text{air sec}} / R_{\text{air sec}} + p_{\text{vapeur}} / R_{\text{vapeur}}) = 18 p_{\text{vapeur}} / (28,896 p_{\text{air sec}} + 18 p_{\text{vapeur}}) = 0,622 p_{\text{vapeur}} / (p_{\text{air sec}} + 0,622 p_{\text{vapeur}})$$

Applications numériques : à saturation, avec les chiffres ci-dessus à 25°C, $p_{\text{vapeur}} = 3160$, $p_{\text{air sec}} = 101325$, $\text{RH} = 1$,

$$q = 0,622 \times 3160 \text{ Pa} / (101325 + 0,622 \times 3160) = 0,01903 \text{ soit } 19 \text{ kg/tonne d'air humide,}$$

$$\omega = 0,622 \times 3160 / 101325 = 0,0194.$$

Le point de rosée est la température à laquelle la vapeur d'eau devient saturante ; il est mesuré par certains appareils et on en tire $p_{\text{vapeur}} = 1,33108 \cdot 10^{26} \exp[-6816 / T_{\text{rosée}}] (1/T_{\text{rosée}})^{5,1309}$

Une humidité relative de 80% à 25°C et $p_{\text{air humide}} = 100\,000 \text{ Pa}$ devient saturante à 21,4°C : en effet

$$(p_{\text{vapeur}} / p_{\text{vapeur saturante}}) (p_{\text{air humide}} - p_{\text{vapeur saturante}}) / (p_{\text{air humide}} - p_{\text{vapeur}}) = 80\%$$

$$(p_{\text{vapeur}} / 3160) (100000 - 3160) / (100000 - p_{\text{vapeur}}) = 0,8$$

donne $p_{\text{vapeur}} = 2544 \text{ Pa}$ et $T_{\text{rosée}} = 294,53 \text{ K}$ ou 21,38°C

2- Climats (au pluriel)

Ce chapitre descriptif illustre les climats présents et passés et leurs principales caractéristiques.

2-1 La climatologie et les trente climats de Köppen-Geiger

La climatologie est, depuis la Grèce ancienne (Aristote, Eratosthène (né -276 à Cyrène, mort en -194 à Alexandrie), Hipparque (-190 à Nicée, -120 à Rhodes), Ptolémée (90 en Haute-Egypte, 168 à Canope)) une science géographique confortée par l'astronomie et la météorologie⁴.

La description de trente climats types mise au point vers 1900 par le botaniste et géographe Vladimir Köppen (1846-1940) se fonde sur la végétation, la saisonnalité des précipitations et les températures extrêmes (figure 1). Voir le site <http://koepen-geiger.vu-wien.ac.at/> et les livres de géographie de A. Hufty ou de G. Beltrando⁵.

Ce sont les limites entre ces climats qui, sur les derniers millénaires ont varié de quelques centaines de kilomètres en latitude et de quelques centaines de mètres en altitude (figure 2) selon les cycles climatiques dont la périodicité va de quelques dizaines d'années à des millénaires. Entre 1930 et 1970, la limite entre climats C (tempéré chaud) et D (neigeux) dans les plaines agricoles du Midwest américain autour de 40°N (latitude de Lisbonne, Naples, New-York et Pékin) s'est décalée (figure 3) de 200 km vers le sud puis est revenue vers le nord, selon un cycle de 60 ans.

Les historiens, dont ceux des climats⁶, les archéologues et les géologues ont mis en évidence l'importance des fluctuations climatiques pour le développement des civilisations sédentaires, depuis le début de l'holocène il y a 11 700 ans environ⁷. L'astronome Herschel a, en 1801, montré que le prix du blé depuis le moyen-âge marquait sa rareté due à de mauvaises récoltes et se liait assez bien aux cycles solaires⁸.

Des ouvrages tels que « *Global crisis, war, climate change & catastrophe in the seventeenth century* »⁹ et pour la Chine « *Sous l'œil des dragons* »¹⁰ décrivent les conséquences politiques des coups de froid et des sécheresses, des mauvaises récoltes et des famines pendant le « *petit âge de glace* », disons de 1320 à 1860.

⁴ Le premier ouvrage de ce nom conservé est celui d'Aristote « *Météorologiques* »

[https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9orologiques_\(Aristote\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9t%C3%A9orologiques_(Aristote))
édition bilingue de Pierre Thillet, 2008, 616 pages Gallimard collection Tel n°356
aussi <http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Aristote/meteorologie.htm>

⁵ André Hufty *Introduction à la climatologie Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine* de boeck 2001, 542 pages

Gérard Beltrando *Les Climats, processus, variabilité et risques* Armand Colin, 2^{ème} édition 2011, 286 pages

Jean-Pierre Vigneau *La climatologie* Armand Colin, 2005, 200 pages

Gisèle Escourrou *Le climat de la France* PUF collection Que sais-je ?, 1982, 125 pages

Marcel Leroux *La dynamique du temps et du climat* 2^{ème} édition, Dunod 2004 367 pages

Hacène Arezki *Climat mensonges et propagande*, Thierry Soucar éditions, 2010, 300 pages

⁶ Nombreux livres de Emmanuel Leroy Ladurie ; Emmanuel Garnier *Les dérangements du temps 500 ans de chaud et de froid en Europe* Plon, 2010, 245 pages ; Roger Dubrion *Le climat et ses excès* Féret, Bordeaux, 2008, 160 pages
Christian Pfister *Wetternachhersage 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen* Haupt Verlag Bern 1999, 304 p.
Rüdiger Glaser *Klimageschichte Mitteleuropas* Primus Verlag 2008, pp. 108-109

Articles : Emmanuel Garnier – *Basses extraordinaires et grandes chaleurs 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes*. Colloque 193 SHF *Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau*, Lyon, 7-8 octobre 2009 ; Wetter, O., Pfister, C.: *An underestimated record breaking event: why summer 1540 was very likely warmer than 2003*, *Clim. Past Discuss.*, 8, 2695-2730, doi:10.5194/cpd-8-2695-2012, 2012
https://www.researchgate.net/profile/Christian_Pfister

⁷ Les dates avant le présent « BP » (Before Present) sont par convention rapportée à 1950 ; il faut donc en 2018 ajouter 68 ans à ces 11700 ans

⁸ Lev A. Pustilnik, Gregory Yom Din *Influence of solar activity on state of wheat market in medieval England*
<http://www.crawfordperspectives.com/documents/0312244SolarWheatMedEngl.pdf>

W. Herschel: *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 91, 265 (1801)

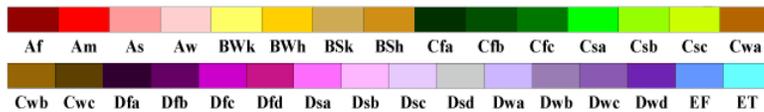
⁹ Geoffrey Parker, Yale University Press, 2013, 871 pages

¹⁰ Thimoty Brook, Payot, 2012, 421 pages

Figure 2-1 Les trente climats de Köppen Geiger <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>
http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pics/kottek_et_al_2006.gif

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASClmO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Main climates

A: equatorial
 B: arid
 C: warm temperate
 D: snow
 E: polar

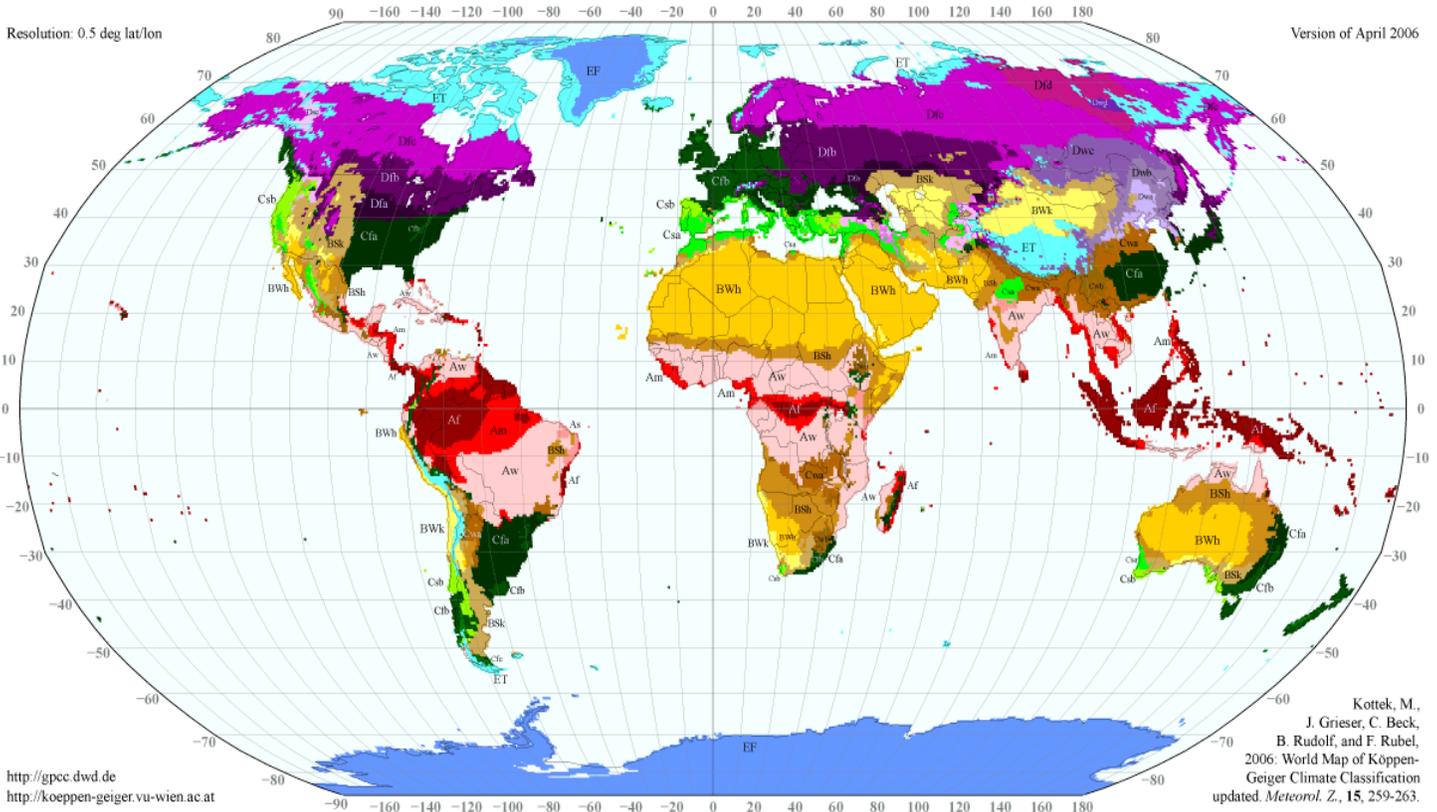
Precipitation

W: desert
 S: steppe
 f: fully humid
 s: summer dry
 w: winter dry
 m: monsoonal

Temperature

h: hot arid
 k: cold arid
 a: hot summer
 b: warm summer
 c: cool summer
 d: extremely continental

F: polar frost
 T: polar tundra



Sont bien visibles à la figure 1 :

- les zones de climat équatorial humide en rouge foncé et rouge très foncé ;
- les zones de mousson, en rose clair avec une saison humide en été, de mai à septembre pour l'hémisphère nord, telles la mousson indienne, la mousson africaine, la mousson australienne et la mousson brésilienne ;
- les zones de steppes arides chaudes en bistre, et les zones désertiques aux latitudes entre 20° et 30° ;
- le climat méditerranéen, en vert clair où il ne pleut pas du tout en été ;
- les climats tempérés en vert foncé avec des précipitations toute l'année, plus chauds (C) ou plus neigeux (D) et leurs variantes continentales à été chaud vers 50°N en Russie et au Canada, avec des forêts d'arbres à feuilles caduques ;
- les climats Dfc en Sibérie, Scandinavie et nord du Canada, neigeux, à été frais et sans saison sèche, où seuls survivent certains conifères ;
- les zones ET de toundra polaire avec quelques lichens pour toute végétation.

Noter le fort contraste entre façades occidentales et orientales des continents : à la latitude de 40°N, New-York et Pékin ont des hivers bien plus rudes que Lisbonne ou Naples : voir au § 2-8 la comparaison des températures de Poitiers (France) et de Caribou aux USA dans l'état du Maine.

La figure 2 montre, en Suisse, le changement, entre la fin du « petit âge de glace » et la fin du XX^{ème} siècle, de la limite en altitude des différents types de végétation. La figure 3 explique pourquoi certains ont aux Etats-Unis annoncé dans les années 1960 et 1970 l'arrivée imminente de la nouvelle grande glaciation, attribuée par les sectes écologistes et par leurs « scientifiques » aux aérosols de la coupable industrie humaine.

Figure 2-2 Evolution, entre la fin du petit âge de glace ou fin du XIXème siècle, et la fin du XXème siècle de la limite en altitude entre climats C, D et E près de Zürich.

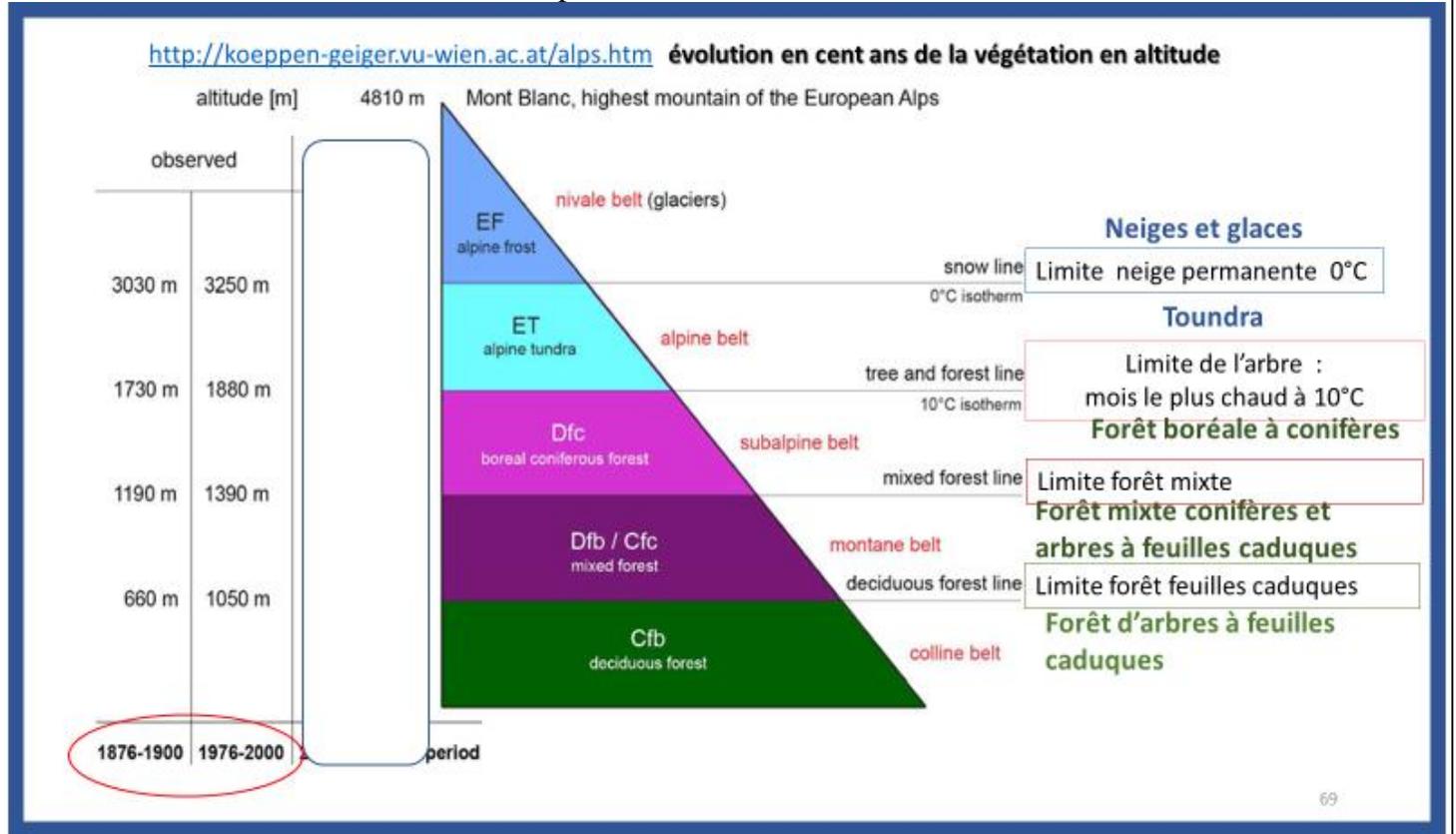
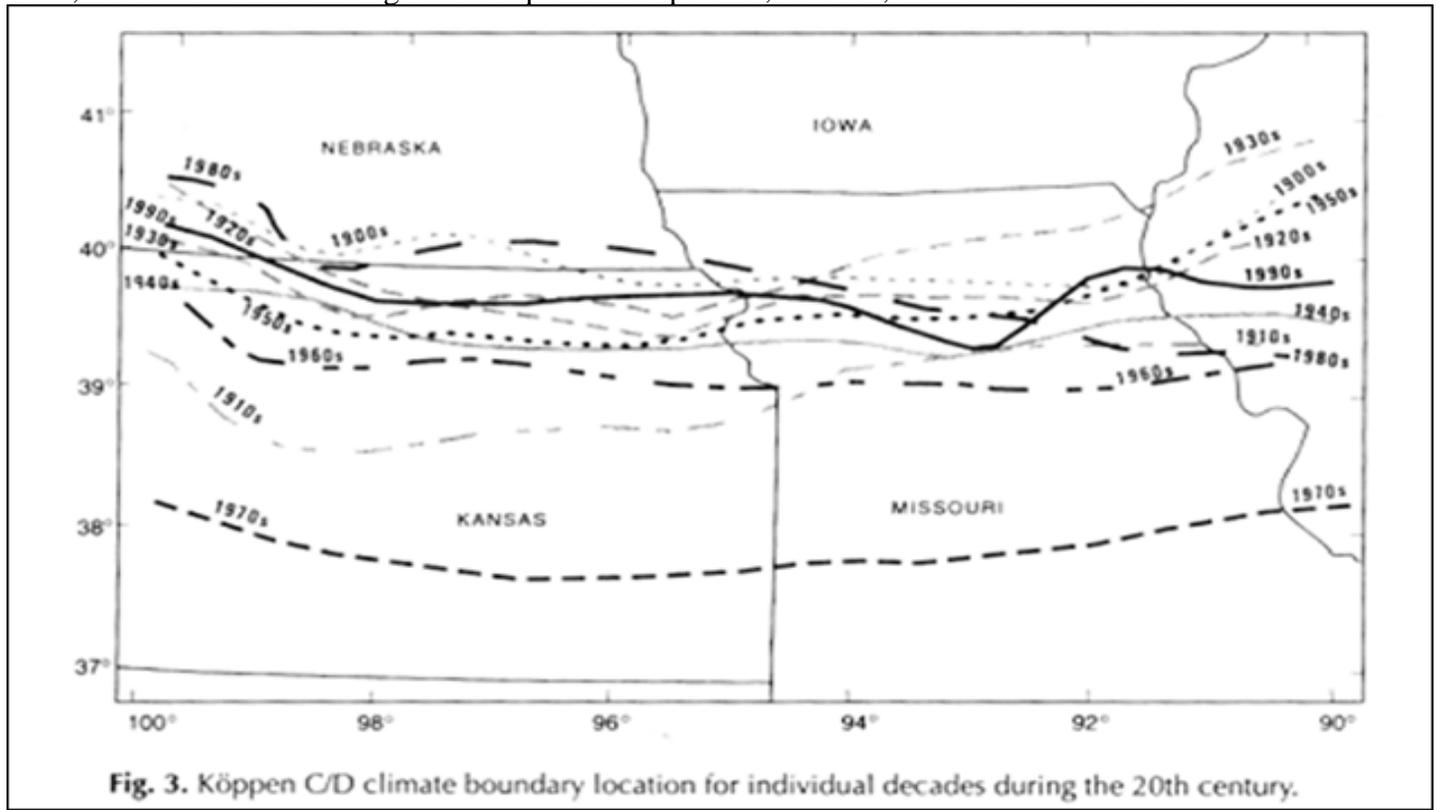


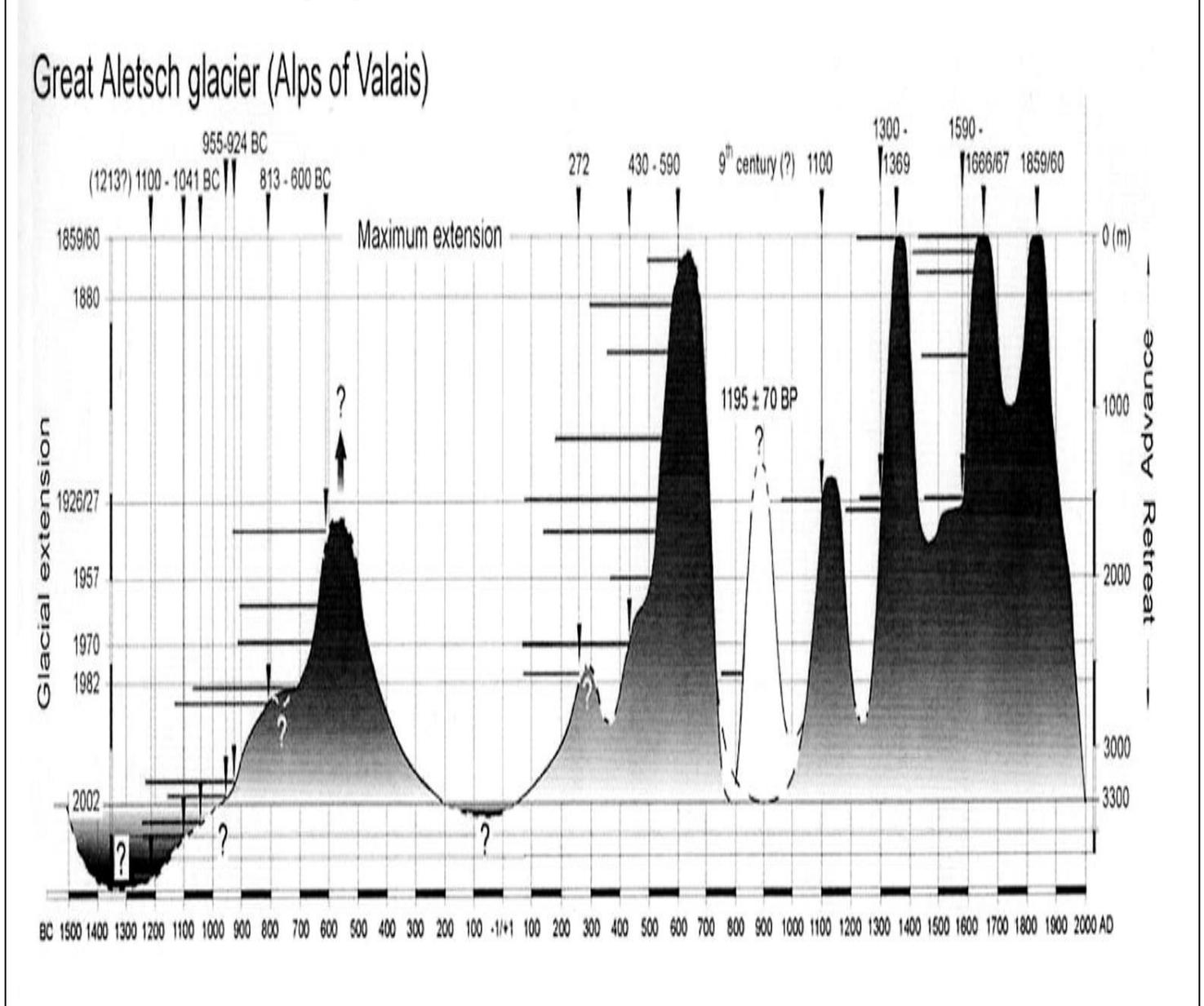
Figure 2-3 Limite entre climats C (tempéré chaud) et D (neigeux) autour de 40°N aux Etats-Unis de 1910 à 1990 : le déplacement de 200 km vers le sud entre 1930 et 1970 a fait craindre le début de la grande glaciation à venir, et donné lieu à un battage médiatique. 60 ans plus tôt, en 1910, cette limite était à 39°N



La figure 5 montre les fluctuations de la longueur du plus grand glacier alpin reconstituée depuis 3200 ans ¹¹ : la langue glaciaire se termine aujourd'hui, comme au haut moyen-âge et à l'époque romaine, à 3,3 km en amont de sa position de plus grande extension datée de 1860, qui avait déjà été atteinte ou presque en 1666 et en 1350 environ.

Le gros du recul a eu lieu de 1860 à 1960, avant le réchauffement récent observé depuis 1975, que certains attribuent aux activités humaines.

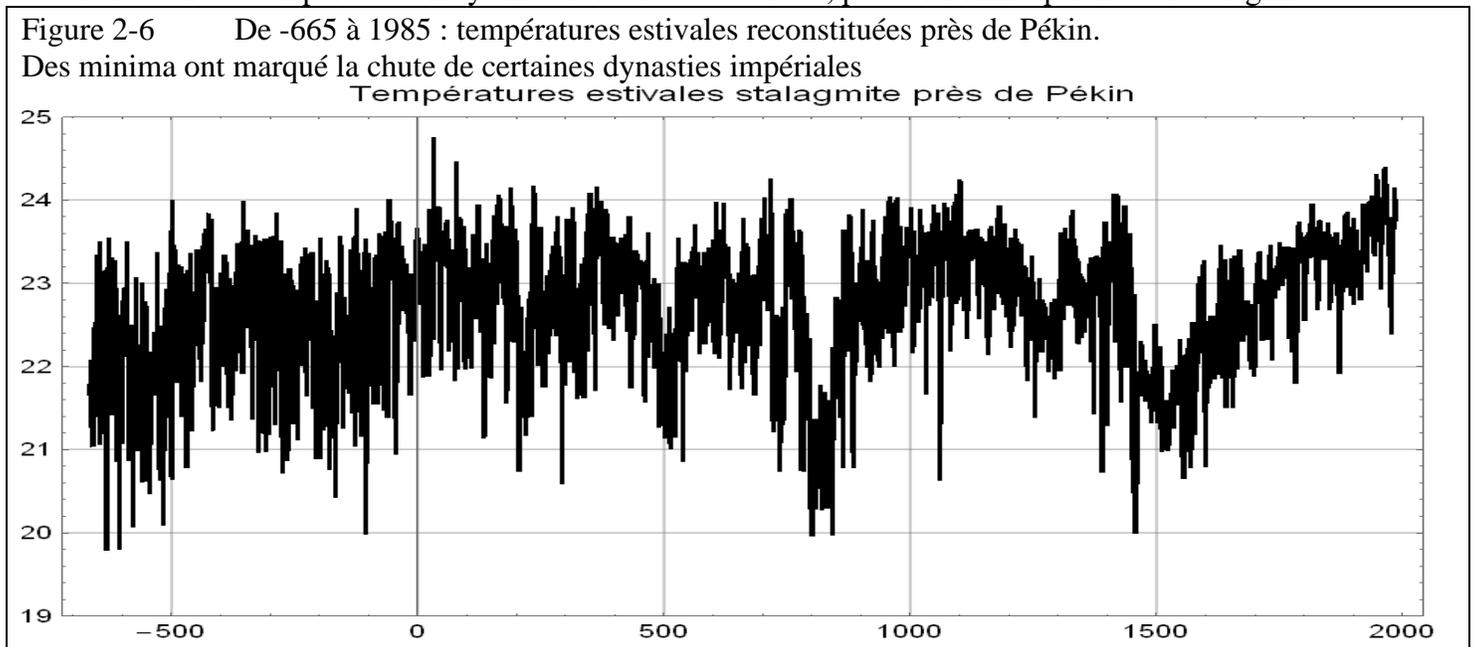
Figure 2-5 Le plus grand glacier des Alpes : avances et reculs depuis 3200 ans ; extension maximale en 1859/1860 (échelle des temps à gauche et des mètres à droite)



¹¹ Holzhauser, H. 1997: *Fluctuations of the Grosser Aletsch Glacier and the Gorner Glacier during the last 3200 years: new results*. In Frenzel, B., editor, *Glacier fluctuations during the Holocene*. Gustav Fisher Verlag, 3538
<http://books.openedition.org/irdeditions/9983>

2-2 Les températures des derniers millénaires

Divers marqueurs permettent de retracer les conditions moyennes en un lieu ; la figure 2-6 donne un exemple de reconstitution des températures moyennes d'été de -650 à 1985, près de Pékin à partir d'un stalagmite.¹²



2-3 Températures ... depuis que l'on a des thermomètres

Les températures extrêmes observées à Paris un même mois mais d'années différentes (tableau 2-A ci-dessous) diffèrent d'environ 35°C, ce qui suggère un écart-type de 6°C ; rappelons que 68,3% d'une distribution gaussienne est à moins d'un sigma (ou écart-type) de la moyenne, 95,5% à moins de deux sigmas ; la probabilité d'être à au moins trois sigmas au-dessus de la moyenne est de 1,35 pour mille, comme celle d'être à 3 σ et plus en-dessous de la moyenne.

La réalité est sans doute plus dure, non-gaussienne avec des événements extrêmes plus fréquents ou « probables » que pour la gaussienne.¹³

https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=117&id_rubrique=39

donne pour chaque station et chaque mois {maximum absolu observé, moyenne des maxima journaliers du mois, moyenne du mois, moyenne des minima journaliers du mois, minimum absolu observé} et des nombres de jours sur certaines plages de températures et aussi des degrés-jour de chauffage, des heures d'ensoleillement, des précipitations mensuelles et des précipitations maximales observées sur une journée (ces chiffres sont souvent du même ordre de grandeur !). Les records de froid en France sont à Mouthe (à 930 m d'altitude dans le Jura) : -38,4°C¹⁴ le 13 janvier 1968 mais +1,1°C au maximum d'un 13 janvier.

Tableau 2-A Températures journalières minimales et maximales depuis 1873 à Paris-Montsouris en °C											
Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
-14,6 23/1/1940	-14,7 2/2/1956	-9,1 3/3/1890	-3,5 13/4/1879	-0,1 7/5/1874	3,1 10/6/1881	6 3/7/1907	6,3 29/8/1881	1,8 26/9/ 1889	-3,1 27/10/1887 29/10/1890	-14 28/11/1890	-23,9 10/12/1879
16,1 5/1/1999	21,4 28/2/1960	25,7 25/3/1955	30,2 18/4/1949	34,8 24/5/1922 29/5/1944	37,6 26/6/1947	40,4 28/7/1947	39,6 6/8/2003	36,2 7/9/1895	28,9 1/10/2011	21 2/11/1899	17,1 16/12/1989

Avec sur le globe une ou deux centaines de régions « météorologiques » on aura, pour le bonheur des journalistes, chaque année un (voire deux) événement dit de *temps de retour de cent ans*, pour chaque type de

¹² Tan, M., T.S. Liu, J. Hou, X. Qin, H. Zhang, and T. Li : *2650-Year Beijing Stalagmite Layer Thickness and Temperature Reconstruction*, 2003, <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/tan2003/tan2003.html>

¹³ Voir les ouvrages de Nicholas Taleb sur les Cygnes noirs et sur les événements majeurs par leurs effets, mais de faible probabilité « ressentie ». *The Black Swan* Penguin Books, 2008-2010, 444 pages

¹⁴ <http://www.meteofrance.fr/actualites/22471664-mouthe-village-le-plus-froid-de-france-explications>

catastrophe : pluie, sécheresse, vague de chaleur et incendies de forêts, vague de froid, crue et inondation, tempête,

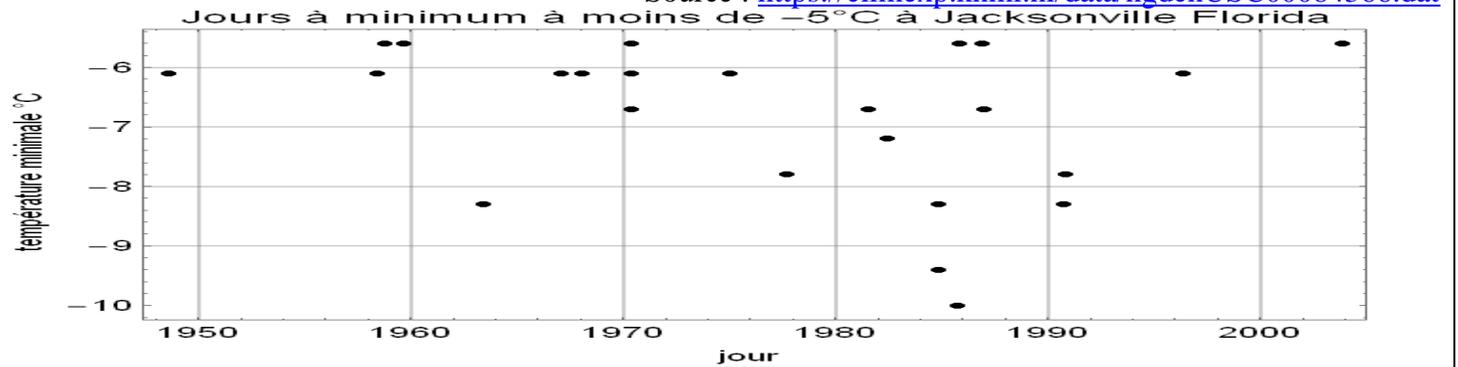
Pour une région donnée la récurrence de grands froids peut interdire certaines cultures : par exemple les orangers ou citronniers dans le nord de la Floride ont beaucoup souffert, comme les joints toriques de la fusée de la navette Challenger qui a explosé le 28 janvier 1986, à cause d'un anticyclone très froid, rare (figure 7).

Voir, pour la France et les oliviers gelés en 1956 (comme en 1608 et 1709),

https://fr.wikipedia.org/wiki/Vague_de_froid_de_l'hiver_1956_en_Europe_et_au_Maghreb

Figure 2-7 Date des minima journaliers à moins de -5°C dans le nord de la Floride à Jacksonville

Source : <https://climexp.knmi.nl/data/ngdcnUSC00084366.dat>

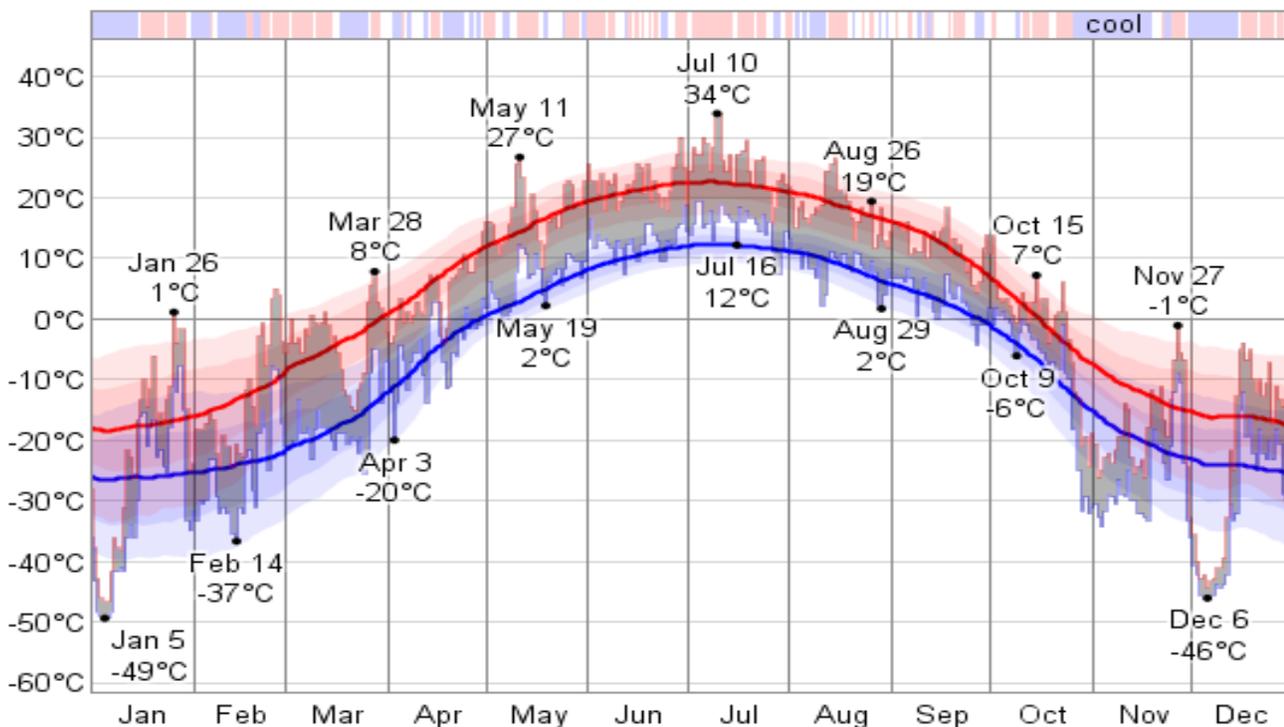


La variabilité des températures croît avec la latitude : comparer les observations à Fairbanks à deux degrés au sud du cercle polaire, ville exposée à des passages d'anticyclones mobiles polaires très froids amenant en peu de jours en hiver des baisses de température de 30°C ou plus, et les observations à Singapour, île proche de l'équateur (figures 8 et 9).

Figure 2-8 Illustration de la dynamique journalière des températures à Fairbanks (Alaska, $64^{\circ} 50' 37'' \text{N}$, $147^{\circ} 43' 23'' \text{O}$) pendant l'année 1975 ; les lignes minces rouge et bleue sont les extrema quotidiens ; entre ces deux lignes remplissage en gris ; les lignes épaisses rouge et bleue sont les moyennes "climatologiques" (sur 30 ans) avec en couleurs les limites des intervalles de probabilité 25% - 75% et 10% - 90% (couleur la plus claire).

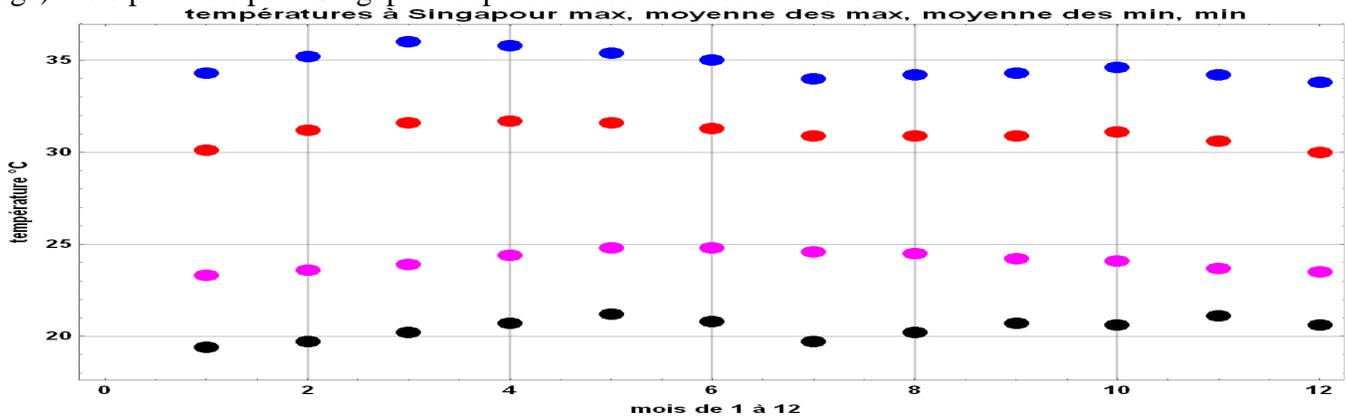
En haut du graphique, la barre est bleue quand maximum et minimum de 1975 sont tous deux en dessous de leur moyenne, et en rouge quand tous deux sont au-dessus de leur moyenne, en blanc autrement.

<http://weatherspark.com/history/3294/1975/Fairbanks-Alaska-United-States>



	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
min°C	24	25	25	25	26	26	25	25	25	25	25	24
max°C	31	32	32	32	33	32	31	31	32	32	31	30
Eau °C	27	26	28	30	31	30	29	29	29	29	29	28
Heures de soleil	6	7	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4

Figure 2-9 Températures extrêmes (bleu et noir) et moyenne des minimums (magenta) et des maximums (rouge) mois par mois pour Singapour depuis le début des observations



2-4 Précipitations : la quantité de pluie, mois par mois, fait le climat

Les précipitations sont exprimées en kg d'eau par m² par an, par jour ou par heure, ou mm d'eau par m², et leur cumul mensuel ou annuel est exprimé en mm (ou kg/m²).

Le régime **spatial et temporel des précipitations est une conséquence de l'organisation de la circulation atmosphérique**, dont la "finalité" est le transfert de vapeur d'eau des zones tropicales vers les hautes latitudes où elle se condense et alimente le rayonnement de l'air vers le cosmos en infrarouge thermique (OLR, Outgoing Longwave Radiation), de façon à compenser exactement, "en moyenne" sur tout le globe et sur quelques semaines, le flux solaire absorbé par le globe. La vapeur d'eau, qui précipite en pluie ou neige, ne vient souvent pas de l'endroit où il pleut ; pour l'équateur météorologique vertical, elle vient du balayage par les alizés de milliers de kilomètres au nord et au sud : ces vents alizés convergent dans la « cheminée équatoriale » ; pour les averses des fronts froids de nos latitudes, la vapeur d'eau vient de milliers de kilomètres au sud-ouest et elle est transférée en direction du nord-est dans le couloir dépressionnaire qui précède les AMP (anticyclones mobiles polaires) qui se déplacent, eux, vers le sud-est avec un effet « chasse-neige ».

Les pluies d'orage à alimentation locale ne durent que quelques minutes ou dizaines de minutes.

Les précipitations sont très fortement variables : des ordres de grandeur des précipitations mois par mois en climat tempéré (Paris sur 1881-1950 : minimum annuel 270 mm en 1921¹⁵, maximum annuel 828 mm) et en climat méditerranéen (port d'Alger, 1843-1942) sont aux tableaux 2-A et 2-B.

	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	mm / an
Minimum	6	2	0	0	0	1	6	3	0	5	9	8	
Moyenne	46	39	42	46	55	52	57	53	48	57	53	55	603
Max	120	100	88	109	124	116	157	161	149	168	133	141	

Belgrand pour les égouts de Paris avait choisi un module de 45 mm/heure atteint ou dépassé tous les "dix ans". L'intensité d'une telle averse en mm/heure pendant une durée de t minutes serait de la forme 3420/(15 + t) ou 2590/(10 + t).

¹⁵ <http://www.meteo-paris.com/chronique/annee/1921>

¹⁶ G. Réméniéras *Hydrologie de l'ingénieur* Eyrolles Paris 1965, 456 pages

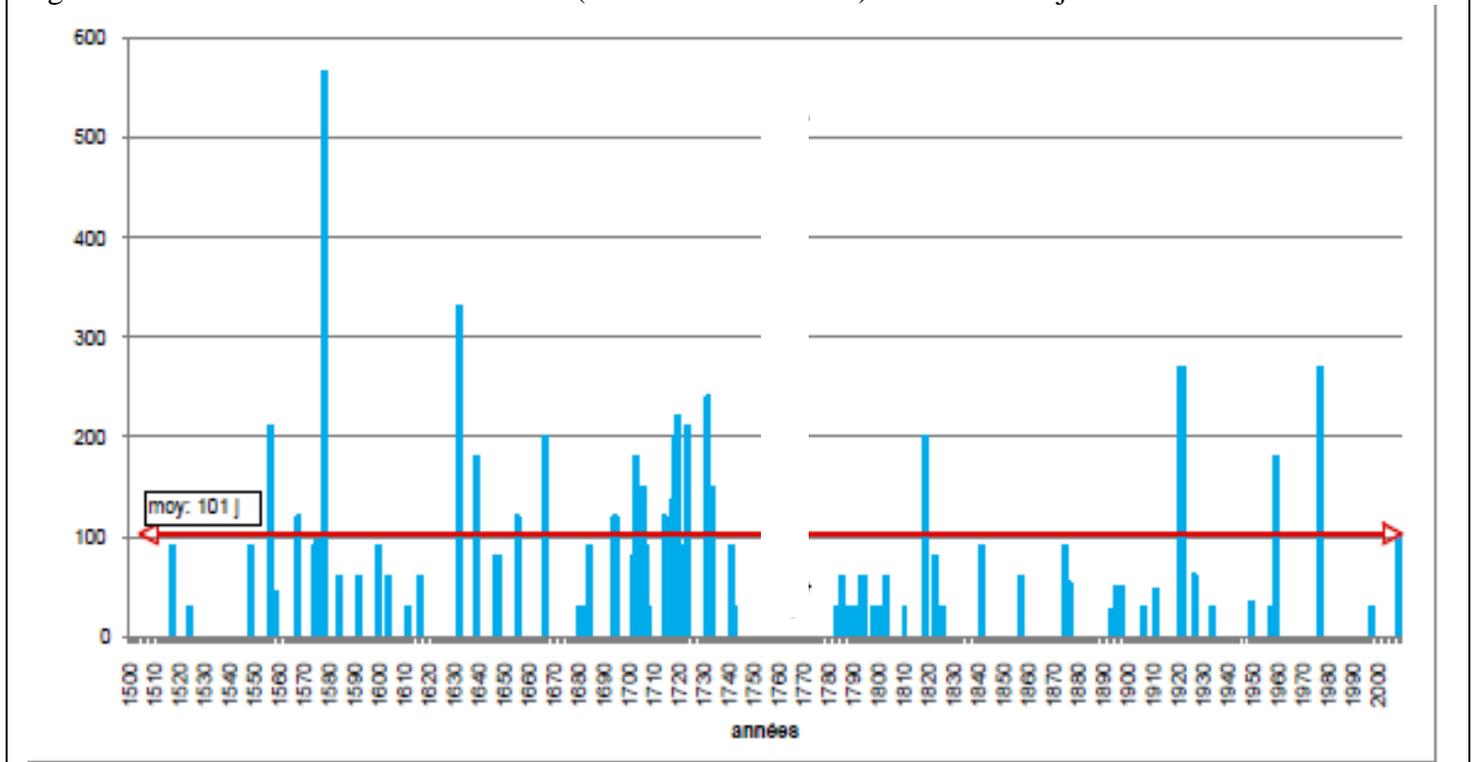
	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	mm/an
Minimum	5	2	10	0,3	0,5	0	0	0	0	0	6	10	
10% de la distribution	20	17	25	10	5	0	0	0	3	12	33	30	
médiane de la distribution	87	45	65	65	41	27	8	0,1	0,7	16	59	85	499
Maximum	297	290	177	159	159	65	22	103	176	233	265	302	

Le maximum d'un mois est, à Paris, trois fois la moyenne, et à Alger aussi, ou presque, du moins pour les mois pluvieux, puisqu'en saison sèche des climats méditerranéens il ne pleut pas du tout. Les minima sont nuls sauf d'octobre à janvier (Paris) ou de novembre à mars (Alger) où ils sont de quelques mm / mois.

Les sécheresses

Les historiens ont retracé ces évènements catastrophiques pour l'agriculture : les figures ci-dessous pour l'Île de France et le Languedoc-Roussillon disent le nombre de jours sans pluie ou presque ; pour la Catalogne, les registres des processions « pour la pluie » permettent aussi des reconstitutions très précises.

Figure 2-10 Sécheresses en Île de France (Emmanuel Garnier ¹⁷) en nombre de jours de 1500 à 2006



En Île de France 69 évènements pour 509 années d'observation ; 22 sécheresses au XVIIIème siècle contre 10 à 13 pour les quatre autres siècles ; la plus grave a été celle de l'hiver 1576/77 à la Toussaint 1578. L'été 1921 a été très sec et chaud ; 1976 a été, en France, l'année de l'impôt-sécheresse.

En Suisse, mai 1577 et 1578 ont été froids et 1540 l'année d'un blocage anticyclonique persistant de mars à octobre, quatre mois de plus qu'en 1947 (Pfister, *Wetternachhersage*, op. cit. pp. 191-193).

L'année 1540 (avril à août) aurait, en Suisse, été de 2°C à 3°C plus chaude que 2003, la sécheresse et la chaleur ayant fait sécher les raisins sur le cep.¹⁸ Ce millésime extraordinaire a été longtemps célébré en Rhénanie ¹⁹.

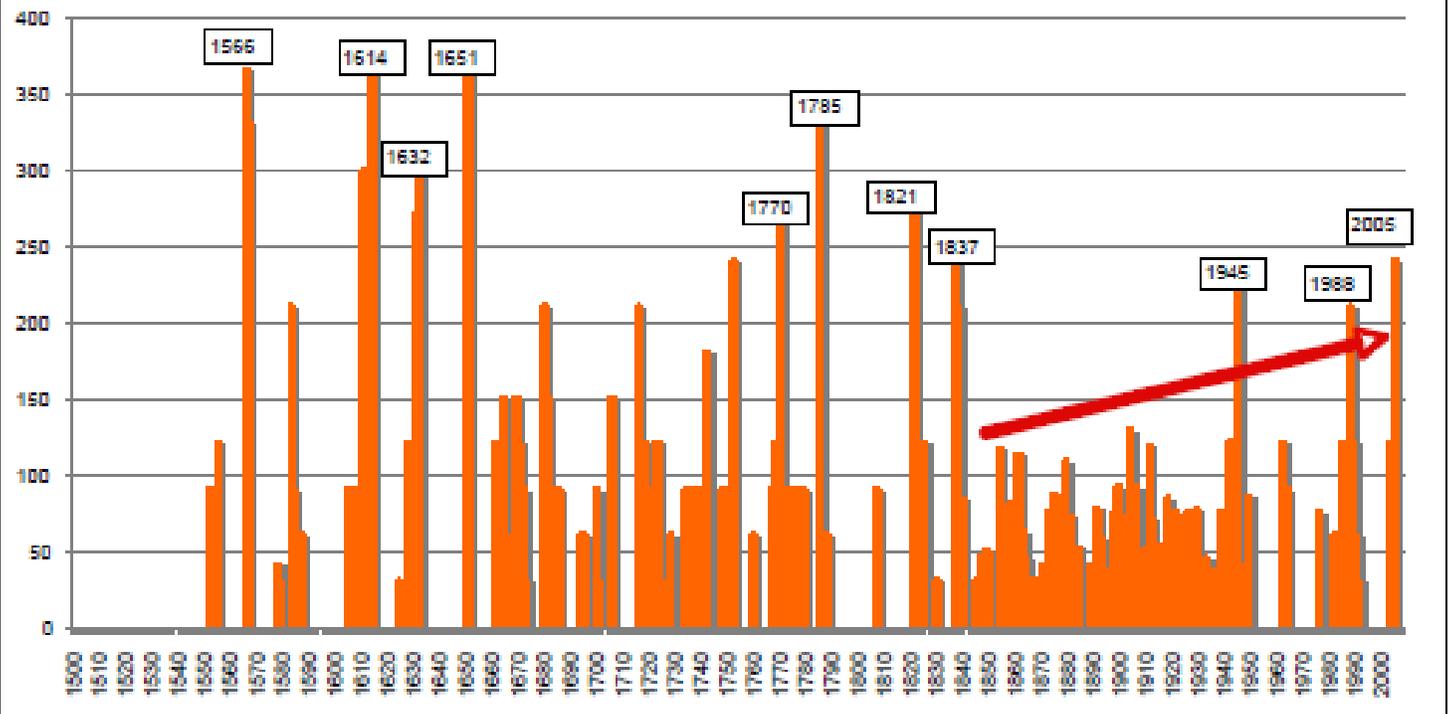
¹⁷ Emmanuel Garnier – *Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs, 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes*. Colloque 193 SHF : «Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau», Lyon, 7-8 octobre 2009. http://www.gisclimat.fr/sites/default/files/Garnier_SHF_2009.pdf

¹⁸ Wetter, O., Pfister, C.: *An underestimated record breaking event: why summer 1540 was very likely warmer than 2003*, *Clim. Past Discuss.*, 8, 2695-2730, doi:10.5194/cpd-8-2695-2012, 2012

¹⁹ Rüdiger Glaser *Klimageschichte Mitteleuropas* Primus Verlag 2008, pp. 108-109

En Languedoc Roussillon des sécheresses fort longues ont, tous les vingt ans, marqué le début du XVII^{ème} et la fin du XVIII^{ème} siècle, documentées entre autres par les processions pour la pluie.

Figure 2-11 Sécheresses en Languedoc Roussillon (Emmanuel Garnier op. cit.) en nombre de jours de 1500 à 2006



2-5 Le baromètre

Il varie, en surface au niveau de la mer entre 1040 mbar sous un anticyclone (maximum observé 1084 mbar) et 950 mbar dans une dépression sévère (minimum observé 870 mbar).

Les cycles climatiques de quelques dizaines d'années se voient sur et même sont définis par les variations de la différence de pression entre par exemple Reykjavik (Islande, 64°08'N, 21°55'W) sous le trajet des dépressions et Lisbonne (38°43'N, 9°08'W) souvent marqué par l'anticyclone des Açores ; dans le Pacifique la différence de pression entre Darwin (Australie, 12°26'S, 130°50'E) et Tahiti (17°40'S, 149°28'W) sert à la confection de l'indice ENSO (El Niño - Southern Oscillation).

Les situations de blocage anticyclonique où une haute pression reste quelques jours ou semaines au-dessus de l'Europe occidentale correspondent aux grands froids en hiver et aux canicules en été. Cette haute pression empêche l'arrivée de l'air frais et humide normalement apporté par les vents d'ouest. Cette configuration de la circulation atmosphérique explique que les grands hivers par exemple de 1709, avec entre -9°C et -15°C à Paris du 6 janvier au 21 janvier, ou de 1684, aient été précédés ou suivis de grandes chaleurs estivales.

2-6 L'Holocène (début fixé à 11700 ans BP, BP = avant 1950) et la prochaine grande glaciation

Les cycles glaciaires de durée 100 000 ans et interglaciaires de durée 12 000 ans alternent depuis plus de 600 000 ans.

Le début de l'Holocène est par convention fixé à 11700 BP (Before Present, soit avant 1950) ou 9750 avant notre ère : c'est aussi le début de l'actuel interglaciaire. Les figures 12 (a) et (b) montrent en écart par rapport aux valeurs du XX^{ème} siècle les températures et précipitations lors de l'optimum climatique holocène entre 8000 ans et 6000 ans avant le présent.

Vers 6000 avant notre ère l'insolation d'été à 65°N était disons de 40 W/m² plus forte que l'actuelle (figure 3-7) mais l'insolation annuelle moyenne (en haut de l'atmosphère) assez peu différente. Des températures arctiques estivales de quelques degrés plus fortes²⁰ réduisaient le contraste avec la zone tropicale ; les hautes pressions

²⁰ Insolation estivale à 65°N de quelques dizaines de W/m² supérieure à l'actuelle ; le périhélie était alors en juillet et non en janvier.

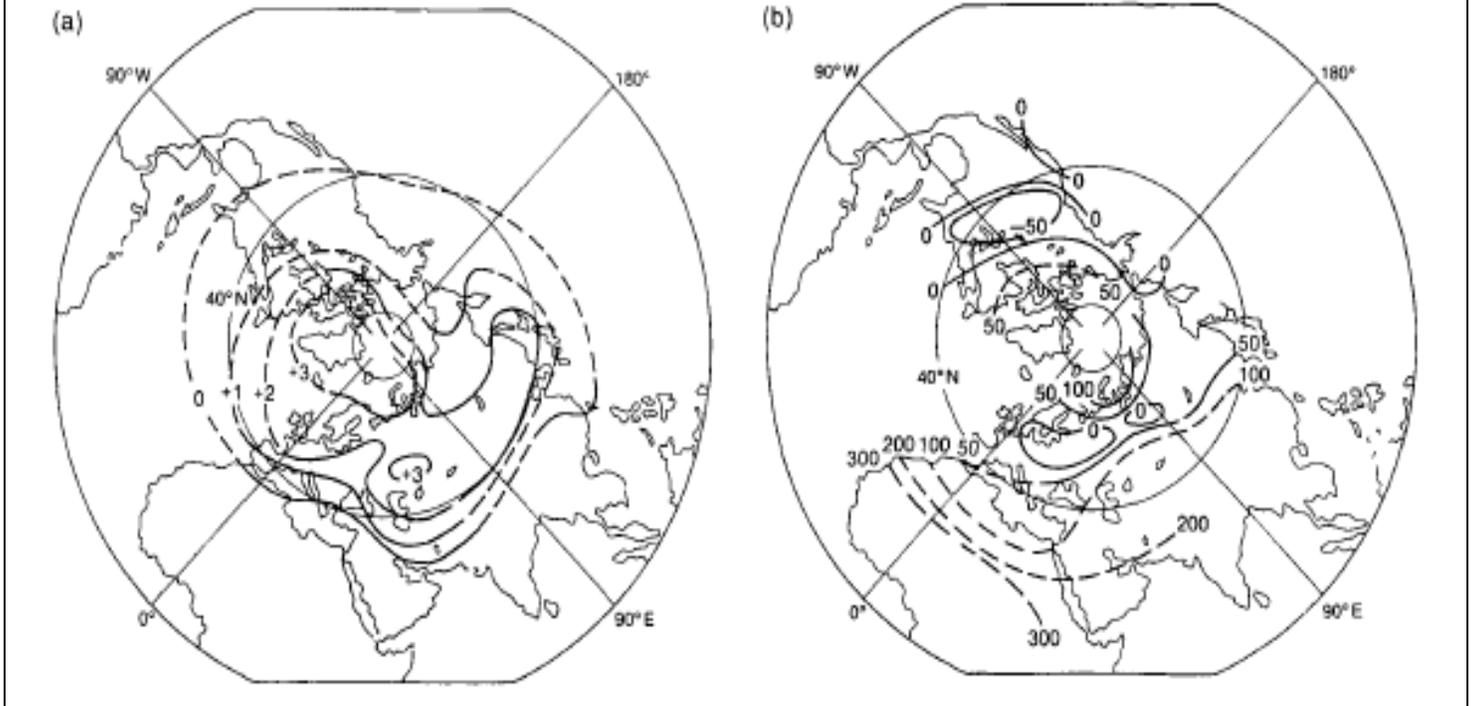
subtropicales qui traduisent ce contraste et limitent l'extension de la mousson vers le nord étaient bien moindres, d'où, au nord de l'actuel Sahel africain, des précipitations de 300 mm supérieures aux actuelles et un Sahara couvert de lacs²¹ avec crocodiles et hippopotames.

Figure 2-12 Figure 7.5 du rapport IPCC-GIEC de 1990 (FAR, first assessment report)

Optimum climatique holocène a) écart des températures d'été par rapport aux valeurs "modernes"

b) écart des précipitations, en mm/an par rapport aux valeurs "modernes"

sources: *Borzenkova and Zubakov, 1984* ; *Budyko and Izrael, 1987*

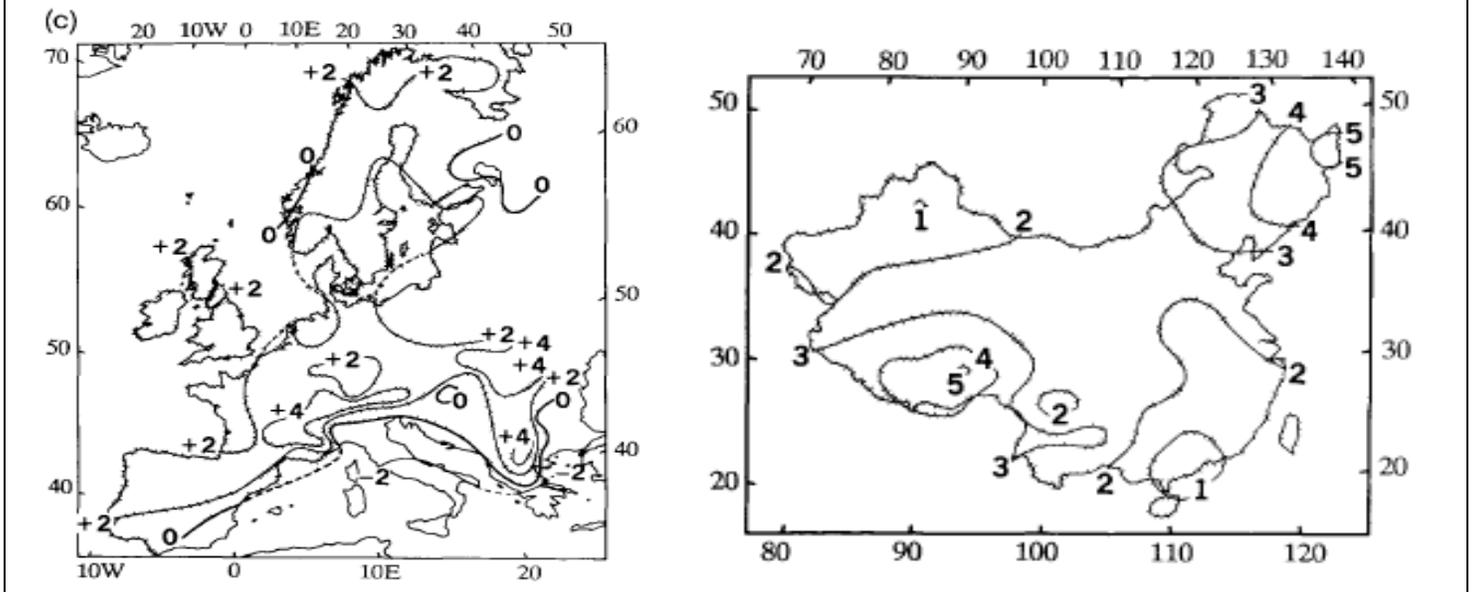


La figure 13 montre une estimation des températures d'été en Europe et en Chine, entre 3000 et 4000 avant Jésus-Christ.

Figure 2-13 Figure 7.5 du rapport IPCC GIEC de 1990 (FAR) Optimum climatique holocène

(c) Températures d'été en écart à celles du milieu du XXème siècle en Europe et en Chine, entre 5000 BP et 6000 BP (3050 et 4050 avant notre ère)

sources: *Huntley and Prentice, 1988*; *Wang et al. personal communication*



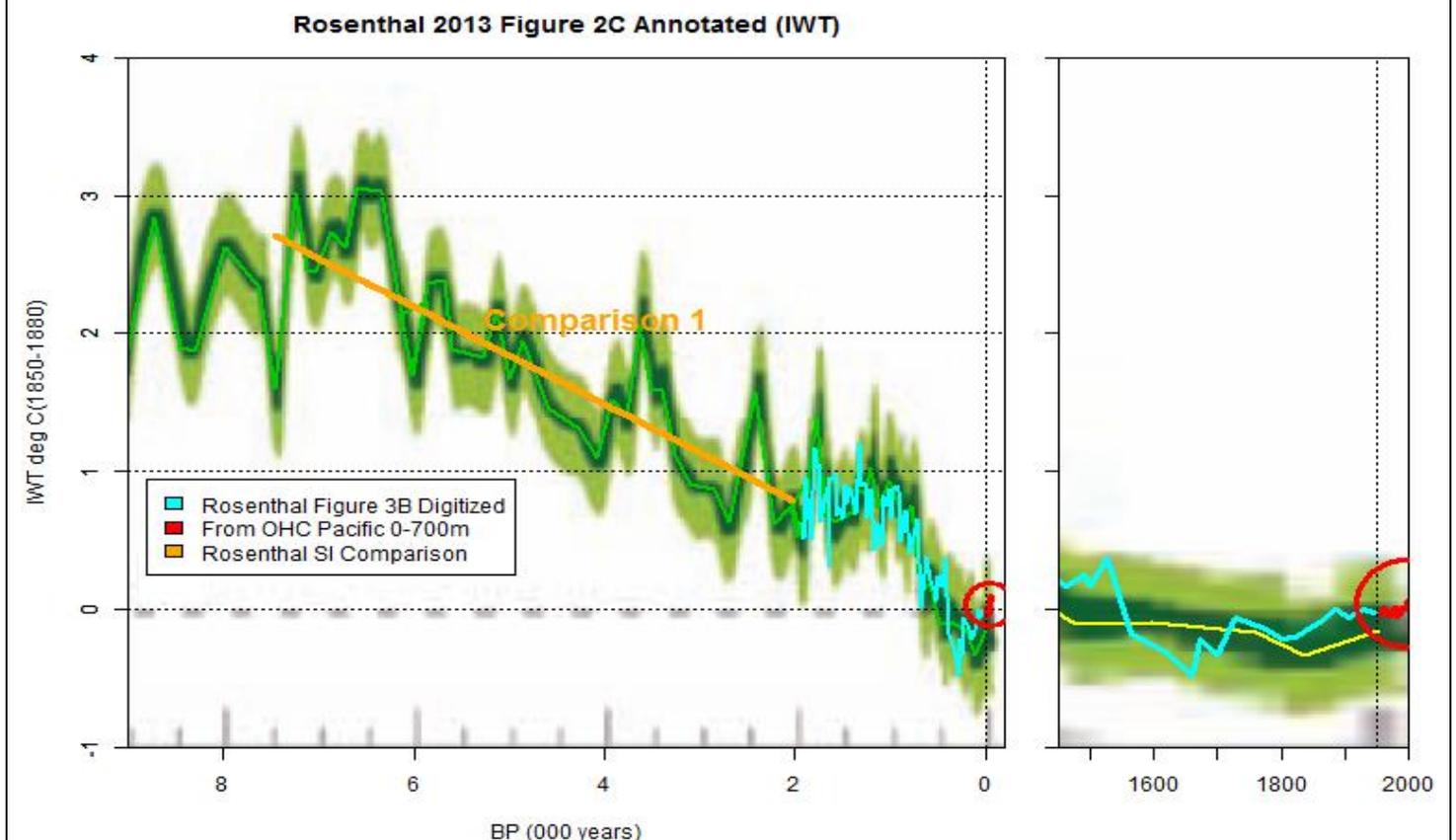
²¹ Voir Nicole Petit-Maire *Sahara: les grands changements climatiques naturels*. Paris, éditions Errance, 2012, 192 pages

On se reportera aux cartes de la commission de la carte géologique du monde ²² plus récentes que le rapport IPCC AR1 de 1990 ; elles présentent l'environnement végétal ou climats de Köppen au dernier maximum glaciaire et à l'optimum holocène.

D'autres observations encore trouvent dans le Canada central entre 6000 BP et 5000 BP ("optimum atlantique") une limite de la végétation à 200 km au nord de l'actuelle limite, et de 3000 BP à 2000 BP un repli de 300 km vers le sud, et dans l'arctique scandinave une forêt fossile d'époque Viking ²³ à 100 km au nord de la limite actuelle, dans l'actuelle toundra.

Figure 2-14 Températures au fond de l'océan dans les détroits indonésiens (Yair Rosenthal et al.) en "anomalies" ou écart à celles du XXème siècle

Source : <http://climateaudit.files.wordpress.com/213/11/rosenthal-213-figure-2c-annotated.png>



Les températures au fond des océans (figure 14 au fond des détroits indonésiens à des profondeurs de 500 m à 900 m) ont depuis 9000 ans, été, le plus gros du temps, nettement plus chaudes qu'actuellement malgré un très léger rebond par rapport au petit âge de glace : de 9000 ans à 5500 ans "avant le présent" (BP), températures de 2°C à 3°C supérieures à l'actuelle.

Le petit âge de glace se voit sur le graphique de droite de la figure 14 qui détaille les derniers 550 ans.

²² Cartes des environnements du monde pendant les deux derniers extrêmes climatiques (18000 +/- 2000 BP et 8000 +/- 1000 BP) publiées par la Commission de la Carte Géologique du Monde (1999)

N. Ray, J. M. Adams *A GIS-based Vegetation Map of the World at the Last Glacial Maximum (25,000-15,000 BP)*.

2001. *Internet Archaeology* 11 (http://intarch.ac.uk/journal/issue11/rayadams_toc.html) <http://lgb.unige.ch/lgmvegetation>

Petit-Maire, N., 1990, *Will greenhouse green the Sahara?* *Episodes*, v. 13, no.2, pp. 103–107.

Petit-Maire, N., Guo Zhengtang, 1996, *Mise en évidence de variations climatiques holocènes rapides, en phase dans les déserts actuels de Chine et du bord de l'Afrique*, C. R. acad. SC. Paris: 322, v. 10, pp. 847–851

N. Ray, J. M. Adams *A GIS-based Vegetation Map of the World at the Last Glacial Maximum (25,000-15,000 BP)*.

2001. *Internet Archaeology* 11 (http://intarch.ac.uk/journal/issue11/rayadams_toc.html) <http://lgb.unige.ch/lgmvegetation>

²³ Alain Godard, Marie-Françoise André Les milieux polaires Armand Colin 1999, 454 pages, pages 317-318; voir aussi une mine d'informations dans www.ClimateSanity.com de M. Tom Moriarty

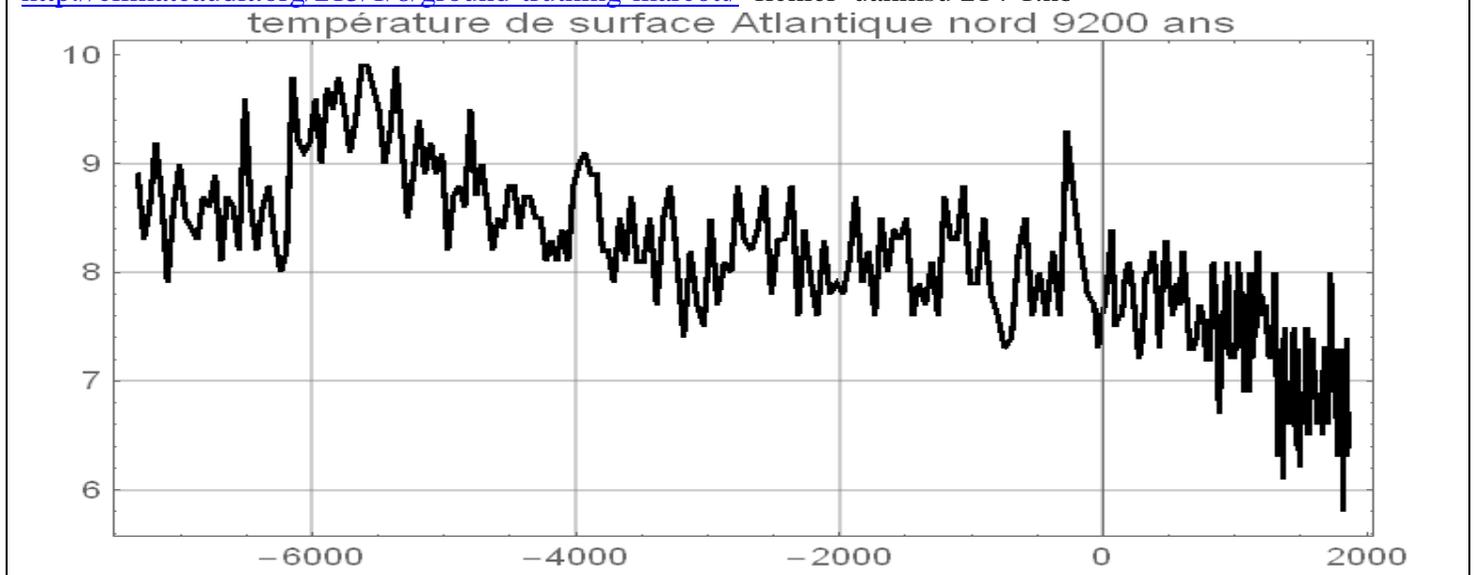
<https://climatesanity.wordpress.com/2008/10/15/dont-panic-the-arctic-has-survived-warmer-temperatures-in-the-past/> qui examine et résume quatorze publications

La figure 15 montre, pour les derniers 10 000 ans, les températures de surface de l'Atlantique Nord au large de l'Islande : elles sont semblables à celles (présentées en anomalies) du fond des détroits indonésiens. Il s'agit là de températures isotopiques sur des diatomées de la carotte MD99-2275 sans doute marqueur biologique des températures d'été. Le minimum de 5,8°C est daté de 1823. Moyenne et écart types sont (9,45°C et 0,31°C) sur -6148 à -5319 et pendant le petit âge de glace de 1323 à 1860 (6,9°C et 0,35°C) soit une différence de 2,5°C entre ces moyennes.

Figure 2-15 Températures de surface en °C de l'Atlantique Nord au large de l'Islande depuis 9300 ans (diatomées) avec un échantillonnage assez lâche (toutes les années ne sont pas renseignées) jusque vers 1860. Jiang et al 2015 *Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic*, *Geology* ²⁴

ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/jiang215/jiang215-md99-2275.txt

<http://climateaudit.org/215/1/8/ground-truthing-marcott/> fichier uahmsu 214-1.nb



De très nombreux relevés montrent, comme la figure 15, que depuis 9000 ans les températures ont, hors petit âge de glace et période des invasions barbares à la fin de l'empire romain, été presque constamment supérieures aux températures actuelles.

2-7 Pour conclure :

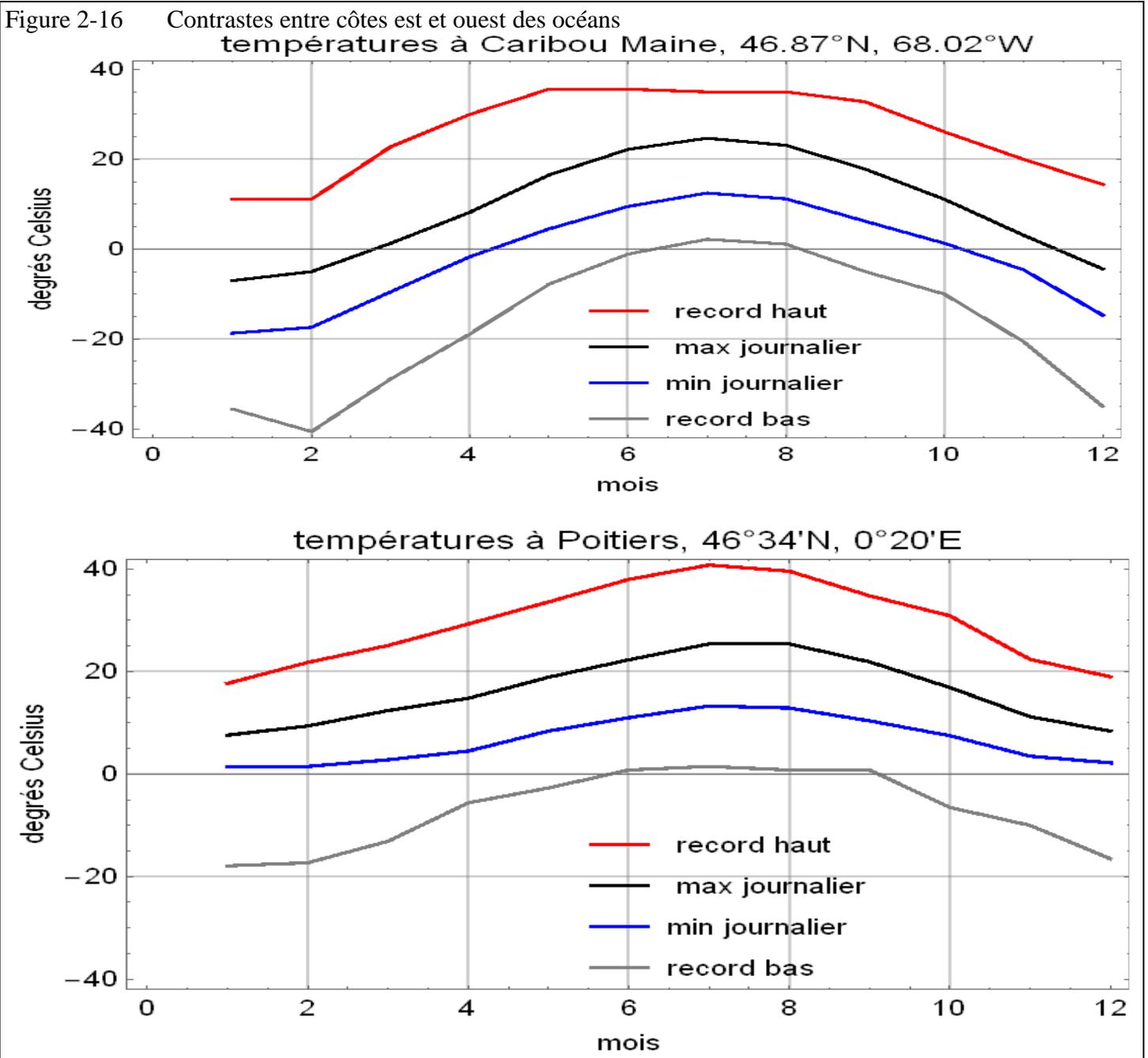
Les climats ont toujours varié : la circulation atmosphérique et la circulation océanique déterminent les pressions, les températures et les précipitations ; ces circulations sont impulsées par l'ensoleillement et sa répartition en latitude qui varie fortement avec la saison et selon des cycles plus longs.

²⁴ Abstract: *Mounting evidence from proxy records suggests that variations in solar activity have played a significant role in triggering past climate changes. However, the mechanisms for Sun-climate linkages remain a topic of debate. Here we present a high-resolution summer sea-surface temperature (SST) record covering the last 9300 yr from a site located at the present-day boundary between Polar and Atlantic surface-water masses. The record is age-constrained via the identification of 15 independently-dated tephra markers from terrestrial archives circumventing marine reservoir age variability problems. Our results indicate a close link between solar activity and SSTs in the northern North Atlantic during the past 4000 years. They suggest that the climate system in this area is more susceptible to the influence of solar variations during cool periods with less vigorous ocean circulation. Furthermore, the high-resolution SST record indicates that climate in the North Atlantic regions follows solar activity variations on multi-decadal to centennial time scales.*

2-8 Annexe : Caribou (Maine, USA) et Poitiers (France)

Le Maine (climat Dfb) voit passer les anticyclones mobiles polaires très froids qui de l'autre côté de l'Atlantique vont, très atténués, s'intégrer à l'anticyclone des Açores.

Ses températures basses sont, en hiver, de 20°C plus froides que celles de Poitiers (climat tempéré Cfb) à la même latitude ! Comparer les courbes bleues et grises entre octobre et mars.



Ceci pour mettre en garde contre l'emploi abusif de moyennes, sans compréhension des particularités de la circulation atmosphérique et de la météorologie synoptique.

3- Insolation et stockage de chaleur

La Terre, avec son atmosphère et ses océans, se trouve dans le vide interstellaire ; elle ne peut recevoir ou perdre d'énergie (ou de chaleur) que par rayonnement échangé avec le cosmos.

3-1 Insolation

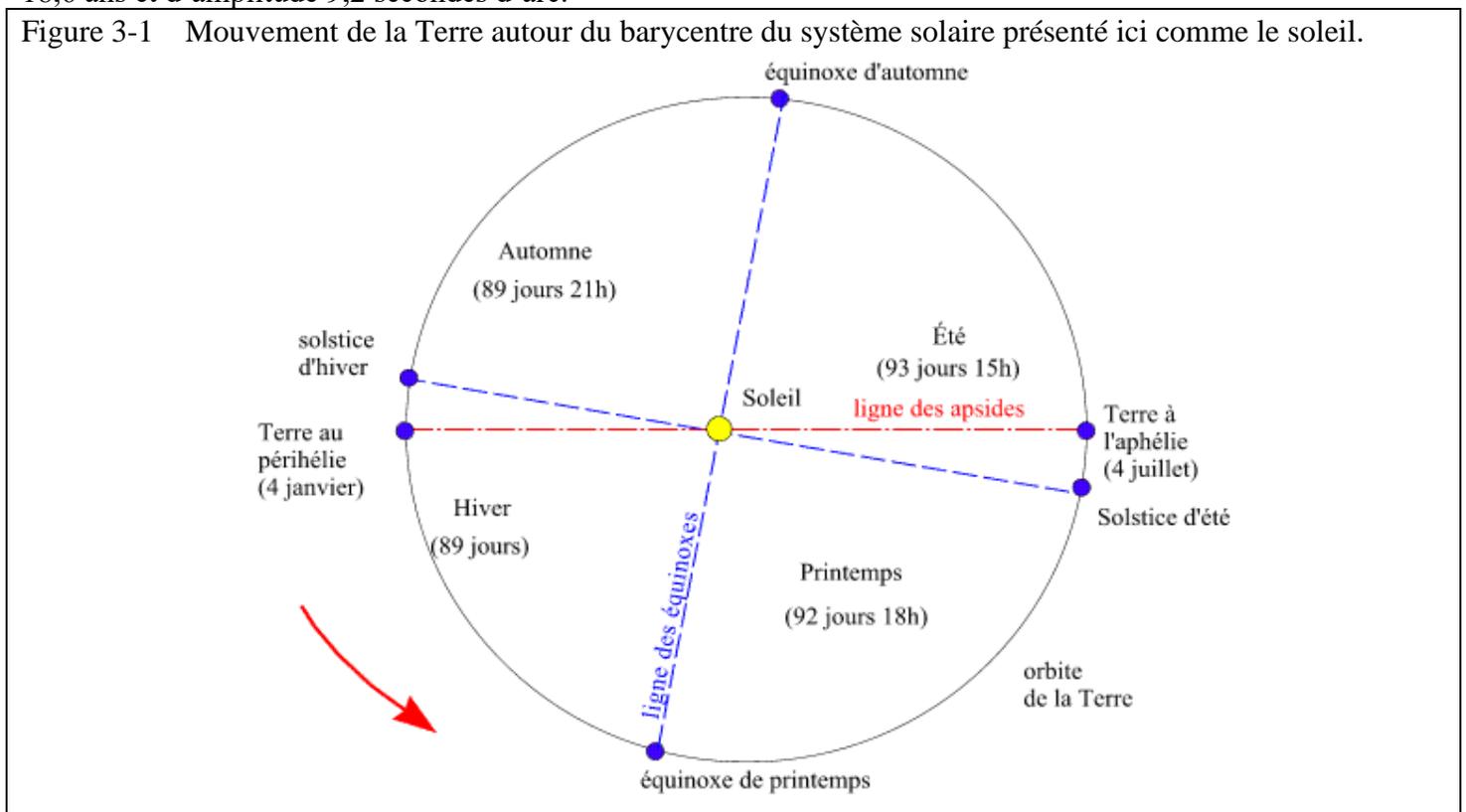
Le rayonnement reçu d'une source décroît comme l'inverse du carré de la distance D du point d'observation : le flux total à une distance D est proportionnel à $4 \pi D^2$.

Le rayonnement solaire incident sur une surface perpendiculaire aux rayons est d'environ 1360 W/m^2 (valeur de la « constante solaire ») à la distance D d'une unité astronomique (UA) du soleil ; l'UA de 149,5979 milliards de mètres est le demi grand axe de l'ellipse qui est la trajectoire de la Terre ; lorsque la Terre est au plus près du soleil (au périhélie, le 4 janvier) la distance est plus faible qu'une unité astronomique,

de $(1-e) = 1 - 0,0167$ fois où $e = 0,0167$ est l'excentricité actuelle de l'ellipse décrite par la Terre, et le flux est 1407 W/m^2 ; le 4 juillet la Terre est le plus loin du soleil (à l'aphélie) à distance de $(1+e)$ fois l'unité astronomique, et le flux tombe à $1360 / (1 + 0,0167)^2 = 1316 \text{ W/m}^2$.

La Terre tourne autour d'un axe incliné par rapport au plan de son orbite, inclinaison actuellement de $23^{\circ}26$ minutes d'arc et qui diminue de $0,468$ seconde d'arc par an ; s'y ajoute l'effet fort petit de la nutation de période $18,6$ ans et d'amplitude $9,2$ secondes d'arc.

Figure 3-1 Mouvement de la Terre autour du barycentre du système solaire présenté ici comme le soleil.



De plus le soleil, comme les planètes, tourne autour du centre de gravité du système solaire qui peut être à plus d'un rayon solaire ($0,696$ milliards de mètres) du centre du soleil, ce qui ajoute une modulation d'environ un pourcent du flux solaire, de l'ordre de 14 W/m^2 qui renforce ou diminue l'insolation selon la position du soleil par rapport à la Terre ; les trajectoires compliquées du soleil autour du centre de gravité du système solaire²⁵ se bouclent en quelques dizaines d'années.

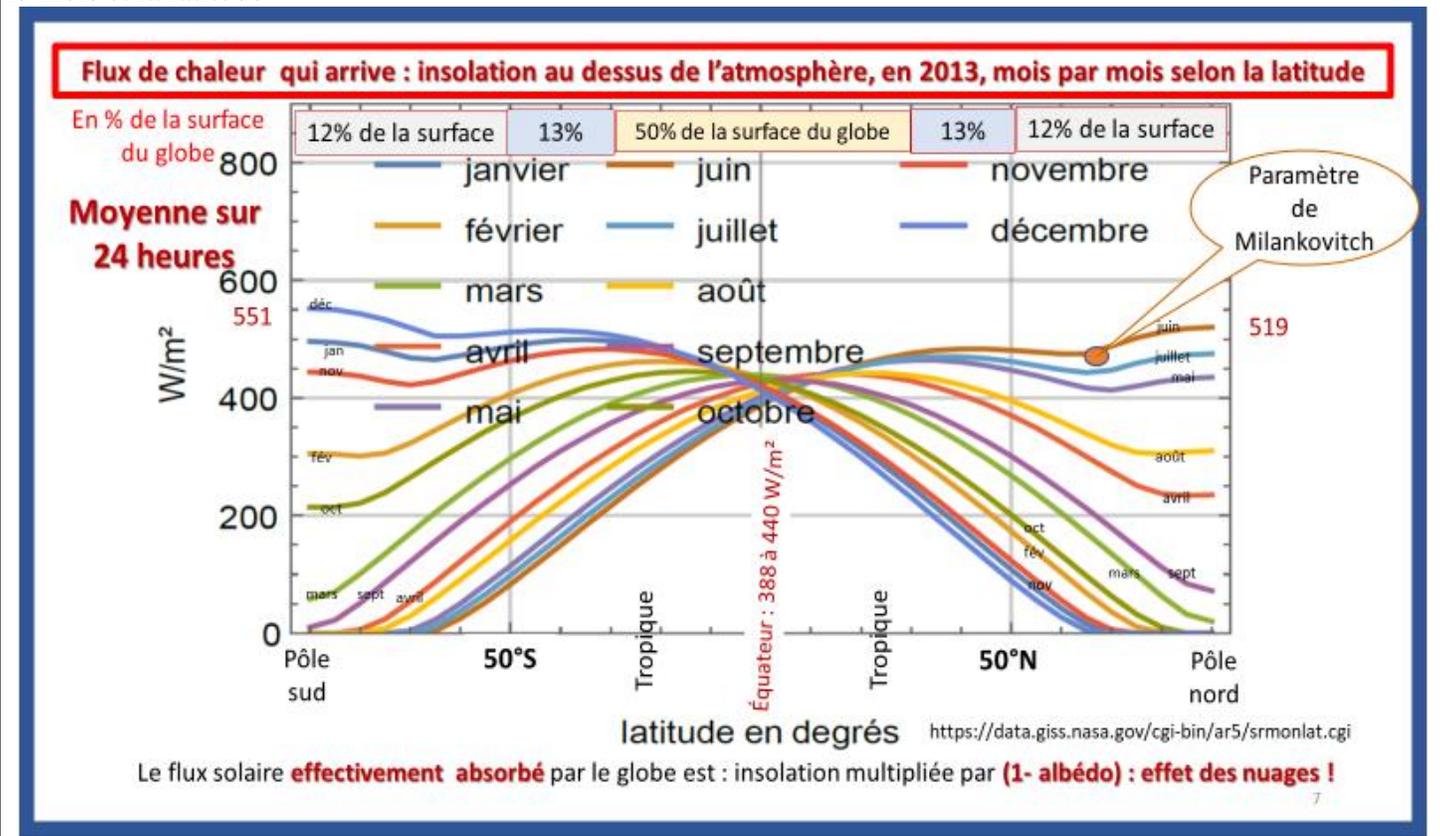
Le flux solaire arrivant en haut de l'atmosphère en W/m^2 varie selon la saison et la latitude comme le montre la figure 2, pour chaque mois et chaque latitude. Le flux effectivement absorbé est moindre et dépend de l'ennuage et de la transparence de l'air.

La Terre émet en moyenne sur l'année vers l'espace une énergie presque égale à celle qu'elle absorbe sinon elle se réchaufferait sans limite.

²⁵ déterminées surtout par les trajectoires de Jupiter et Saturne d'où leur périodicité de l'ordre de 60 ans

Les observations de la quantité de chaleur dans les océans suggèrent des déséquilibres au bout d'une année de l'ordre de $0,3 \text{ W/m}^2$, assez fluctuants.

Figure 3-2 Exemple de valeurs moyennes sur 24 heures du flux solaire tombant en haut de l'atmosphère selon le mois et la latitude



Le contenu calorifique des océans aurait selon la figure 10 crû de disons 20 fois 10 ZettaJoule soit $200 \cdot 10^{21}$ Joule en 60 ans soit :

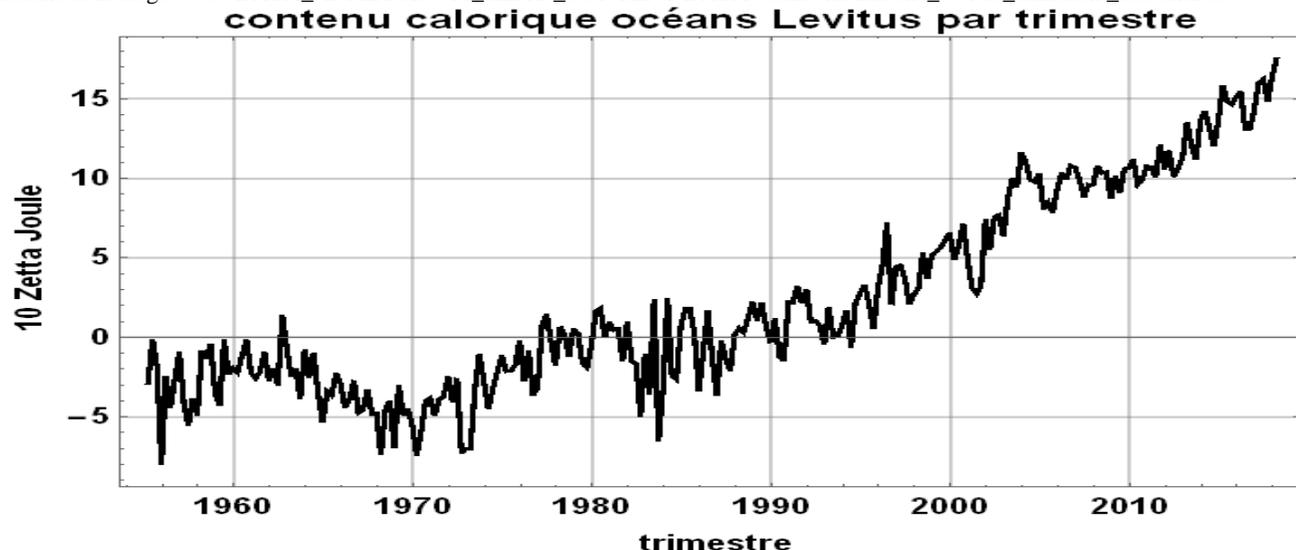
$$200 \cdot 10^{21} \text{ Joule} / (\text{surface des océans } 361 \text{ M km}^2 \times 60 \text{ ans} \times 365,2425 \text{ jours} \times 86400 \text{ secondes par jour}) = \underline{\underline{0,29 \text{ W/m}^2}}$$

et de l'ordre du millième du flux moyen de 240 W/m^2 absorbé et rayonné, avec $+0,18^\circ\text{C}$ en 60 ans si cette chaleur de 200 ZettaJoule était uniformément répartie sur les premiers 700 m des océans.

Figure 3-3 Estimation de l'évolution du contenu calorifique des océans selon Levitus sur les 700 premiers mètres, **en dizaines** de ZettaJoule de 10^{21} Joule.

Sources : https://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html

http://data.nodc.noaa.gov/woa/DATA_ANALYSIS/3M_HEAT_CONTENT/DATA/basin/3month/ohc_levitus_climdash_seasonal.csv



Une diminution de l'albédo moyen de 0,3009 à 0,3 (une diminution imperceptible de la couverture nuageuse) amènerait ces +0,3 W/m² !

La capacité calorique de toute l'atmosphère est égale à celle de 2,5 m d'eau de mer. Les réchauffements de deux dixièmes de degrés en 40 ans de la troposphère en moyenne mondiale (chapitre suivant) font :

10300 kg/m² x 0,2 °C x 1005 J/°C = 2 MJ / m² et, en tout, un ZettaJoule sur 40 ans et 1,6 mW/m² négligeables par rapport aux 200 ZettaJoule en 60 ans de la figure 7.

3-2 Stockage de chaleur dans l'océan et dans le sol

Le flux de chaleur à travers un solide est le produit de la conductibilité calorique par le gradient de température ou quotient de la différence de température entre deux points d'un corps par leur distance.

Une attaque thermique sinusoïdale de période ω , en $T_1 \sin(\omega t)$ provoque dans le sol des ondes calorifiques sinusoïdales amorties avec la profondeur z de la forme :

$$T(z) = T_1 \exp[-(\omega / (2 \beta^2))^{1/2} z] \sin(\omega t - (\omega / (2 \beta^2))^{1/2} z),$$

où $\beta^2 = \lambda / (\rho C_v)$, λ conductibilité calorique en W/m/°C, ρ densité du sol en kg/m³, C_v chaleur massique en J/kg/°C.

Prenons pour le sol ²⁶ $\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$, $C_v = 800 \text{ J/kg/K}$, $\lambda = 0,4 \text{ W/m/K}$,

$$\beta^2 = 0,4 / (3000 \times 800) = 1 / 6000000 \text{ m}^2/\text{s}$$

Effet sur 24 heures : $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5}$ radians/s est la vitesse de rotation de la Terre, l'onde de chaleur est amortie d'un facteur $1/e = 0,37$ au bout de $z = (2 \beta^2 / \omega)^{1/2} = 0,068 \text{ m}$ soit 7 cm

Effet sur l'année : ω est 365,25 fois plus petit que ci-dessus et la profondeur de pénétration de l'onde de chaleur devient 1,3 m avec un retard notable (déphasage de 1 radian à 1,3 m) du maximum de température en profondeur par rapport au maximum en surface ; dans les bonnes caves profondes de quelques mètres la température est pratiquement constante toute l'année.

Pour l'océan il y a stratification le jour puisque le soleil réchauffe la couche superficielle qui devient moins dense et convection la nuit quand la couche superficielle se refroidit et devient plus dense que les couches en dessous, amenant un renouvellement de l'eau de surface.

Le vent fait qu'il y a sous la surface une « couche bien mélangée » profonde de quelques dizaines voire d'une centaine de mètres.

3-3 Insolation et températures de surface

Il est parfois question de la température dans une voiture fermée et laissée au soleil sur un parking ; exemple de relevés ²⁷ : thermomètre dans la voiture directement sur le coussin au soleil 71°C, dans la voiture à l'ombre 39°C, au sol au soleil à côté de la voiture 31°C, au sol à l'ombre à côté de la voiture 29°C et dans la maison voisine 25°C.

Un corps de masse volumique ρ de surface S d'épaisseur d , de chaleur massique C_v recevant un flux de rayonnement F , F somme du flux solaire vers par exemple 1000 W/m² et du flux net en infrarouge thermique, bilan du corps par rapport à son environnement, bilan d'autant **plus négatif** que le corps est plus chaud ²⁸ (chapitre 5) voit sa température varier en

²⁶ <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=18523>

<http://www.meteo.fr/cic/meetings/2015/AMA/presentations/dephy21012015AM/19-Calvet-2015-01-19.pdf>

²⁷ Prof Dr Gerlich *Die physikalischen Grundlagen des Treibhauseffektes und fiktiver Treibhauseffekte* Herbstkongress der Europ. Akad. f. Umweltfragen: Die Treibhaus-Kontroverse, Leipzig, 9./10. Nov. 95 22.08.2006 <http://www.ib-rauch.de/datenbank/vortrag-leipzig.html>

²⁸ Le fauteuil ou le tableau de bord à 71°C rayonne (si corps noir), 795 W/m² vers le pare-brise qui à 39°C rayonnera 538 W/m², ce qui refroidit de 257 W/m² le corps à 71°C.

$$\rho S d C_v dT/dt = S F \quad \text{d'où} \quad T = T_0 + (F / (\rho S d C_v)) (t - t_0).$$

Des couches minces absorbantes, celles du tableau de bord ou de la couverture des sièges voient leur température monter rapidement si elles ne peuvent céder de la chaleur à leur environnement parce que les vitres sont fermées : si en plein air, en dehors de la voiture, la convection et l'évaporation refroidissent le sol, la surface exposée au soleil est, dans la voiture, de 40°C plus chaude parce que les vitres sont fermées.

Que le pare-brise soit transparent ou opaque en infrarouge thermique est sans effet pratique comme montré - expérimentalement- dès 1909 par le Pfr Wood et encore rappelé ²⁹ par R. Lee en 1973.

3-4 Inversion nocturne des températures de surface

à terminer

Le pare-brise est refroidi par la convection de l'air extérieur et par la différence entre son rayonnement vers l'air (538 W/m²) et le rayonnement infrarouge thermique qu'il reçoit de l'air, disons 400 W/m² pour ces conditions estivales.

²⁹ Robert W. Wood *Note on the theory of the greenhouse* http://www.wmconnolley.org.uk/sci/wood_rw.1909.html

R. Lee *The "greenhouse" effect*, J. Appl. Meteor. 1973, **12**, 556-557; et 1974, **13**, 603 – 606

Que le parebrise ou la vitre de la serre soit opaque ou transparent en infrarouge thermique n'a aucun effet car :

rayonnement de la surface (795 W/m²) – rayonnement de l'air vers la voiture (400 W/m²) = 395 W/m²

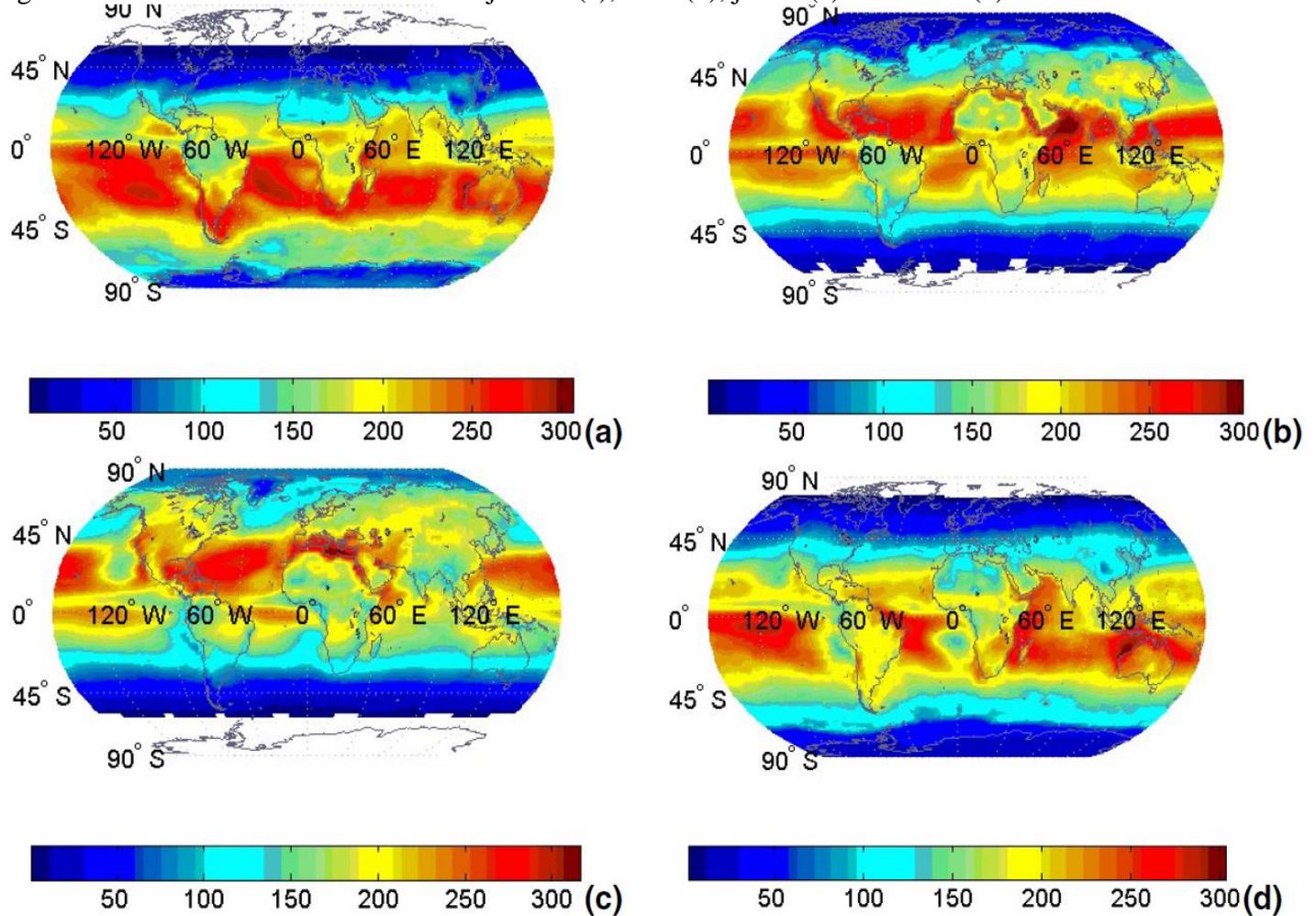
rayonnement de la surface vers la vitre opaque en IR thermique (795) - rayonnement de la vitre opaque en IR thermique (538) = 257 W/m²

rayonnement de la vitre opaque en IR thermique (538) – rayonnement de l'air vers la voiture (400 W/m²) = 138 W/m²
395 = 257 + 138.

3-5 Insolation en surface, selon la saison ³⁰, brute et nette du flux rétrodiffusé par la surface

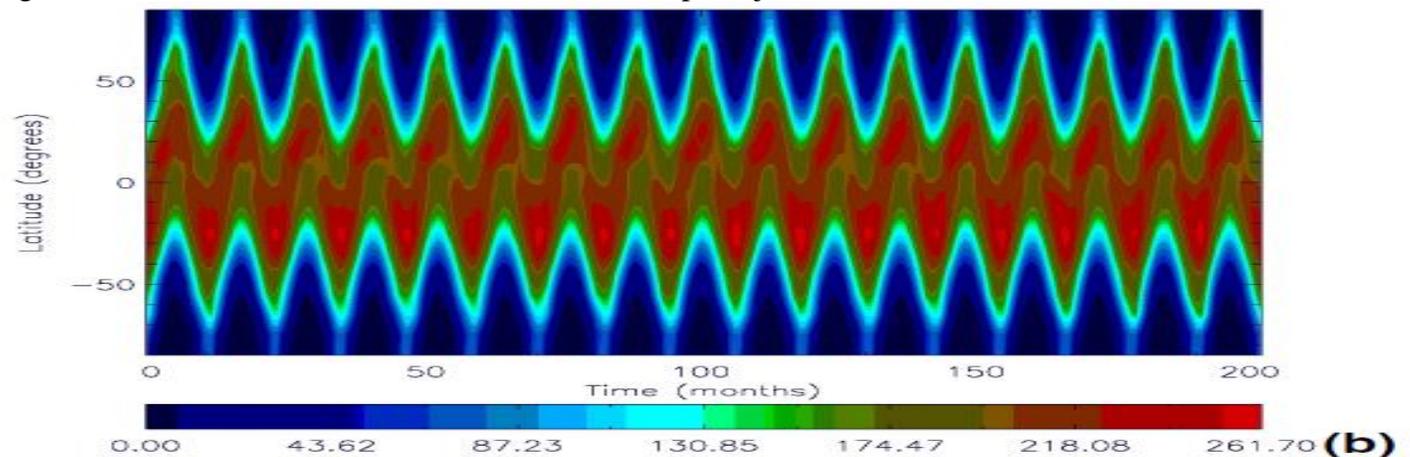
La figure 4 montre en W/m² l'insolation en surface, nette de l'effet de l'albédo de la surface, en janvier (a), avril (b), juillet (c) et octobre (d).

Figure 3-4 Insolation nette en surface : en janvier (a), avril (b), juillet (c) et octobre (d)



La figure 5 montre l'évolution de l'insolation en fonction de la latitude et du temps.

Figure 3-5 Insolation nette selon la latitude et le temps de janvier 1984 à 2000



La régression sur le temps de l'insolation, qui augmente quand il y a moins de nuages, donne, en W/m² :

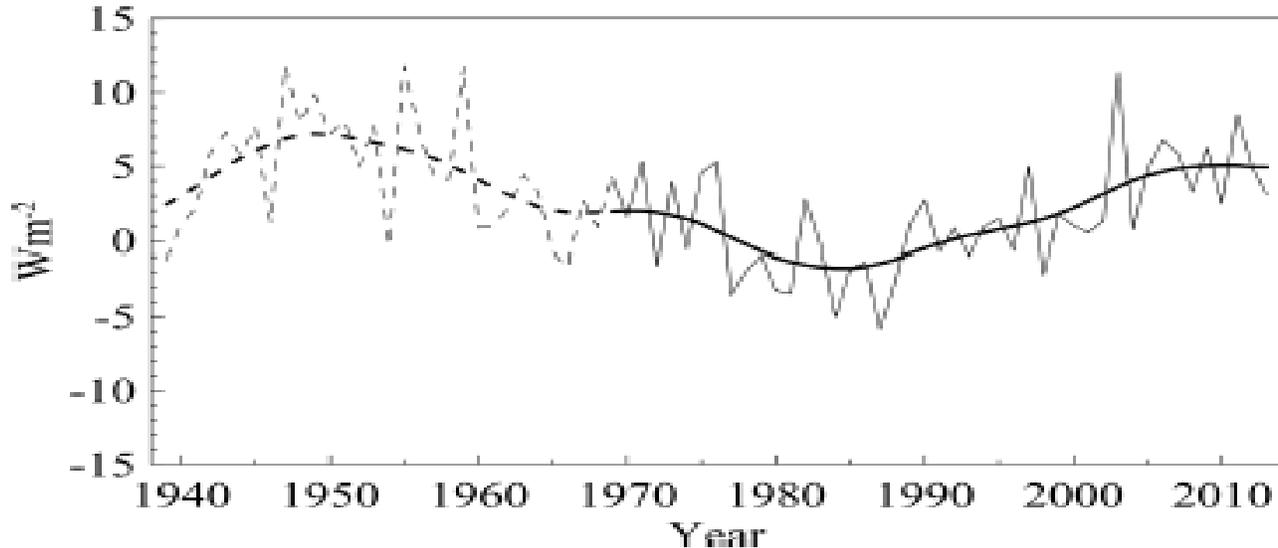
- pour l'insolation brute en surface : $175,9 + 0,02 (t - 1984)$,
- pour l'insolation nette (après déduction de l'effet de l'albédo de la surface) : $153,2 + 0,018 (t - 1984)$.

³⁰ N. Hatzianastassiou et al. *Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget* Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 4545–4597, 2005, www.atmos-chem-phys.org/acpd/5/4545/

Le mouvement des océans et de l'atmosphère découple les températures de surface qui, à 50°N, varient sur l'année entre disons 260 K et 295 K, alors que l'insolation nette en surface y varie dans un rapport 1 à 6 ou plus.

D'une année à l'autre l'insolation varie de quelques W/m^2 avec des fluctuations selon le cycle de 60 ans ; la figure 6 montre des moyennes d'observations en Europe occidentale ; une variation de 7 W/m^2 de l'insolation ferait, au bout d'un an, 221 MJ/m^2 , de quoi évaporer (en plus) 88 kg d'eau par m^2 sur un an, ou faire monter de 53°C la température d'un mètre cube d'eau !

Figure 3-6 Mesures du rayonnement solaire incident en surface sur 56 stations européennes exprimées en moyenne et en écart à une moyenne calculée sur 1971-2000. Source : Martin Wild 2017 ³¹



Pour des indications sur les fortes variations observées de l'insolation en de multiples observatoires voir Ohmura (2008) ³².

³¹ M. Wild et al.: *The Global Energy Balance Archive (GEBA)* Earth Syst. Sci. Data, 9, 601–613, 2017

Légende originale : *Composite of 56 European GEBA time series of annual surface downward shortwave radiation (thin line) from 1939 to 2013, plotted together with a 21-year Gaussian low-pass filter (thick line). The series are expressed as anomalies (W/m^2) from the 1971–2000 mean. Dashed lines are used prior to 1961 due to the lower number of records for this initial period. Updated from Sanchez-Lorenzo et al. (2015) including data until December 2013.*

³² Ohmura A. (2009) *Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes* J. Geophys. Res., 114, D00D05, doi:10.1029/2008JD011290

3-6 Insolation aux hautes latitudes depuis le dernier maximum glaciaire

Le maximum d'insolation estivale autour de l'Antarctique, il y a vingt mille ans (figure 7) s'est traduit par une augmentation des températures des eaux des océans équatoriaux vers -17 000 ans³³, alors que les calottes de glace sur l'Amérique du Nord et l'Europe ont disparu entre -11 000 ans et -6 000 ans (voir figures 2-14 et 2-15) suite à une remontée de 15% environ de l'insolation estivale sur le cercle polaire arctique (figure 7).

Des carottages de sédiments océaniques montrent que le réchauffement des pôles a lieu avant le réchauffement (de l'ordre 2°C) de la zone intertropicale et avant le dégazage du CO₂³⁴ qui a lieu dans cette zone.

Les eaux de surface du Pacifique (selon leurs foraminifères planctoniques) ont commencé à se réchauffer vers 17 500 BP et après, mais avant la diminution du delta¹⁸O de l'eau de mer de 1 pour mille environ due à la désintégration des inlandsis qui stockent de l'eau (glace) très appauvrie en isotope lourd.

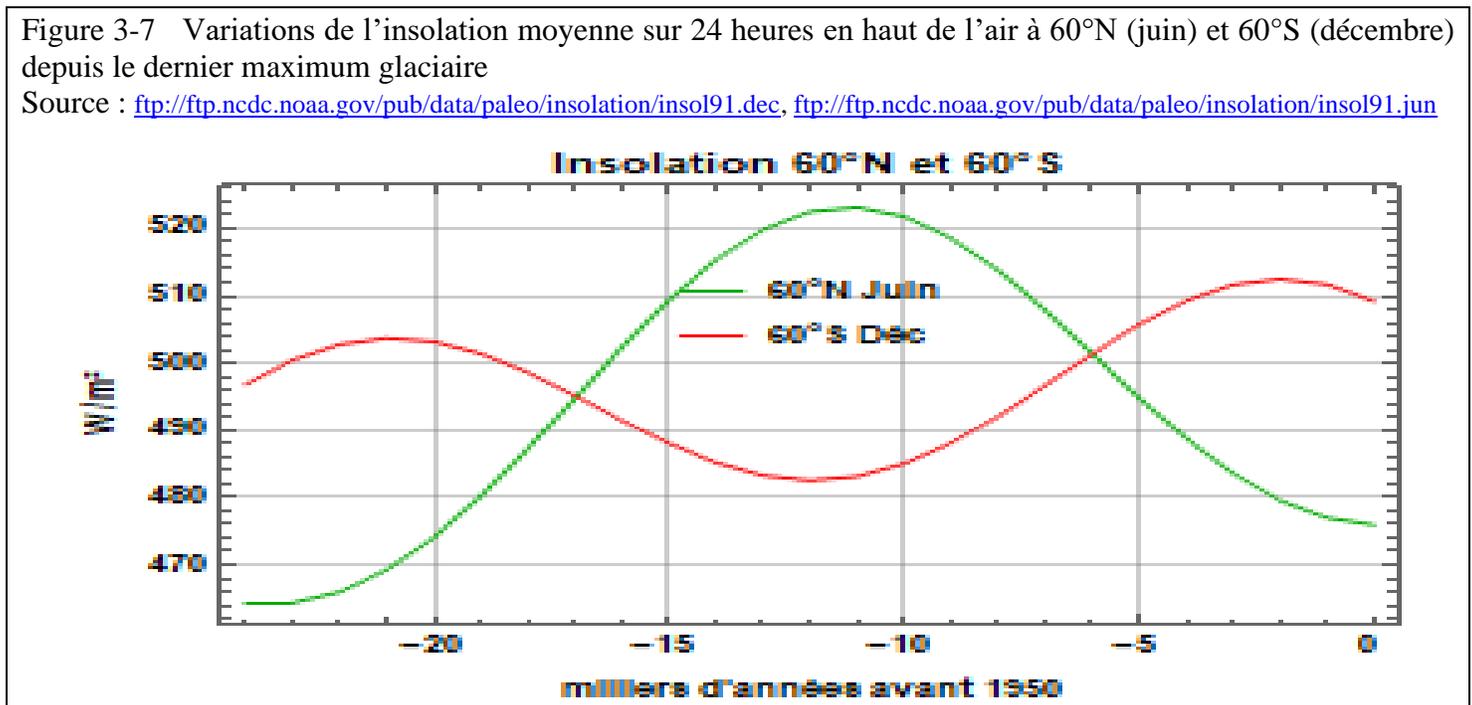
Pendant le dernier maximum glaciaire les eaux de surface du "bassin chaud" ("warm pool") du Pacifique étaient vers 26°C, ont atteint 27°C entre 17 000 et 16 000 BP et 28°C en 14 000 BP, tandis que la température des eaux du sud-Pacifique augmentait de 2°C entre 19 000 et 17 000 BP comme en témoignent des carottages à haute latitude.³⁵

La remontée des températures en zone équatoriale a fait que les flux de dioxyde de carbone de l'océan vers l'air et la végétation ont augmenté.

Le CO₂ ne peut donc pas jouer de rôle déclencheur.

Figure 3-7 Variations de l'insolation moyenne sur 24 heures en haut de l'air à 60°N (juin) et 60°S (décembre) depuis le dernier maximum glaciaire

Source : <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/insol91.dec>, <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/insol91.jun>



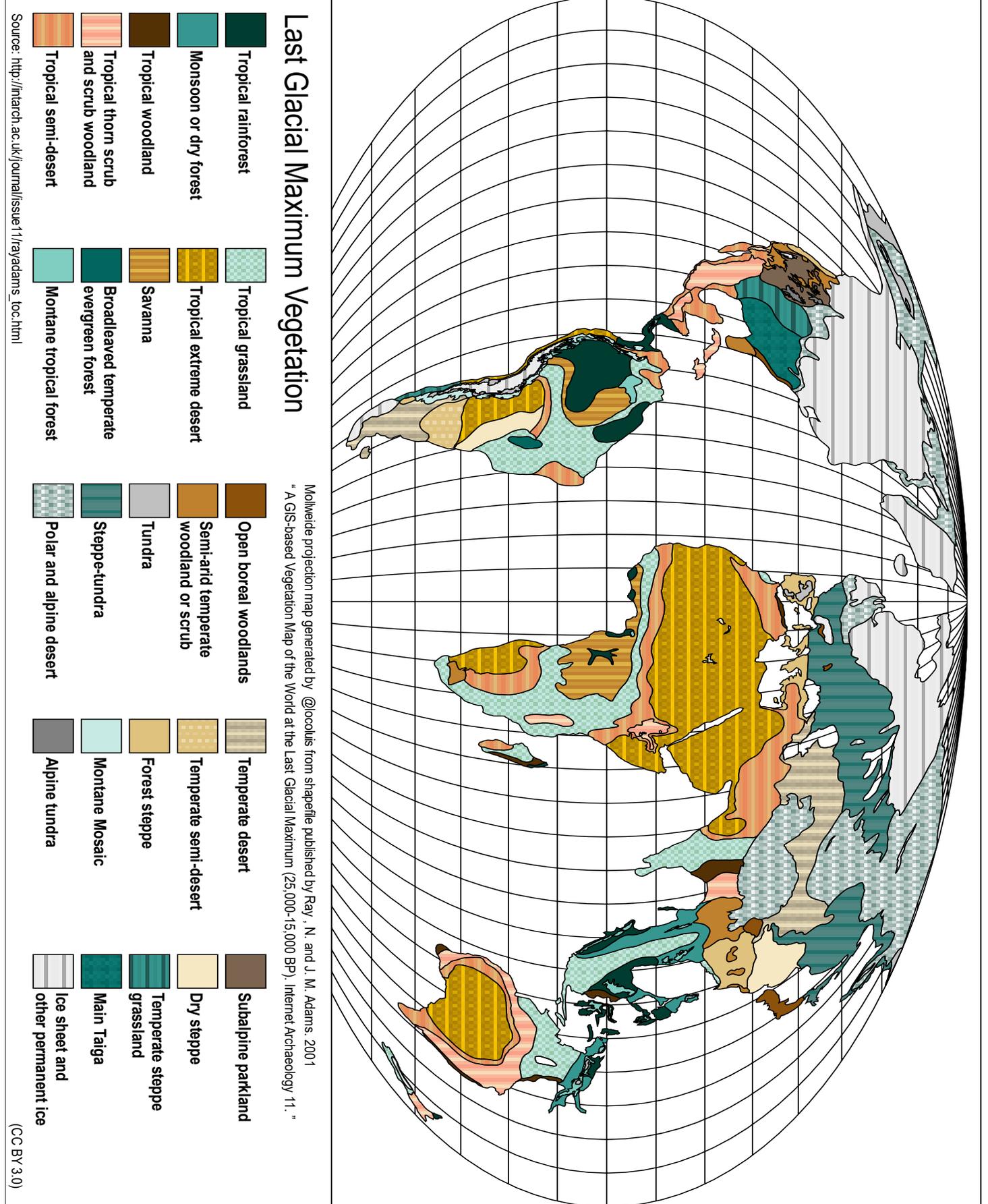
La figure 8 montre que ne subsistaient pour les arbres, au dernier maximum glaciaire, que quelques zones refuges.

³³ L'origine de cette eau de fond est vers 50°S autour de l'Antarctique

³⁴ Lowell Stott, Axel Timmermann, Robert Thunell *Southern Hemisphere and Deep-Sea Warming Led Deglacial Atmospheric CO₂ Rise and Tropical Warming* 27 September 2007 on *Science Express* DOI: 0.1126/science.1143791 et supporting online material 1143791S. Ce travail établit que le CO₂ et les températures de surface en zone tropicales n'ont commencé à évoluer que 1000 ans après le début du réchauffement des eaux antarctiques, parvenues au fond près de l'équateur 1000 ans à 1400 ans plus tard avec leur signature isotopique.

³⁵ Kaiser, J., F. Lamy, and D. Hebbeln. 2005. *A 70-kyr sea surface temperature record off southern Chile (Ocean Drilling Program Site 1233)*. *Paleoceanography*, Vol. 20, PA4009, doi:10.1029/2004PA001146

Figure 3-8 Carte de la végétation résiduelle lors du dernier maximum glaciaire
 source : https://en.wikipedia.org/wiki/Last_Glacial_Maximum (Ray Adams)



3-7 Absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère et les nuages, infrarouge thermique

Alors que ce sont les contrastes d'insolation et de température qui génèrent les mouvements de l'océan et de l'air et par là les transferts de chaleurs sensible et latente (vapeur d'eau), la fabrication de moyennes « globales » semble un besoin psychologique irrésistible : voyons un exemple ³⁶ de 2006.

L'auteur rapporte d'abord un *calcul* de l'absorption du solaire par l'atmosphère : 70 W/m² par la vapeur d'eau (25 kg/m²), 13 W/m² pour l'ozone (300 DU), 3,8 W/m² pour le CO₂, 1,1 W/m² pour le méthane, 5 W/m² pour les aérosols, 3 W/m² pour les nuages, et **96 W/m² en tout**. L'ozone et la moitié du CO₂, soit 15 W/m² en tout, concernent la stratosphère laissant **80 W/m² pour la troposphère**. L'absorption de l'infrarouge solaire par les nuages est sans doute assez sous-estimée puisque l'eau liquide absorbe complètement l'infrarouge (figure 5-5).

Le diagramme proposé par cet auteur (figure 9) entre la surface et le haut de l'air surestime sans doute le « *longwave upward* » émis par la surface en infrarouge thermique qui serait plutôt de 365 W/m² au lieu de 385 W/m².

22 W/m² seulement vont en infrarouge thermique de la surface au cosmos. (figure 6-9 ci-dessous)

Le flux de chaleur latente serait à augmenter de 10 W/m² selon des évaluations récentes des pluies sur les océans.

Les 145 W/m² d'insolation nette en surface repartiraient peut-être par la somme :

$$22 \text{ (rayonnement surface à cosmos)} + 25 \text{ (convection)} + 3 \text{ (rayonnement thermique net surface-air)} + 95 \text{ (évaporation)} = 145.$$

Le rayonnement de la troposphère vers le cosmos, qui vient presque entièrement de la vapeur d'eau serait alimenté par : 80 (solaire absorbé par la troposphère) + 25 + 3 + 95 (condensation) = 203 W/m²

Figure 3-9 Estimations de Ohmura (2006) : en rouge le solaire et en vert le rayonnement infrarouge thermique

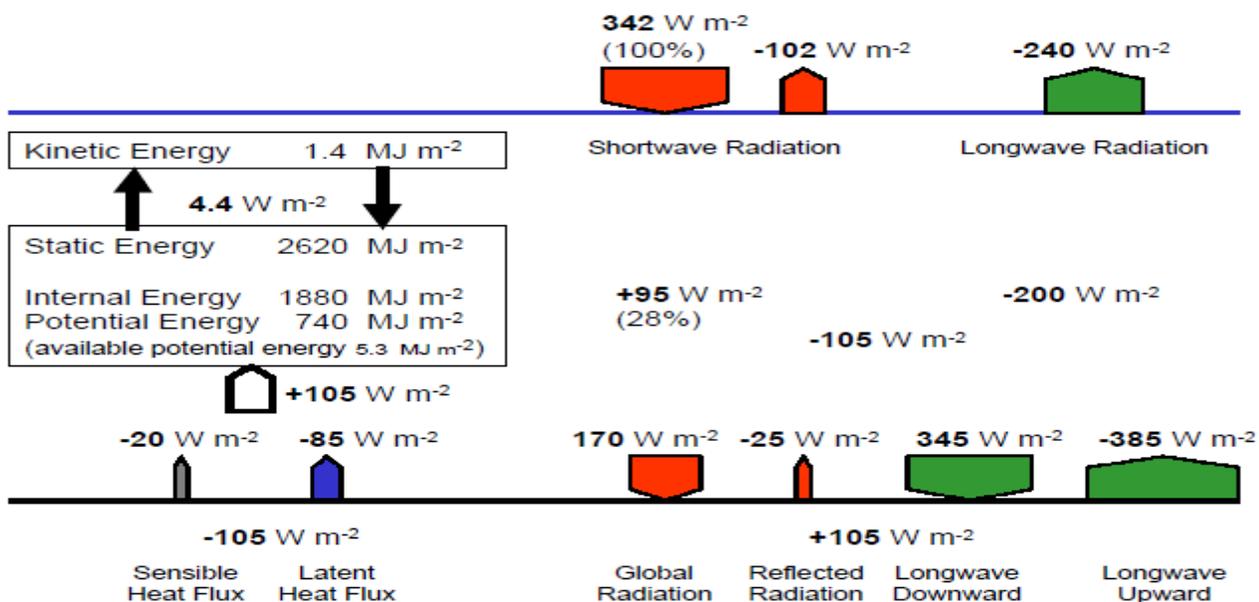


Fig. 1. New global energy balance of the atmosphere and earth's surface.

³⁶ Ohmura 2006 *New Radiation and energy balance of the world and its variability*

ftp://iacftp.ethz.ch/pub_read/aroesch/mikro/G_Ohmura.DOC.pdf

Martin Wild, Atsumu Ohmura, Christoph Schär, Guido Müller, Doris Folini, Matthias Schwarz, Maria Zyta Hakuba, and Arturo Sanchez-Lorenzo *The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes* <https://www.earth-syst-sci-data.net/9/601/2017/essd-9-601-2017.pdf>

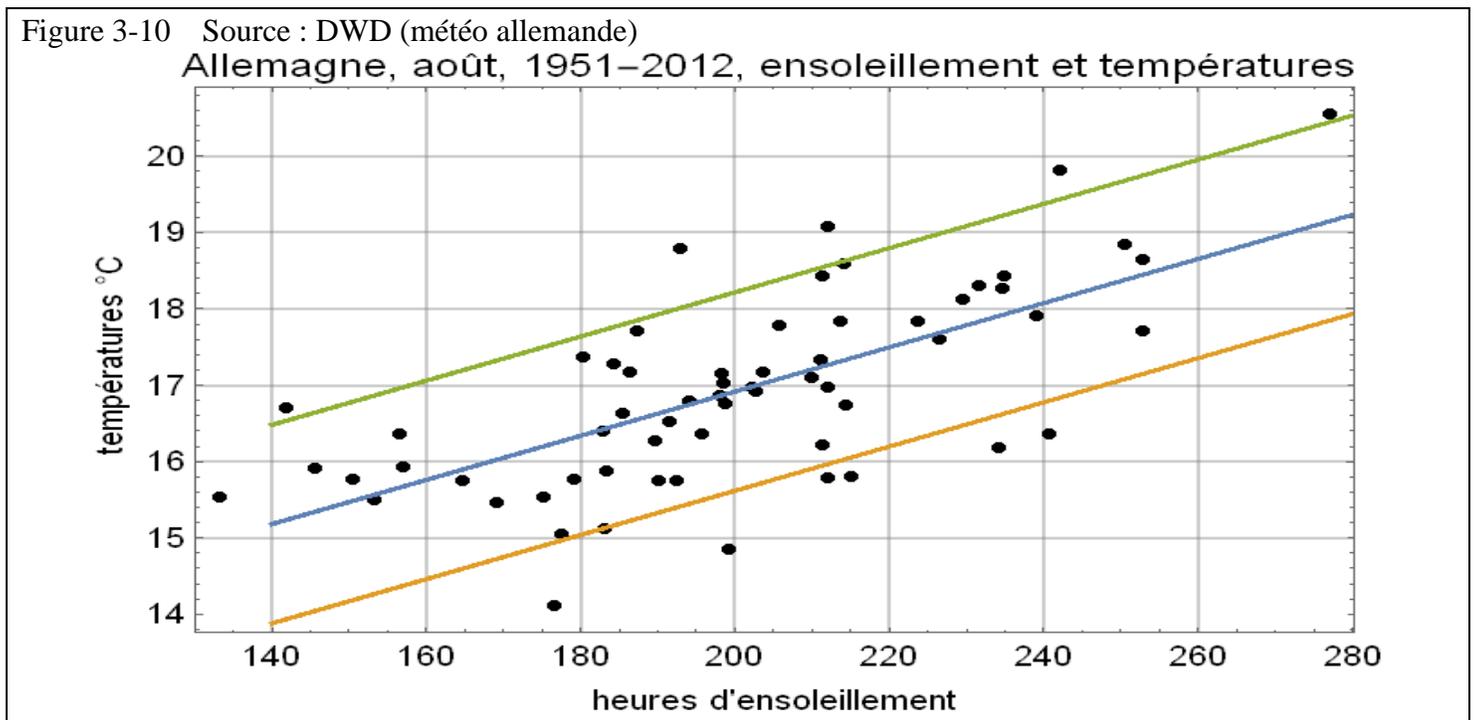
Des observations satellitaires ³⁷ moyennées sur mars 2000 – février 2010 donnent des ordres de grandeur en haut de l'atmosphère ; ces chiffres, même avec des décimales, sont sans doute incertains à quelques pour cent près.

Tableau 3-A Flux radiatifs en haut de l'air en W/m ²	Hémisphère nord	Hémisphère sud
Solaire incident	340,1	340,1
Solaire rétrodiffusé	99,7	99,6
Infrarouge thermique vers le cosmos	240,4	239,1
Solaire rétrodiffusé (ciel sans nuage)	55,5	49,3
Infrarouge thermique (ciel sans nuage) vers le cosmos	267,2	264,9

Mais toutes ces moyennes « globales », utiles certes, semblent distraire de l'étude des mécanismes effectivement à l'œuvre pour le transport de chaleur de zones chaudes et en surface aux couches hautes de la troposphère qui rayonnent vers le cosmos en infrarouge thermique.

3-8 Ensoleillement et températures de surface, évolution de la couverture neigeuse

La figure 10 suggère une corrélation apparente, en été, entre heures d'ensoleillement et températures moyennes de surface : +4°C pour un doublement des heures de soleil.

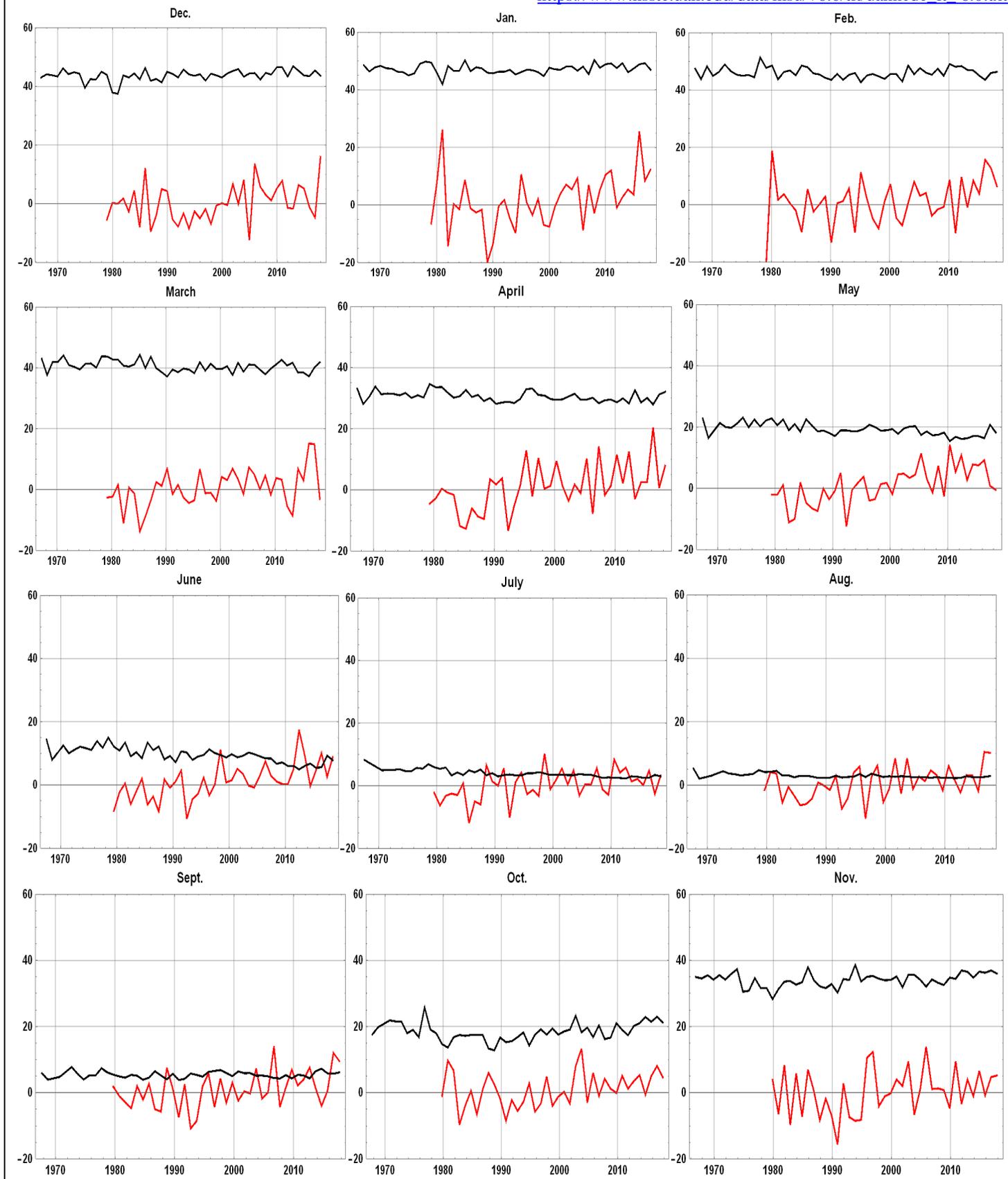


La couverture neigeuse de l'hémisphère nord atteint ou dépasse 50 millions de km².

Son évolution depuis novembre 1966, présentée figure 11, ne suggère **pas de décroissance, sauf en mai et juin** et seulement depuis 1990-2000, probablement grâce à la meilleure insolation nette en surface suggérée par la figure 3-6.

³⁷ Aiko Voigt, Bjorn Stevens, Jürgen Bader, Thorsten Mauritsen *The Observed Hemispheric Symmetry in Reflected Shortwave Irradiance* J. of Climate, 2013, vol. 26, pp. 468-477

Figure 3-11 En noir, mois par mois, couverture neigeuse de l'hémisphère nord de novembre 1966 à juillet 2018, en millions de km². En rouge, 10 fois les anomalies en °C des températures de la basse troposphère, au-dessus des terres, entre 60°N et le pôle nord. sources : http://climate.rutgers.edu/snowcover/files/moncov_nhland.txt
https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tl/uahncdc_lt_6.0.txt



4- “Climat” (au singulier), moyennes, et moyennes de moyennes

Quoique ce soient les pressions barométriques qui font le temps et la météo et expriment la circulation atmosphérique, une importance extraordinaire a, depuis presque 50 ans, été donnée à des moyennes (sur le globe) de moyennes (sur un mois) de températures moyennées sur la journée ... alors qu’il y a une différence de 10°C voire bien plus entre la température de la fin de la nuit et celle du milieu de l’après-midi.

Le chapitre 2 a donné des exemples de la grande variabilité des conditions réellement observées et de l’importance réelle des extrêmes que ces moyennes escamotent.

4-1 Les moyennes et les anomalies

Sur quelques minutes la température de l’air est fort variable du fait de la turbulence de l’air sur les premiers mètres : les abris météorologiques standardisés protègent leurs instruments du soleil sous un pavillon peint en blanc et situé à presque deux mètres du sol.

Posé, comme trop souvent, sur un parking ou sur une piste d’aérodrome ou sur un bâtiment habité, ce pavillon subit ou peut subir des influences extérieures « *réchauffantes* ».

Le nombre de stations météo à terre est passé de quelques dizaines vers 1850 à quelques milliers de 1940 à 1980, puis, les observations par satellite suffisant à recaler, toutes les six heures par exemple, les programmes de calcul des services météorologiques, beaucoup ont été abandonnées.

Les livres de bord des navires donnent des mesures de la température ou de l’eau de mer en surface ou à la prise d’eau de refroidissement du moteur et aussi de l’air en passerelle ; évidemment ces indications ne concernent que les grandes routes de la navigation commerciale. Des réseaux de bouées fixes ou dérivantes complètent depuis les années 1980 les observations satellitaires de la température de surface des mers.

Ne sachant que faire de plusieurs températures par jour des météorologistes ont cru bon de faire des moyennes, moyenne du minimum et du maximum si la station de mesure avait un thermomètre enregistrant le minimum et le maximum, ou moyenne de relevés faits trois fois par jour voire toutes les heures pour en tirer une moyenne sur 24 heures.

On a ainsi des moyennes horaires, journalières, mensuelles, annuelles dont l’intérêt et la signification pratique sont de plus en plus incertains.

Le développement des moyens de calcul automatique a permis de faire des moyennes sur un certain nombre de stations météorologiques, et même de moyennes « globales » ou mondiales en affectant à chaque série historique disponible une surface du globe fort variable, car s’il y a des stations météo « officielles » tous les 100 km en Europe ou aux Etats-Unis (hors Alaska), elles sont en Amérique du Sud et en Afrique séparées de milliers de kilomètres, sans parler des océans où il n’y avait d’observations que sur les routes de la navigation commerciale, et rien ou presque en dehors.

Le calcul des **anomalies** se fait en prenant, pour une station donnée, une moyenne sur trente ans des températures d’un mois donné, par exemple les mois de mai de 1981 à 2010, dont la valeur servira de référence ; puis pour chaque mois de mai de la série, qui par exemple va de 1873 à 2018, on calcule la différence entre la moyenne de ce mois et la référence : cette différence est baptisée « anomalie »³⁸.

Ce calcul est fait pour chacun des 12 mois.

La moyenne des anomalies mois par mois sur tout le globe ou sur une région se fait ensuite avec une pondération par la surface de la zone que chaque station est présumée représenter.

³⁸ Stanley L. Grotch *Some Considerations Relevant to Computing Average Hemispheric Temperature Anomalies* Monthly weather review July 1987, pp. 1305-1317

<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281987%29115%3C1305%3ASCRTCA%3E2.0.CO%3B2>

Pour une analyse critique et bien documentée voir [http://www.hashemifamily.com/Kevan/Climate/#Data Massage](http://www.hashemifamily.com/Kevan/Climate/#Data%20Massage)

Ce moyennage des anomalies mensuelles sur des centaines ou des milliers de stations fait disparaître la variabilité que l'on a vu, au chapitre 2, être de 30°C à 40°C entre les températures extrêmes observées sur un mois en un lieu, et de quelques degrés d'une année à l'autre sur les moyennes mensuelles d'une station donnée.

Ne restent alors que des variations de quelques dixièmes de degré, dont la figure 4-1 donne une idée.

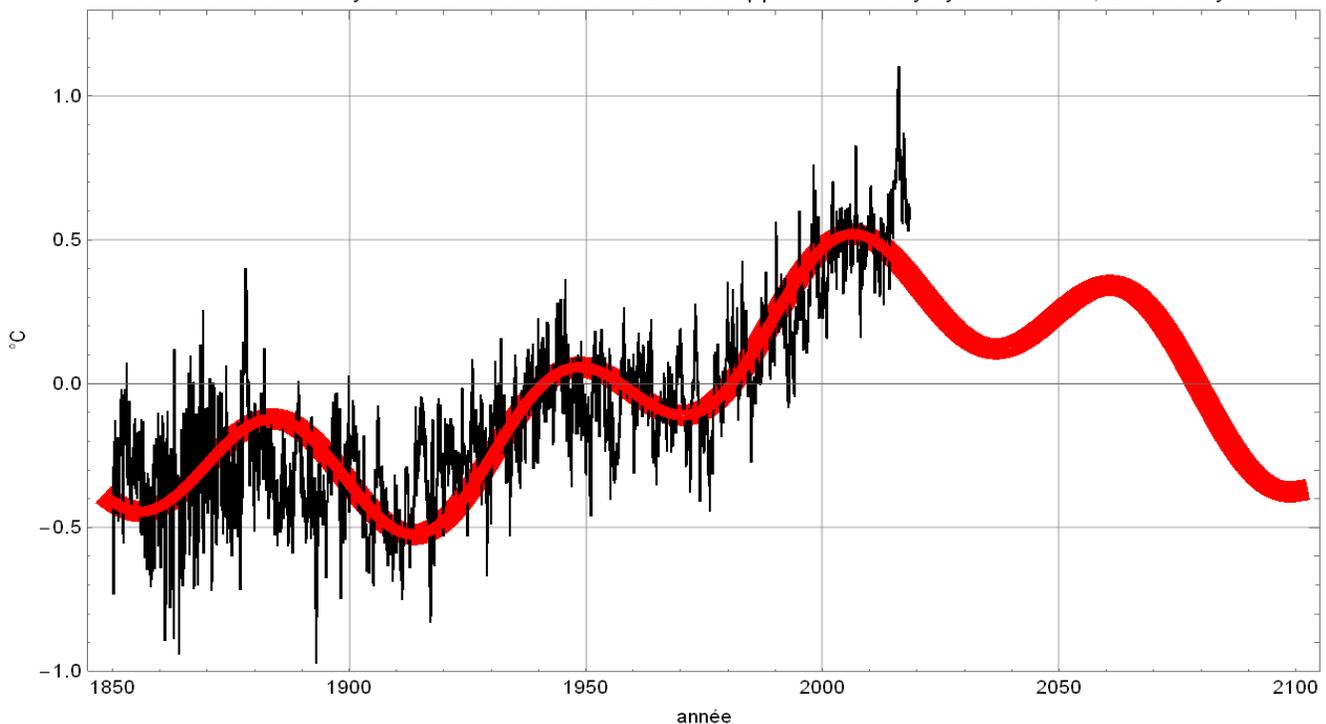
Figure 4-1 Anomalies moyennes « globales » de surface « terres et océans » de la série Hadcrut4 fabriquée à partir d'observations thermométriques sur des stations météo à terre ou sur des navires.

L'approximation en rouge est purement heuristique ou illustrative et emploie des cycles naturels de périodes 1050 ans, 208 ans et 60 ans bien documentés ³⁹.

Noter les grands El Niño de 1878, des années 1940-1945 et de 1998, 2010 et 2017.

https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/data/current/time_series/HadCRUT.4.6.0.0.monthly_ns_avg.txt

$0,25 \cos(2 \pi (x - 2021,8) / 208) + \cos(2 \pi (x - 2015) / 1050) + 0,2 \cos(2 \pi (x - 2004,8) / 60) - 0,9$
HadCRUT4 monthly series Jan. 1850– June 2018 & approximation by cycles of 1050, 208 & 60 years



Mais quel sens y a-t-il à faire la moyenne des températures des sommets de l'Everest et du milieu du Sahara ? Le professeur Lindzen ⁴⁰ y voit autant de sens qu'à faire la moyenne des numéros d'un annuaire téléphonique. Le chapitre 2 a rappelé que ce sont les limites entre climats qui se déplacent selon les cycles climatiques, climats essentiellement déterminés par les précipitations et leur saisonnalité.

4-2 Exemples de moyennes « globales » des anomalies

Personne ne peut nier que la température « moyenne globale » ait augmenté depuis les années 1975 -1980 : elle a augmenté de quelques dixièmes de degré pour la basse et la moyenne troposphère, mais cette augmentation n'est, en tendance linéaire, que d'un dixième de degré par siècle pour la haute troposphère !

Ci-dessous ces observations faites par des radiomètres entre 50 GHz et 60 GHz embarqués sur de multiples satellites. La figure 4-2, vignette du haut, montre deux épisodes de réchauffement de la basse stratosphère provoqués par l'absorption du flux solaire par des poussières et aérosols stratosphériques envoyés dans la

³⁹ Par exemple <http://hbar.phys.msu.ru/gorm/dating/suess.pdf> de 1990 pour les cycles de de Vries de 208 ans

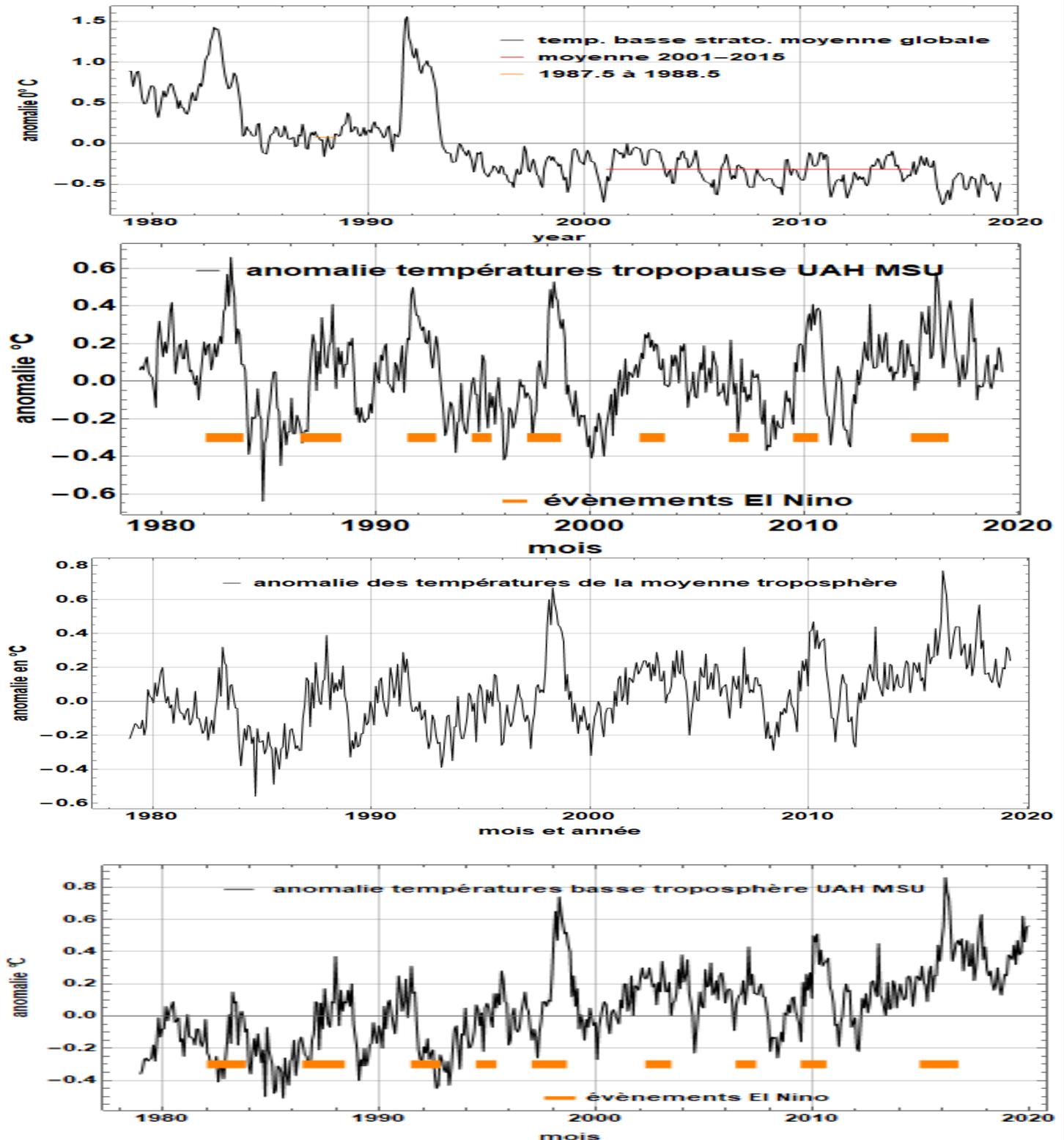
⁴⁰ <https://static.climato-realistes.fr/2017/05/Lindzen-Richard-trad-Veyres-def.pdf>

<https://www.climato-realistes.fr/conference-r-lindzen-escpi-paris-mai-2017/>

<http://www.skyfall.fr/2017/08/04/croire-que-le-co2-controle-le-climat-cest-a-peu-pres-comme-croire-a-la-magie/>

stratosphère par deux grandes éruptions volcaniques qui ont déprimé les températures de la basse troposphère des années 1983-84 et 1992-93. Les pointes des anomalies des température de la troposphère (deux vignettes du haut de la figure 2) sont la marque d'évènements El Nino explicités à la figure 3.

Figure 4-2 Températures exprimées en °C et en écart à une moyenne sur trente ans ou « anomalie » : basse stratosphère (vers 16 km) où les poussières volcaniques stratosphériques ont intercepté du flux solaire pendant quelques semestres, haute troposphère, moyenne troposphère (2 à 8 km) et basse troposphère (0 à 2 km) ; sources : https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tls/uahncdc_ls_6.0.txt, https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tp/uahncdc_tp_6.0.txt, www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tmt/uahncdc_mt_6.0.txt, https://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/lt/uahncdc_lt_6.0.txt,



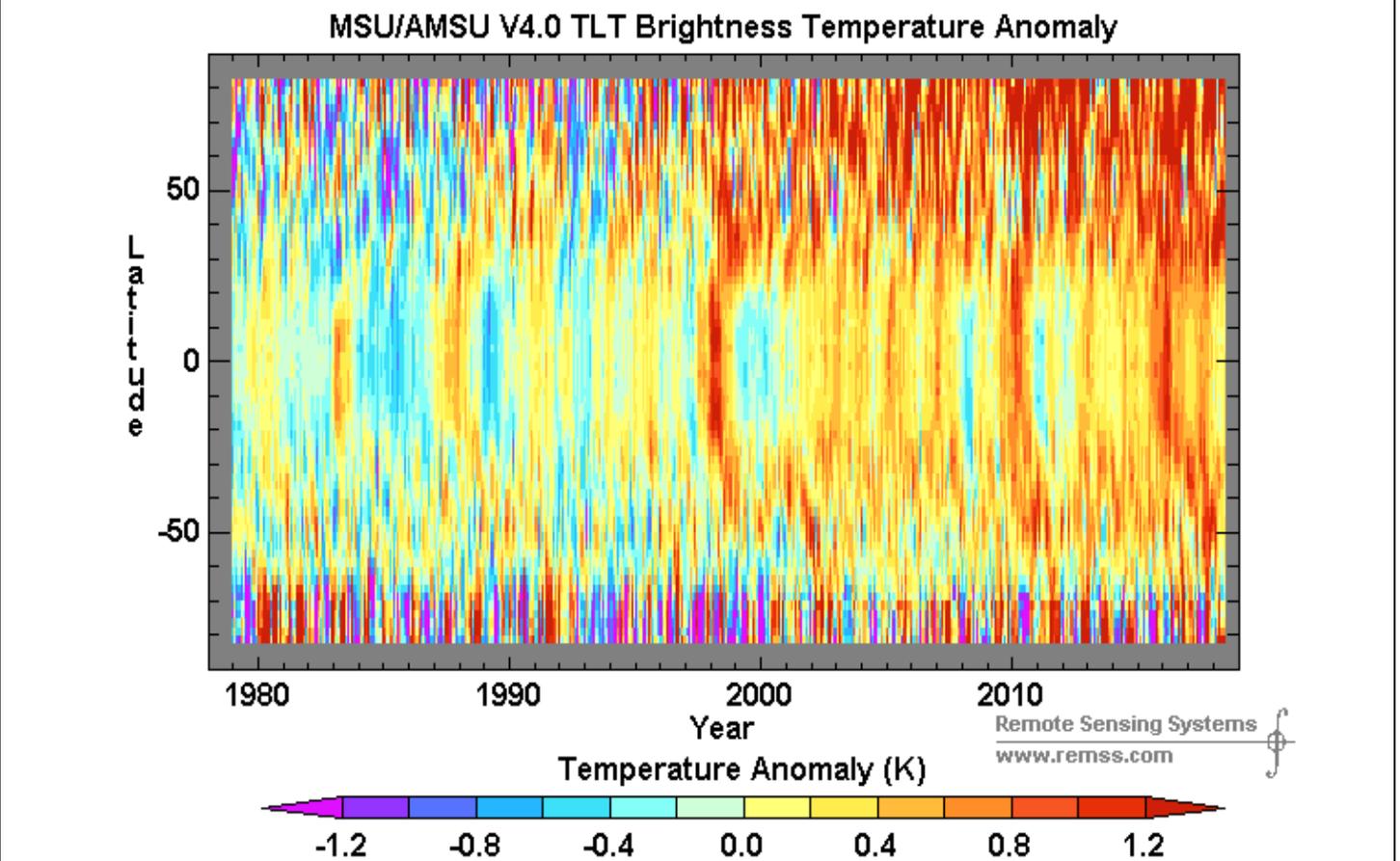
4-3 Les El Niño régulent-ils les températures sur tout le globe ?

Les El Niño sont un phénomène naturel qui se répète tous les trois à cinq ans, et vient du renforcement des pressions atmosphériques de l'hémisphère nord par rapport à celles de l'hémisphère sud, avec un effet très marqué sur le Pacifique où l'équateur météorologique vertical ou « cheminée équatoriale » usuellement vers 10°N passe, pour quelques mois, dans l'hémisphère sud. Des observations sur les coraux et d'autres marqueurs, et, depuis cent-cinquante ans, des observations thermométriques et barométriques ont permis de retracer ces événements pour les derniers millénaires ⁴¹.

La « piscine » d'eau chaude du Pacifique ouest (longue et large de quelques milliers de kilomètres et profonde de quelques centaines de mètres) se déplace tous les trois à cinq ans d'ouest en est, de l'Indonésie vers la côte péruvienne, qu'elle atteint aux environs de Noël, d'où le nom El Niño qui, en espagnol, désigne l'enfant Jésus.

Au passage la température de la zone entre 5°S et 5°N au milieu du Pacifique monte d'un ou deux degrés. Au bout de quelques mois la « piscine » repart vers l'ouest, mais est éclatée vers le nord et le sud, par la « force de Coriolis » due à la rotation du globe. La zone équatoriale retrouve alors sa température d'avant le El Niño, mais les latitudes vers 30° ou 40° et au-delà bénéficient pendant quelques mois de températures océaniques de surface plus chaudes (du moins lorsque l'eau de la « piscine » repasse en surface, par exemple lors des tempêtes d'hiver), dont la chaleur grâce aux vents d'ouest va sur les continents.

Figure 4-3 Représentation temps-latitude des anomalies des températures de la basse troposphère et phénomènes El Niño : on y voit **une sorte de chauffage central planétaire à eau pulsée**.



⁴¹ Par exemple : Beaufort, Luc & Grelaud, Michael. (2017). *A 2700-year record of ENSO and PDO variability from the Californian margin based on coccolithophore assemblages and calcification*. Progress in Earth and Planetary Science. 4. 10.1186/s40645-017-0123-z. et références
https://www.researchgate.net/publication/315539319_A_2700-year_record_of_ENSO_and_PDO_variability_from_the_Californian_margin_based_on_coccolithophore_assemblages_and_d_calcification

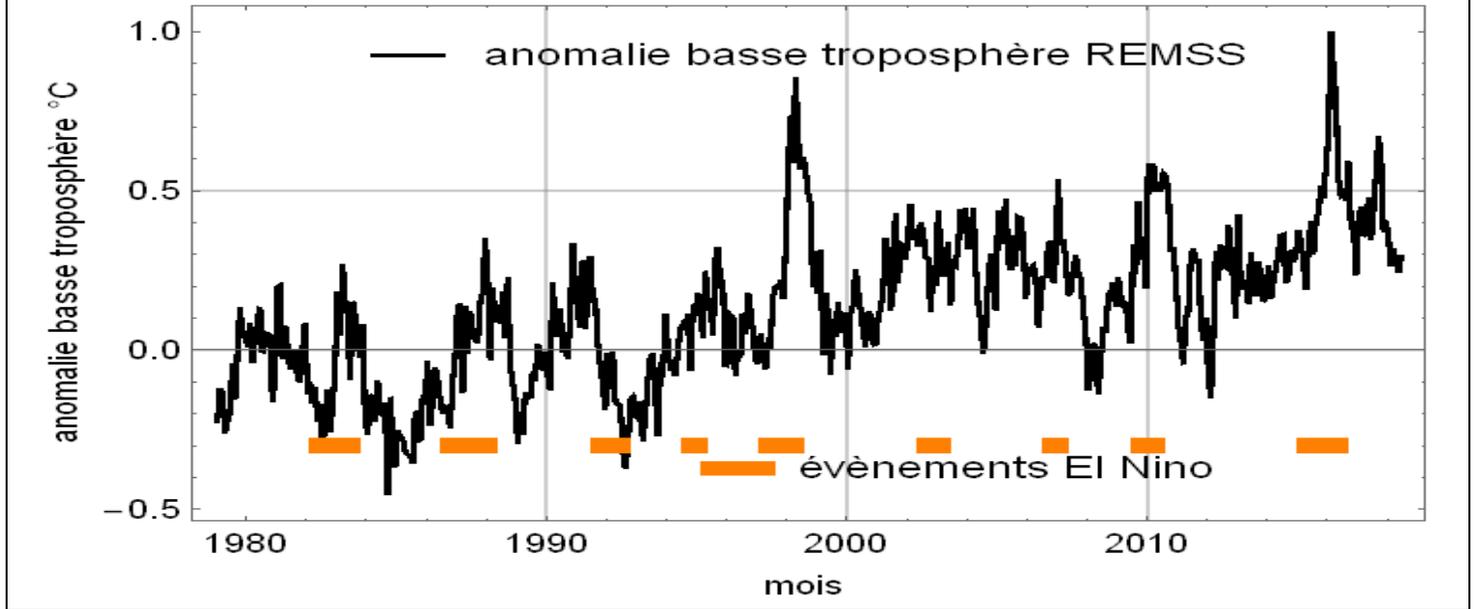
La figure 4 ci-dessous montre une moyenne sur tout le globe de l'anomalie des températures de la basse troposphère et les épisodes El Nino où la température de la zone dite Nino 3-4 au centre du Pacifique (5°N-5°S et 120°W -170°W) a été à +1°C et plus par rapport à la moyenne.

Figure 4-4 Effet des évènements El Nino sur la température moyenne globale de la basse troposphère

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>

http://images.remss.com/data/msu/graphics/TLT/time_series/RSS_TS_channel_TLT_Global_Land_And_Sea_v03_3.txt

Noter les effets des poussières volcaniques dans la stratosphère illustrés figure 4-2



4-4 Les températures moyennes globales des différents modèles du climat et les moyennes faites sur un grand nombre de « modèles informatiques » du climat

Néanmoins, cette évolution des températures moyennes « globales », que la figure 4-1 montre être de **quelques dixièmes de degrés Celsius** et rythmée par les phénomènes naturels El Niño, n'est pas aussi rapide que celles dites par des « modèles climatiques », gros programmes informatiques qui par leurs nombreux paramètres ajustables peuvent dire toute évolution que voudra le chef de l'équipe qui le fait tourner.

La très grande diversité des résultats des modèles informatiques et leur inadéquation pour une région donnée est masquée par un moyennage sur un grand nombre de modèles ou de sorties de ces modèles : on fait la moyenne sur tous les points du globe pour lesquels un programme fait le calcul, par exemple avec un point tous les 100 km une vingtaine de points sur la verticale ; les paramètres ajustables sont ajustés pour que la moyennes sur plusieurs jeux avec des conditions initiales différentes de moyenne globale ait sur les années couvertes par le calcul la forme que l'on veut.

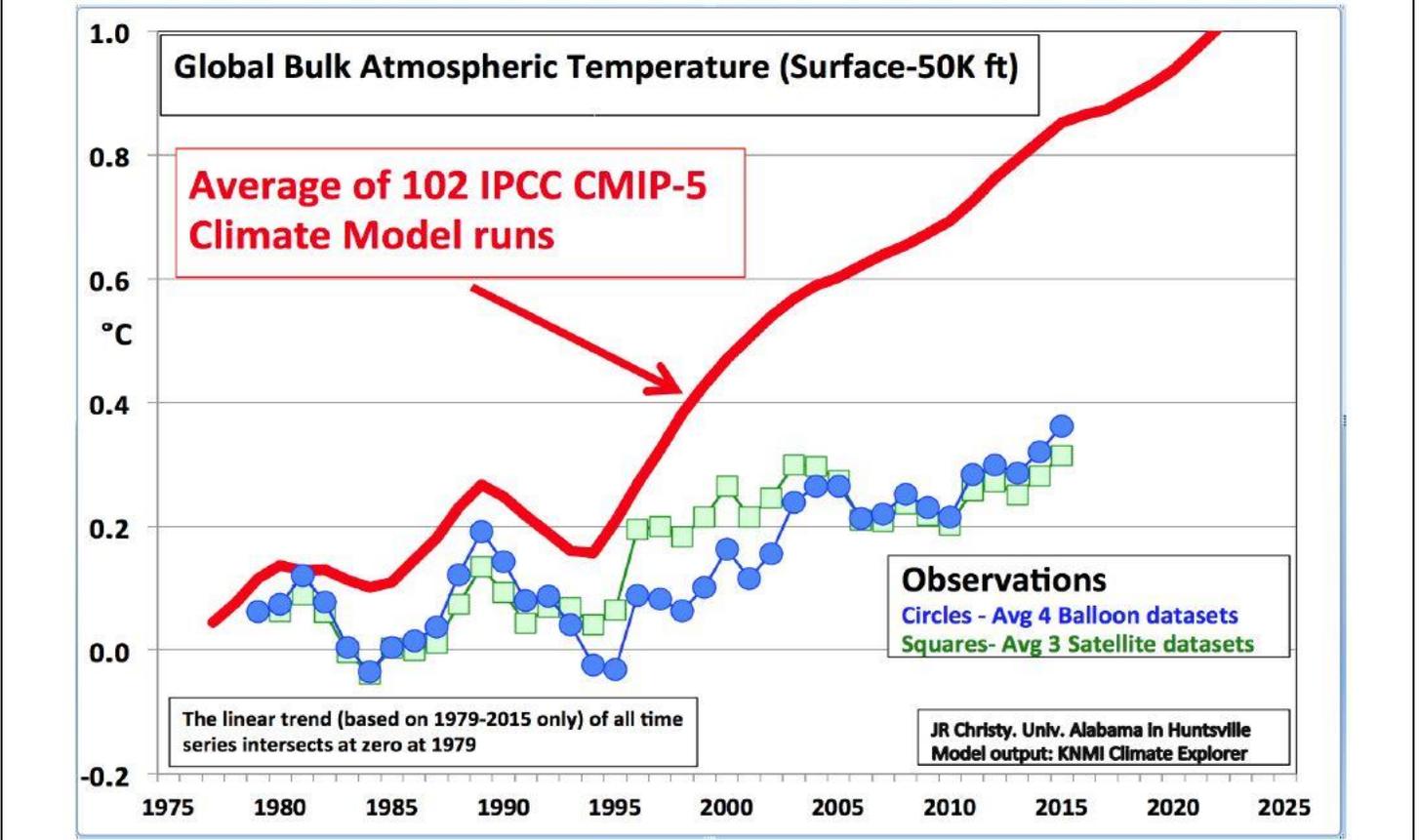
Puis on fait la moyenne entre les résultats des programmes de diverses équipes ce qui donne la courbe rouge de la figure 5.

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

- considérer cet écart comme transitoire, et croire que la réalité finira par rejoindre les modèles, autrement dit, accorder plus de foi aux modèles qu'à la réalité observée : c'est l'attitude politico-médiatique de certains pays comme la France ;
- considérer, comme le ferait n'importe quel ingénieur ou scientifique, que cet écart nécessite à tout le moins une explication, et probablement une remise en cause de la physique qui est dite sous-tendre ces modèles.

Figure 4-5 Les températures de cette figure sont lissées dans le temps par une moyenne mobile sur cinq années ; en rouge la moyenne de 102 jeux de programmes informatiques, en bleu et vert les observations par ballons et par satellites

Source : <http://www.globalwarming.org/2016/02/05/satellites-and-global-warming-dr-christy-sets-the-record-straight/>



Voilà qui peut motiver le lecteur à étudier la physique élémentaire exposée aux chapitres suivants.

5- Rayonnements

5-1 Rappels sur les ondes électromagnétiques :

Elles ont des propriétés fort diverses selon leurs fréquences et sont cataloguées comme :

rayons gamma : de fréquences supérieures à 30 ExaHertz ($30 \cdot 10^{18}$ Hz), longueur d'onde moindre que 1 picomètre ou 10^{-12} mètre, produits par des désintégrations à l'intérieur des noyaux atomiques ; leur énergie est d'au moins $h \nu = (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz}) (30 \cdot 10^{18} \text{ Hz}) = 123 \text{ kilo Electron Volt ou keV}$; 1 eV vaut $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

rayons X : de fréquences entre 30 PetaHertz ($30 \cdot 10^{15}$ Hz, longueur d'onde de 10 nm ou 10^{-8} mètre) et 30 ExaHertz voire 300 ExaHertz ($3 \cdot 10^{20}$ Hz et 999 fm ou longueur d'onde de 1 pm) ; énergie $h \nu$ des photons entre 124 eV à 30 PHz et 124 keV à 30 EHz

rayons UV ou Ultra-Violet :

UV extrême de longueurs d'onde 10 nm à 121 nm ou de fréquences 30 PetaHertz à 2,5 PetaHertz Raie Lyman Alpha de l'hydrogène à 121,567 nm ou 10,18 eV ou 2,46 PetaHertz (PHz) produite par la retour de l'atome d'hydrogène de son premier état excité à son état fondamental ⁴²

UV lointain de 122 nm à 200 nm (soit 1,5 PetaHertz ou 1500 TeraHertz (Tera = 10^{12})).

UV-C de 100 à 280 nm ; les UV de longueur d'onde inférieure à 240 nm décomposent les molécules d'oxygène en atomes d'oxygène qui réagissent avec une molécule d'oxygène pour former de l'ozone O_3

UV entre 240 nm et 280 nm qui détruisent l'ozone

UV-B de 280 à 315 nm absorbés par les molécules d'ozone

UV-A de 315 à 400 nm qui arrivent en surface, pénètrent dans les océans et servent aussi de lumière noire.

Des insectes, des oiseaux et certains mammifères ont une vision en UV avec des cônes sensibles aux UV-A⁴³. Des lasers excimères ArF à 193 nm sont employés en lithographie pour la production de semi-conducteurs, avec, en cours de développement, des systèmes à 13,5 nm⁴⁴ dits Extreme UV (EUV)

Visible : entre 380 nm (789 THz) limite du violet et la limite du rouge à 750 nm ou 400 THz

Des sources à laser semi-conducteurs sont présentes dans les produits grand public tels qu'enregistreur Blue ray à laser bleu vers 405 nm, graveur DVD à 690 nm ou lecteur de Compact Disc à 780 nm.

Infrarouge proche : de 400 THz à 75 THz il fait plus de 40% du rayonnement solaire.⁴⁵

Les télécommunications par fibre optique emploient la bande entre 190 THz et 200 THz.

Infrarouge thermique de 75 THz aux fréquences radio (qui commencent ou vers 1 THz avec une longueur d'onde de 300 μm , ou vers 300 GHz où la longueur d'onde est de 1 mm) ; cet infrarouge thermique est rayonné par des corps aux températures usuelles de la surface et de l'air entre 200 K (tropopause, Antarctique, ...) et 350 K : voir les températures de la peau à la figure 1.

La production, la détection et l'utilisation en imagerie et analyse de matériaux d'ondes TeraHertz ont considérablement progressé depuis quinze ans⁴⁶.

⁴² Les fréquences des raies de l'hydrogène sont en $(1 - 1/n^2) 3,289842 \text{ PetaHertz}$, avec $n=2$ pour la première raie, 3 pour la seconde etc. Ce rayonnement correspond à l'émission d'un photon quand un électron passe d'une orbite éloignée du noyau à l'orbite la plus proche du noyau de cet atome, noyau aussi appelé proton.

⁴³ R. H. Douglas, G. Jeffery *The spectral transmission of ocular media suggests ultraviolet sensitivity is widespread among mammals*, 2014 <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/281/1780/20132995>

⁴⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Extreme_ultraviolet_lithography

⁴⁵ Les classifications sont fort variables selon les disciplines : par exemple la Commission Internationale de l'Eclairage dit : IR-A 430 THz à 215 THz, IR-B 215 THz à 100 THz, IR-C 100 THz à 0,3 THz

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Infrarouge>

⁴⁶ S.S. Dhillon et al. The 2017 Terahertz science and technology roadmap Phys. D: Appl. Phys. 50 043001 (49 pages) (<http://iopscience.iop.org/0022-3727/50/4/043001>)

https://www.researchgate.net/publication/310673624_The_2017_Terahertz_Science_and_Technology_Roadmap

Les **ondes millimétriques** permettent l'observation par satellites⁴⁷ des températures de l'air, par mesure de rayonnement des molécules d'oxygène à plusieurs fréquences entre 50 GHz et 60 GHz correspondant à différents niveaux de la troposphère et de la stratosphère ; la quantité de vapeur d'eau est observée à partir de rayonnements à quelques fréquences entre 20 GHz et 50 GHz et vers 183 GHz ; le rayonnement reçu vers 89 GHz dit la température du sommet des nuages.

Les ondes radio centimétriques (de 30 GHz ou 1 cm à 300 MHz ou 1 mètre) sont d'un usage constant : télévision radiodiffusée, communications fixes et mobiles (satellites, faisceaux hertziens, mobiles), radars, Wi-Fi, et vers 2,45 GHz (12,2 cm) fours micro-ondes où le rayonnement tend à aligner les molécules d'eau qui sont freinées par leur environnement, ce qui réchauffe les aliments.

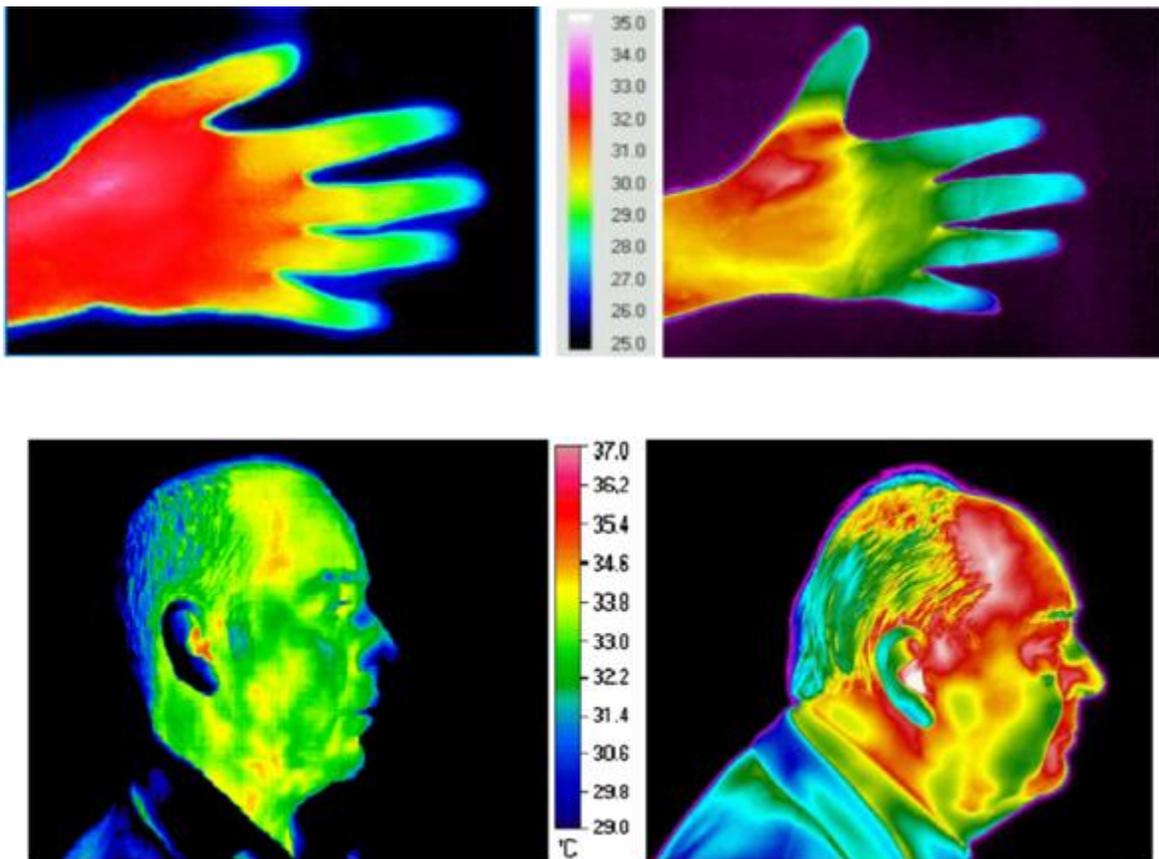
L'observation de signaux GPS (à 1575,42 MHz et 1227,60 MHz) permet de retrouver les profils d'humidité de l'atmosphère qui modifient l'indice de réfraction de l'air et la vitesse de propagation des ondes.

5-2 Rayonnement thermique :

Un corps qui absorbe à une fréquence rayonne à cette fréquence mais à sa température propre comme pour la peau humaine à la figure 1.

Figure 5-1 L'infrarouge thermique observé par une caméra : le flux rayonné par une peau (ou un vêtement) indique sa température

Figures from Infrared thermal imaging in medicine E F J Ring and K Ammer 2012 Physiol. Meas. 33 R33
doi:10.1088/0967-3334/33/3/R33



Un transfert de chaleur par rayonnement thermique entre deux corps est **comme un transfert d'argent entre deux comptes bancaires** :

« flux rayonné par A et absorbé par B » moins « flux rayonné par B et absorbé par A ».

C'est un point essentiel : les flux unidirectionnels ne réchauffent ni ne refroidissent ; seule compte la différence des flux de sens opposés.

Pour un corps idéal appelé « corps noir » le flux émis est $B(\nu, T)$ fonction de la fréquence ν du rayonnement et de la température T du corps, avec les constantes physiques

⁴⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_microwave_sounding_unit

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/Hz} \quad c = 2,997924 \cdot 10^8 \text{ m/s}, \quad k_B = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$B(\nu, T) = 2 (h/c^2) \nu^3 / (\exp [h \nu / (k_B T)] - 1) = 1.4745 \cdot 10^{-50} a^4 \nu^3 / (\exp[4.779 \cdot 10^{-11} a \nu / T] - 1)$$

où $a = 1$ si ν est en Hertz, $a = 10^{12}$ si ν est en THz, $a = 29,97924 \cdot 10^9$ si ν est en cm^{-1} ; le cm^{-1} est l'unité de fréquence des spectroscopistes, qui vaut presque 30 GHz.

$B(\nu, T)$ est appelé fonction de Planck. Le maximum de cette fonction est atteint à $\nu (\text{cm}^{-1}) = 1,93145 T(\text{K})$ ou à $\nu (\text{THz}) = 0,0588 T(\text{K})$, soit 17,6 THz à 300 K.

La fonction $B(\lambda, T)$ en fonction de la longueur d'onde est la densité d'énergie à intégrer en $\lambda = c / \nu$, λ exprimé en unités de longueur ; son maximum en longueur d'onde est à $\lambda = 2897 (\mu\text{m}) / T(\text{K})$ qui est très différent de la position en fréquence du maximum de $B(\nu, T)$.⁴⁸

Le rayonnement d'un **corps réel** est le produit de la fonction de Planck par l'émissivité qui dépend de l'angle du rayon émis avec la normale à la surface, et de la fréquence ; cette émissivité est très variable selon les fréquences et les types de matériaux, de liquides ou de gaz.

Le rayonnement à la fréquence ν vers un demi-espace d'une surface idéale plane corps noir est $\pi B(\nu, T)$.

Le facteur π vient de l'intégration de ces flux sur toutes les directions : un flux faisant un angle a par rapport à la normale à la surface émettrice, sera en $\cos(a)$ ⁴⁹, à intégrer sur l'angle solide $d\Omega = \sin(a) da db$ avec les angles a entre 0 (la normale à la surface) et $\pi / 2$ et b entre 0 et 2π : en effet

$$\left(\int_0^{2\pi} db \right) \left(\int_0^{\pi/2} \sin(a) \cos(a) da \right) = (2\pi) (1/2) = \pi$$

L'intégration sur tout le spectre du flux rayonné par une surface idéale corps noir donne le flux total en σT^4 , par exemple $389,5 \text{ W/m}^2$ à 288 K, avec $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ dite constante de Stefan-Boltzmann.

On verra plus loin que la formule en σT^4 sert beaucoup pour donner un air « scientifique » à des raisonnements faux ou ineptes où l'on veut ignorer l'existence et le rôle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de la Terre.

Cette formule simple en σT^4 peut servir à estimer l'ordre de grandeur de la température d'une surface plane qui **dans le vide** recevrait par exemple 1360 W/m^2 du soleil et serait à la température qui lui permet -si elle était un corps noir- de rayonner la même puissance : il vient 393,5 K ou 120,4°C température voisine de celles que l'on aurait observé sur la Lune soleil au zénith.

Figure 5-2 Exemples d'émissivité moyennes de surfaces terrestres en infrarouge thermique : océans, avec végétation, déserts, neige et glace Source : Daniel Feldman PNAS 2014

En abscisse unité en cm^{-1} de 30 GHz ou 0,03 THz ; une longueur d'onde de $10 \mu\text{m}$ correspond à 1000 cm^{-1} et 30 THz, une longueur d'onde de $100 \mu\text{m}$ correspond à 100 cm^{-1} et 3 THz

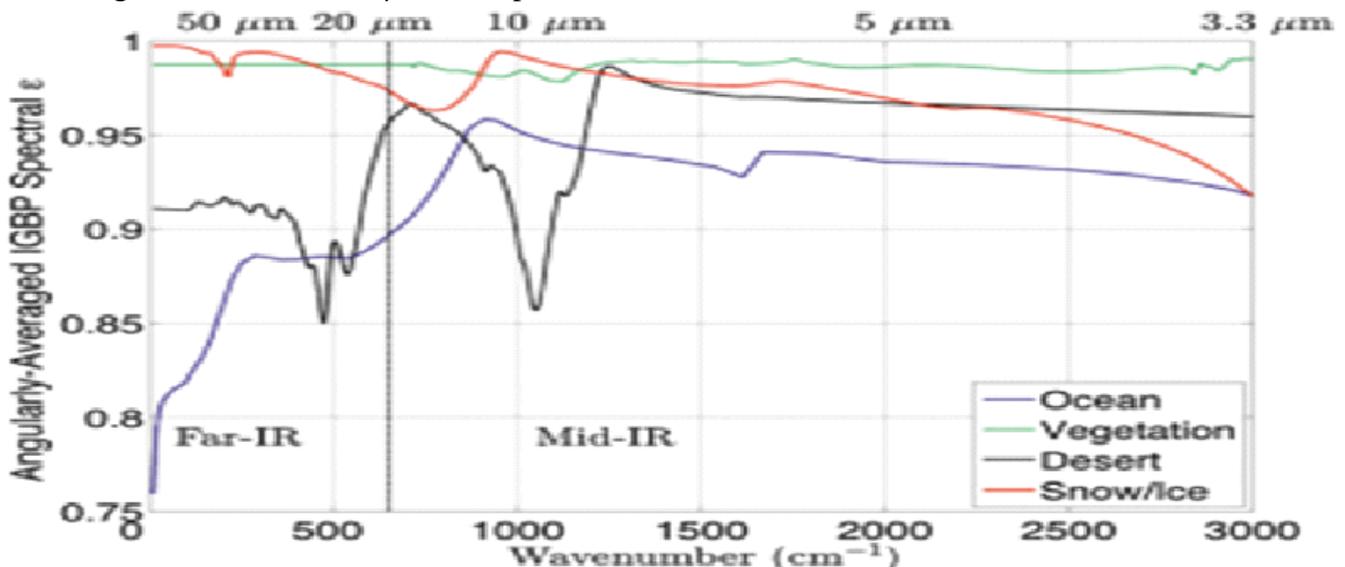


Fig. 3. Angularly averaged, spectrally resolved far-IR surface emissivity for four IGBP land types (ocean, vegetation, desert, and snow) based on 3D radiative transfer calculations and published indices of refraction.

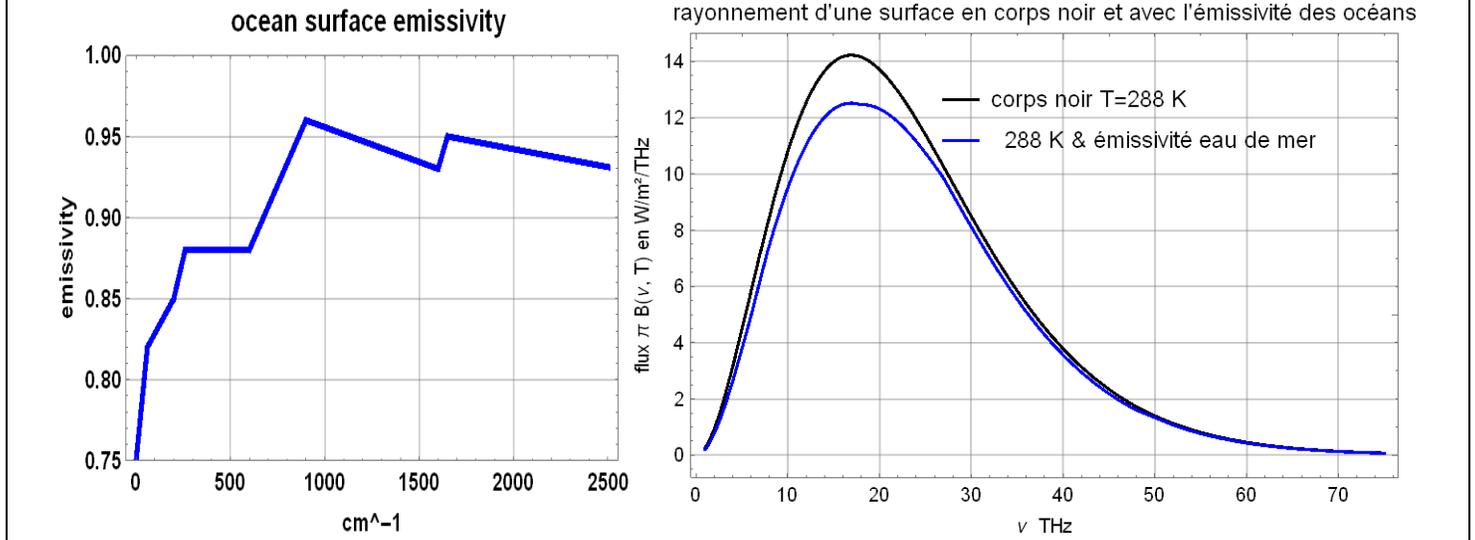
⁴⁸ En effet $B(\lambda, T) d\lambda = B(\nu, T) d\nu = B(c/\lambda, T) c d\lambda / \lambda^2 = 2 h c^2 / \lambda^5 (\exp [h c / (\lambda k_B T)] - 1) d\lambda$;

$B(\lambda, T)$ est une fonction très différente de $B(\nu, T)$

⁴⁹ Hypothèse d'une source dite lambertienne : voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lambert

Pour la surface des océans (71% de la surface du globe) le calcul avec la courbe simplifiée de la figure 3 conduit, par rapport au corps noir, à une diminution du maximum du flux infrarouge thermique émis par la surface des océans de $14 \text{ W/m}^2/\text{THz}$ à $12 \text{ W/m}^2/\text{THz}$; la surface intégrée sous la courbe passe de $389,5 \text{ W/m}^2$ à $354,8 \text{ W/m}^2$. Cette importante correction (-10% !) invalide la plupart des schémas en flux en W/m^2 qui prétendent illustrer ou justifier un « effet de serre » (voir Partie II).

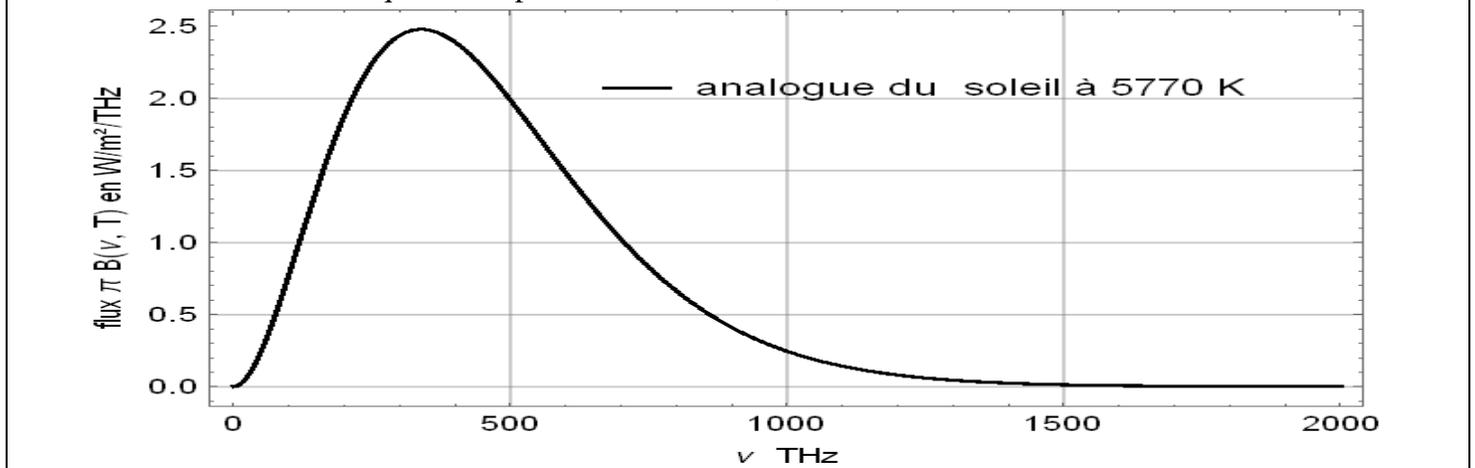
Figure 5-3 A gauche, émissivité de l'eau de mer, courbe simplifiée. $1 \text{ cm}^{-1} = 0,02997 \text{ THz}$ ou presque 30 GHz . A droite : rayonnement vers un demi-espace d'une surface à 288 K ($14,85 \text{ }^\circ\text{C}$) de type corps noir (courbe noire) et avec l'émissivité de l'eau de mer (courbe bleue).



5-3 Rayonnement solaire

Si le soleil était un corps noir à 5770 K on aurait, à la distance d'une unité astronomique du centre du soleil un flux, réduit dans le rapport du carré du rapport du rayon du soleil 696 Mm à l'unité astronomique $149,59 \text{ Gm}$; ce flux est à la figure 4 représenté en $\text{W/m}^2/\text{THz}$; les flux en infrarouge (moins de 400 THz), dans le visible (400 à 789 THz) et en UV (789 THz à 2000 THz) seraient respectivement de 630 W/m^2 , 595 W/m^2 et 135 W/m^2 dont 56 W/m^2 pour les UV au-delà de 952 THz (UV en dessous de 315 nm), ceux qui agissent sur l'oxygène et l'ozone.

Figure 5-4 Allure du rayonnement solaire à une unité astronomique du soleil en $\text{W/m}^2/\text{THz}$. Total 1360 W/m^2 . Les ultraviolets sont aux fréquences supérieures à 789 THz , le visible entre 400 THz et 789 THz .



Sur la plage de l'infrarouge thermique aux températures terrestres, aux fréquences en dessous de 75 THz , le flux solaire ne fait que 13 W/m^2 sur un total de 1360 W/m^2 .

5-4 Transfert de chaleur

Comme déjà dit, un transfert de chaleur par rayonnement thermique entre deux corps est comme un transfert d'argent entre deux comptes bancaires :

« flux rayonné par A et absorbé par B » moins « flux rayonné par B et absorbé par A ».

Si deux surfaces en vis-à-vis sont séparées par du vide ou par un milieu transparent en infrarouge thermique, et si ces surfaces sont assimilées à des corps noirs, le transfert de chaleur de A à B vaudra $\sigma (T_A^4 - T_B^4)$.

Par exemple, la main droite à 33°C émet 500 W/m² vers la main gauche placée à quelques centimètres d'air de la droite et reçoit autant de la main gauche : la main droite ne réchauffe pas la main gauche ni la gauche la droite puisque 500 – 500 = 0.

Aux températures usuelles et si T_A et T_B sont proches on aura un transfert radiatif de chaleur en

$$4 \sigma T_{\text{moyen}}^3 (T_A - T_B) \text{ qui pour } T_{\text{moyen}} = 280 \text{ K (soit } 6,85^\circ\text{C) vaut } 5 (T_A - T_B)$$

à comparer à l'effet de la convection sur une façade souvent pris à 4 W/m²/K en calcul thermique des bâtiments.

La chaleur transférée de la paroi de l'immeuble à T_A à l'air supposé « corps noir à T_B » est alors :

$$(4 + 5) (T_A - T_B) \text{ W/m}^2.$$

Pour 10 m² de vitrage et une différence de température de 11°C : 10 m² x 9 W/m²/°C x 11°C = 990 W/m².

La conductivité thermique, quotient du transfert de chaleur en W/m² par la différence des températures entre les deux faces du mur ou du vitrage, est pour un mur épais ou isolé vers 0,5 W/m²/K, pour un vitrage simple vers 6 W/m²/K (intérieur à +20°C, extérieur à -5°C, vitrage à 2°C), pour un double vitrage à 2,7 W/m²/K avec une vitre intérieure à 10°C.

5-5 Absorption des rayonnements électromagnétiques par l'eau liquide

L'infrarouge est absorbé par de l'eau liquide, très fortement au-delà de 1 µm (1000 nm ou 300 THz) ; sont aussi absorbés les UV en dessous de 200 nm, de fréquences supérieures à 1500 THz.

Figure 5-5 **Absorption par l'eau liquide exprimée en cm⁻¹, des ondes UV aux ondes millimétriques**

Le coefficient d'absorption u en cm⁻¹ correspond à une transmission $\exp[-u z]$ à la traversée de z cm d'eau (loi de Beer) ; par exemple on lit, à la longueur d'onde de 1 µm (300 THz), $u = 0,1 \text{ cm}^{-1}$ d'où

$$1/u = (1/0,1) (0,01 \text{ mètre}) = 0,1 \text{ mètre} = \mathbf{10 \text{ cm}}$$
 donc une transmission en $\exp[-z(\text{cm})/10]$

A 9000 cm⁻¹ (270 THz), $u = 100 \text{ cm}^{-1}$, transmission de $1/e = 37\%$ au bout d'une distance

$$z = (1/100) (1/100) \text{ mètre} = \mathbf{100 \mu\text{m}}$$

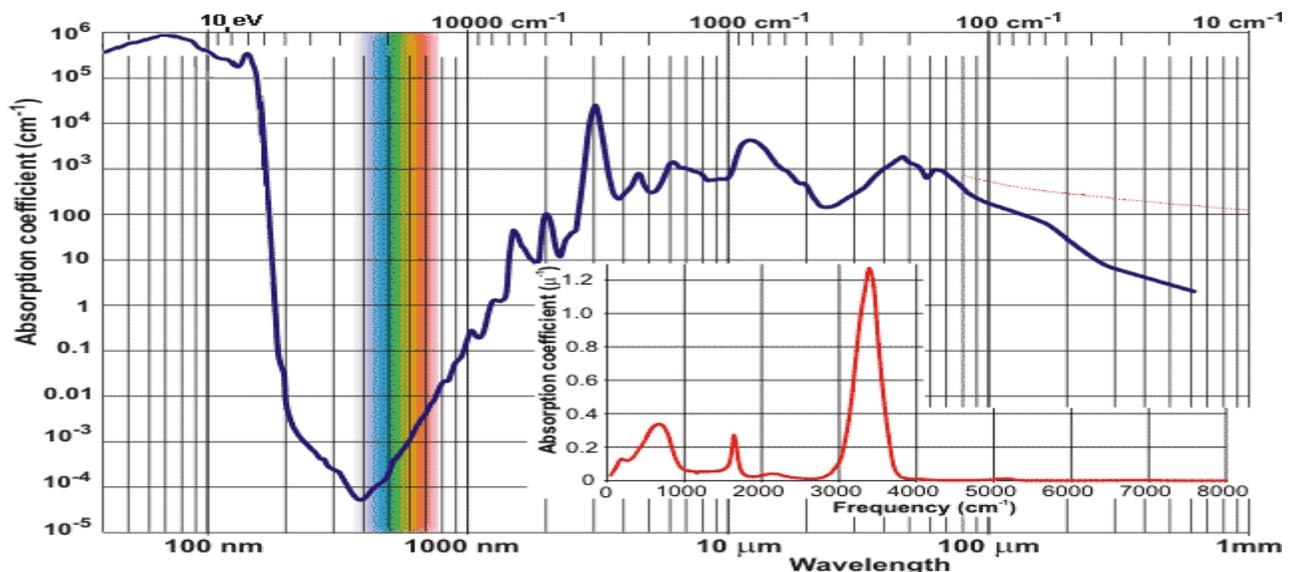
A la longueur d'onde de 15 µm (raie du CO₂ à 666 cm⁻¹ ou 19,9 THz), $u = 1000 \text{ cm}^{-1}$

à 20 THz aura été absorbé par l'eau.

L'absorption est, en gros, de 2/3 plus forte pour un rayonnement diffus (cas de l'infrarouge thermique).

La transmission s'exprime encore par 10^{-A} où A est l'absorbance = $\epsilon c z = u z / 2,303$;

ϵ = absorption par mole en litre/mole/cm⁻¹ ; c = concentration molaire = 55,345 mole/litre @ 25°C.



Noter la relative transparence de l'eau entre 200 nm et 800 nm (1500 THz à 380 THz) qui laisse passer plus de 37% à 1 mètre de profondeur (u plus petit que $0,01 \text{ cm}^{-1} = (100 \text{ cm})^{-1}$).

L'infrarouge thermique vers 15 μm est entièrement absorbé par quelques dizaines de microns d'eau liquide.

Le rayonnement infrarouge thermique de l'air vers la surface, entre 1 THz (33 cm^{-1}) et 70 THz (2333 cm^{-1}) est sur 75% du globe (mer, plans d'eau, forêts humides) absorbé par les premiers vingt microns d'une surface d'eau liquide alors que le solaire visible et ce qui reste des UV de longueur d'onde supérieure à 315 nm (non absorbés par l'oxygène ou l'ozone) pénètrent et chauffent les premiers mètres de l'océan.

Plus ou moins de CO_2 et de « *back radiation* » de l'air vers la surface n'a sur presque les trois quarts de la surface du globe pas d'effet « *réchauffant* » puisque compensé par l'évaporation de la couche d'eau liquide superficielle.

5-6 Diffusion par des aérosols, les gouttelettes et les molécules

Il a diffusion quand une onde rencontre une molécule, ou une particule ou une gouttelette de taille comparable à la longueur d'onde. Une partie de l'onde est renvoyée vers l'arrière, voire sur les côtés.

Les molécules d'azote et d'oxygène diffusent les UV et les fréquences visibles avec une efficacité croissant en ν^4 : le bleu du ciel vient de la diffusion ($750 \text{ THz} / 400 \text{ THz}$)⁴ = 12 fois plus forte du bleu solaire que du rouge. Les gouttelettes de brouillard diffusent et absorbent dans le visible et le proche infrarouge

Visibilité en météorologie

Il y a une distance à laquelle un objet noir devient à peine perceptible sur l'horizon, avec un rapport de contraste C de seulement 0,02 entre le rayonnement visible I_{objet} de l'objet et celui le fond I_{fond} : $C = (I_{\text{fond}} - I_{\text{objet}}) / I_{\text{fond}}$.

A une distance z le contraste (défini à 550 nm ou 545 THz) diminue en $\exp(- \text{ext } z)$ où ext est le coefficient d'extinction dû à l'absorption par les gaz et à la diffusion par les aérosols.

La distance limite de visibilité est $z = 3,912 / \text{ext}$. qui sauf brouillards est entre quelques km et quelques dizaines de km.⁵⁰

Le fog est défini par une visibilité inférieure à 1 km, le brouillard entre 1 et 2 km, la brume entre 2 et 5 km.⁵¹

Il a été trouvé que le réchauffement observé depuis 1980 en Europe occidentale est en relation avec une meilleure transparence de l'air ou une meilleure visibilité ⁵² avec une division par disons deux entre 1980 et 2010 du nombre de jours de visibilité limitée à moins de 2 km, 5 km et 8 km.

La comparaison de stations météo proches suggère une augmentation des températures à 15 heures de 2°C quand la visibilité est de 15 km -et plus- par rapport au cas où elle n'est que de 2 km.

Cette meilleure visibilité découlerait d'une très forte diminution de la quantité de dioxyde de soufre dans l'air de l'Europe occidentale depuis les années 1980.

⁵⁰ Pour une analyse récente voir : Zhong Ping Lee, Shao Ling Shang *Visibility: How Applicable is the Century-Old Koschmieder Model?* Journal of atm. sc. Nov. 2016, pp. 4573-4581

L'emploi de capteurs embarqués sur des véhicules « autonomes » pour détecter des conditions de mauvaise visibilité est décrit dans : Hazar Chaabani et al. *A Neural network approach to visibility range estimation under foggy weather conditions* Procedia Computer Science 113, 2017, pp. 466-471

⁵¹ Des imageurs ou caméras à des longueurs d'onde vers 10 μm pénètrent mieux les brouillards formés de gouttelettes de petit diamètre que les caméras dans le visible ou l'infrarouge proche.

⁵² Robert Vautard, Pascal Yiou & Geert Jan van Oldenborgh *Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years*. Nature Letters, 18 jan. 2009

6- Absorption et émission du rayonnement infrarouge thermique par la vapeur d'eau et par le dioxyde de carbone

6-1 Epaisseur optique

Un faisceau de lumière dirigé est, à la traversée d'un corps, atténué en $\exp[-t]$ où t est l'épaisseur optique de ce corps, une grandeur sans dimension, qui dans le cas homogène de la figure 5-5 (absorption par l'eau liquide) est le produit du coefficient linéique d'absorption par la distance traversée.

Pour un rayonnement diffus, la transmission est une fonction de l'épaisseur optique t , fonction qui peut être approchée par $\exp(-t) / (1+0,65 t)$ et vaut **20% pour $t=1,07$** , 5% pour $t=2,15$ et 1% pour $t=3,5$.

La figure 1 montre aux fréquences de l'infrarouge thermique l'épaisseur optique t pour une valeur moyenne de 25 kg/m² de vapeur d'eau et 6 kg/m² de dioxyde de carbone.

Figure 6-1 Epaisseur optique totale de l'air pour 25 kg/m² de vapeur d'eau et 6 kg/m² de dioxyde de carbone

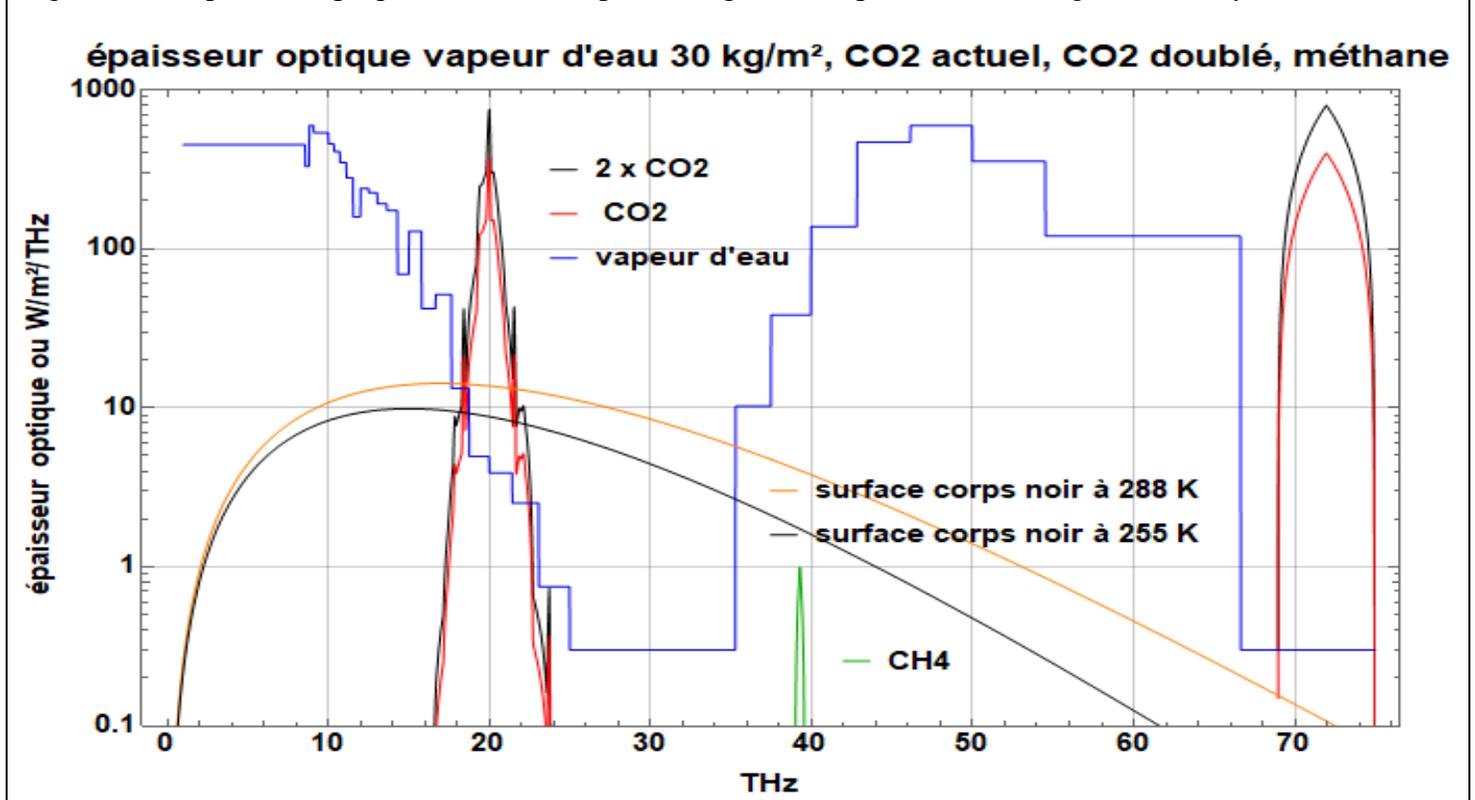
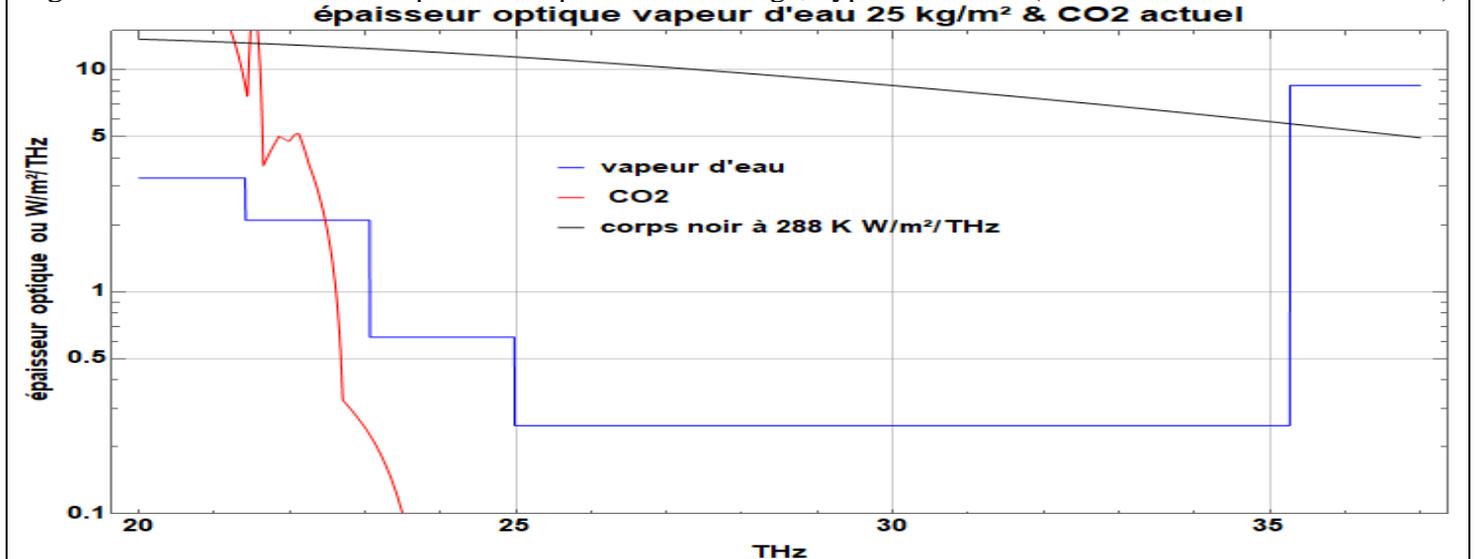


Figure 6-2 La fenêtre de la vapeur d'eau par ciel sans nuage, hypothèse basse (effet du continuum sous-estimé)



Rappelons que la quantité de vapeur d'eau varie de 4 kg/m² pour une surface très froide à 70 kg/m² dans la zone équatoriale ; les quantités de vapeur d'eau cumulées sur toute la hauteur de l'air sont pour les cinq profils-types des figures 1-3 et 1-4, en tropical 40,6 kg/m², et, pour les moyennes et les hautes latitudes, 29 kg/m² et 20,7 kg/m² en été, et 8,5 kg/m² et 4,3 kg/m² en hiver.

Mais la teneur de l'air en vapeur d'eau en kg par tonne d'air est très inhomogène et varie dans un rapport mille entre la surface et la haute troposphère.

6-2 Altitude du rayonnement vers le cosmos et origine du refroidissement de l'air par émission d'infrarouge thermique

Une couche de gaz d'épaisseur optique 1,07 absorbe 80% du rayonnement incident sur l'une ou l'autre de ses faces, ne laisse passer que 20% ; elle fournit donc à peu près 80% du rayonnement total qui sort par ses faces. Pour 30 kg/m² de vapeur d'eau aux fréquences où l'épaisseur optique est 107 ce sera une couche de 300 grammes de vapeur d'eau qui, en haut ou en bas de la troposphère, produit le gros (80%) du rayonnement vers le cosmos ou vers la surface.

Comme vu aux figures 1-3 et 1-4 la teneur en vapeur d'eau est pour les cinq cas-types, en surface, par tonne d'air, 16 kg, 11,5 kg, 7,5 kg, 2,5 kg et 1 kg.

En surface une tonne d'air occupe 100 mbar environ puisque l'on a 10,3 tonnes d'air sur 1013 millibar, et les 300 grammes tiennent dans

$(0,3 \text{ kg} / 16 \text{ kg/tonne d'air}) \times 100 \text{ mbar} / \text{tonne} = 1,9 \text{ mbar}$ en tropical

$(0,3 \text{ kg} / 1 \text{ kg/tonne d'air}) \times 100 \text{ mbar} / \text{tonne} = 30 \text{ mbar}$ en hiver des hautes latitudes.

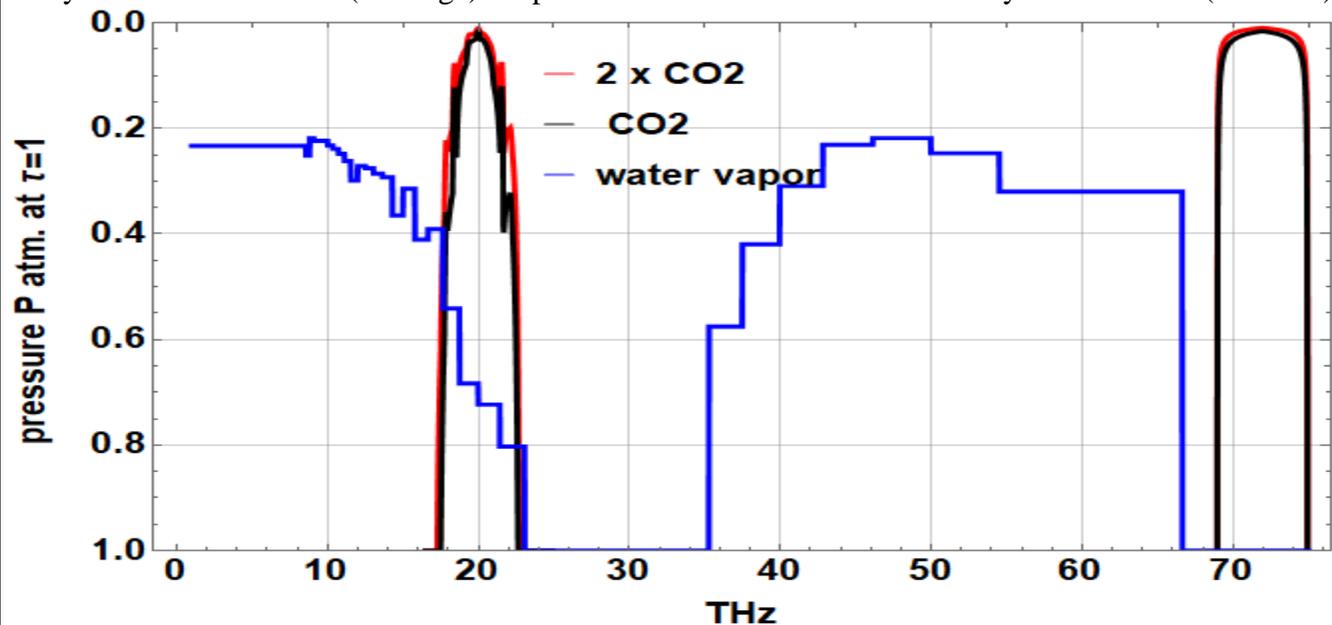
Le tableau 1-B dit, près de la surface, une altitude $z(p)$ en $z(p) = T_0 / \gamma (1 - (p/p_0)^{0,19})$ soit

$300 \text{ K} / 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m} (1 - (1 - 1,9 \cdot 10^{-3})^{0,19}) = 17 \text{ mètres}$ en tropical pour 1,9 mbar,

$270 \text{ K} / 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K/m} (1 - (1 - 30 \cdot 10^{-3})^{0,19}) = 240 \text{ m}$ pour $T_0 = 270 \text{ K}$ et 30 mbar de l'hiver des hautes latitudes.

La position de la couche d'épaisseur optique 1,07 qui en haut de l'air assure le gros du rayonnement vers le cosmos peut être évaluée grossièrement, séparément pour la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone en supposant une épaisseur optique croissant comme le cumul de la vapeur d'eau en $P^{4,2}$ (voir figures 1-3 et 1-4, exercice 1-2 du § 1-4 et figure 1-6) et comme le cumul du CO₂ en $P^{1,45}$ ce, pour rendre compte de l'élargissement des raies d'absorption quand la pression augmente.

Figure 6-3 Position du bas de la couche d'épaisseur optique 1,07 pour la vapeur d'eau (30 kg/m²), pour le dioxyde de carbone actuel (en rouge) et après doublement de la teneur en dioxyde de carbone (en bistre).



La figure 3 montre que doubler la teneur de l'air en dioxyde de carbone (la courbe marron remplace la courbe rouge) ferme très légèrement la fenêtre de la vapeur d'eau vers 26 THz et réduit donc le rayonnement qui, échappant aux nuages et à la vapeur d'eau, passe directement de la surface au cosmos ; cet effet l'ordre de 0,8 W/m² par ciel clair. Il est à réduire du rapport du rayonnement de la surface parvenant au cosmos en moyenne (effet des nuages inclus), 22 W/m² en moyenne globale, au rayonnement de la surface parvenant au cosmos par ciel clair sans nuage, disons 50 W/m² dans la fenêtre.

Ne reste donc, pour effet du doublement de la teneur de l'air en dioxyde de carbone sur l'absorption du rayonnement de la surface, que $(22 / 50) \times 0,8 \text{ W/m}^2 = 0,35 \text{ W/m}^2$ qui au lieu d'aller de la surface au cosmos, passeront par le cycle évaporation, advection (ou déplacement de l'air), condensation, rayonnement en altitude vers le cosmos. Ce supplément d'absorption par le CO₂ est donc négligeable comparé à l'évaporation moyenne de 100 W/m², le double ou le triple en zone tropicale, le tiers aux hautes latitudes (figure 7-2).

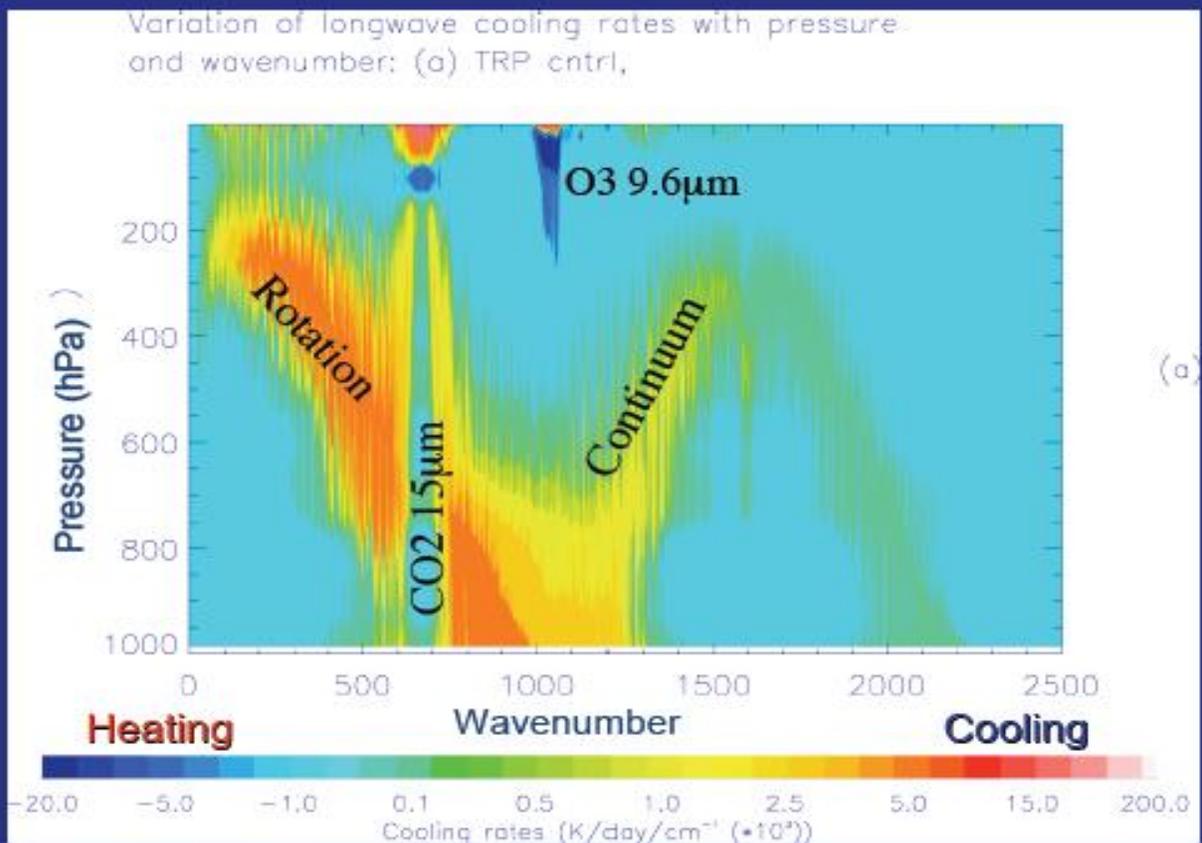
Le calcul « exact » raie d'absorption par raie d'absorption, figure 4 confirme la position des courbes bleues et rouge de la figure 3.

Figure 6-4 Calcul raie d'absorption par raie d'absorption de la position de la couche qui, en haut de l'air, assure le refroidissement du globe exprimé en millième de degré par 24 heures et par cm⁻¹ (ou bande spectrale de 30 GHz) cas tropical avec la tropopause vers 100 mbar ou 100 hectoPascal(hPa)

Source :

http://airs.jpl.nasa.gov/Science/ResearcherResources/MeetingArchives/TeamMeeting20060307/2006_03_07/Gettelman_airs_climate.pdf

H₂O dominates Longwave



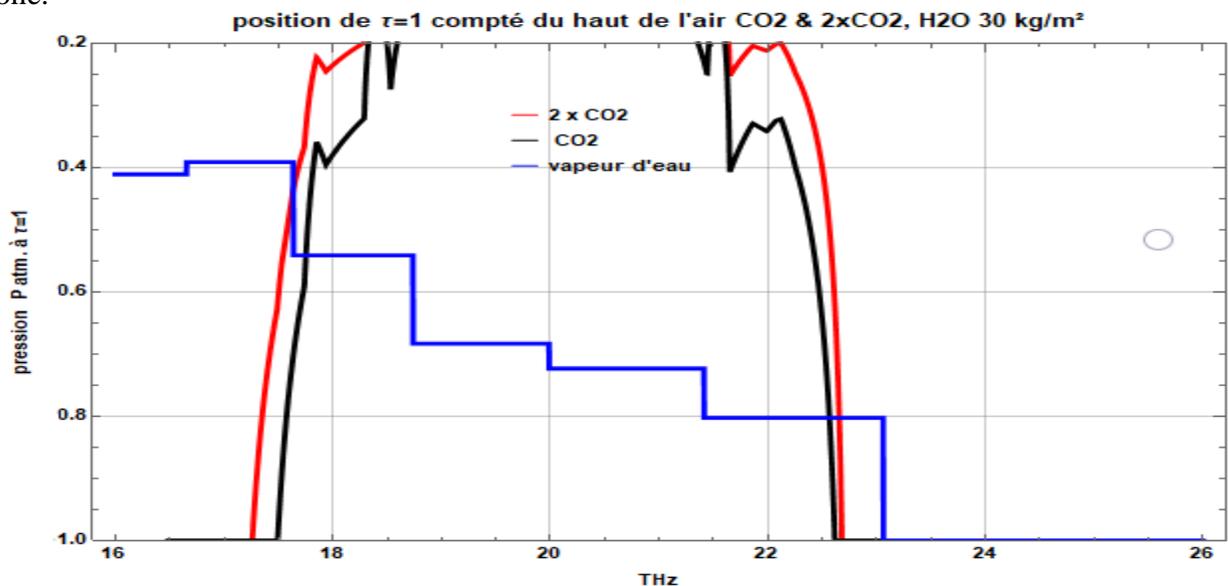
Brindley & Harries 1998 (SPARC 2000)

La sommation sur tout le spectre de l'infrarouge thermique montre un refroidissement par rayonnement vers le cosmos de l'ordre de 2 degrés par 24 heures à peu près uniforme entre la surface et 200 mbar. Bien noter que le CO₂ en réchauffant la tropopause (le point bleu à 100 mbar et entre 600 cm⁻¹ et 700 cm⁻¹) contribue au transfert de chaleur de la surface et des basses couches vers les hautes couches de la troposphère, mais bien moins que la condensation et la convection ; augmenter la valeur absolue |C_h| diminue le gradient de température $g/(C_p + |C_h|)$ et à température constante de la tropopause diminue la température de surface.

6-3 Plus haut plus froid pour le dioxyde de carbone et plus bas plus chaud pour la vapeur d'eau

La comparaison des courbes rouge et marron de la figure 3 (agrandie à la figure 6-5 ci-dessous) montre entre 400 mbar et la tropopause un effet « *plus haut plus froid* » autour de 20 THz et de 24,5 THz.

Figure 6-5 Effet, dans la troposphère, d'un doublement de la teneur de l'air en dioxyde de carbone sur la position du bas de la couche qui rayonne vers le cosmos évaluée séparément pour la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.



Cet effet « *plus haut plus froid* » amènerait une réduction de l'ordre de 1,8 W/m² du flux rayonné vers le cosmos, au bout de deux siècles, temps qu'il faudrait pour passer de 400 ppm à 800 ppm au rythme actuel de +2 ppm/an (voir figure 7-10, vignette de gauche).

Cela suppose que la vapeur d'eau reste inchangée pendant tout ce temps !

Si le bas de la couche de la vapeur d'eau d'épaisseur optique 1,07 baisse de 10 mbar, en passant par exemple de 290 mbar à 300 mbar entre 1 THz et 18 THz et entre 42 THz et 74 THz (figures 6-3 et 6-4), le flux rayonné augmente de 1,6 W/m² par effet « *plus bas plus chaud* ».

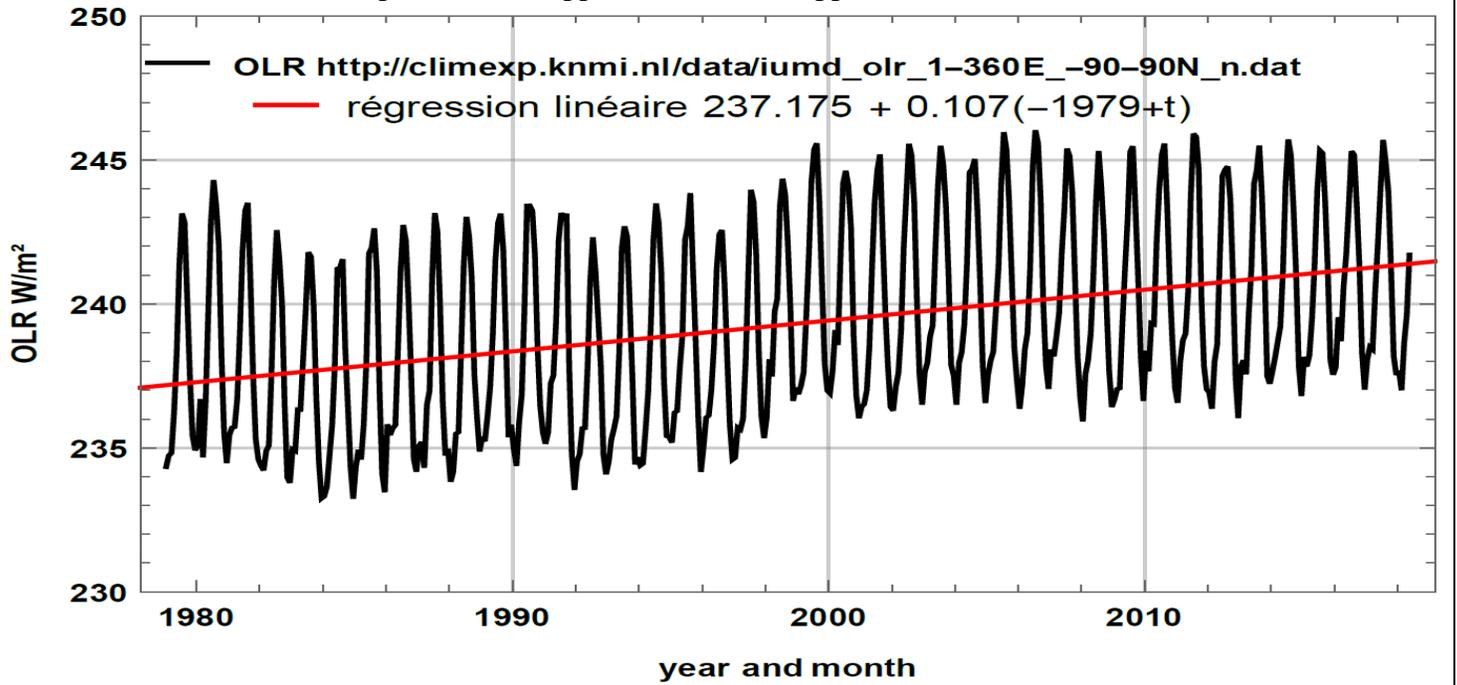
La quantité de vapeur d'eau au-dessus de 500 mbar est dynamique comme vu à la figure 1-7 (l'humidité relative est extrêmement variable et instable entre 400 mbar et 200 mbar), et régule le flux infrarouge thermique émis par le globe vers le cosmos ; la figure 3-3 montre que le contenu calorifique des océans ne change que très peu d'une année à l'autre, d'environ un millième du flux solaire absorbé par le globe, ce qui démontre l'efficacité de la régulation par la quantité de vapeur d'eau entre 100 mbar et 400 mbar, et par les nuages. Les fables du réchauffement de l'atmosphère par plus de dioxyde de carbone ignorent soigneusement l'existence de la vapeur d'eau et postulent que, lorsque le niveau d'émission du dioxyde de carbone monte, c'est la température des hautes couches de la troposphère qui doit croître pour compenser le moindre rayonnement vers le cosmos ; la température devrait, nous dit-on, pour un doublement des teneurs en CO₂ croître de 1°C à quelques °C selon les -mauvais- traitements appliqués à la vapeur d'eau dont on suppose l'humidité relative constante ce que dément la figure 6-7.

Les observations (figure 6) montrent **une augmentation** du rayonnement thermique émis par le globe d'environ $1,1 \text{ W/m}^2 / \text{décennie}$, ce malgré une augmentation sur 1979-2018 de 21% de la teneur de l'air en CO_2 .

L'effet *plus haut plus froid* du CO_2 n'est pas visible !

Ce que l'on voit est l'effet « *plus bas, plus chaud* » de la vapeur d'eau.

Figure 6-6 Variations du rayonnement global moyen vers le cosmos observé par divers satellites depuis 1979. La teneur de l'air en CO_2 est passée de 336 ppm en 1979 à 407 ppm en 2018.



La figure 6-7, vignette du bas, montre, après 1980, une décroissance de l'humidité autour de 300 mbar (9 km) qui expliquerait que le bas de la couche d'épaisseur optique 1,07 soit descendu, par exemple, de $p = 300 \text{ mbar}$ à $p = 311 \text{ mbar}$ ⁵³. Ces pressions correspondent, pour 288 K en surface, selon la relation $T \sim P^{0,19}$, à des températures de 229,1 K et de 230,7 K⁵⁴.

Comme, à ces températures, $4 \sigma T^3$ vaut $2,75 \text{ (W/m}^2) / \text{K}$, on aurait, en corps noir, une variation du flux $4 \sigma T^3 dT = 2,75 (230,7 \text{ K} - 229,1 \text{ K}) = +4,3 \text{ W/m}^2$. La figure 3 montre que la vapeur d'eau à ces pressions n'émet que sur une partie du spectre infrarouge thermique, sur 50 THz environ des 75 THz.

En dessous de 600 mbar la température de surface détermine la teneur de l'air en vapeur d'eau, mais n'a d'effet radiatif que dans la fenêtre de la vapeur d'eau (figure 6-2) : la régulation s'y fait par les nuages (bas) qui réduisent l'ensoleillement, absorbent le flux rayonné par la surface et rayonnent vers le cosmos, par leur face supérieure, à leur température propre.

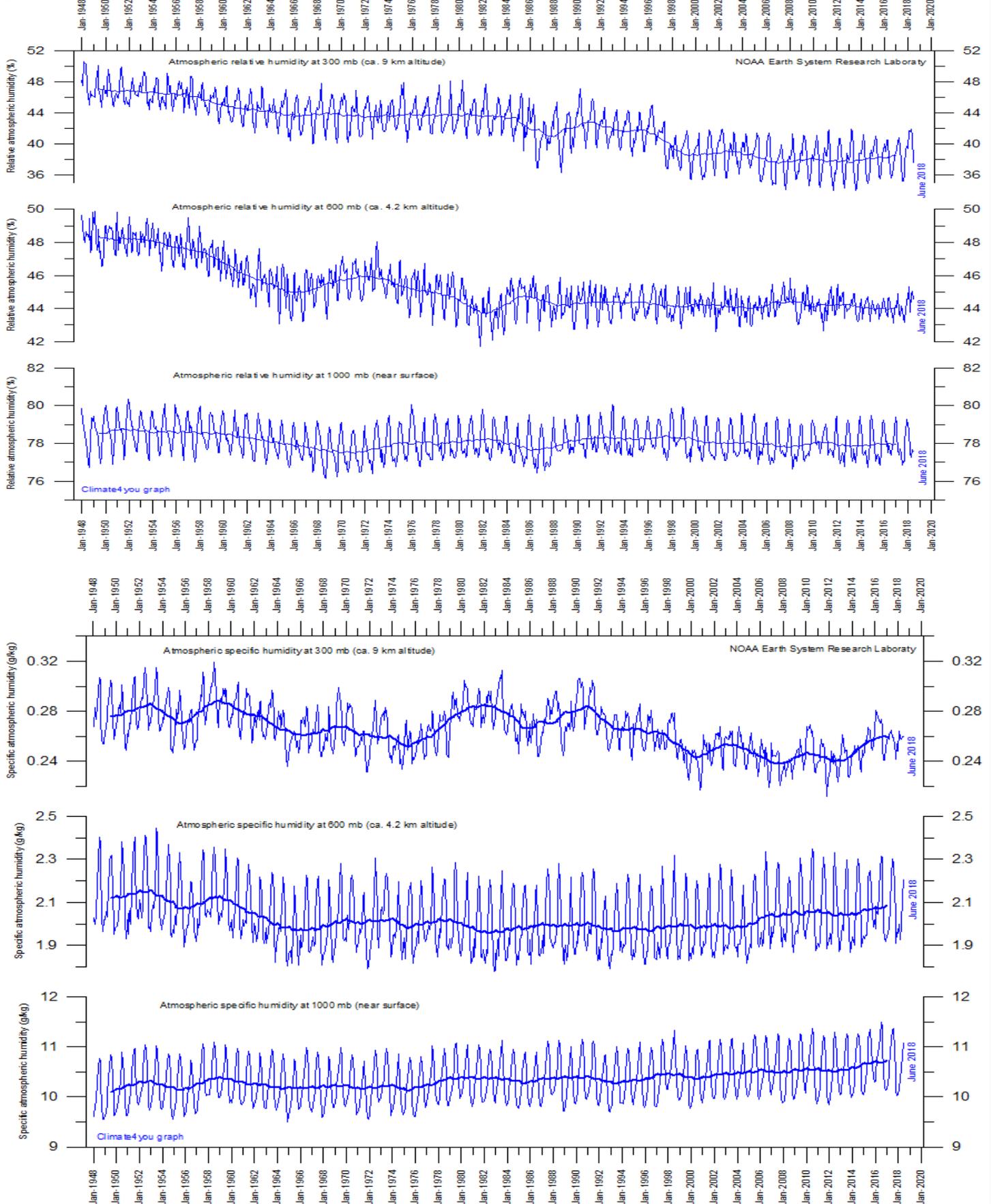
Entre 400 mbar et 200 mbar le mouvement de l'air détermine la quantité de vapeur d'eau dont les observations montrent qu'elle assure une remarquable régulation du rayonnement de l'air vers le cosmos (figures 6-3 et 6-4 et figures 6-6 et 6-7).

⁵³ Supposons que la teneur en vapeur d'eau soit, à 300 mbar, passée de 280 grammes par tonne d'air à 240 grammes par tonne d'air.

Comme les teneurs en vapeur d'eau cumulées entre le haut de l'air et p varient en $p^{4,2}$ (figures 1-3 et 1-4 et exercice du § 1-3-2), on aura, avec 240 g/tonne, la même quantité cumulée de vapeur d'eau à 311 mbar = 300 mbar $(280 / 240)^{(1/4,2)}$ que précédemment à 300 mbar et 280 g/tonne.

⁵⁴ Une surface corps noir à ces températures émettrait $156,2 \text{ W/m}^2$ et $160,6 \text{ W/m}^2$ sur tout le spectre soit $+4,4 \text{ W/m}^2$; mais la vapeur d'eau à ces pressions vers 300 mbar ne rayonne que sur une partie du spectre (figures 3 et 4).

Figure 6-7 Variations de l'humidité relative (RH en % de la teneur à saturation) et de l'humidité spécifique (en kg/tonne d'air ou kg de vapeur d'eau par 100 mbar) de 1948 à 2018 source : <http://climate4you.com/greenhouse.gases>. Courbes pour 300 mbar (9 km), 600 mbar (4,2 km) et 1000 mbar.



6-4 Observations commentées

Les considérations qui précèdent sont à confronter aux réalités de la géographie.

La figure 8 montre la répartition du rayonnement émis par le globe vers le cosmos, en moyenne sur une semaine ; il va, sauf cas particuliers, de 160 W/m² au-dessus de régions très froides à 300 W/m² au-dessus de quelques déserts. A comparer aux émissions de la surface de la Lune entre 2 W/m² (face obscure) et 1270 W/m² (sous le soleil au zénith, en supposant un albédo lunaire de 7%).

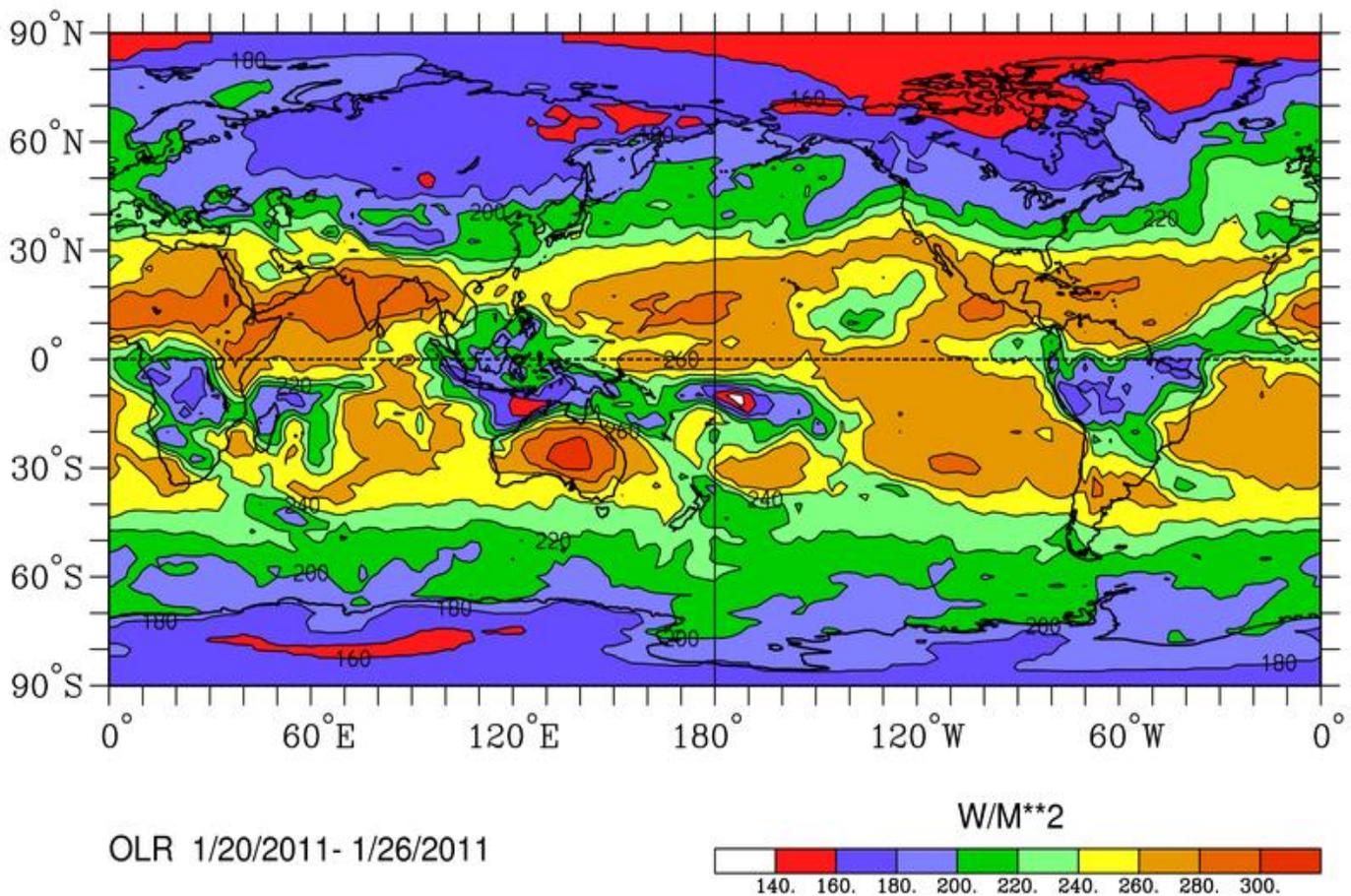
L'équateur météorologique vertical ou « cheminée équatoriale » est à la figure 8, fin janvier, vers 10°S à 15°S et se voit par sa couverture de nuages très hauts (le sommet des « tours convectives ») et très froids ; la mousson arrose alors le sud de l'Afrique, Madagascar, le nord de l'Australie et le Brésil.

En Europe occidentale, vers 40°N à 50°N, l'insolation en janvier en haut de l'atmosphère n'est que de 100 W/m² (en moyenne sur 24 heures : figure 3-2, courbe bleue « Janvier ») et deux fois moindre en surface, alors que le flux rayonné vers le cosmos est de 220 W/m² à 240 W/m² apportés surtout par le mouvement de l'air humide.

Les centres de hautes pressions anticycloniques subtropicales entre 280 W/m² et 300 W/m² rayonnent à la température du haut de la vapeur d'eau que la circulation de l'air⁵⁵ confine là en-dessous de 2 km, avec, au-dessus, des couches très sèches et subsidentes.

Figure 6-8 Exemple de rayonnement du globe vers le cosmos, observations de fin janvier 2011

Source <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.hov.shtml>



⁵⁵ Dont le cisaillement d'alizés : l'alizé supérieur vient d'une haute pression anticyclonique plus à l'est, l'alizé inférieur vient de l'anticyclone le plus proche : cette différence d'orientation empêche le développement de structures convectives et l'humidité reste sous le « stratus marin » qui marque l'ouest des continents vers 20° de latitude ; l'air au-dessus est très sec et le rayonnement vient de « bas et chaud »

Voir figure 4 de Juno Hsu, 2017 *A Radiative Transfer Module for Calculating Photolysis Rates and Solar Heating in Climate Models: Solar-J 7.5 l* et Marcel Leroux *La dynamique du temps et du climat* Dunod, 2004, 367 pages.

La figure 6-9 montre que la surface ne contribue que fort peu au rayonnement infrarouge thermique du globe, pour 22 W/m^2 en moyenne sur les 240 W/m^2 de la figure 6-6 dont au moins 220 W/m^2 viennent de la troposphère ou de la surface et le reste, 5 à 15 W/m^2 , de la stratosphère selon l'altitude de la tropopause. **La vapeur d'eau et les nuages font donc la quasi-totalité ($200/220 = 91\%$) du rayonnement du globe hors stratosphère.**

Figure 6-9 Flux infrarouge thermique rayonné par la surface qui parvient au cosmos après avoir échappé à l'absorption par la vapeur d'eau et les nuages.

S.Costa and K. Shine *Outgoing longwave radiation due to directly transmitted surface emission* Journal of Atmospheric Sciences, vol. 69, 2012 pp. 1865-1870

<http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/11.28.19.31.24/doc/Outgoing%20Longwave%20Radiation%20due%20to%20Directly%20Transmitted%20Surface%20Emission-1.pdf>

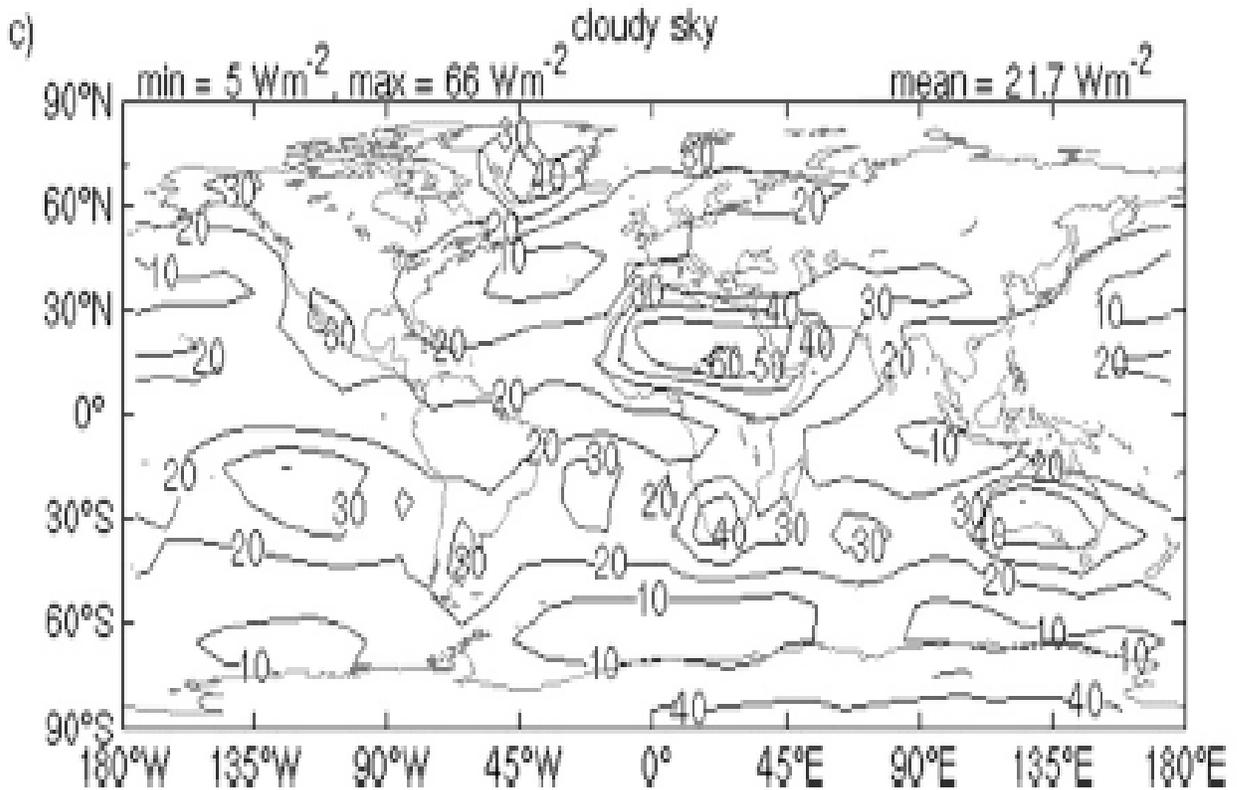


FIG. 2. Geographical distribution of the annual-mean surface transmitted irradiance (W m^{-2}) for (a) clear skies without the continuum, (b) clear skies with the continuum, and (c) cloudy skies. Above each panel, the minimum, maximum, and global-mean values are shown.

6-5 Rôle de la stratosphère

Comme la stratosphère rayonne toujours autant, couche par couche, que ce qu'elle reçoit du soleil, elle peut être exclue des bilans de la troposphère et de la surface.

Elle contribue, comme la troposphère au chauffage radiatif de la tropopause par le CO_2 et l'ozone comme vu à la figure 6-4 (pastilles en bleu foncé autour de 100 mbar, tropopause tropicale).

Cet apport est évacué par la vapeur d'eau de la tropopause. (Voir figure 4).

7 - Océans et flux et stocks de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone

7-1 Introduction :

La vapeur d'eau est le premier « gaz trace » avec des cumuls assez variables sur toute la hauteur de l'air, de 5 kg/m² en zone subarctique en hiver à 75 kg/m² dans des zones de forte convection, entre les tropiques.

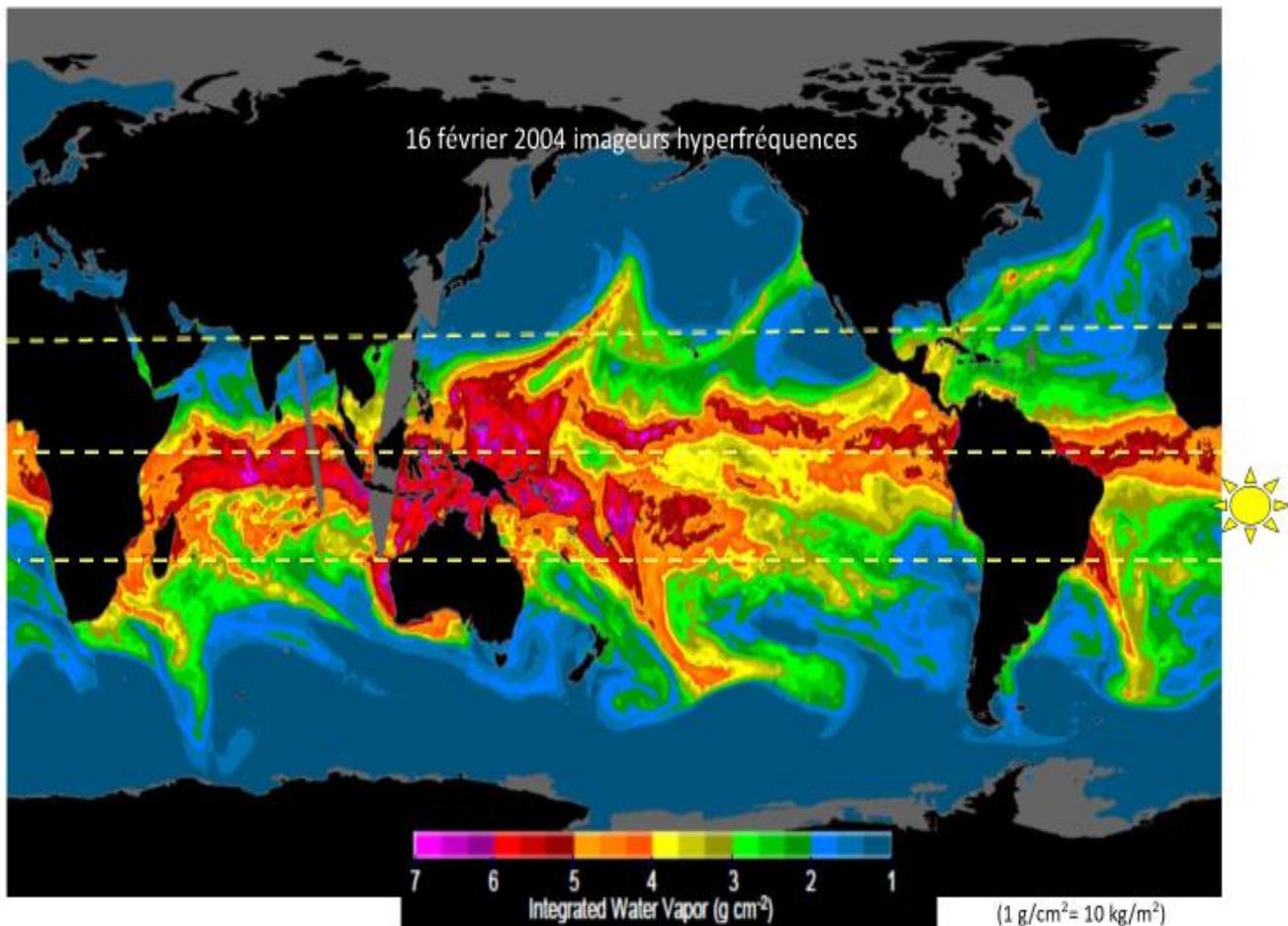
Le dioxyde de carbone est, après la vapeur d'eau, le second « gaz trace » avec une masse de 6,3 kg/m² ; sa teneur exprimée en parties par million en volume, ppmv, est, actuellement, d'environ 406 ppmv, soit 406 molécules par million de molécules d'air.

Le dioxyde de carbone est, à la différence de la vapeur d'eau qui condense, en proportion vaguement constante sur toute la hauteur de l'atmosphère. Comme vu au chapitre 6 il n'absorbe et rayonne en infrarouge thermique qu'entre 17 THz et 24 THz ; il assure les deux tiers du refroidissement de la stratosphère par rayonnement infrarouge thermique entre 18,3 THz et 21,5 THz, le dernier tiers étant le rayonnement thermique de l'ozone. Le rayonnement du CO₂ parvenant au cosmos depuis la troposphère est de quelques W/m².

Figure 7-1 Teneurs de l'air en vapeur d'eau un 16 février : en tiretés les tropiques du Cancer (nord) et du Capricorne

Noter les moussons « malgache », « australienne » qui arrosent la zone tropicale de l'hémisphère alors en été.

Pour des indications en temps réel voir http://images.remss.com/cdr/climate_data_record_browse.html
www.ventuski.com et <https://earth.nullschool.net> 1g/cm² correspond à 10 kg/m²



7-2 Stocks et flux d'eau et de carbone

Les océans sont -depuis toujours- la principale source et réserve de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. L'écoulement des rivières et fleuves fait – en « moyenne » - un tiers des précipitations sur les continents, le reste partant par évapotranspiration et évaporation, avec stockage intermédiaire dans des nappes phréatiques de

diverses profondeurs. La vapeur d'eau de l'air est renouvelée en gros 38 fois par an, tandis qu'un cinquième du dioxyde de carbone de l'air est renouvelé chaque année.

Tableau 7-A Stocks et flux , en milliards de tonnes de carbone ou d'eau en Gt-C ou Gt-H ₂ O 1 Gt = 1 Tkg (Tera kg de 10 ¹² kg); nota les flux dégazés par les océans et finalement emmagasinés par la végétation et les sols sont très différents selon que l'on admet une forte croissance de la productivité primaire nette de la végétation au cours depuis l'an 1900 (+1/3 selon des multiples observations) ou une croissance négligeable (GIEC) ; ci-dessous chiffres hors respiration sur 24 heures de la végétation pendant la saison de croissance, invisible du Mauna Loa Observatory situé au milieu du Pacifique La légende de la figure 6.1 de [IPCC, 2013] dit : " <i>Individual gross fluxes and their changes since the beginning of the Industrial Era have typical uncertainties of more than 20%</i> ".			
	Océans	Sols & végétation	Atmosphère
Eau et vapeur d'eau stock	1,335 10 ⁹		12900
Flux /an évaporation	- 430 000	- 60 0000	
Flux / an précipitations	380 000	110 000	
Carbone stock	39 000	2 500	880
Flux /an dégazage	- 78 (GIEC) ou - 90	-86 (GIEC) ou -80	reçu =164 ou 170 + emiss. anthrop..
Flux / an absorption	80	90 (GIEC) ou 95	perdu = - 170 ou -176

Le cumul des émissions « anthropiques (fuels et ciment) depuis 1751 est **430 Gt-C, soit un pour cent** du carbone circulant dans les trois compartiments océans, sols & végétation, air dont le stock fait

$$39\,000 + 2\,500 + 850 = 42\,350 \text{ Gt-C.}$$

7-3 Cycle de l'eau : évaporation et évapotranspiration

1 mm d'eau précipitable = 1 kg/m².

Les océans et les forêts équatoriales couvrent plus des 3/4 de la surface du globe et les basses couches de l'atmosphère y sont presque saturées en humidité ; l'évaporation au-dessus des mers,

$$\rho_{\text{air}} C_E V_{10} (q_{\text{sat}} - q)$$

dépend de la petite différence (10% en valeur relative ?) entre les humidités spécifiques en kg de vapeur d'eau par kg d'air q_{sat} à saturation et q locale de l'air qui souffle sur la surface, et de la vitesse V_{10} du vent à 10 mètres, avec $C_E = 1,5 \cdot 10^{-3}$, nombre de Dalton.⁵⁶

Une autre formule dit pour une vitesse du vent V , une température $t(^{\circ}\text{C})$ et une humidité relative RH , avec a dépendant des unités, une évaporation :

$$a (1 + 0,6 V) (p_{\text{H}_2\text{O}_{\text{sat}}} - p_{\text{H}_2\text{O}_{\text{ambient}}}) = 0,3 (1 + 0,6 V) \exp[17,27 t / (237,3 + t)] (1 - RH) \text{ en mm/jour ;}$$

pour $V=0$ m/s, $t= 32^{\circ}\text{C}$, $RH = 80\% = 0,8$, il vient 0,5 mm/jour et sept fois plus à $V=10$ m/s.

L'évaporation est concentrée sur les heures de forte insolation, puisqu'elle emporte 2,4 ou 2,3 MJ/kg (selon la température et la salinité).

La chaleur latente d'évaporation est ⁵⁷ en moyenne mensuelle (jour et nuit) de l'ordre de 200 W/m² sur les océans entre 40°S et 40°N (figure 2). Sur terre ferme ce sont les racines de plantes qui vont chercher l'eau dans le sol, où l'eau représente de 10% à 25% en poids du sol et l'évaporent pendant les heures d'activité de la

⁵⁶ Application numérique pour 0°C et 30°C : $\rho_{\text{air}} = 101325 / (287 \{273 \text{ K}, 303 \text{ K}\}) = \{1,29; 1,16\} \text{ kg/m}^3$; $V_{10\text{m}} = 10 \text{ m/s}$; avec $q_{\text{sat}} - q = 10\%$ de q_{sat} ; $w_{\text{sat}} = 0,622 E_{\text{sat}} / 101325$; $q_{\text{sat}} = w_{\text{sat}} / (1 + w_{\text{sat}})$; $E_{\text{sat}}(\{273 \text{ K}, 303 \text{ K}\}) = \{611, 4231\} \text{ Pa}$; évaporation = $\{7,2; 44,2\} \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ soit **0,6 mm et 3,8 mm en 24 heures à 0°C et à 30°C**.

Variante pour des lacs : évaporation journalière = $0,13 (E_{\text{sat}}(\text{mbar}) - e_{2\text{m}}(\text{mbar})) V_{2\text{m}} (\text{m/s})$ où E est la pression de vapeur saturante, $e_{2\text{m}}$ la pression de vapeur effective à 2 mètres, $V_{2\text{m}}$ le vent à 2 mètres

Pour d'autres expressions encore, voir G. Réménieras *l'hydrologie de l'ingénieur* Eyrolles 1965, 456 pages.

⁵⁷ La chaleur latente en fonction de la température $t(^{\circ}\text{C})$ et de la salinité s vaut en J/kg

$$(2,501 \cdot 10^6 - 2,369 \cdot 10^3 t + 2,678 \cdot 10^{-1} t^2 - 8,103 \cdot 10^{-3} t^3 - 2,079 \cdot 10^{-5} t^4) (1 - s/1000)$$

La salinité moyenne des océans est 37 ou 38 grammes/litre, soit $s = 37$ ou 38.

voir aussi <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/69157>

l'effet de la salinité est aussi écrit comme : $1,025 - 0,0246 \exp(-0,00879 s)$

https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2013/msc/wrem/abdelrady.pdf

photosynthèse, à travers ces mêmes ouvertures des feuilles, les stomates, qui permettent l'absorption du CO_2 . L'évapotranspiration, est, hors saison de "sommeil hivernal" de la végétation, du même ordre de grandeur que l'évaporation d'une surface d'eau. Mais si la nappe phréatique est proche (par exemple à 50 cm) de la surface, des sols en gazon évaporeront de mai à septembre 50% de plus qu'une même surface d'eau.

Figure 7-2 Exemple de flux de chaleur latente (évaporation) pour un mois de juillet en W/m^2 , exprimés en "chauffage" (négatif) de la surface : 200 W/m^2 équivaut à l'évaporation de 6,9 mm d'eau par jour de 86400 secondes, mais concentré sur les seules heures d'ensoleillement
source http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/atlas/eng/indexe_surface12.htm

Surface latent heat flux

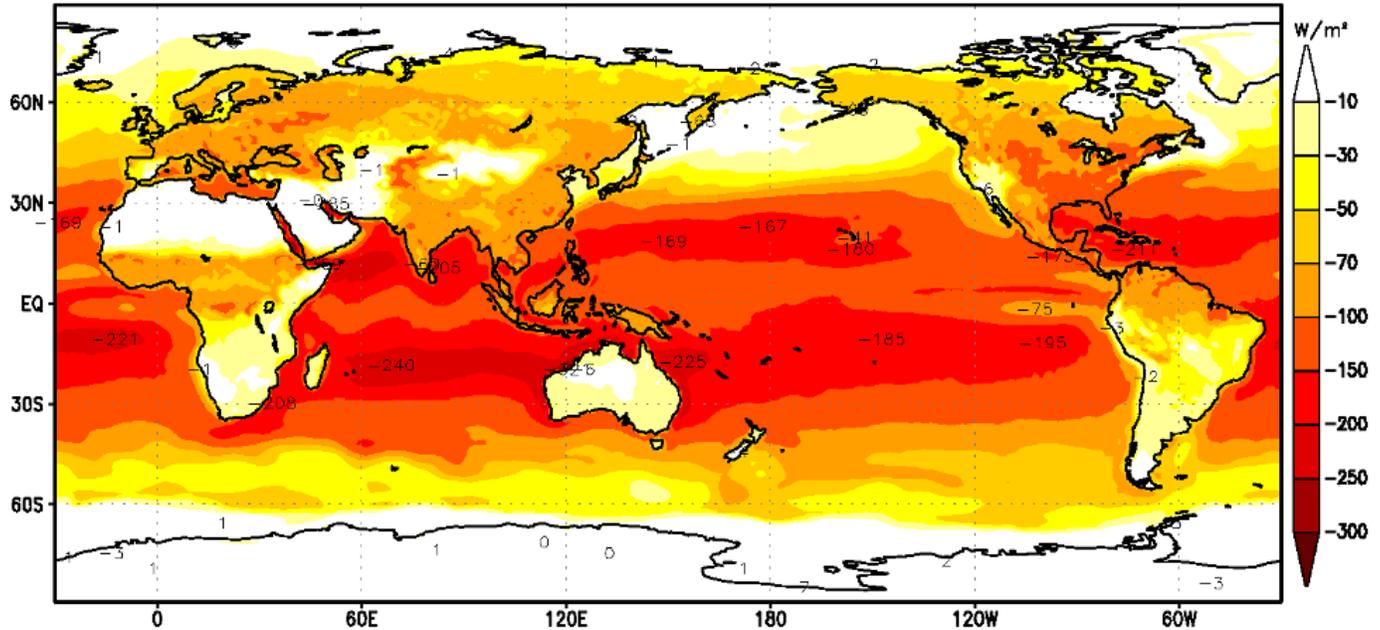
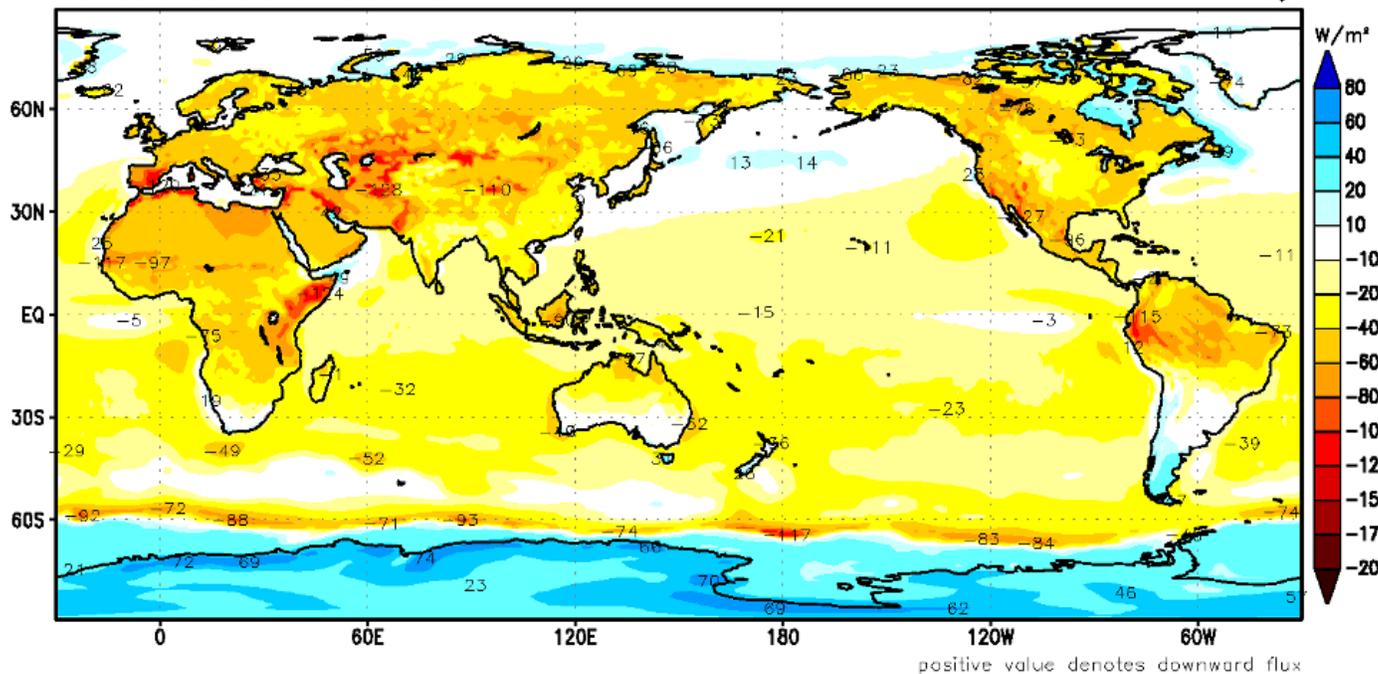


Figure 7-3 Flux de chaleur sensible (convection) pour un mois de juillet en W/m^2 , exprimé en "chauffage" (négatif) de la surface ; source : http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/atlas/eng/indexe_surface12.htm

Surface sensible heat flux



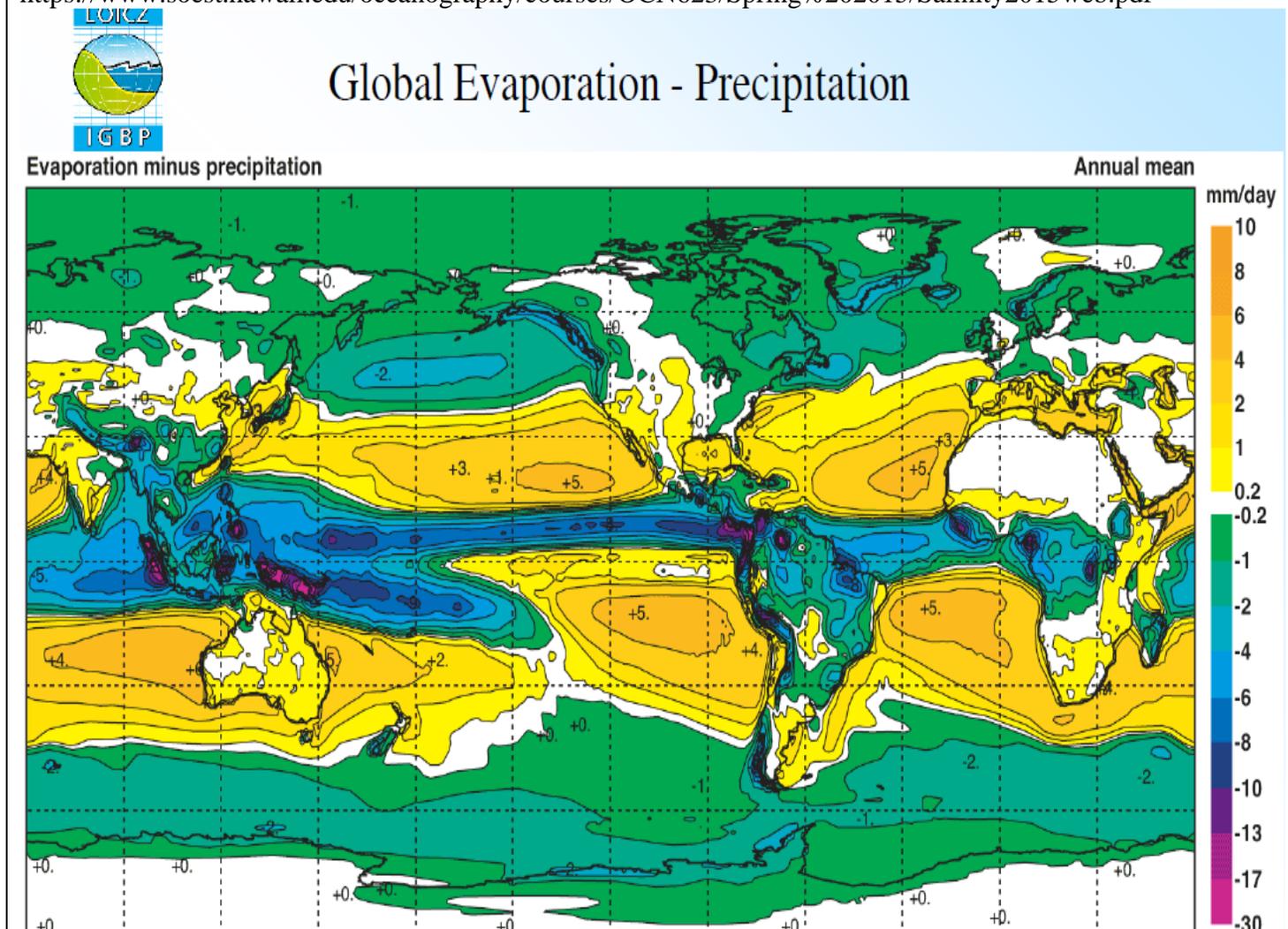
La figure 7-3 montre que les flux de chaleur sensible (ou convection) atteignent 100 W/m^2 (moyenne sur 24 heures) sur quelques déserts secs en surface : Tibet, Perse, Somalie, et sur le pourtour méditerranéen en juillet (figure 3), mais ne dépassent guère 30 W/m^2 sur les océans sauf latitudes australes très venteuses comme les "quarantièmes rugissants" et les "cinquantièmes hurlants".

Evidemment le gros du flux est concentré sur les heures de forte insolation. Noter en quelques endroits des flux convectifs positifs, en bleu, de l'air vers la surface au-dessus de l'Antarctique en hiver et en quelques zones de l'Arctique où l'air advecté de latitudes plus basses est plus chaud que la surface.

La figure 7-4 montre bien comment les zones anticycloniques fournissent de la vapeur d'eau à la cheminée équatoriale et aux moyennes latitudes

Figure 7-4 Bilan évaporation moins précipitation : noter les anticyclones dits des Açores, de Hawaï, de l'île de Pâques de Sainte Héléne et à l'ouest de l'Australie ; les alizés sortent de ces hautes pressions et convergent vers la « cheminée équatoriale » en bleu.

<https://www.soest.hawaii.edu/oceanography/courses/OCN623/Spring%202015/Salinity2015web.pdf>



7-4 Dioxyde de carbone : pression partielle du CO_2 dans l'eau de mer et dans l'air

1 mole de carbone = 12 grammes ; DIC désigne le carbone inorganique dissous qui est à 90% sous forme d'ion bicarbonate HCO_3^- , à 9% en ion carbonate CO_3^{2-} et 1% en acide carbonique ou CO_2 ; les rééquilibrages entre ces différentes formes se font en quelques minutes quand changent les paramètres température, DIC ou Talk : $\text{DIC} = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$, TALK est l'alcalinité totale (Total Alkalinity), différence des charges totales des ions majeurs des sels dissous (chlorures de sodium, de potassium, etc.) hors carbonates et borates, $\text{TALK} = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + \text{bt[S]} - \text{kb}/(\text{kb} + [\text{H}^+])$.

La quantité de carbone inorganique dissous par kg d'eau dans les océans va de 2000 micromoles/kg, en surface, où elle est déprimée par la consommation de carbone (CO_2 ou HCO_3^-) par le phytoplancton, les coraux etc., à 2500 micromoles par kg (vers 700 à 1000 mètres et en dessous), ce qui fait de 25 à 30 milligrammes de carbone par kg d'eau.

La figure 7-5 montre les plages de température correspondant à l'absorption (pression partielle de CO_2 dans l'eau de mer moindre que la pression partielle dans l'air de par exemple $400 \mu\text{atm}$) et les plages de température imposant un dégazage, par exemple à plus de $400 \mu\text{atm}$ avec

$$p\text{CO}_2 \text{ eau de mer} = 400 (T/296.42)^{12.5} (\text{DIC}/2000)^{10} (2300/\text{TAlk})^{10},$$

pour une salinité $S=35$ psu, avec DIC et TAlk en $\mu\text{mol}/\text{kg}$

Le point essentiel est la dépendance en $T^{12.5}$ par rapport à la température absolue T de l'eau de mer

Figure 7-5 Calcul selon [Copin-Montégut, 1996] de la pression partielle du CO_2 dans l'eau de mer pour diverses valeurs de DIC, TAlk et $T(\text{K})$ et, en tiretés une approximation par

$$400 (T/296.42)^{12.5} (\text{DIC}/2000)^{10} (2300/\text{TAlk})^{10}, \text{ pour } S=35, \text{ avec DIC et TAlk en } \mu\text{mol}/\text{kg}$$

PCO2 surface water μatm function of $T(\text{K})$ $S=35$

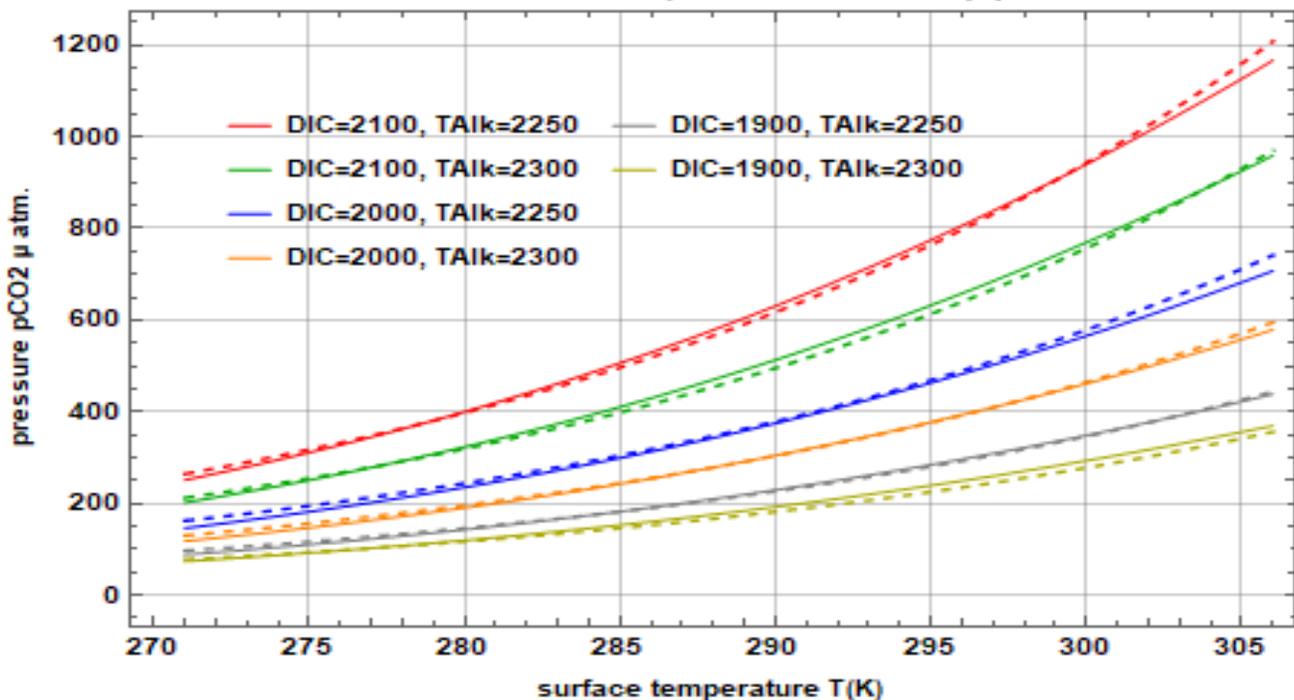


Figure du livre de Zeebe & Wolf-Gladrow (2003) montrant bien -pour des valeurs très faibles du DIC- l'effet des températures sur la pression partielle du CO_2 : un facteur 4 entre 0°C et 30°C , entre $80 \mu\text{atm}$ et $320 \mu\text{atm}$

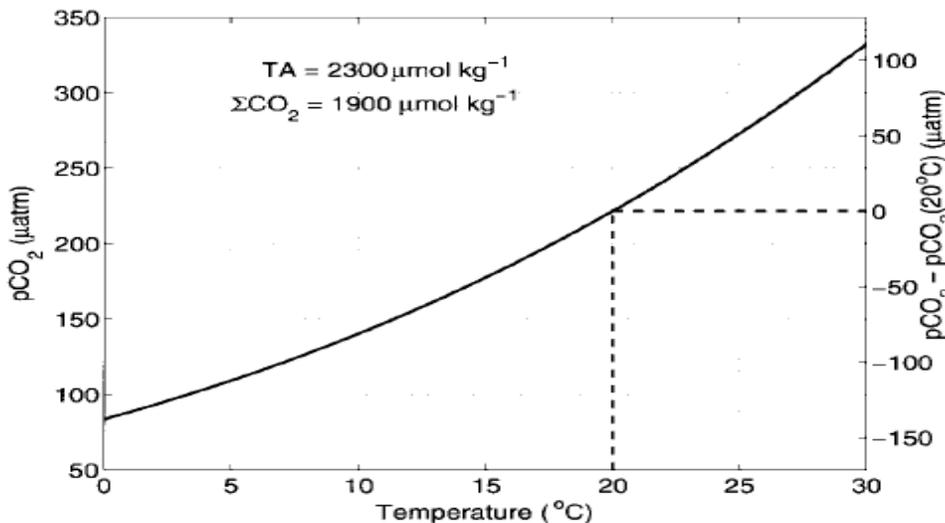


Figure 1.4.18: Seawater $p\text{CO}_2$ as a function of temperature (T). If measurements are made at 20°C (so-called discrete systems), large corrections may have to be applied to calculate $p\text{CO}_2$ at *in situ* T (cf. Goyet et al., 1993). The problem is less severe in so-called continuous systems where equilibration and *in situ* T are similar.

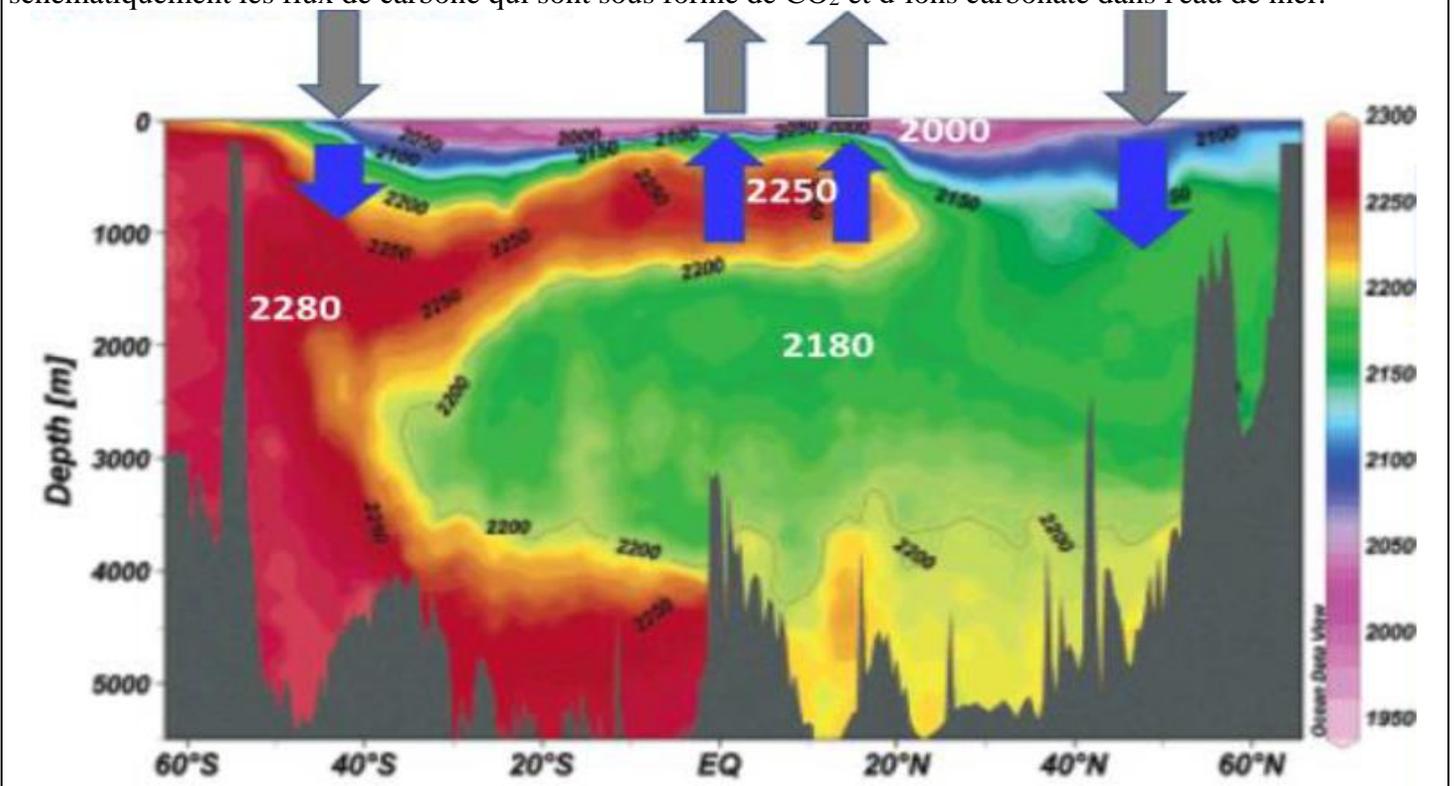
Le dégazage du CO₂ est proportionnel à la différence des pressions partielles dans l'eau et dans l'air et à la moyenne du carré de la vitesse du vent. **Il n'y a pas d'équilibre statique des pressions partielles de CO₂ entre l'air, mais un flux de CO₂ dégazé par l'océan intertropical** (80 milliards de tonnes de carbone par an) et absorbé par l'océan aux moyennes et hautes latitudes. **Ce transfert de carbone de l'océan vers l'air et vers la végétation (et les sols) explique la croissance du tiers de la productivité nette de la végétation observée depuis l'an 1900, la végétation étant fertilisée par plus de CO₂ dans l'air, en conséquence de températures légèrement plus fortes qui favorisent le dégazage net de l'océan.**

Les remontées de carbone de l'océan profond vers l'océan de surface en zone intertropicale sont de l'ordre de 270 Gt-C/an dont presque un tiers passe dans l'air ; aux hautes latitudes la pression partielle est bien plus faible (d'un facteur 3,5 à 4) et c'est l'air qui cède du CO₂ à l'océan de surface qui envoie ce carbone dans l'océan profond (265 Gt-C/an).

Marina Levy et al. 2013⁵⁸ explique :

"Aux latitudes tempérées la subduction de carbone inorganique dissous (DIC) et dans une moindre mesure (< 10%) la descente de particules [de matière organique] assure une sous-saturation en CO₂ alors que le carbone inorganique dissous remonte vers la surface dans la zone intertropicale (75%) et dans l'océan austral (25%). A l'échelle du globe on aurait une remontée de 275,5 Gt-C/an et une subduction de 264,5 Gt-C/an, soit trois à cinq fois les estimations précédemment avancées."

Figure 7-6 Teneurs observées en carbone inorganique dissous en $\mu\text{mol/kg}$ dans l'océan Atlantique (figure 20 de [Millero, 2007] ; en 2005, MLO était vers 380 ppm. Les flèches grises et bleues représentent schématiquement les flux de carbone qui sont sous forme de CO₂ et d'ions carbonate dans l'eau de mer.



⁵⁸ Levy, M., L. Bopp, P. Karleskind, L. Resplandy, C. Ethe, and F. Pinsard (2013), *Physical pathways for carbon transfers between the surface mixed layer and the ocean interior*, Global Biogeochem. Cycles, 27, 1001–1012,

doi:[10.1002/gbc.20092](https://doi.org/10.1002/gbc.20092). <http://hockeyschtick.blogspot.fr/2013/09/new-paper-finds-oceans-are-net-source.html>

Texte original : "... climatological physical fluxes of dissolved inorganic carbon (DIC) are two orders of magnitude larger than the other carbon fluxes ... At temperate latitudes, the subduction of DIC and to a much lesser extent (<10%) the sinking of particles maintain CO₂ undersaturation, whereas DIC is obducted back to the surface in the tropical band (75%) and Southern Ocean (25%). At the global scale, these two large counter-balancing fluxes of DIC amount to +275.5 Gt-C/yr for the supply by obduction and -264.5 Gt-C/yr for the removal by subduction which is 3 to 5 times larger than previous estimates. "

Des cartes des pressions partielles dans l'air et dans l'eau de mer se voient, pour des données un peu anciennes figure 3-1 page 54 de <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/06/oa-guide-to-best-practices.pdf> document publié par l'Union Européenne⁵⁹

7-5 Dioxyde de carbone : Flux annuels et stocks (figure 7)

Comme le montre la figure 6-1 de IPCC AR5 WG1 le flux absorbé par l'océan a, depuis le « préindustriel » crû comme la pression partielle dans l'air. Pour la végétation, la croissance de l'absorption et de la productivité de la végétation aurait, selon de multiples observations⁶⁰, été de +31% entre 1900 et 1999⁶¹.

Et sur 1960-2010 la dynamique annuelle du CO₂ a crû de 20% à 50% et plus selon la latitude.⁶²

(90 +80) est le cinquième de 850 : un cinquième du dioxyde de carbone de l'air est absorbé chaque année, maintenant comme au début du XX^{ème} siècle ; le stock dans l'air noté y(t) varie comme la différence entre les entrées notées f(t) et les sorties qui sont y(t)/5

$$dy(t)/dt = f(t) - y(t)/5.$$

Cette équation linéaire peut se décomposer en deux équations où y_{naturel}(t) et y_{anthropique}(t) sont les solutions de

$$d y_{\text{naturel}}(t)/dt = \text{dégazage naturel} - y_{\text{naturel}}(t)/5.$$

$$d y_{\text{anthropique}}(t)/dt = \text{émissions anthropiques}(t) - y_{\text{anthropique}}(t)/5.$$

Les émissions anthropiques étant connues avec précision par les statistiques économiques, y_{anthropique}(t) se calcule exactement⁶³ et est de l'ordre de 23 ppm ou 48 Gt-C soit 6% du CO₂ de l'air.

Pour des émissions constantes, y_{anthropique}(t) serait constant et cinq fois les émissions annuelles.

Le reste vient des dégazages naturels : y_{naturel}(t) = 406 ppm – 23 ppm = 383 ppm soit 94 % du CO₂ de l'air.

⁵⁹ James P. Barry, Toby Tyrrell, Lina Hansson, Gian-Kasper Plattner, Jean-Pierre Gattuso *Atmospheric CO₂ targets for ocean acidification perturbation experiments*, pp. 53-66 in *Guide to best practices for ocean acidification research and data reporting*. Edited by U. Riebesell, V. J. Fabry, L. Hansson and J.-P. Gattuso. 2010, Luxembourg: Publications Office of the European Union

⁶⁰ E. Campbell, J. A. Berry, ... *Large historical growth in global terrestrial gross primary production (+31% over 1900-1999)* <http://www.nature.com/nature/journal/v544/n7648/full/nature22030.htm>

Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer, Th., *Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870*, (2014) Nat. Commun. 5:4967, 552 DOI:10.1038/ncomms5967

⁶¹ Ce qui est un très grand bienfait ! Cette croissance fait le quart de la nourriture que nous consommons aujourd'hui !

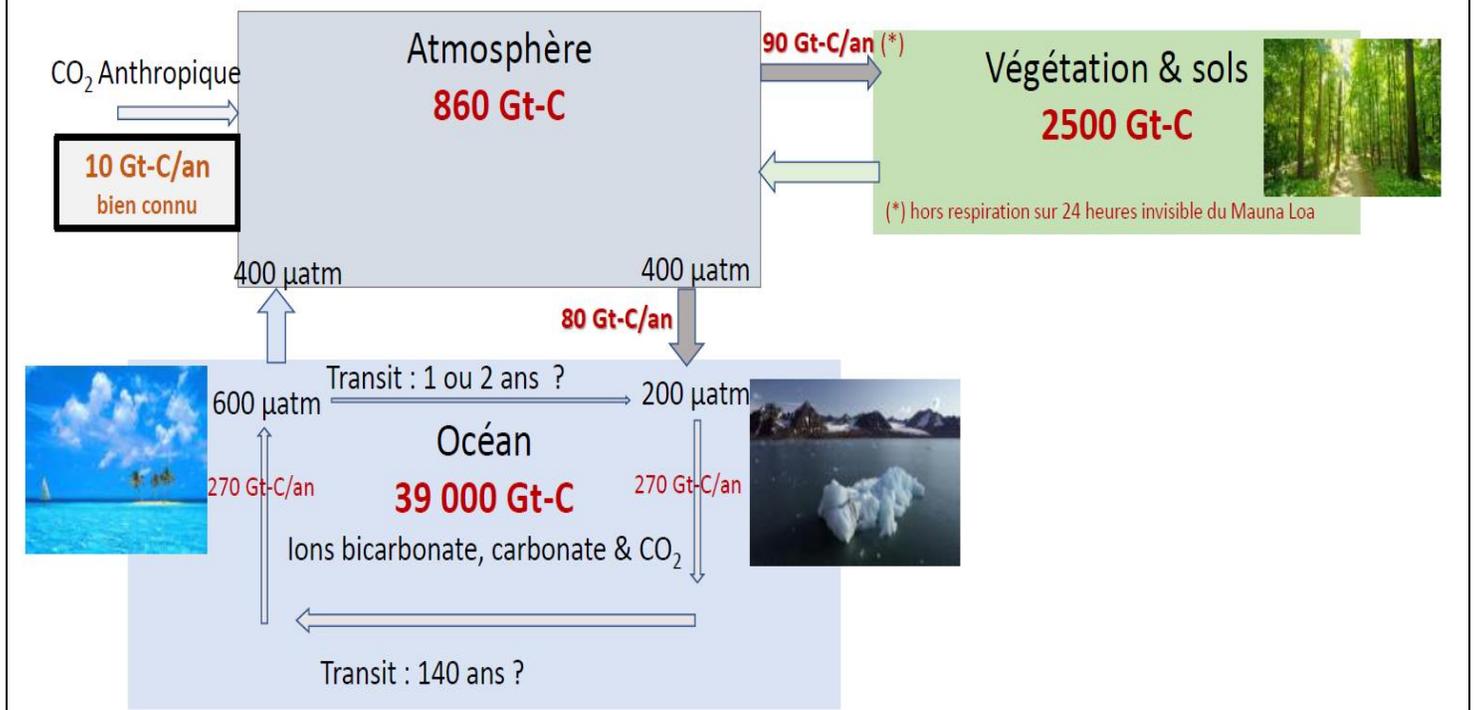
⁶² Graven, Heather & F Keeling, et al. (2013). *Enhanced Seasonal Exchange of CO₂ by Northern Ecosystems Since 1960*. Science (New York, N.Y.). 341. 10.1126/science.1239207.

https://www.researchgate.net/publication/255716054_Enhanced_Seasonal_Exchange_of_CO2_by_Northern_Ecosystems_Since_1960

Seasonal variations of atmospheric carbon dioxide (CO₂) in the Northern Hemisphere have increased since the 1950s, but sparse observations have prevented a clear assessment of the patterns of long-term change and the underlying mechanisms. We compare recent aircraft-based observations of CO₂ above the North Pacific and Arctic Oceans to earlier data from 1958 to 1961 and find that the seasonal amplitude at altitudes of 3 to 6 km increased by 50% for 45° to 90°N but by less than 25% for 10° to 45°N. An increase of 30 to 60% in the seasonal exchange of CO₂ by northern extratropical land ecosystems, focused on boreal forests, is implicated, substantially more than simulated by current land ecosystem models. The observations appear to signal large ecological changes in northern forests and a major shift in the global carbon cycle.

⁶³ La solution de $dy(t)/dt = f(t) - y(t)/5$ s'écrit $y(t) = y(t_0) \exp[-(t-t_0)/5] + \int_{t_0}^t \exp[-(t-t')/5] f(t') dt'$

Figure 7-7 Cycle du carbone (selon IPCC AR5 WG1, figure 6-1, corrigé quant aux flux entre océan de surface et océan profond) : 90 Gt-C/an seraient absorbés par la végétation (hors respiration) et 80 Gt-C/an par les océans (froids en surface).



Confirmation par les rapports isotopiques

Il y a deux isotopes stables du carbone, le carbone 13 qui fait environ 1% du carbone naturel et le carbone 12 ; les plantes préfèrent le carbone 12 et donc les combustibles fossiles sont « pauvres » en carbone 13. Le rapport des nombres d'atomes de ces isotopes est caractérisé par une fonction dite delta¹³C ou $\delta^{13}\text{C}$, exprimée en pour mille (abréviation : pm) : $\delta^{13}\text{C} = 1000 \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{0,0112372} - 1 \right)$.

Les combustibles fossiles sont vers -25 pour mille pour le charbon, moins pour le pétrole et vers -45 pour mille pour le gaz naturel, et, en pondérant par les quantités de carbone venant du charbon du pétrole et du gaz, sont, actuellement en moyenne vers -29 ou -30 pour mille. Les dégazages naturels sont vers -7 pour mille.

L'identité (pm= pour mille) :

$$(-29 \text{ pm}) (6\%) + (-7.14 \text{ pm}) (94\%) = (-8.4 \text{ pm})$$

correspond aux observations de la courbe bleue de la figure 8.

Le dioxyde de carbone des dégazages naturels (courbe verte à la figure 7- 8) a, à peu près, le delta13C de l'air ambiant 50 ans plus tôt.

Il est évident qu'il ne saurait y avoir beaucoup plus de carbone « anthropique » dans l'air, car alors la courbe verte devrait « remonter » de la gauche vers la droite⁶⁴ ce qui est physiquement impossible.

⁶⁴ Le delta¹³C de l'air ambiant a, avant 1980, selon les analyses directes et selon les reconstitutions faites à partir de coraux ou autres, toujours été entre -6,5 pm et -7 pm.

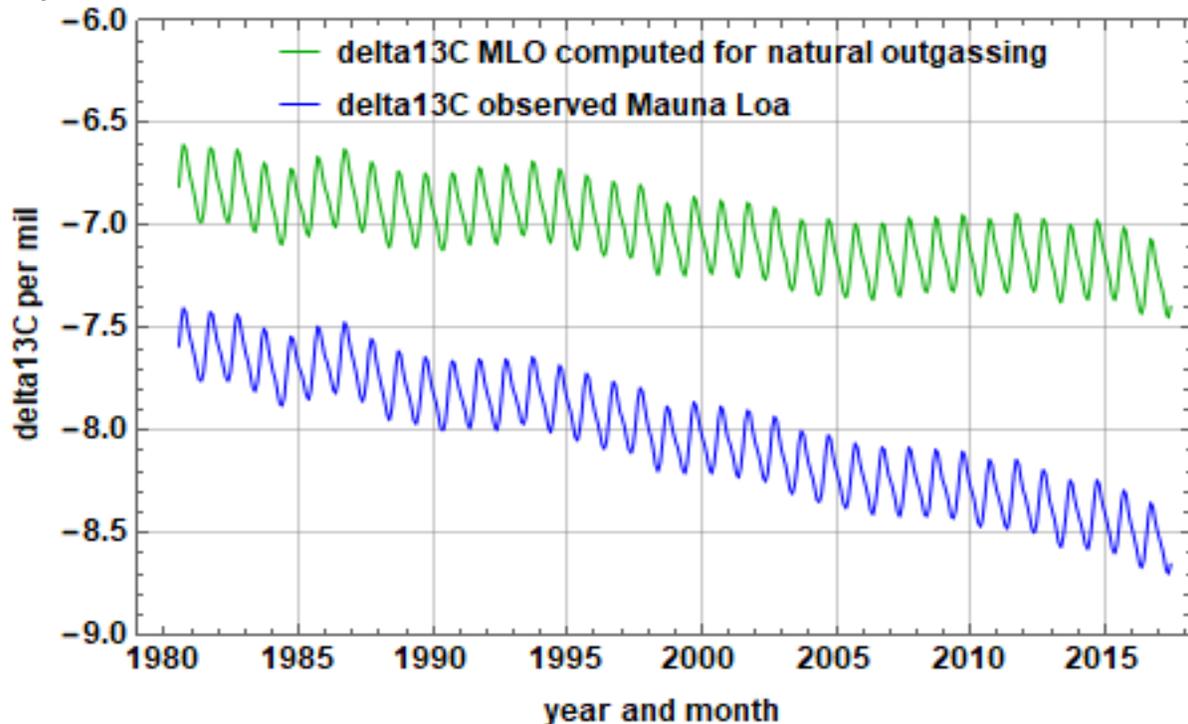
Pour, par exemple vingt pour cent « anthropique » dans l'air en 2016 et dix pour cent en 1980 (les émissions ont presque doublé de 5,3 Gt-C en 1980 à 9,6 Gt-C en 2016), on aurait

$$10\% (-28) + 90\% (-5,33) = (-7,6) \quad \text{et} \quad 20\% (-30) + 80\% (-3) = (-8,4)$$

Mais le carbone naturellement dégazé ne peut pas avoir été à -5,33 pm en 1980 et à -3 pm en 2016 !

Le carbone qui revient a été celui de l'air des décennies ou des siècles avant, comme le montre la figure 7-7 et son delta¹³C ne peut donc pas croître (devenir moins négatif).

Figure 7-8 $\delta^{13}\text{C}$ observé (moyenne mensuelle) au MLO (Mauna Loa Observatory) (en bleu) et $\delta^{13}\text{C}$ naturel calculé (en vert) pour une durée de vie de cinq ans ; la fraction « fossiles » dans l'air est passée de 3,7% en 1980 à 5,9% en 2018 ; le carbone « fossile » après recyclages est, ici, compté avec le « naturel » ce qui explique en partie la dérive de la courbe verte.



Les observations des teneurs en isotope radioactif ^{14}C produit par les explosions thermonucléaires et par les rayons cosmiques ⁶⁵ sur des cernes d'arbres disent sur nombre de sites (Nagoya, Cracovie, Salamanque, ...) et avant 2008 dans l'air moins de 16 ppm de CO_2 venant de combustibles fossiles ce qui confirme bien qu'il n'y a dans l'air que quelques pour cent de CO_2 venant des combustibles fossiles.

7-6 Dioxyde de carbone : croissance observée à l'observatoire du Mauna Loa (altitude : 3400 m)

Nous venons de voir que 94% (actuellement) du CO_2 de l'air vient de dégazages naturels et que les dégazages océaniques sont fortement modulés par la température de l'eau de mer qui dégaze :

+1°C fait +4% sur la pression partielle dans l'eau de mer et la différence de par exemple

500 μatm - 400 μatm = 100 μatm devient 520 μatm - 400 μatm = 120 μatm , soit +20% sur le flux dégazé.

La figure 7-9 montre en gris foncé les différences d'une année à l'autre, pour le même mois, de $y_{\text{naturel}}(t)$ mesuré à l'observatoire du Mauna Loa. Les températures de la zone de dégazage sont représentées par les anomalies $\text{AT}(t)$ des températures de la basse troposphère intertropicale mesurée par divers satellites depuis fin 1978 ; on prend pour t le milieu des 12 mois.

⁶⁵par exemple

Rakowski AZ, Pawelczyk S and Pazdur A, 2001. *Changes of ^{14}C concentration in modern trees from Upper Silesia region, Poland*. Radiocarbon 43(2B): 679-689

Rakowski, Andrzej Z, *Radiocarbon monitoring of fossil fuel emissions* GEOCHRONOMETRIA, 38(4) 2011: 314-324

Rakowski, Andrzej Z, Toshio Nakamura, Anna Pazdur, John Meadows *Radiocarbon concentration in annual tree rings from the Salamanca region western Spain* Proceedings of the 21st International Radiocarbon Conference edited by A J T Jull & C Hatté RADIOCARBON, Vol 55, Nr 2-3, 2013, p 1533-1540

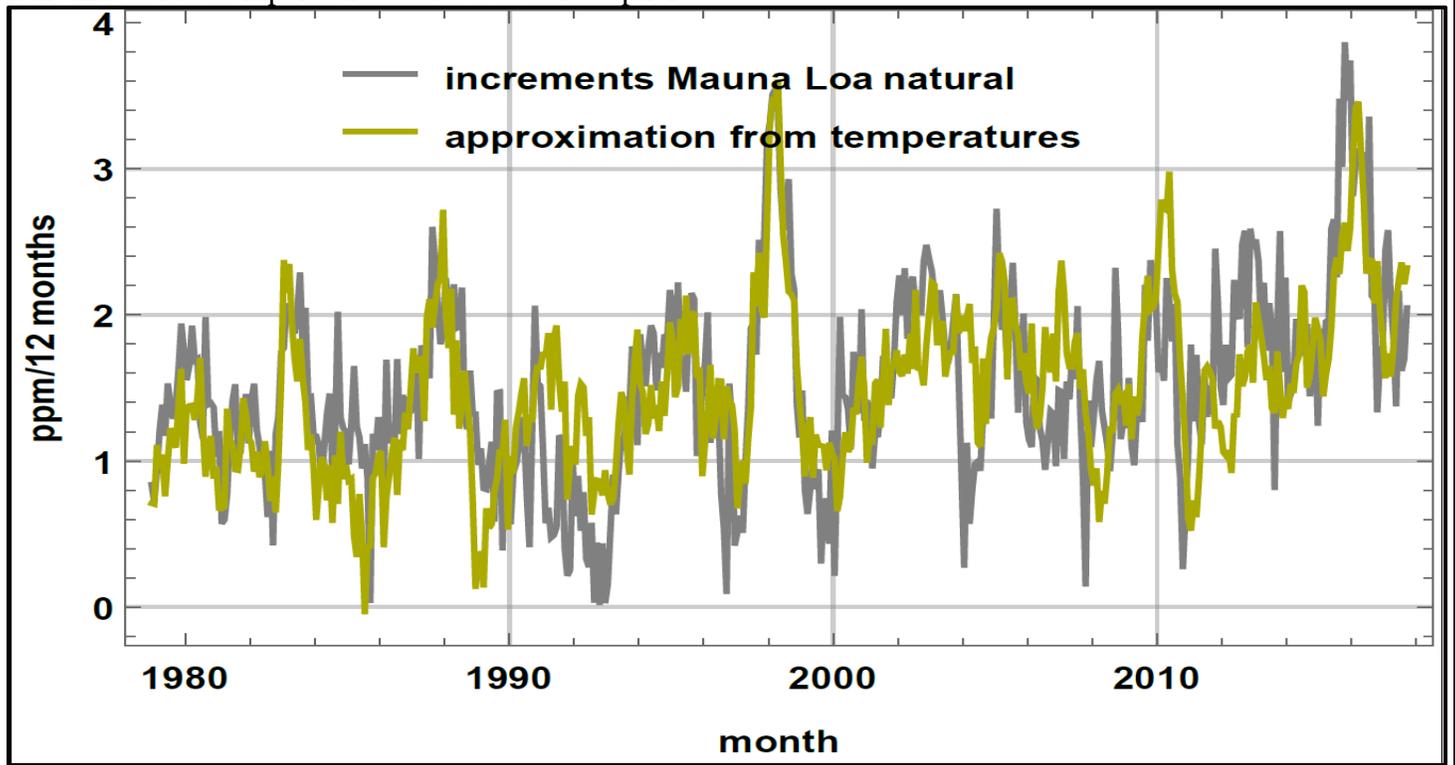
La bonne corrélation visuelle, malgré les effets de poussières volcaniques sur 1992-1994, permet d'écrire :

$$d y_{\text{naturel}}(t) / dt = a AT(t) + b \quad \text{et donc} \quad y_{\text{naturel}}(t) - y_{\text{naturel}}(t_0) = \int_{t_0}^t (a AT(t) + b) dt$$

Le dioxyde de carbone de l'air est l'intégrale sur le temps des températures passées, une conséquence des températures et ne peut donc pas être la cause de ces températures.

Figure 7-9 Différences entre mêmes mois d'une année à l'autre des ppm mesurés à l'observatoire du Mauna-Loa, et anomalies des températures de la basse troposphère intertropicale (anomalies par rapport à la moyenne de référence calculée pour chacun de ces même mois sur 1981-2010).

Quelques désaccords peuvent être rapportés aux éruptions volcaniques vues à la figure 4-2 vignette du haut par leur effet sur les températures de la basse stratosphère.



Des tests mathématiques⁶⁶ sur les séries temporelles $y_{\text{Mauna Loa}}(t)$ et $AT(t)$ **imposent** de dériver une fois $y(t)$ avant de tenter une corrélation avec la série des $AT(t)$ intertropicaux ou avec plusieurs séries $AT(t)$, intertropicale et extratropicales.

Le dégazage fonction des températures (§ 7-4) et le renouvellement constant du carbone des océans de surface sont les justifications physiques de la corrélation observée.

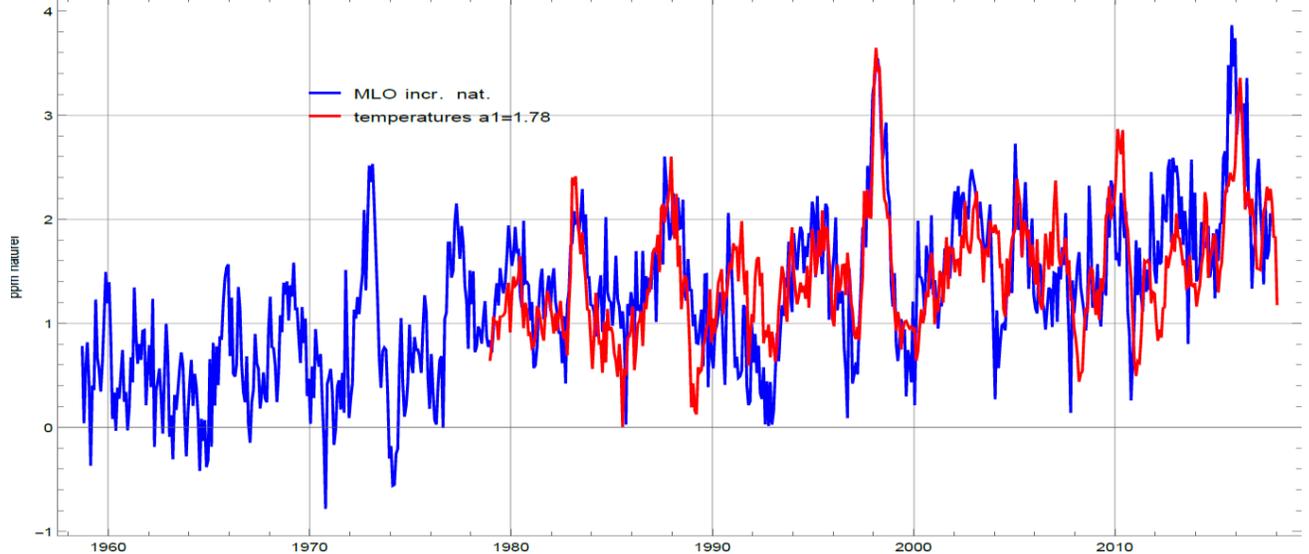
La figure 7-10 montre que si à l'observatoire du Mauna Loa (19°31'N, 155°34'W, altitude 3400 m) le dégazage de la zone intertropicale fait le gros des incréments, à l'observatoire du pôle sud (altitude 3200 m) c'est l'océan austral qui prédomine dans la régression linéaire. La figure 4-3 explique la synchronisation par les El Niño.

⁶⁶ Dits de racine unité ou ADF et KPSS

Figure 7-10 dy_{naturel}/dt aux observatoires du Mauna Loa (MLO) et du Pôle sud (SPO) en bleu, et en rouge, combinaisons des anomalies des températures de la basse troposphère au-dessus de la zone intertropicale et de l'océan austral.

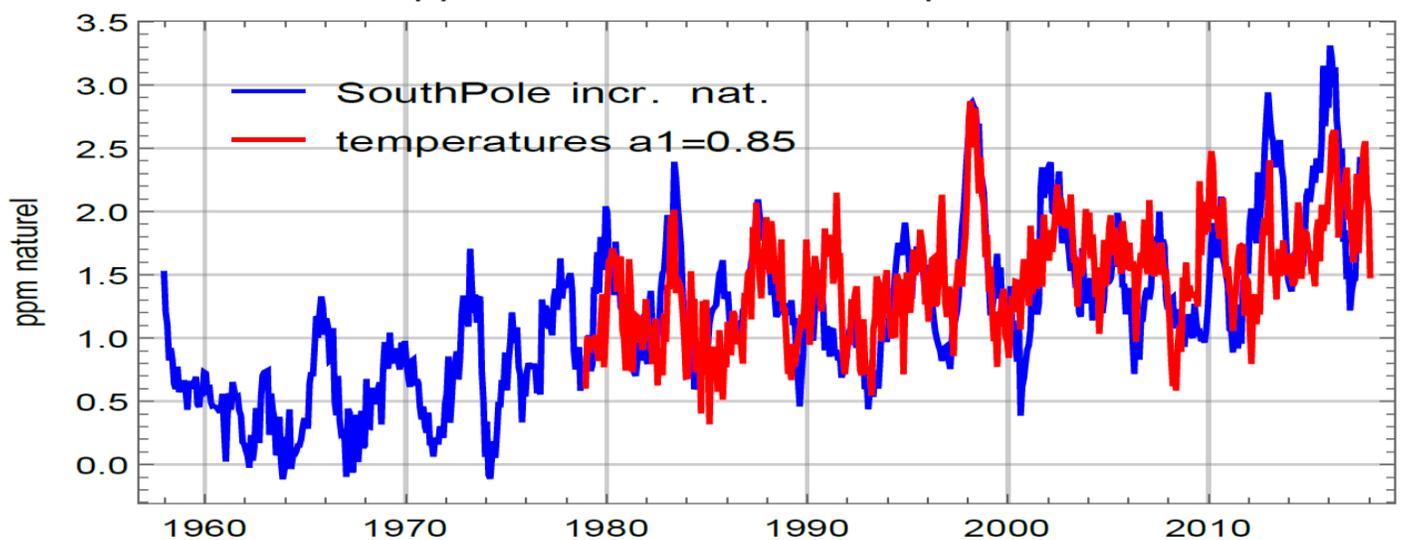
$$\text{MLO : } dy_{\text{naturel}}(t)/dt = 1,78 AT_{\text{intertropical}}(t) - 0,166 AT_{\text{océan austral}}(t) + 1,424$$

ppm natural MLO & températures



$$\text{SPO : } dy_{\text{naturel}}(t)/dt = 0,85 AT_{\text{intertropical}}(t) + 1,088 AT_{\text{océan austral}}(t) + 1,416$$

ppm natural SPO & températures



7-7 Dioxyde de carbone dans l'air et émissions anthropiques

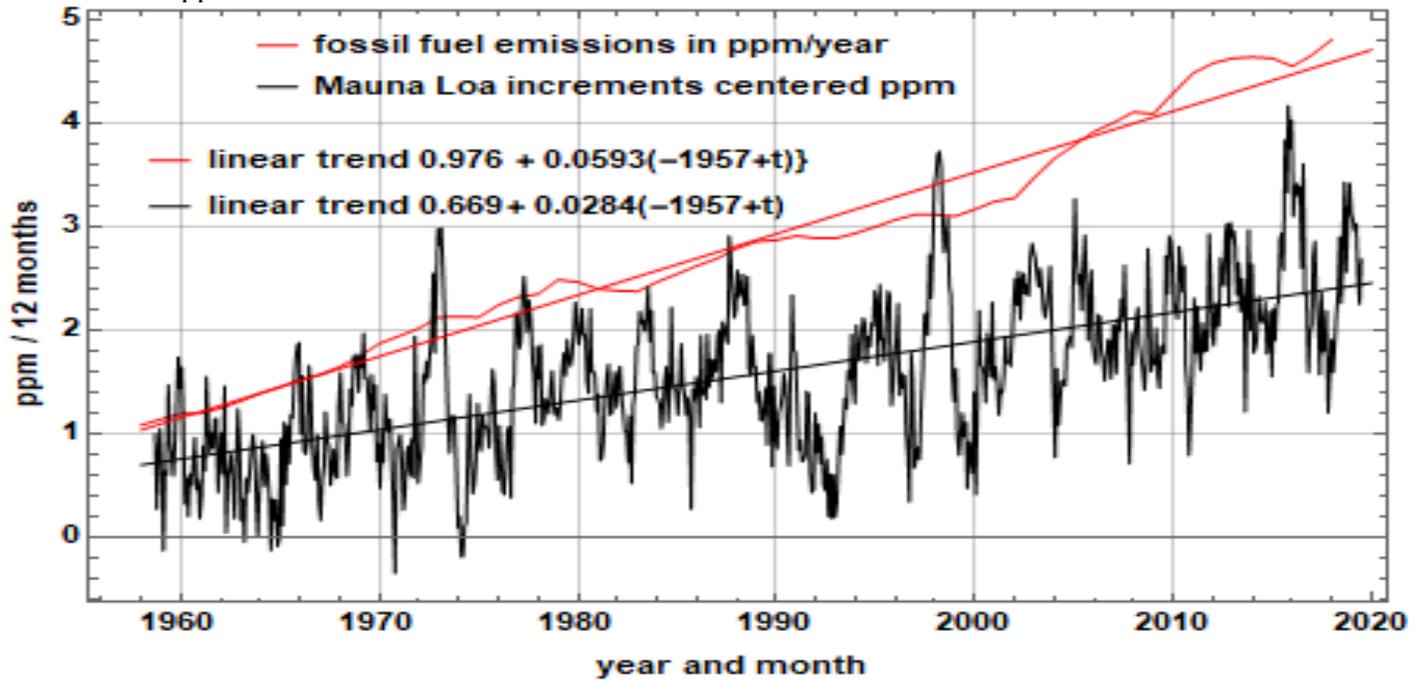
La figure 7-11 vignette du haut présente

- en rouge : l'évolution des émissions avec leur tendance linéaire en rouge, de 1,1 ppm/an vers 1958 à 4,5 ppm/an en 2017 ; noter les +40% entre 2000 et 2010 avec le doublement de la production de charbon,
- en noir : les accroissements ou incréments observés au Mauna Loa en ppm/12 mois en prenant, comme ci-dessus les différences entre un mois et le même mois de l'année précédente pour éviter les effets saisonniers dus à la croissance de la végétation ; cette différence est affectée à un temps t pris au milieu des 12 mois ; la tendance linéaire en rouge va de +0,67 ppm/an vers 1958 à +2,4 ppm/an en 2018-2019

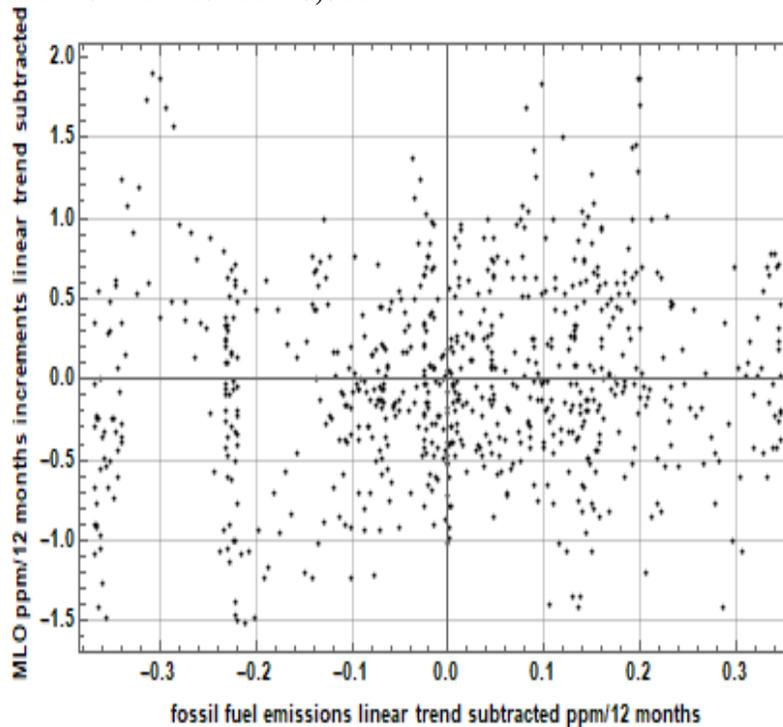
Deux tendances linéaires croissantes établissent-elles une relation de causalité ? Evidemment non ! Soustraire de chacune des deux séries des émissions et des incréments sa tendance linéaire, conduit au nuage de points de

la figure 7-11 la vignette du bas : il n'y a aucune espèce de corrélation entre les deux séries résiduelles puisque leur coefficient de détermination est $R^2 = 0,011$.

Figure 7-11 **Absence de corrélation réelle** entre les émissions venant des combustibles fossiles et la croissance des ppm observée au Mauna-Loa : données brutes et tendances linéaires



après soustraction des tendances linéaires : $R^2 = 0,011$



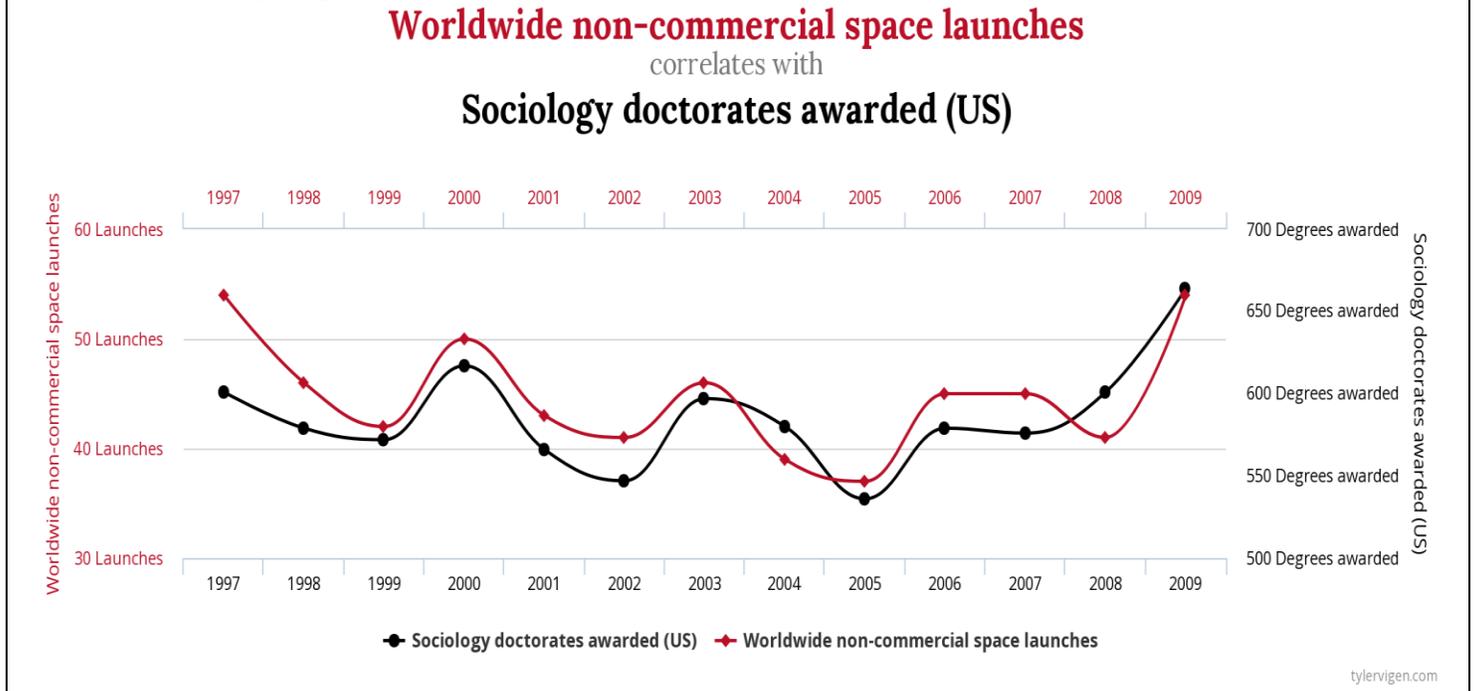
La série des émissions anthropiques reflète les cycles économiques, et le développement de l'emploi du gaz naturel (1980-2000) puis du charbon (2000-2010).

La série des accroissements des ppm de CO₂ dans l'air reflète les températures de la zone de dégazage ce qui est conforme aux lois de la physico-chimie et aux flux de carbone dans l'océan (figures 7-5 et 7-6).

Rappel de bon sens : Même avec une bonne corrélation, comme entre les lancements de satellites non commerciaux (monde) et le nombre de doctorats de sociologie décernés aux Etats-Unis (figure 12), la corrélation peut être fortuite et ne pas justifier une relation de cause à effet.

Figure 7-12 Exemple de corrélation qui n'exprime pas un lien de causalité

Source : <http://www.tylervigen.com/spurious-correlations>



Voir sur SSRN Electronic Journal les papiers du professeur Munshi ⁶⁷ examinant en détail les corrélations relatives au réchauffement climatique, corrélations que le IPCC-GIEC affirme comme des évidences mais qui n'existent tout simplement pas.

Nous renvoyons aussi aux études de Jeffrey Glassman ⁶⁸ auteur du <http://rocketscientistsjournal.com/>.

Supplément : détails sur les séries temporelles en cause

Les ppm MLO (de 1958 à mi-2019) (série mensuelle) sont un processus non stationnaire de type ARIMA avec L opérateur de retard ou Lag, $LX_t = X_{t-1}$

$(1 - 0.855 L + 0.115 L^2 + 0.337 L^3) (1 - L) y(t) = 0.076 + e(t)$, $e(t)$ bruit blanc normal de variance 0.555

On a bien une racine unité dans le facteur $(1-L)$.

Les incréments $y(t + dt/2) - y(t - dt/2)$ des ppm au MLO pour $dt = 12$ mois sont un processus ARMA stationnaire $(1 - 0.5 L - 0.37 L^2) y(t) = 0.212 + (1 + 0.189 L) e(t)$, $e(t)$ bruit blanc normal de variance 0.171.

Les émissions anthropiques annuelles sont de type SARIMA avec curieusement un cycle économique de 17 ans sur 1957 – 2018 image des trois phases de développement, avant le choc pétrolier de 1973, de 1974 à 2001 le développement du gaz naturel, et enfin la croissance chinoise des derniers 20 ans.

$(1 - 0.306 L) (1-L) (1 - L_{-17})^3 y(t) = 0.0135 + e(t)$, $e(t)$ bruit blanc normal de variance 0.052.

Ces expressions n'ont pas ou peu de valeur prédictive mais évitent les fausses corrélations entre des séries non-stationnaires qui présentent des tendances.

⁶⁷ Munshi, Jamal. (2016). *Spurious Correlations in Time Series Data: A Note*. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.2827927.

Munshi, Jamal. (2016). *Responsiveness of Atmospheric CO2 to Fossil Fuel Emissions: Part 2*. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.2862438.

https://www.researchgate.net/publication/309585704_Responsiveness_of_Atmospheric_CO2_to_Fossil_Fuel_Emissions_Part_2

Wu, You, Zou *On spurious regressions with trending variables* <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1606/1606.05049.pdf>

⁶⁸ <http://notrickszone.com/2013/06/19/reader-jeff-glassman-comments-on-murry-salby-and-co2-climate-forcing/>

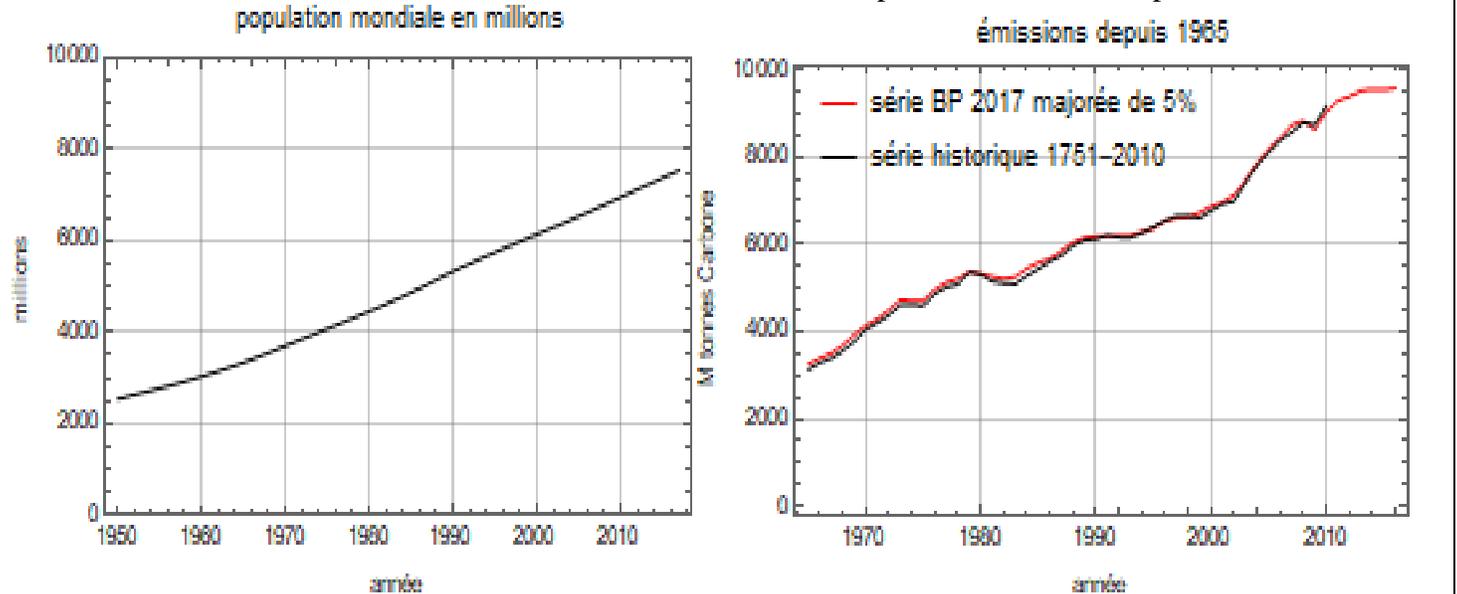
7-8 Annexe : émissions anthropiques et ppm anthropiques dans l'atmosphère

La figure 13 montre la population mondiale depuis 1950, les consommations de combustibles fossiles (en Mt-C/an et en t-C/tête) et des scénarios d'émissions d'ici 2100 de la forme (t est le temps) :

$$f(t) = a / (1 + \exp[- b (t-c)]), \text{ dite fonction logistique.}$$

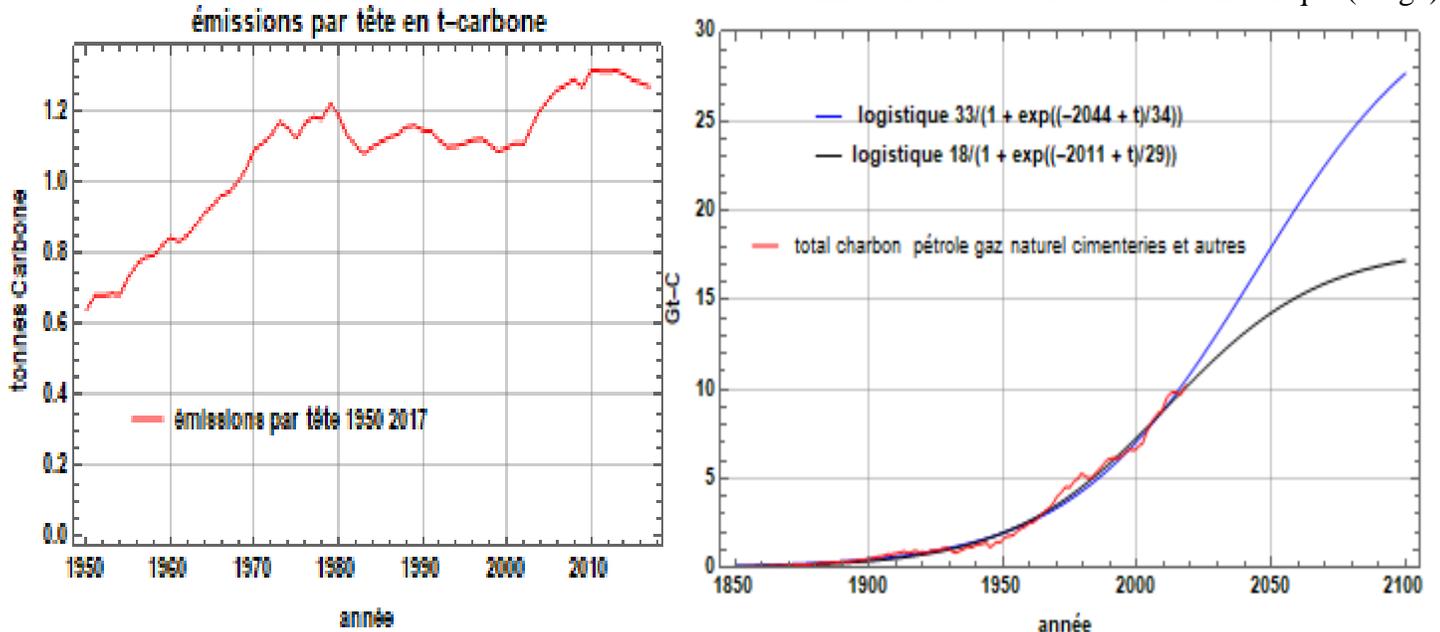
Figure 7-13 Population mondiale (1950 à 2018)

Emissions anthropiques depuis 1965 (en millions de tonnes de carbone par an).
Noter les +40% entre 2000 et 2010, par doublement de la production de charbon



Emissions en tonne de carbone par tête et par an (1950-2017)

émissions futures en Gt-C/an et historique (rouge)



Notons que pour le scénario RCP8.5 du GIEC :

- 1155 / 1685 = 69% des émissions *resteraient dans l'air* (sic !) perpétuellement, contre 44% actuellement si on est assez crédule pour croire que les +2 ppm/an viennent des émissions de 4,5 ppm/an et non pas des dégazages naturels (figure 11, vignette de gauche) marqués par les températures de la zone de dégazage,
- il y aurait dans l'air +545 ppm en 90 ans soit **+6 ppm/an de 2011 à 2100, trois fois les actuels +2 ppm/an** (figure 7-11) dont quelques +0,3 ppm/an effectivement anthropiques (figure 14 vignette de droite),
- l'ajout d'autres gaz (méthane, etc.) permet d'arriver à 1310 ppm de CO₂ et « équivalent CO₂ » soit +9,6 ppm/an.

7-9 Annexe : consommation d'énergie primaire

Les consommations mondiales de 2017 sont 4,6 Gtep en pétrole, 3,2 Gtep en gaz et 3,7 Gtep en charbon plus, en électricité, en Peta-Watt-heure, 2,7 en nucléaire, 4 en hydroélectrique, 0,4 en solaire et 1,1 en éolien.

Comme le rendement thermique des centrales électriques modernes « ultra-super-critiques » (vapeur à 620°C et 300 bar, avec des progrès incrémentaux ⁶⁹ vers 650°C-670°C et 330 bar) approche 50% pour le charbon voire 60% pour le gaz, le rendement de 38% employé pour les conversions d'unités depuis les années 1980, surestimerait ⁷⁰ un peu l'équivalent de l'énergie électrique en tonnes-équivalent-pétrole fixé à 0,225 Gtep / PWh mais en route vers 0,2 Gtep / PWh.

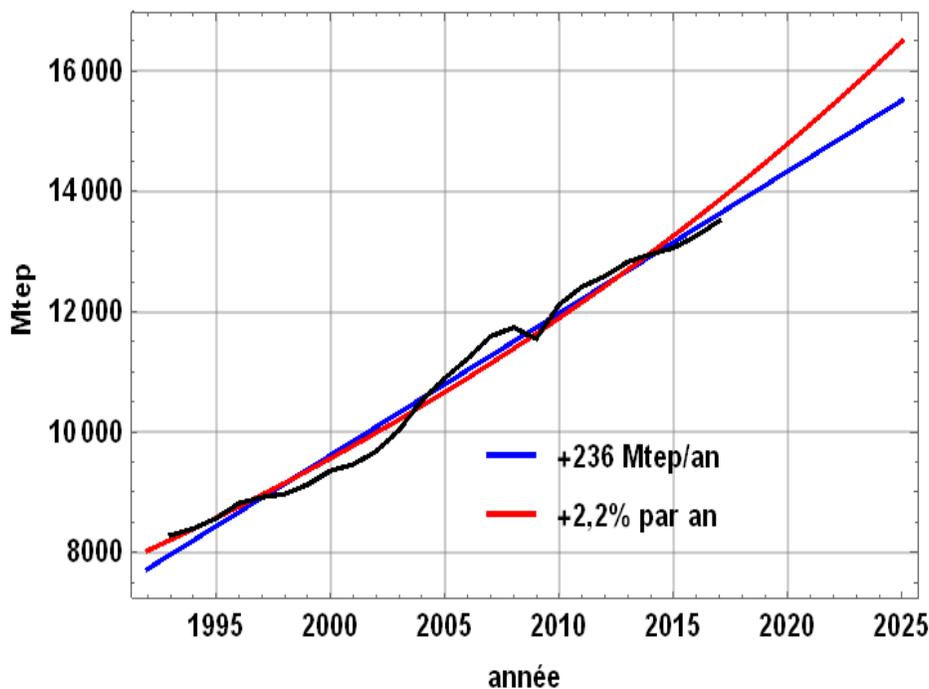
La production primaire d'énergie est donc de :

- 11,5 Gtep en combustibles fossiles
- 1,8 à 1,6 Gtep en production électrique convertie en énergie primaire.

La publication statistique BP-2018 dit 13,5 Gtep avec le bois et des carburants d'origine agricole.

L'extrapolation des consommations d'énergie primaire des derniers 24 ans (figure 15) suggère +2,5 Gtep d'ici 2025.

Figure 7-14 Evolution des consommations **d'énergie primaire** depuis 1993 en millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep) et extrapolations linéaire (à +236 Mtep/an) et exponentielle (à +2,2%/an).
consommation d'énergie



⁶⁹ <https://www.ge.com/power/steam/steamh>

Selon <https://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-25/issue-3/features/critical-thinking.html>, en août 2013, 165 unités ultra-supercritiques étaient en service, contre 645 supercritiques et 7880 sub-critiques.

⁷⁰ <https://www.powermag.com/who-has-the-worlds-most-efficient-coal-power-plant-fleet/>

8- Régulation locale et systèmes convectifs, régulation globale et albédo

Les chapitres 6 et 7 ont montré

- le rôle de la vapeur d'eau qui (en valeurs moyennes) rayonne environ 200 W/m^2 sur les 220 W/m^2 rayonnés par la surface et la troposphère, et assure à $0,25 \text{ W/m}^2$ (figure 3-3) près sur l'année l'égalité entre le flux infrarouge thermique rayonné vers le cosmos et le flux solaire absorbé,
- l'absence de rôle du dioxyde de carbone, qui est une conséquence des températures,
- la qualité du caloduc qui apporte aux couches qui rayonnent vers le cosmos sur toute la surface du globe en haut de la vapeur d'eau, la chaleur solaire reçue par la surface surtout dans les zones proches des tropiques.

8-1 Transfert de chaleur

La figure 1 montre que c'est le mouvement des océans et de l'atmosphère qui apporte aux zones déficitaires la chaleur à rayonner vers le cosmos, en la retirant des zones excédentaires à différentes échelles de temps de la journée à des dizaines d'années, avec, entre autres, le mécanisme El Niño.

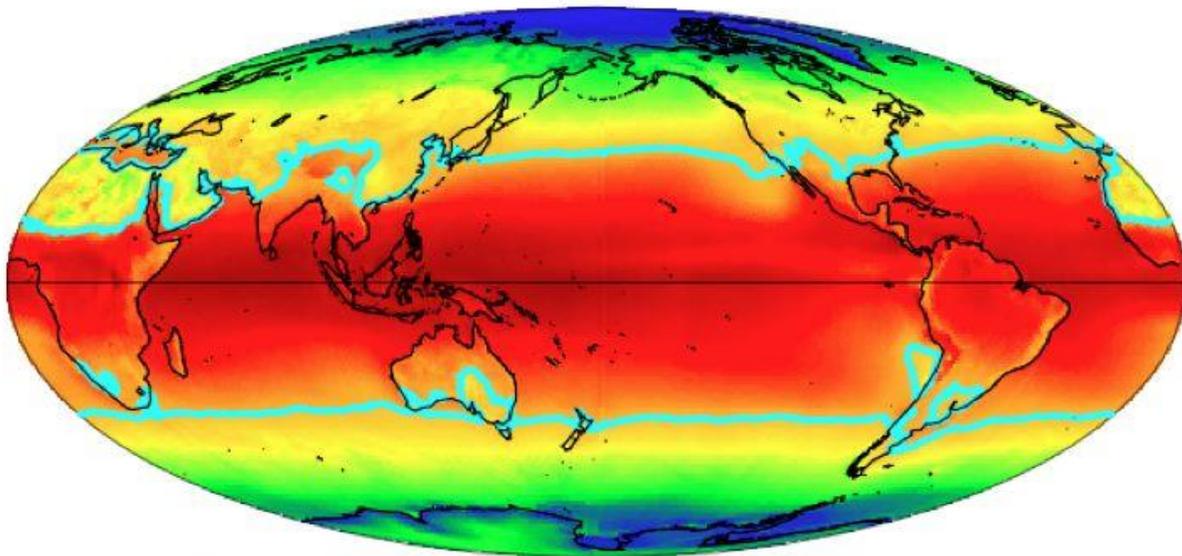
Figure 8-1 Importation et exportation de chaleur qui servent à uniformiser le rayonnement vers le cosmos : moyennes annuelles de la chaleur entrante et sortante en haut de l'atmosphère pour chaque cellule de $1^\circ \times 1^\circ$:
(solaire incident) moins (solaire rétrodiffusé et infrarouge thermique)

selon W. Eschenbach et données CERES ⁷¹

Le transport à travers les lignes bleu clair estimé à 6 PetaWatt (PW) vers le nord et 6 PW vers le sud ; mais la moyenne annuelle cache des variations saisonnières très fortes.

Noter que la chaleur va de l'océan ($9,2 \text{ W/m}^2$ sur ce relevé) vers les continents (-20 W/m^2) comme la vapeur d'eau qui transporte de l'eau des océans vers les continents (tableau 7-A).

**Net Amount of Energy Exported (+) Poleward
or Imported (-) From The Tropics**
Average Exports Global: 44.2 NH: 47.3 SH: 41.6 Land: -20 Ocean: 9.2 W/m²
Light blue lines indicate where the value is zero.



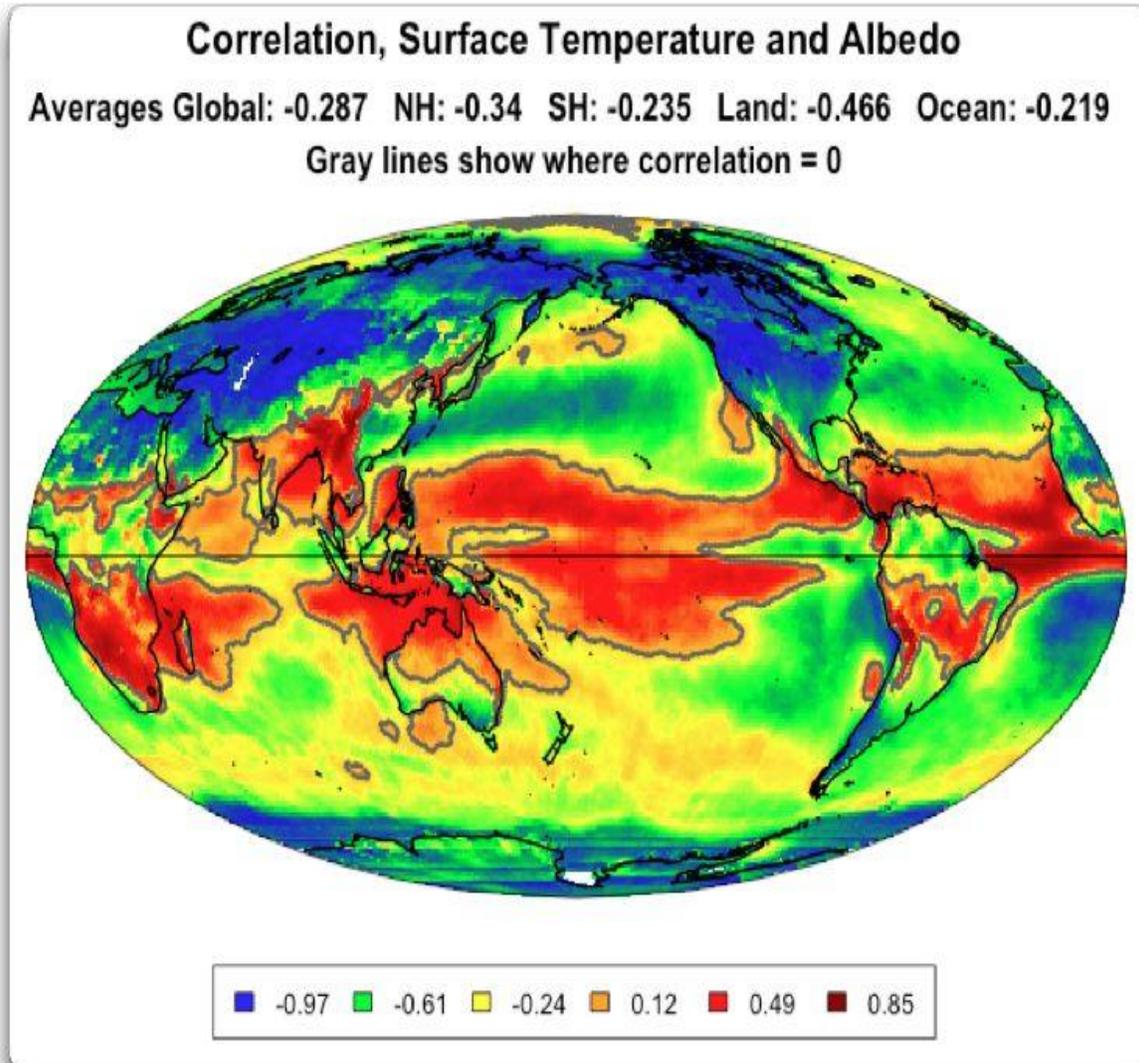
⁷¹ Voir [The Magnificent Climate Heat Engine](http://www.magnificentclimate.com) Posted on [December 21, 2013](http://www.magnificentclimate.com) by [Willis Eschenbach](http://www.magnificentclimate.com)
<https://pielkeclimatesci.wordpress.com/2012/02/14/on-self-regulation-of-the-climate-system-an-excellent-new-analysis-by-willis-eschenbach/> aussi <http://www-c4.ucsd.edu/cepex/Chapter2.html>

8-2 Albédo et température de surface

La régulation des températures en surface se fait aussi par la couverture nuageuse : la figure 2 montre deux régimes différents :

- en zone tropicale (rouge) une température de surface plus forte fait démarrer la convection plus tôt en fin de matinée ou dans l'après-midi et par là augmente l'ennuageement et l'albédo, et la température de surface sur les océans ne dépasse presque jamais 32°C (figure 3)
- sur les continents (en bleu) et aux moyennes et hautes latitudes (en vert et jaune) la couverture nuageuse fait chuter la température de surface.

Figure 8-2



On a déjà vu aux § 3-3 et 3-4 l'importance des variations de l'insolation en surface.

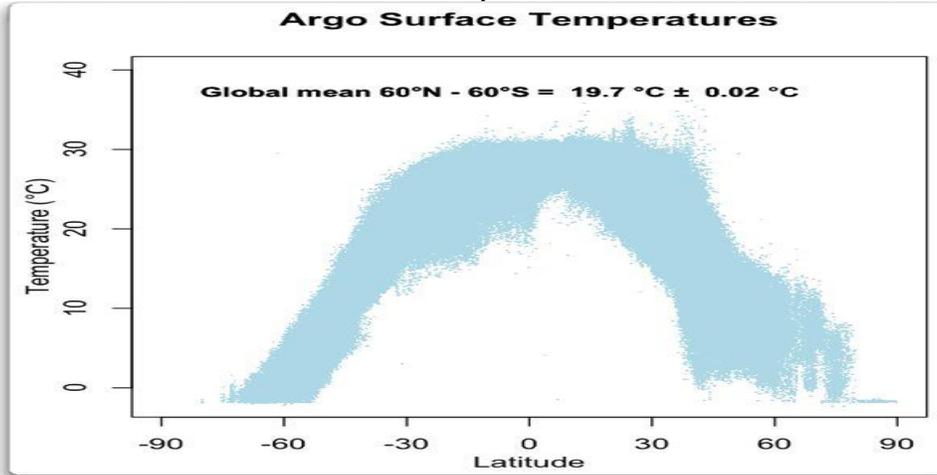
La relative stabilité vers 32°C du maximum des températures en surface des mers entre 30°S et 40°N (57% de la surface du globe) est visible figure 3.⁷² Les flux de chaleur latente et sensible vus aux figures 7-1 et 7-2, et les structures convectives qui les alimentent l'expliqueraient : l'emport d'un mm de vapeur d'eau exige 2,4 MJ/m² soit 2400 secondes à 1000 W/m².

⁷² <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MYD28M>

<https://wattsupwiththat.com/2012/02/12/argo-and-the-ocean-temperature-maximum/> February 12, 2012

<https://motls.blogspot.com/2012/02/willis-eschenbach-and-argo-on-warmest.html>

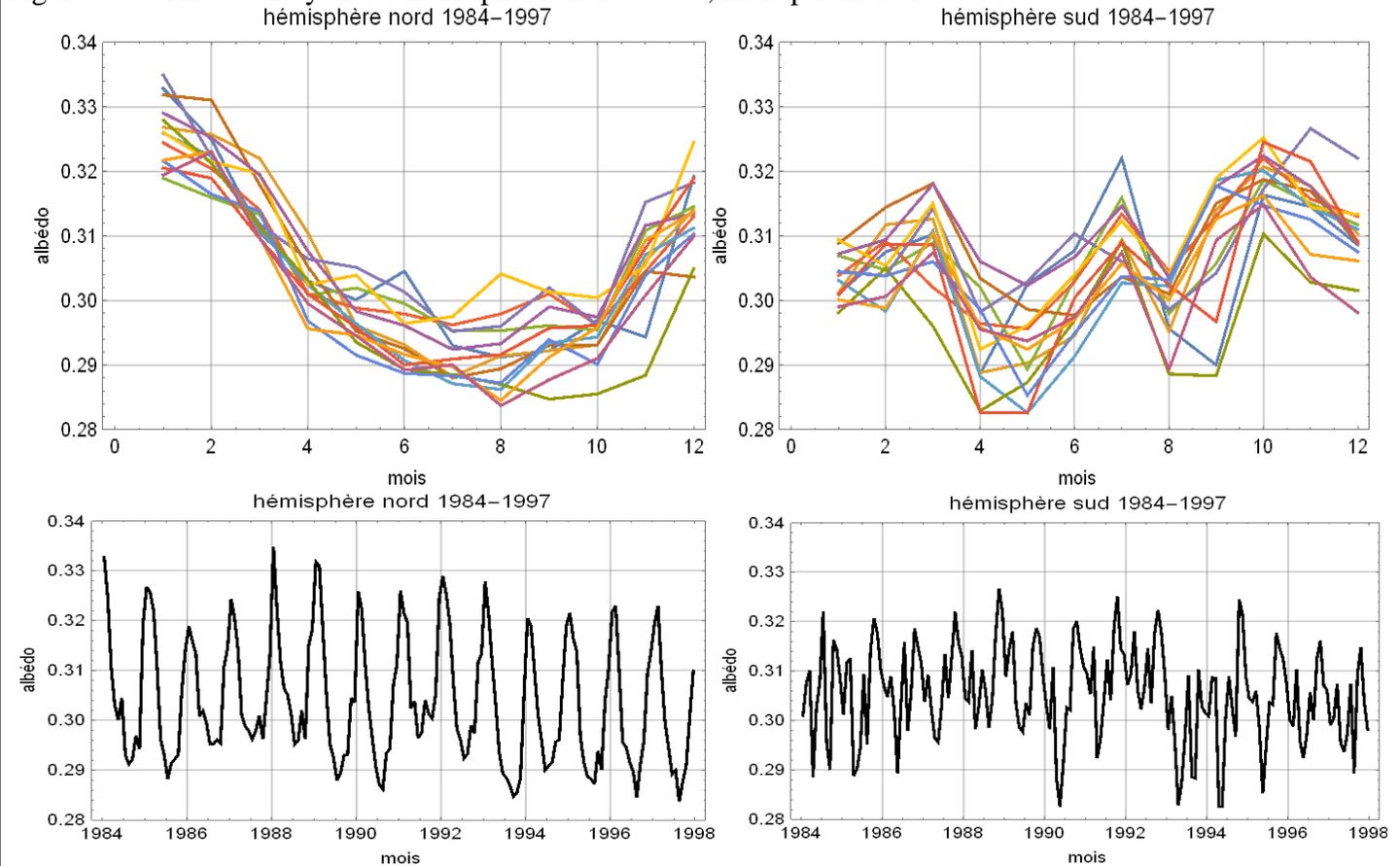
Figure 8-3 Températures de surface des mers observées par les bouées flottantes et dérivantes Argo



8-3 Albédo des hémisphères nord et sud de janvier 1984 à décembre 1997 ⁷³ ; régulation des températures en cycle annuel

Des données de Hatzianastassiou et al. tracées à la figure 4 suggèrent que la maximum d'albédo de l'hémisphère nord vient de la couverture nuageuse et accessoirement de la couverture neigeuse en hiver des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord ; les maxima d'enneigement de l'hémisphère sud sont en été austral (déplacement vers le sud de l'équateur météorologique vertical) et en hiver austral (enneigement et extension de la banquise antarctique).

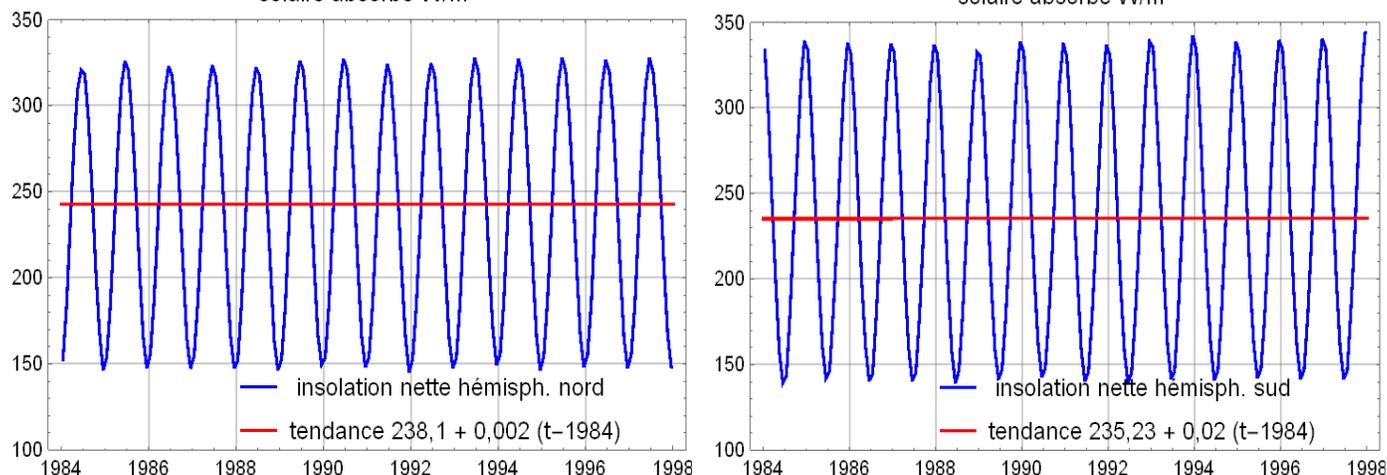
Figure 8- 4 Albédo moyen des hémisphères nord et sud, mois par mois 1984-1997



⁷³ N. Hatzianastassiou et al. *Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget* Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 4545–4597, 2005 www.atmos-chem-phys.org/acpd/5/4545/

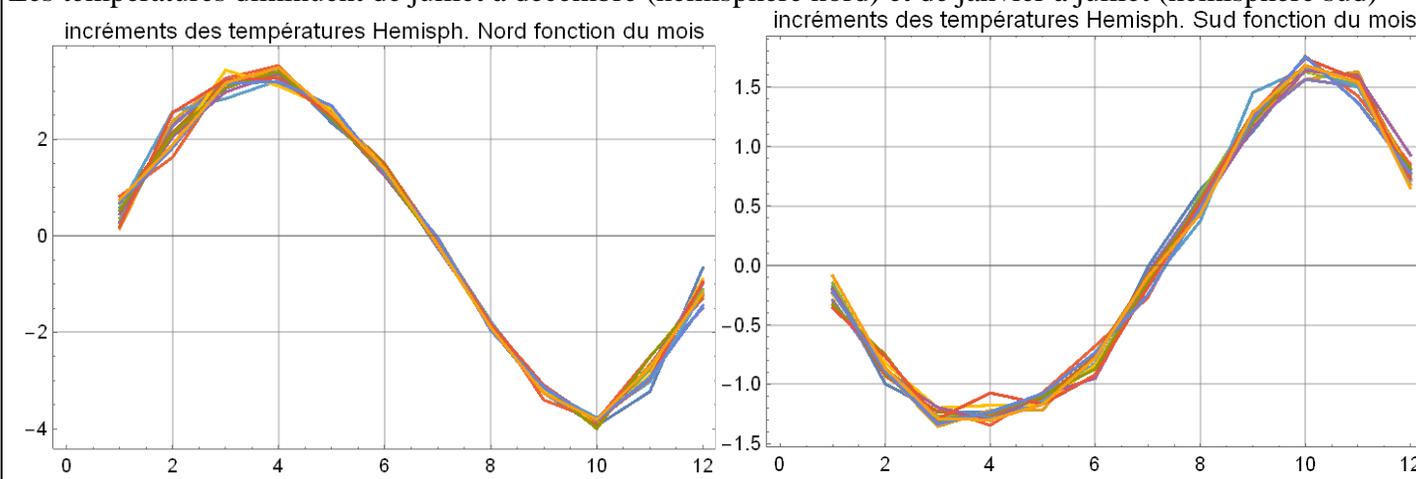
Les fluctuations interannuelles de l'albédo d'un même mois (figure 4) sont de 0,01 environ mais ne semblent pas impliquer de tendance sur l'insolation nette ou flux solaire moyen sur 24 heures absorbé par l'atmosphère et la surface : la figure 8 dit + 0,02 W/m²/décennie dans l'hémisphère nord et 0,2 W/m²/décennie au sud.

Figure 8-5 solaire absorbé par l'atmosphère et la surface = (solaire en haut de l'air) x (1 - albédo)
solaire absorbé W/m²



W. Eschenbach a rapproché ces insolutions nettes de données sur les températures de surface ⁷⁴.

Figure 8-6 Incréments des températures d'un mois par rapport au mois précédent, hémisphères nord et sud.
Les températures diminuent de juillet à décembre (hémisphère nord) et de janvier à juillet (hémisphère sud)



Calculer pour chacun des hémisphères,

(1) les variations de l'insolation (en moyenne mensuelle sur l'hémisphère, pondérée par les surfaces correspondant aux 37 intervalles de latitude de la figure 3-2, corrigées de l'effet de l'albédo moyen de l'hémisphère pour ce mois,

(2) les variations d'un mois par rapport au mois précédent des températures moyennes,

conduit aux courbes de la figure 6 qui montrent une relation stable entre **incrément**s de l'insolation effective et **incrément**s des températures de surface pour chacun des hémisphères nord (NH) et sud (SH)

$$\text{incrtempNH}(t) = 0,00175 + 0,587 \text{ incrinsolNH}(t) + 0,04255 \text{ incrtempNH}(t-1)$$

$$\text{incrtempSH}(t) = 0,00205 + 0,655 \text{ incrinsolSH}(t) + 0,01575 \text{ incrtempSH}(t-1).$$

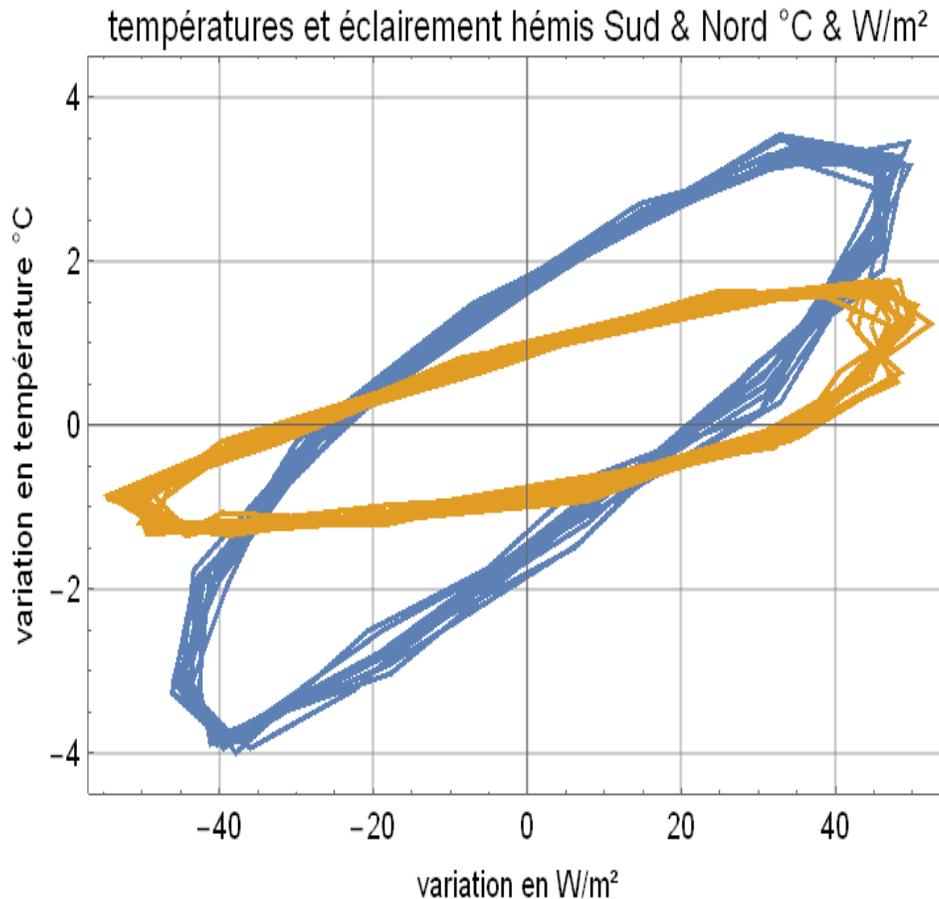
On a supposé un petit effet retardé de l'incrément des températures du mois précédent.

⁷⁴ An Observational Estimate of Climate Sensitivity Willis Eschenbach / May 29, 2012

<https://wattsupwiththat.com/2012/05/29/an-observational-estimate-of-climate-sensitivity/>

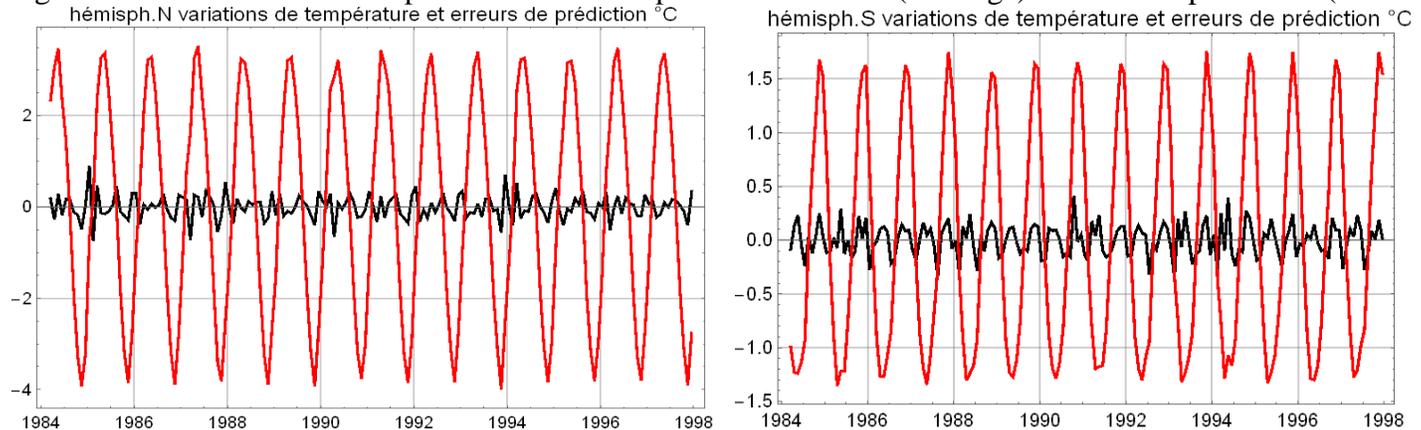
<https://pielkeclimatesci.files.wordpress.com/2009/09/ppt-4.pdf> <https://klimaatgek.nl/wordpress/2013/01/15/de-thermostaat-hypothese/>

Figure 8-7 Courbes de Lissajous entre variations des températures (en ordonnées) et variations de l'insolation effective (en abscisse). Les incréments des températures sont négatifs de juillet à décembre (hemisphere nord en bleu), avec un minimum en octobre ou de janvier à juillet (hemisphere sud en orange) avec un minimum en mars ou avril.



Les températures calculées avec les formules précédentes sont proches des températures observées, avec une erreur de l'ordre de 0,2°C tracée en noir (figure 8).

Figure 8-8 Variations des températures des hémisphères nord et sud (en rouge) et erreur de prédiction (en noir)



La période de janvier 1984 à décembre 1997 a été animée par quatre El Niño et deux éruptions volcaniques majeures : la figure 7 suggère qu'à cette échelle (le mois et l'hémisphère) la couverture nuageuse et l'albédo stabilisent bien, mois par mois, les variations des températures sur les courbes de Lissajous.

Nous avons déjà vu (figure 4-5) que les températures peuvent s'analyser comme conséquences des El Niño qui modifient passablement la couverture nuageuse. Le cycle annuel de la figure 7 montre l'importance de la **régulation de l'insolation par la vapeur d'eau.**

Partie II Quelques fables et inepties

1. La vitre de la serre ⁷⁵

Une vitre suspendue dans **le vide** entre la surface ensoleillée et le cosmos amène une augmentation de la température de surface, qui sur la Lune atteindrait +73°C, sous le soleil au zénith.

Mais ça ne marche **que sous le soleil et dans le vide**. Sur la face obscure de la Lune ça n'aurait aucun effet.

Dans un milieu qui comme l'air chargé de vapeur d'eau, est **opaque** en infrarouge thermique ce phénomène ne peut avoir lieu, puisqu'un corps opaque ne saurait transmettre beaucoup de chaleur par voie radiative, à la différence du vide où le seul échange possible de chaleur est radiatif.

L'équivalent de la vitre qui rayonne vers le cosmos est le haut de la vapeur d'eau. La « peau » de la vapeur d'eau (les « derniers 300 grammes ») est alimentée en chaleur par la convection et la condensation de la vapeur d'eau, nullement par une transmission en infrarouge thermique depuis la surface.

La température de surface s'en déduit par la relation $T(p) / T_0 = (p / p_0)^{R/(C_p - C_h)} = (p/p_0)^{0,19}$ du § 1-3.

Mais la vitre de la serre veut ignorer que la pression a un effet sur les températures : il n'y a pas de pression, puisque dans le vide il n'y a pas d'air !

De plus, dans un milieu qui comme l'air chargé de vapeur d'eau, est, grâce à l'évaporation et à la convection, un bon caloduc entre la surface et le haut de la tropopause, caloduc qui apporte au rayonnement vers le cosmos la chaleur que la surface reçoit du soleil et y ajoute la chaleur solaire absorbée par l'air chargé de vapeur d'eau, il n'y a pas non plus d'effet de serre ; la « vitre » ou « peau » en haut de la vapeur d'eau reçoit, à, travers le caloduc, la chaleur solaire reçue par la surface et l'air et la rayonne vers le cosmos.

Sur Vénus dont la surface émet 16 kW/m² mais ne reçoit à peu près pas de lumière solaire, le prétendu « modèle de la vitre » qui rayonnerait 8 kW/m² vers la surface amènerait un prodigieux refroidissement de la surface au rythme de 8 kJ/m²/seconde !

2. Les empilements de vitres

Tout aussi ineptes ; ils sont dans le vide ! Avec n vitres le rapport du flux émis par la surface à celui émis par la vitre n vers le cosmos est en (n+1) ; pour n=5 et 240 W/m² en haut de l'air émis par la 5^{ème} vitre vers le cosmos, le flux émis par la surface serait (5 +1) 240 = 1440 W/m² et la surface serait à 399 K !

Voir les articles [D], [D&T] et les manuels universitaires [Me]

3. Les 255 K ou -18°C

On fait l'hypothèse d'une Terre sans atmosphère, comme la Lune, mais moyenne le flux solaire incident sur toute la surface du globe, alors pourtant qu'il n'y a aucun élément mobile, ni air ni océan, pour transporter la chaleur et égaliser le rayonnement entre face éclairée et face obscure.

On a vu au §3-2 que le stockage de chaleur dans le sol est extrêmement faible et ne peut justifier cette moyenne sur les deux faces éclairée et obscure.

A cette véritable fraude, les auteurs ajoutent l'hypothèse d'une planète sans atmosphère mais avec des nuages et un albédo de 0,3 !

⁷⁵ La vitre supposée opaque en infrarouge thermique rayonne vers le cosmos autant que ce que l'ensemble vitre et surface reçoit du soleil, émet de l'infrarouge thermique vers la surface ; la surface reçoit alors et le solaire et cet infrarouge thermique de même valeur, soit un flux total incident doublé par rapport au cas sans vitre ; puisque par hypothèse (on est dans le vide) le rayonnement thermique est la seule et unique possibilité de refroidissement de la surface, celle-ci sera à une température en Kelvin $2^{1/4} = 1,189$ fois plus grande.

Pour 1360 W/m² tombant sur la surface de la Lune soleil au zénith avec un albédo de 0,1 il vient

$$T(K) = (0,9 \cdot 1360 / \sigma)^{1/4} = 383 \text{ K}$$

et avec la vitre une température (en Kelvin) $2^{1/4} = 1,189$ fois plus forte, soit 456 K et +73°C.

Un calcul correct de la moyenne des températures montre que la moyenne des températures de la face éclairée est 0,8 fois la température sous le soleil au zénith et zéro sur la face non éclairée. Pour la Lune on a -67°C en moyenne à l'équateur et -175°C en moyenne aux pôles, et pas -18°C !

Et une éclipse de soleil sur la Lune amène très rapidement (en vingt minutes) sur la surface poussiéreuse une chute des températures de surface de 150°C .

4. "Atmosphère grise a une couche"

La vitre de la serre est supposée partiellement transparente en infrarouge thermique, absorbant une fraction u de l'émission de la surface ; [L] écrit $T_{\text{surface}} = 303 \text{ K} = 255 \text{ K} / (1 - u/2)^{1/4}$ d'où $u = 0,9967$; sa vitre est donc opaque en infrarouge thermique et il n'y a ni vapeur d'eau ni convection !

5. Effet de serre $\text{GH} = \sigma T_{\text{surface}}^4 - \text{OLR}$, où OLR désigne le rayonnement du globe vers le cosmos

Ce GH est dépourvu de toute espèce de signification en transfert de chaleur puisque, dans la réalité, le rayonnement de la surface absorbé par l'air (par sa vapeur d'eau et par le CO_2) est égal au rayonnement de l'air vers la surface, à quelques W/m^2 près.

L'OLR venant de la troposphère est alimenté par l'évaporation-condensation, par la convection et par le chauffage de la vapeur d'eau par l'infrarouge solaire.

Cette expression GH affirme deux idées absurdes :

(1) que le rayonnement de la surface fait, plus ou moins atténué par les gaz à effet de serre, le rayonnement du globe.

Or l'épaisseur optique de l'air est des dizaines ou des centaines et sa transmission pour une épaisseur optique de 100, en rayonnement diffus vaut $2 E_3(100) \text{ presque } \exp(-100) / (1 + 100 \times 0,65) = 7 \cdot 10^{-46}$!

Le rayonnement thermique de la surface ne fait que $22 \text{ W}/\text{m}^2$ sur les $220 \text{ W}/\text{m}^2$ du rayonnement du globe hors stratosphère ; ces $22 \text{ W}/\text{m}^2$ sont dans la fenêtre de la vapeur d'eau, souvent fermée par des nuages

(2) que GH est une chaleur qui s'ajoute au flux solaire comme pour la vitre de la serre ! De la chaleur produite à partir de rien du tout, sans réaction chimique ou nucléaire !

L'objectif tout à fait frauduleux de cette expression est d'évaluer GH pour les différents « gaz à effet de serre » en supposant une Terre sans vapeur d'eau (!) mais avec du CO_2 , puis la même Terre sans CO_2 mais avec de la vapeur d'eau.

Comme le CO_2 émet surtout aux très basses températures de la basse stratosphère, l'OLR qu'il produit est faible (moins de $15 \text{ W}/\text{m}^2$ à 200 K) alors que la bande $19,5 \text{ THz}$ à 25 THz fait, en surface $67 \text{ W}/\text{m}^2$ « en corps noir » à 288 K d'où un GH_{CO_2} de $67 - 15 = 52 \text{ W}/\text{m}^2$.

Le GH du globe est dit être 390 (surface en corps noir à 15°C) – $240 = 150 \text{ W}/\text{m}^2$

On conclut cet exercice de fiction en expliquant que le CO_2 fait $52 / 150 = 35\%$ de l'effet de serre !

Contre seulement $98 / 150 = 65\%$ pour la vapeur d'eau !

Donc le CO_2 est « prouvé » être très important : CQFD !

Ce calcul absurde a diverses variantes et des extensions à divers gaz traces mineurs tels le méthane, le N_2O , ...

En réalité le CO_2 troposphérique ne rayonne que quelques W/m^2 vers le cosmos (figures 6-3, 6-4, 6-5) sur les $230 \text{ W}/\text{m}^2$ venant de la surface ($22 \text{ W}/\text{m}^2$) et de la vapeur d'eau.

6. Le « piégeage » du rayonnement de la surface

Cette idée est absurde : il n'y a pas de transfert de chaleur par voie radiative à travers l'air qui est opaque en infrarouge thermique. La surface se refroidit par évaporation et convection Le transfert de chaleur entre la surface et l'air est faible ou négligeable car « Rayonné par l'air et absorbé par la surface » est égal à « rayonné par la surface et absorbé par l'air ».

La surface ne se refroidit que pour $22 \text{ W}/\text{m}^2$ en moyenne par rayonnement surface à cosmos dans la fenêtre de semi-transparence de la vapeur d'eau. La fermeture de la fenêtre par doublement des teneurs en CO_2 diminuerait ce flux d'une fraction de W/m^2 , mais serait compensée, comme tous les jours, par plus d'évaporation et de convection qui emporte cette fraction de W/m^2 à l'endroit où ce minime supplément de chaleur sera rayonné vers le cosmos.

7. Le plus haut plus froid, sans distinguer la vapeur d'eau (troposphérique) du dioxyde de carbone

Le *plus haut plus froid* pour le dioxyde de carbone diminuerait le rayonnement de la troposphère vers le cosmos de l'ordre de 2 W/m^2 après un doublement parfois dit « instantané » des teneurs de l'air en CO_2 .

Mais ces auteurs [D&T] ignorent soigneusement la vapeur d'eau, dont le nom même est absolument tabou, et dissimulent le fait qu'elle assure 90% et plus du rayonnement vers le cosmos de ce qui est sous la tropopause, air et surface pris ensemble.

Selon [L] *doublement de CO_2* : $+150 \text{ m}$, -1K , -4 W/m^2 ; en réalité passage de 350 mbar à 250 mbar, (voir tableau 1-B) de $z = 288/6,5 (1 - 0,35^{0,19}) = 8 \text{ km}$ à $z = 288/6,5 (1 - 0,25^{0,19}) = 10,26 \text{ km}$ ($+2,26 \text{ km}$), et de 236 K à 221 K (-15 K) mais sur $1,1 \text{ THz}$ et donc $-1,8 \text{ W/m}^2$.

[L] écrit : *Rayonnement sortant plus faible. $T(z)$ augmente : retour à l'équilibre* ; en réalité $T(z)$ ne change pas et c'est la teneur de l'air en vapeur d'eau autour de 9 km qui diminue légèrement d'où un rayonnement *plus bas plus chaud* sur 40 THz .

8. Le contre-rayonnement et la fermeture de la fenêtre par plus de CO_2

Il est prétendu qu'il y aura plus de « contre rayonnement » ou « *back-radiation* » de l'air vers la surface et que donc la surface va chauffer. C'est absurde parce que le bilan net entre air et surface reste nul pratiquement quelle que soit la fermeture de la fenêtre :

« **Rayonné par l'air et absorbé par la surface** » reste égal à « **rayonné par la surface et absorbé par l'air** ».

9. Les équations des photosphères des étoiles

La photosphère des étoiles a une température $T(t)$ qui croît avec l'épaisseur optique t comptée depuis sa surface, selon des relations $T^4(t) = T_{\text{rayonnement}}^4 (3/4) (t + q(t))^{76}$ ou $T_{\text{rayonnement}}^4 (0,75 t + 0,5)$.

Application (inepte) à l'atmosphère terrestre : $T_{\text{rayonnement}} = 255 \text{ K}$, $T_{\text{surface}} = 288 \text{ K}$ donc

$$t = (4/3) (288 / 255)^4 - (2/3) = 1,5 \text{ valeur sans rapport aucun avec celles de la figure 6-1.}$$

L'argument « massue » est ensuite que si t augmente à cause de l'augmentation des teneurs de l'air en CO_2 alors $T(t)$ va augmenter ...

Si dans les étoiles à $10\,000 \text{ K}$ le transfert de chaleur se fait par rayonnement, dans la troposphère terrestre à 250 K il se fait par évaporation-condensation et convection.

10- L'équilibre radiatif

Venant aussi de la physique des étoiles, la notion d'*équilibre radiatif* (pas de chauffage ni de refroidissement des couches de l'air ... puisque la photosphère de l'*étoile* transporte un flux produit dans le cœur de l'*étoile*) prétend que chaque couche de l'air, même la plus haute absorbe autant que ce qu'elle rayonne.

Posons $b(t, \nu) = \pi B(\nu, T(t))$; il est simple de voir ⁷⁷ que le flux montant est $b_0 + b_0 t/2$, le flux descendant $b_0 t/2$ où b_0 est le flux rayonné vers le cosmos en haut de l'air à $t=0$, et $b(t) = (b_0/2) (1 + t)$ décrit la température de l'air en fonction de l'épaisseur optique t .

⁷⁶ La fonction de Hopf $q(t)$ tend vers $2/3$... sous certaines hypothèses, quand t est grand.

⁷⁷ Justification :

notations : flux radiatifs montant et descendant $f_u = f_{\text{up}}$, $f_d = f_{\text{down}}$, $b(t, \nu) = \pi B(\nu, T(t))$, B fonction de Planck, t épaisseur optique valant t_{max} au sol, t_0 à la tropopause et $t=0$ au sommet de l'atmosphère, T température de l'air, ρ et C_p masse volumique et chaleur massique de l'air, θ le temps.

Comme $d(f_u - f_d)/dz = \rho C_p dT/d\theta$, une température stationnaire dans l'atmosphère $dT/d\theta = 0$ impose à toute altitude z :

$$d(f_u - f_d)/dz = 0, \text{ donc } \mathbf{f_u(z) - f_d(z) = b_0 = \text{constante} = \text{flux rayonné vers le cosmos.}}$$

Et en t , épaisseur optique comptée depuis le sommet de l'atmosphère, $\mathbf{f_u(t) - f_d(t) = b_0}$ pour toute valeur de t .

(équations 1) $df_u/dt = f_u - b(t)$; $df_d/dt = -f_d + b(t)$ expriment que chaque couche rayonne autant que ce qu'elle absorbe;

$$\text{(équation 2) } d(f_u + f_d)/dt = (f_u - b(t)) + (-f_d + b(t)) = f_u(t) - f_d(t) = b_0 \text{ puisque } f_u(t) - f_d(t) = b_0$$

Application numérique :

$b_0 = 240 \text{ W/m}^2$, $f_u(0) = 240 \text{ W/m}^2 = b_0$ et pour $t_{\max} = 2$, $f_u(t_{\max}) = 240 + 240 (2/2) = 480 \text{ W/m}^2$ donc surface (si corps noir) à 303,3 K alors que $b(t_{\max}) = 120 (1 + 2) = 360 \text{ W/m}^2$ donc l'air est à 282 K

Pour Tapio Schneider⁷⁸ le sol serait à 297 K, l'air proche du sol à 285 K donc un OLR de 268,4 W/m² et une épaisseur optique t_{\max} de 1,785 !

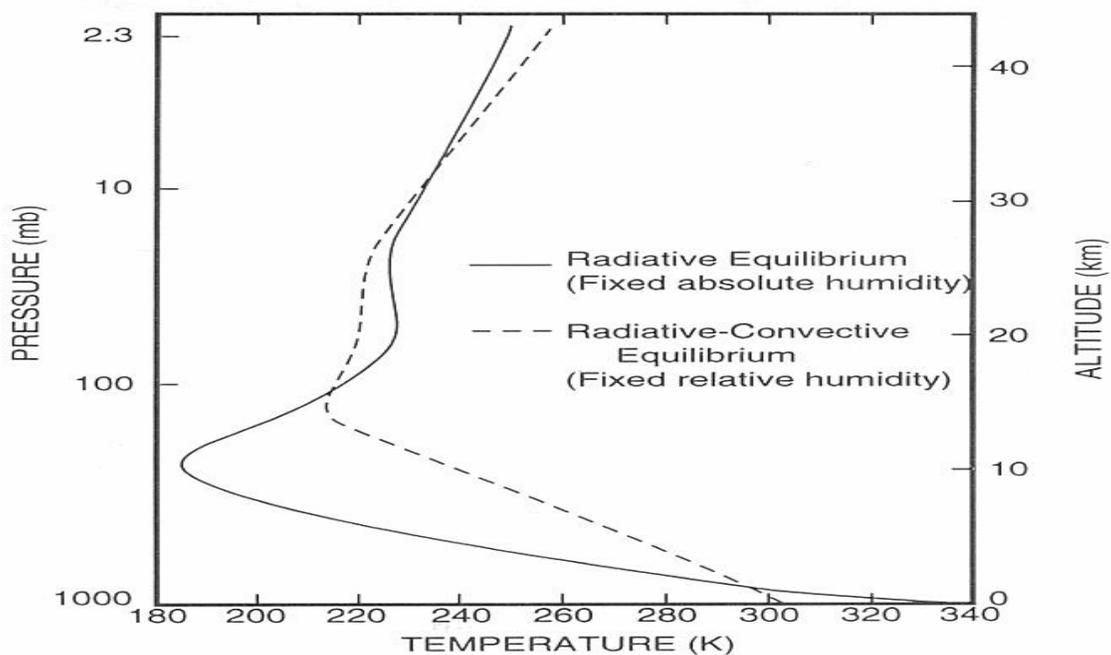
Pour éviter cette grosse discontinuité des températures, [M1] a inventé que la convection effacerait cette bizarrerie et qu'il suffisait de poser que le gradient ne devait jamais être plus fort (en valeur absolue) que 6,5 K/km.

Ces délires qui ignorent l'existence de la vapeur d'eau et l'épaisseur optique de l'atmosphère vue à la figure 6-1 sont enseignés comme donnant de bonnes idées de l'effet-de-serre !

[L1, slide 35] dit une épaisseur optique t_{\max} de 4 sur Terre (avec $T_{\text{surface}} = 336 \text{ K}$ et un OLR en corps noir à 215 K) et de 80 sur Vénus.

La figure 6-1 a montré l'épaisseur optique de l'atmosphère de la Terre par ciel clair, que les nuages accroissent fortement : ce n'est pas 4 !

Figure II-10-1 Allure des profils de température pour le prétendu « équilibre radiatif » et ses variantes



donc (équation 3) $d(f_u - f_d)/dt = db_0/dt = 0$;

Or, par (équations 1), $d(f_u - f_d)/dt = (f_u + f_d) - 2b(t)$ et par (équation 3) $d(f_u - f_d)/dt = 0$, donc $f_u(t) + f_d(t) = 2b(t)$

En dérivant par rapport à t : $d(f_u + f_d)/dt = 2 db(t)/dt$ et par (équation 2) $2 db(t)/dt = b_0$, donc

$$b(t) = b_0 t/2 + \text{cte1} \quad \text{où cte1 désigne une constante à trouver.}$$

$df_d/dt + f_d = b_0 t/2 + \text{cte1}$ a pour solution $(b_0/2)(t-1) + \text{cte1} + \text{cte2} e^{-t}$ où cte2 est une seconde constante.

$f_d(0) = 0$ impose $\text{cte1} + \text{cte2} = b_0/2$, d'où $f_d(t) = (b_0/2)(t-1) + \text{cte1} + (b_0/2 - \text{cte1}) e^{-t}$;

par (équation 2) $f_u(t) = b_0 + f_d(t) = (b_0/2)(t+1) + \text{cte1} + (b_0/2 - \text{cte1}) e^{-t}$

Enfin $b(t) = (f_u + f_d)/2 = (b_0/2)(t + e^{-t}) + \text{cte1}(1 - e^{-t})$; la relation montrée précédemment $b(t) = b_0 t/2 + \text{cte1}$ impose alors que $\text{cte1} = b_0/2$ pour éliminer le terme e^{-t} .

$$b(t) = (b_0/2)(1 + t) \quad \text{et on a bien } f_u(t) - f_d(t) = b_0 \text{ donc } f_u(t) = (b_0/2)(t+2) = b_0 + (b_0/2)t \text{ et } f_d(t) = (b_0/2)t$$

En surface $f_u(t_{\max}) = (b_0/2)t_{\max} + b_0$ alors que la température de l'air est telle que $b(t_{\max}) = (b_0/2)t_{\max} + (b_0/2)$ soit $(b_0/2)$ de moins. L'air serait donc bien moins chaud que la surface !

⁷⁸ *The Thermal Stratification of the Extratropical Troposphere* (chapitre 3 de *The global Circulation of the Atmosphere* Princeton University Press 2007 385 pages) figure 3-2 page 49,

11-Température potentielle

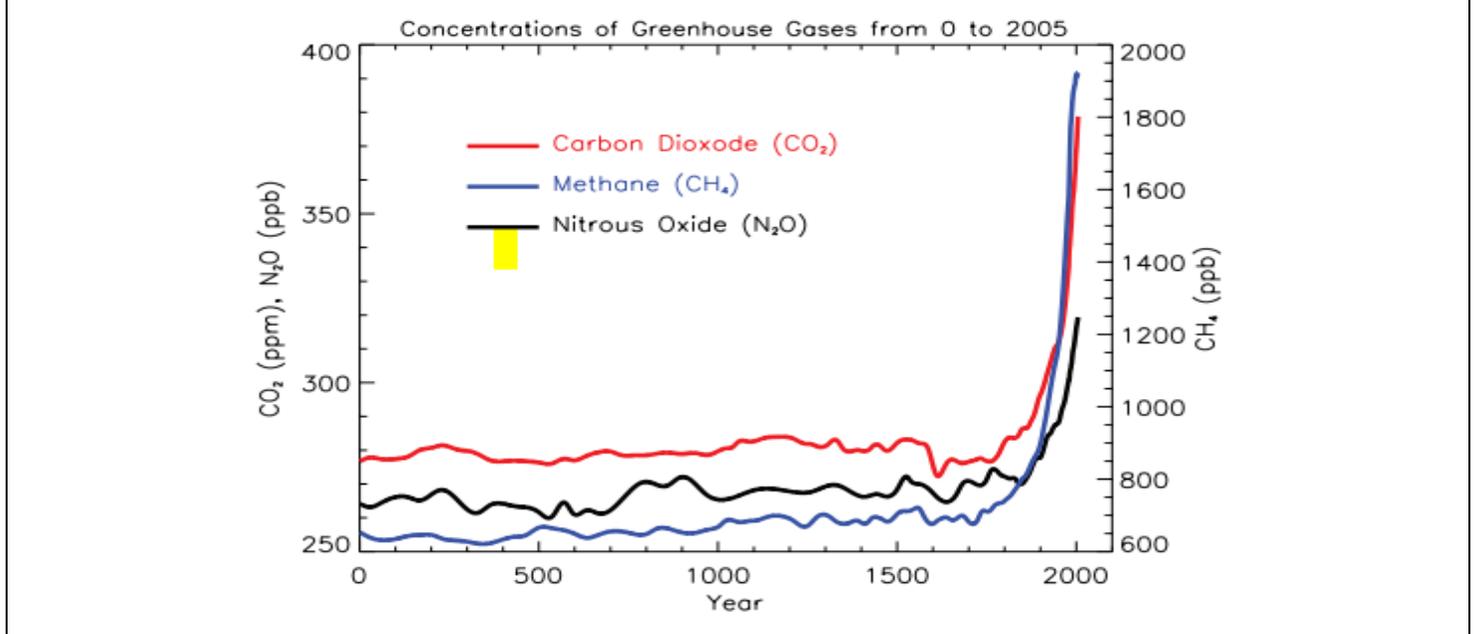
Pour ajouter de la confusion est souvent invoquée une température potentielle qui serait la température effective ramenée en surface avec un gradient de 9,8 K/km.

On veut là encore ignorer la vapeur d'eau contenue dans l'air qui absorbe l'infrarouge solaire ce qui explique la moitié du C_h du paragraphe I-1-3.

12-Concentration en gaz « à effet de serre »

[L1] affirme « *l'origine anthropique de ces variations ne fait pas de doute* » avec le graphique 12-1 ci-dessous.

Figure II-12-1



Mais concaténer des mesures instantanées réalisées par spectroscopie infrarouge depuis 1958 et des évaluations de la teneur en gaz trace dans des bulles recrées par éclatement de clathrates dans des sections droites de carottes de glace relève de l'escroquerie.⁷⁹

En effet le mécanisme de fermeture des pores entre cristaux de glace dans un névé, pores qui laissent des chemins de diffusion des molécules entre la surface et la section droite analysée, 120 mètres plus bas (compte tenu de la faible masse volumique de la neige, 200 kg/m³ et du névé, 600 kg/m³, ça fait 60 mètres en équivalent eau et 6000 ans pour des précipitations de 10 mm/an) implique un moyennage des teneurs en surface sur des siècles ou des millénaires, avec, de plus une absorption préférentielle du CO₂ par toute zone du névé où il y aurait de l'eau liquide surfondue.

Des valeurs de 350 ppm et plus ont été déterminées par des techniques telles que l'examen des stomates de feuilles retrouvées dans des tourbières ; des dosages du CO₂ de l'air faits par des méthodes de titrage ou dosage chimique employées en routine depuis 1812, date du premier titrage, jusque dans les années 1960 donnent aussi des valeurs vers 400 ppm.

Les bulles d'une même section droite qui se reforment à la remontée de la carotte de glace, lorsque la pression passe par exemple de 200 atmosphère à 2200 m de profondeur à une atmosphère en surface, ont vu leur dernier chemin libre avec la surface se fermer à des moments fort différents répartis sur des millénaires ; ce lissage temporel fait disparaître l'information nécessaire à la reconstitution des cycles du carbone pilotés par les températures de surface de la zone de dégazage intertropicale (figure 7-6 et § 7-5) cycles qui induisent des fluctuations de l'ordre du siècle.

La températures à l'époque du dépôt de la neige sont estimées à partir des teneurs en deutérium (hydrogène lourd à un proton et un neutron, qui s'évapore plus d'une mer plus chaude) et en oxygène 18 (en période froide

⁷⁹ <https://wattsupwiththat.com/2017/03/28/breaking-hockey-sticks-antarctic-ice-core-edition/>

les molécules H₂O plus lourdes précipitent plus avant d'arriver sur le glacier et la teneur des glaces en ¹⁸O est diminuée). Les rapports en nombre d'atomes des isotopes de l'argon et de l'azote (⁴⁰Ar/³⁶Ar) et (¹⁵N/¹⁴N) ont permis d'estimer les températures et montré sur les carottes de Vostok que les teneurs des inclusions de CO₂ suivaient de quelques 800 ans les températures.

13- Affirmations de IPCC-GIEC relatives au cycle du carbone

page 10 § B.5, second paragraphe : Entre 1750 et 2011, les émissions de CO₂ dues à l'utilisation de combustibles fossiles et à la production de ciment ont libéré 375 [345 à 405] Gt-C dans l'atmosphère et l'on estime que la déforestation et d'autres changements d'utilisation des sols ont relâché 180 [100 à 260] GtC.

Cela se traduit par des émissions cumulées de 555 [470 à 640] Gt-C

page 10 § B.5, troisième paragraphe : Parmi ces émissions anthropiques cumulées de CO₂, 240 [230 à 250] Gt-C se sont accumulées dans l'atmosphère, 155 [125 à 185] Gt-C ont été absorbées par les océans et 160 [70 à 240] Gt-C se sont accumulées dans les écosystèmes terrestres naturels (c'est-à-dire le puits continental résiduel, hors usage de sols, intégré dans le temps); {figure RT.4, 3.8, 6.3}

La durée de vie de cinq ans du dioxyde de carbone dans l'air fait qu'il n'y a que 6% du dioxyde de carbone qui puisse être attribué aux combustibles fossiles, comme vu au §7-5, en particulier sur les rapports des isotopes stables du carbone. Selon IPCC-GIEC :

240 Gt-C = (émissions anthropiques de tous types accumulés dans l'atmosphère),

375 Gt-C = (combustibles fossiles cumulés libérés dans l'atmosphère)

555 Gt-C = (émissions cumulées de tous types, avec la « déforestation »),

donc $240 (375 / 555) = 162$ Gt-C est le cumul dans l'air de ce qui vient des combustibles fossiles, soit 76 ppm ou encore 19,4% des 392 ppm de 2011, et alors le rapport isotopique de l'air serait :

$$19,4\% (-30 \text{ pm}) + 80,6\% (-7 \text{ pm}) = -11,5 \text{ pm}$$

ce qui est très différent des -8,3 pm observés de la figure 7-8.

page 9 § B.5 dernier alinéa : Les taux moyens d'augmentation des concentrations atmosphériques [du CO₂] au siècle dernier sont, avec un très haut degré de confiance, sans précédent depuis les 22 000 dernières années ... Les concentrations de CO₂, CH₄ et N₂O dépassent désormais fortement les plus hautes valeurs de concentrations enregistrées dans les carottes de glace pour les 800 000 dernières années

Comme vu ci-dessus les lissages temporels sur des millénaires dans les carottes de glace n'autorisent pas ces affirmations.

14- L'isotope 14 du carbone : ^{14}C

Le $\Delta^{14}\text{C}$ a servi, dès le premier rapport de 1965 écrit par Roger Revelle⁸⁰ à essayer de faire croire que la croissance du dioxyde de carbone dans l'air observée depuis 1957-1958 venait des combustibles fossiles, dépourvus de ^{14}C .

Comme les énormes perturbations des teneurs en ^{14}C de l'air dues aux explosions thermonucléaires faites depuis 1952, étaient, en 1965 (figure 14-1 ci-dessous), parfaitement connues, l'intention dolosive est prouvée. Curieusement J. Jouzel a en 2017 repris cet argument du ^{14}C [J].

14-1 Rappels :

Les rayons cosmiques sont des particules de très haute énergie, émis par des supernovas et de vitesses proches de celles de la lumière ; 99% sont des noyaux atomiques, 90% de protons et 9% des particules alpha. Ces particules réagissent avec les atomes de l'air et les neutrons produits transforment les atomes d'azote ^{14}N en ^{14}C radioactif.

Les productions seraient de **2,1 10^{26} atomes de ^{14}C** par an par les rayons cosmiques (soit 4,9 kg de carbone 14 par an)⁸¹ surtout aux hautes latitudes, avec un **cumul** (en 2009) de 12 10^{26} atomes venant de l'industrie et de **620 10^{26} atomes** produits par les **explosions thermonucléaires** dans l'atmosphère de 1952 à 1974 (France) et 1980 (Chine). La Tsar Bomba du 30 octobre 1961 (à 73°32'N, 54°42'E en Nouvelle Zemble) a provoqué un panache montant à 64 km et permis des études de propagation du ^{14}C qui met quelques années à retomber de la stratosphère ; les pics de concentration vus en Europe ont, 1,6 an plus tard, été observés en Nouvelle Zélande.

Les mesures du ^{14}C contenu dans des échantillons de matière organique, directement par spectrométrie de masse ou indirectement par comptage des désintégrations ont permis de faire correspondre aux teneurs en ^{14}C des dates de fin de vie d'organismes vivants, car la fin de vie arrête l'assimilation de carbone ; la demi-vie de 5730 ans (+ ou - 40 ans) est celle de la désintégration du ^{14}C en ^{14}N (avec émission d'un électron et d'un antineutrino) et la teneur résiduelle en ^{14}C décroît en $2^{-(t/5730)}$ ou $\exp[-t/8267]$, d'où un temps écoulé an années depuis la fin de vie en

$$t(\text{ans}) = 8267 \ln[(\text{teneur initiale}) / (\text{teneur mesurée en } ^{14}\text{C})] ;$$

les dates trouvées sont calibrées par rapport au présent à partir de cernes d'arbres datés par comptage des cernes ; les variations de la production de ^{14}C imposent des corrections⁸² significatives d'un ou deux millénaires vers -10 000.

En effet le champ magnétique solaire, plus ou moins fort, module le flux de rayons cosmiques et la production de ^{14}C ; les cycles solaires se retrouvent dans ces corrections à apporter lors de la conversion en dates de teneurs en ^{14}C , dont les cycles de de Vries de l'ordre de 210 ans que la figure 4-1 montre contribuer aux cycles climatiques naturels.

Des événements solaires ont en -5480, en 774-775 et en 993-994 amené pendant quelques semestres des taux de production de ^{14}C (et de ^{10}Be et de ^{36}Cl) très supérieurs à celui vu avant ou après ces événements⁸³.

⁸⁰ <http://climateandcapitalism.com/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/Presidents-Advisory-Report-on-warming-1965.pdf>

« Carbon dioxide from fossil fuels the invisible pollutant » publié en 1965 par la présidence des Etats-Unis

Ce rapport « scientifique » affirme

(1) que 50% des émissions anthropiques restent perpétuellement dans l'air (parce que, dit-il, n'y a pas d'échange de carbone entre l'océan de surface et l'océan profond)

(2) que le dioxyde de carbone est « comme la vitre de la serre » et que le laboratoire de la météorologie américaine va bientôt fournir une formulation « scientifique » de ces phénomènes radiatifs, et

(3) « que le changement climatique amené par plus de CO_2 dans l'air pourrait avoir des effets nuisibles ».

Ces inepties sont restées le fondement de la religion du réchauffement climatique et figurent dans tous les rapports du IPCC-GIEC depuis 1990.

⁸¹ 2,32 kg-C pour 10^{26} atomes

⁸² Corrections souvent associées à celles imposés par la conservation d'une formule « traditionnelle » des années 1950, $t(\text{ans}) = -8033 \ln [A_{\text{sn}}/A_{\text{on}}]$ qui donne des années « Before Present non calibré ». 8033 ans a été corrigé en 8267 ans.

⁸³ https://en.wikipedia.org/wiki/774%E2%80%9393775_carbon-14_spike

La quantité de ^{14}C est transcrite en millième par $\Delta^{14}\text{C} = 1000 \left(\frac{A_S}{A_{BS}} [1 - 2(25 + \delta^{13}\text{C}) 1000] - 1 \right)$, où A_S est l'activité spécifique du radiocarbone en désintégrations par seconde (ou Becquerel) par gramme de carbone de l'échantillon, A_{BS} est l'activité spécifique d'un échantillon servant de standard (95% de l'activité de 0,238 Bq/g d'un standard OxA-I), $\delta^{13}\text{C}$ est la signature de l'échantillon par rapport au bélemnite de Pee Dee.

Figure II -14-1 Evolution du $\Delta^{14}\text{C}$ de l'air pour diverses zones des hémisphères nord (NH) et sud (SH)

Source : Quan Hua, Mike Barbetti, Andrzej Z Rakowski *Atmospheric Radiocarbon for the Period 1950–2010*, <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/issue/view/1024>

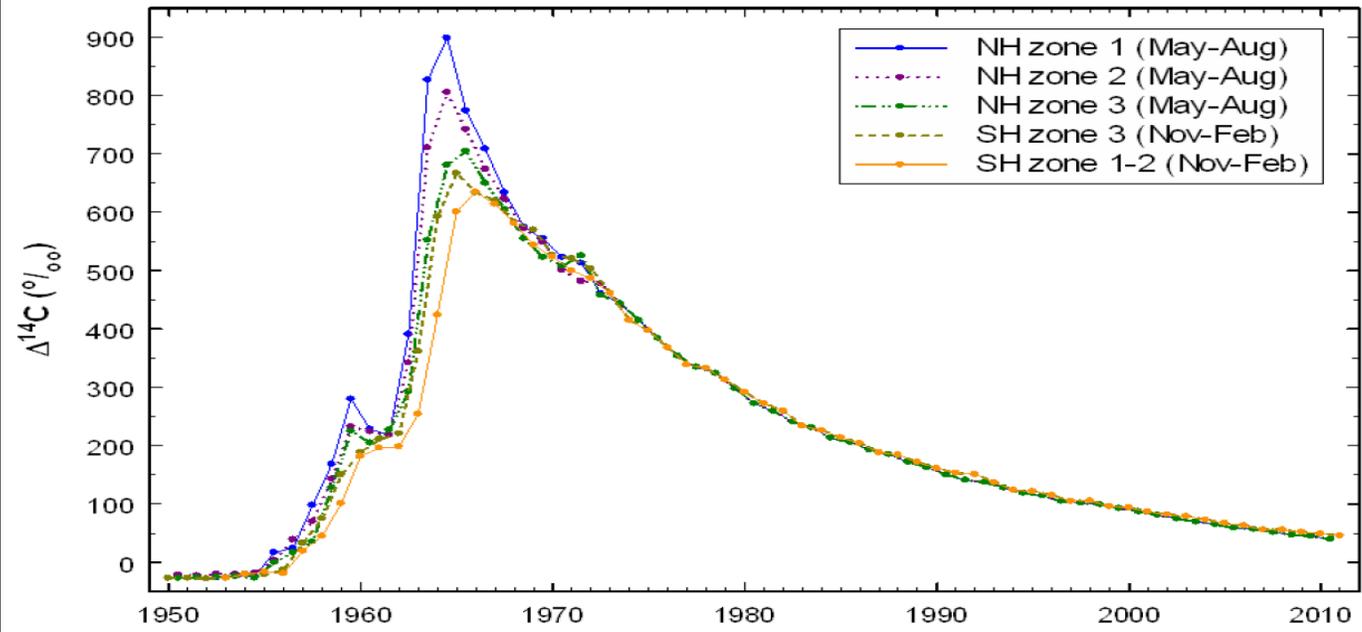
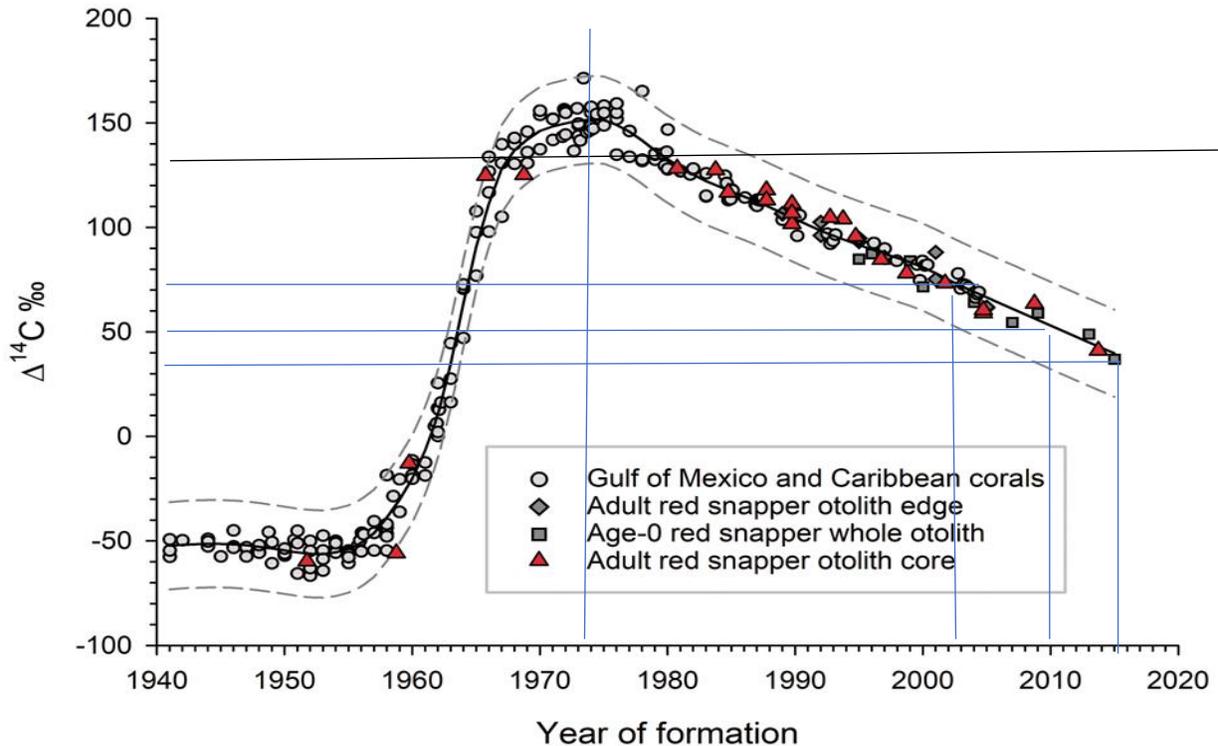


Figure II -14-2 Evolution du $\Delta^{14}\text{C}$ d'otolithes de poissons vivaneaux rouges et de coraux

<https://academic.oup.com/icesjms/advance-article/doi/10.1093/icesjms/fsy043/4992258> ; décroissance en $\exp(-t / 29 \text{ ans})$; noter un décalage de quelques années entre la croissance dans l'air du ^{14}C (figure 14-1) et dans l'océan de surface

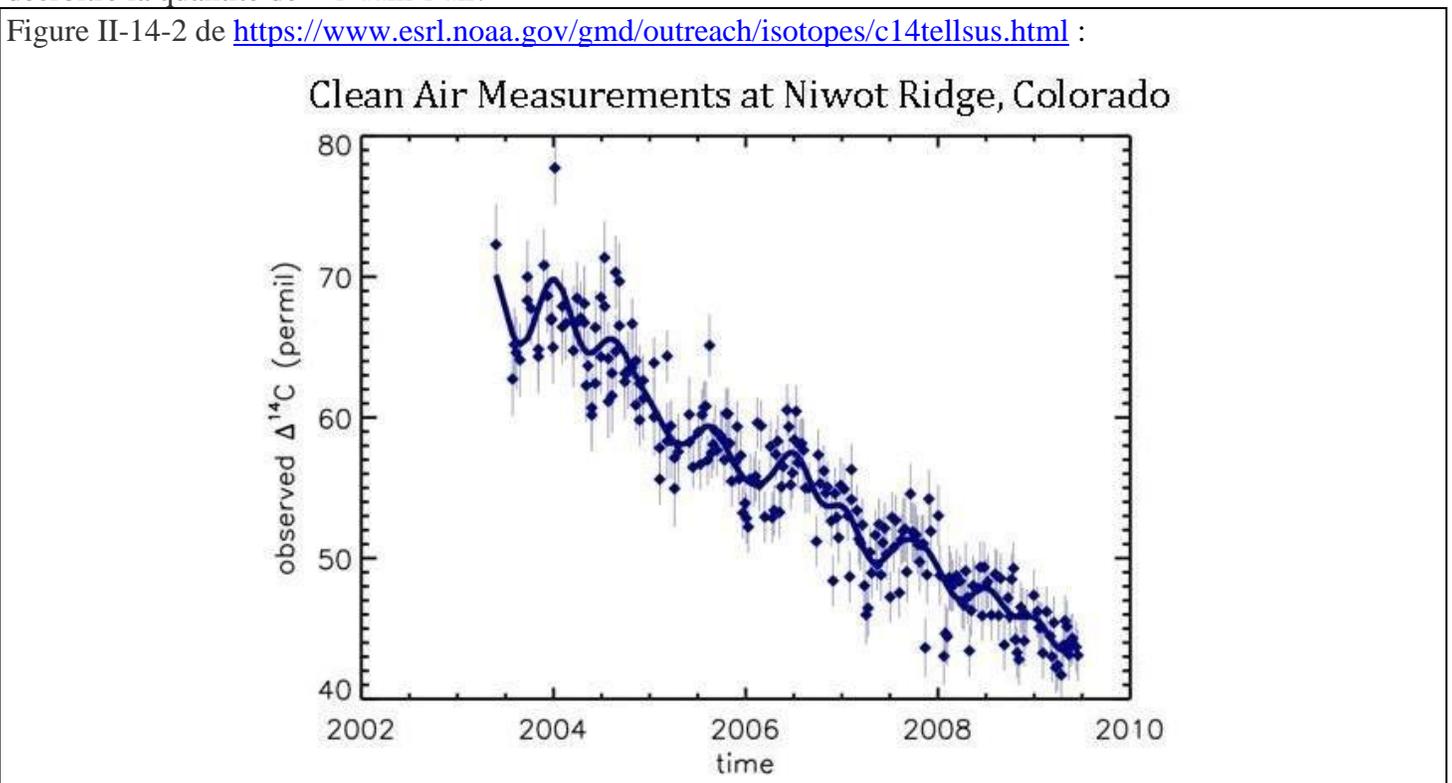


14-2 Affirmations

Voici un premier exemple (source : la météo américaine <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/isotopes/c14tellsus.html>) :
 “ ^{14}C is the isotope NOAA scientists use to understand fossil fuel CO_2 emissions. You can see how $\Delta^{14}\text{C}$ values have decreased since 2003 in the background air at Niwot Ridge: We can precisely calculate how much the $\Delta^{14}\text{C}$ value in the atmosphere goes down when fossil fuel CO_2 is added. It turns out to be about a 3‰ decrease in $\Delta^{14}\text{C}$ for every 1 ppm of fossil fuel CO_2 added to the atmosphere ... However, over the land, there is another effect that we think about – carbon released from plants and soils. Carbon dioxide taken up from the atmosphere by plants is eventually **released back to the atmosphere by respiration, but only after a few years (typically 10-20 years)**. This means that a very small amount of the ^{14}C has decayed away, and the $\Delta^{14}\text{C}$ value of the CO_2 from **respiration** (when organisms use energy and release carbon dioxide as a byproduct) is different than the atmosphere. Scientists have calculated exactly how much this changes $\Delta^{14}\text{C}$ in the atmosphere, and it turns out to be not much – to be sure though, when scientists use $\Delta^{14}\text{C}$ measurements to calculate how much fossil fuel CO_2 has been added to the atmosphere, they make a correction for this respiration effect.”

La figure illustrant ce paragraphe (figure 14-3) est supposée montrer l’effet des émissions anthropiques qui fait décroître la quantité de ^{14}C dans l’air.

Figure II-14-2 de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/isotopes/c14tellsus.html> :



14-3 Discussion de l’affirmation précédente

La diminution du $\Delta^{14}\text{C}$ de 30 pour mille entre 2003 et 2010 de la figure 14-2 devrait donc correspondre à +10 ppm de carbone « fossile » dans l’air, alors que le calcul avec une durée de vie de cinq ans donne +3,5 ppm, de 16,9 ppm en 2003 à 20,3 ppm en 2010.

Ce que l’on voit en fait est le transfert de l’air vers les océans et la végétation et les sols du ^{14}C avec une décroissance en $\exp(-t/17 \text{ ans})$ observée en divers endroits dans l’air^{84, 85}.

L’injection dans la stratosphère, en peu d’années de $620 \times 2,32 \text{ kg} = \mathbf{1438 \text{ kg de } ^{14}\text{C}}$ en sus des $\mathbf{4,8 \text{ kg/an}}$ produits par les rayons cosmiques a alimenté une augmentation du ^{14}C troposphérique puis une modification du $\Delta^{14}\text{C}$ de la végétation et des sols et des océans de surface froide. Quelques années plus tard les sols et les océans de surface régurgitent vers l’air du ^{14}C qui contribue à maintenir le ^{14}C de l’air à un niveau élevé, en parallèle

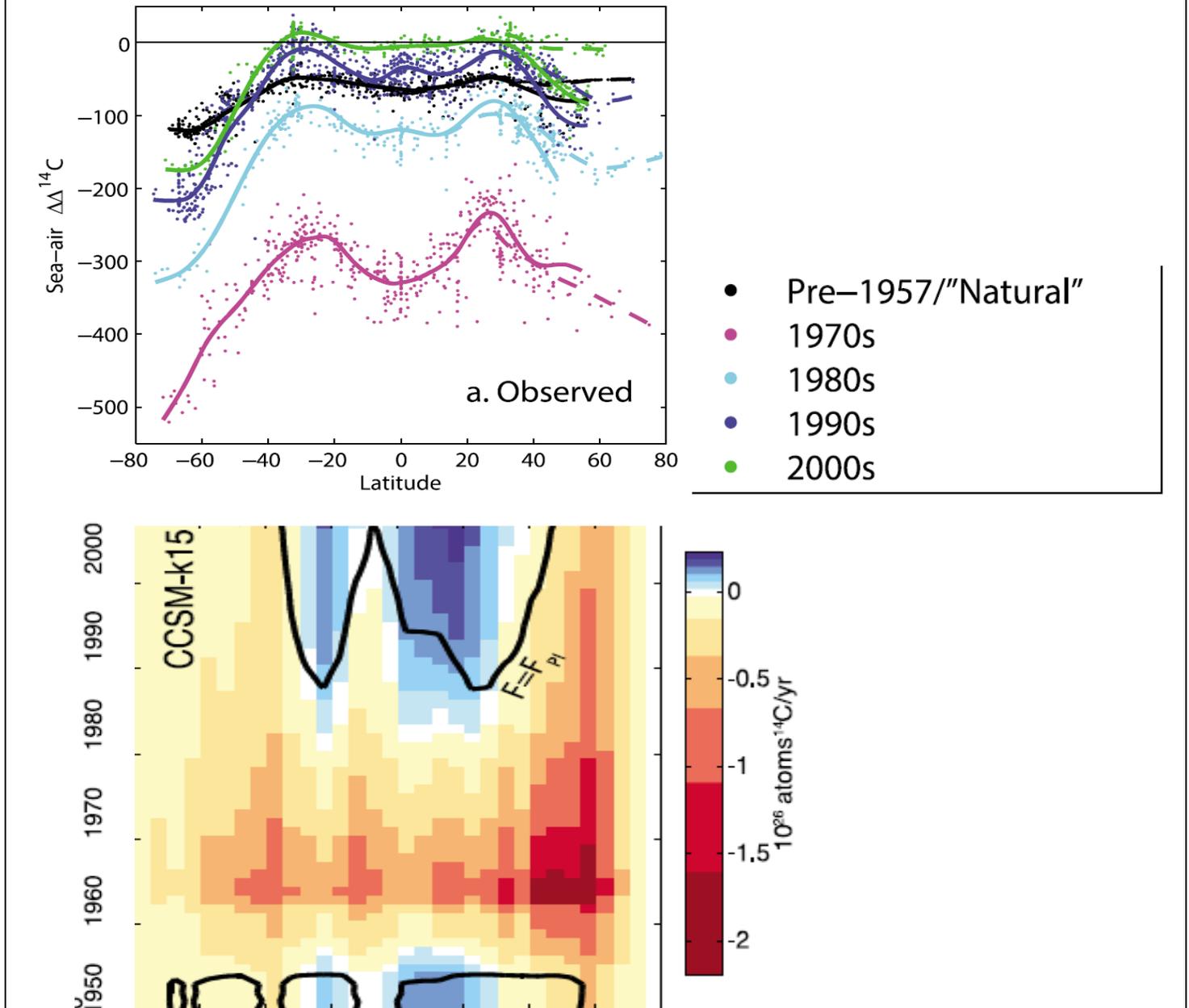
⁸⁴ Munshi, Jamal, Dilution of Atmospheric Radiocarbon CO_2 by Fossil Fuel Emissions (April 30, 2016). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2770539> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2770539>

⁸⁵ <https://wattsupwiththat.com/2013/07/01/the-bombtest-curve-and-its-implications-for-atmospheric-carbon-dioxide-residency-time/>

avec la continuation du flux de la stratosphère vers la troposphère ; le $\Delta^{14}\text{C}$ de l'air a été divisé par six entre 1970 et 2000.

Figure 14-3 Source : Graven et al. 2012⁸⁶ Observations de la **différence des teneurs** en ^{14}C de l'océan de surface (les premiers 50 m) et de l'air, en fonction du temps et de la latitude. Le « naturel » est obtenu en soustrayant un $\Delta^{14}\text{C}$ de 0 pour le préindustriel. Noter l'homogénéisation rapide de la zone d'upwelling (ou obduction) intertropicale (où le carbone venant de l'air est maintenu en surface par la remontée des eaux et aussi dans la zone des gyres subtropicaux où l'eau de surface reste plusieurs mois exposée à l'air sans échange notable avec l'océan plus profond ; les zones de subsidence aux latitudes de plus de 40° montrent un équilibrage moins rapide. Cette figure corrobore les indications du § 7-4.

En dessous résultat d'un calcul : depuis les années 1990 l'océan entre 30°S et 30°N relâche du ^{14}C à l'air, CO_2 absorbé depuis les années 1960, surtout à 60°N et vers 50°S dans les zones de subduction du carbone.



Le dégazage du $^{12}\text{CO}_2$ léger est, à température donnée, plus intense que celui du $^{14}\text{CO}_2$ que les figures 14-3 montrent s'accumuler en surface autour des tropiques.

⁸⁶ Graven, H. D., N. Gruber, R. Key, S. Khatiwala, and X. Giraud (2012), *Changing controls on oceanic radiocarbon: New insights on shallow-to-deep ocean exchange and anthropogenic CO_2 uptake*, J. Geophys. Res., 117, C10005, doi:10.1029/2012JC008074

14-4 Les arguments de Revelle dans son texte de 1965

Voici un extrait du texte fondateur du réchauffement climatique au dioxyde de carbone, pp.118 à 130 : « *La mesure de l'effet Suess [des cernes d'arbres des années 1950 auraient moins de ^{14}C que des cernes datant du XIX^{ème} siècle, ce, prétendument à cause des combustibles fossiles] est pleine de difficultés parce que le rapport ^{14}C sur ($^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}$) varie de 1% à 2% de siècle en siècle selon l'activité des taches solaires.* [souligné par le rédacteur, pas par Revelle qui était donc conscient de l'absurdité de son argumentation] ... *Prenons l'effet Suess entre 1% et 2% sur la période 1860-1950 où le cumul des émissions est égal à 10% du CO_2 de l'air [64 Gt-C cumulés en 1950, 100,5 G-C en 1965] nous pouvons calculer la taille des réservoirs océans et biosphère qui ont absorbé une partie de ce CO_2 ... le calcul montre que si la couche de l'océan qui échange avec l'air est épaisse de quelques centaines de mètres, alors la quantité de carbone circulant [échangeable] dans la biosphère est moindre que ou presque égale à ce qu'il y a dans l'air ... en fait, on n'a pas vu de croissance de la biosphère ... calculs détaillés : à cause du mécanisme tampon de l'eau de mer (Bolin & Eriksson, 1958)*

$dp_{\text{CO}_2\text{eau}} / p_{\text{CO}_2\text{eau}} = 12.5 dp_{\text{CO}_2\text{air}} / p_{\text{CO}_2\text{air}}$... en prenant un effet Suess de 2%, les combustibles fossiles comme seule source de carbone supplémentaire, et une taille « effective » de la biosphère de 2,5 à 0,5 fois le CO_2 atmosphérique, le réservoir océanique va de 2,6% à 6% du volume des océans soit 100 m à 240 sous la surface ... ». Une section II "Detailed computations" montre comment le rôle posé a priori des combustibles fossiles se retrouve dans la conclusion, après deux pages de calculs.

14-5 Discussion des arguments de Revelle (1965) qui précèdent

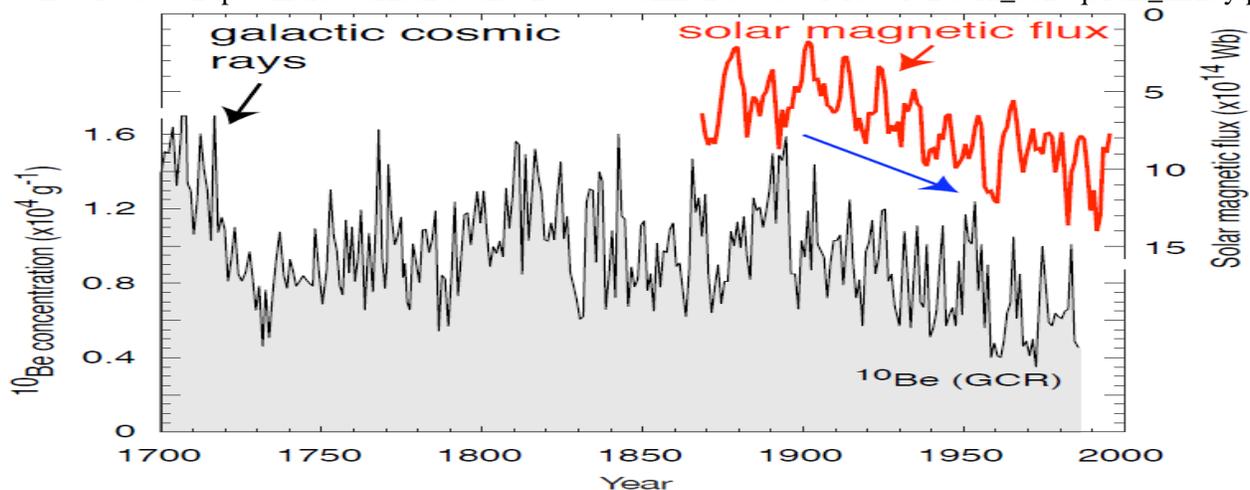
Ce raisonnement circulaire montre, une fois de plus, qu'il s'agit bien d'une fraude réfléchie.

Raisonnement circulaire puisqu'il part d'une estimation fort incertaine, à partir de mesures de ^{14}C de deux ou trois arbres sur 1860-1950, l'attribue aux combustibles fossiles tout en reconnaissant qu'il s'agit en réalité d'effet des variations du champ magnétique solaire, et en tire la taille des réservoirs de carbone (« *taille effective de la biosphère* », « *réservoir océanique* ») et les flux qu'ils échangent de façon à trouver que la moitié en gros du dioxyde de carbone des combustibles fossiles reste perpétuellement dans l'air, comme supposé initialement avec cette invocation du prétendu « effet Suess » fabriqué par Revelle lui-même dans un article de 1956.

Pour que restent dans l'air la moitié des émissions anthropiques il lui faut :

- mettre hors circuit l'océan avec le « *mécanisme tampon de Bolin* » $dp_{\text{CO}_2\text{eau}} / p_{\text{CO}_2\text{eau}} = 12.5 dp_{\text{CO}_2\text{air}} / p_{\text{CO}_2\text{air}}$ qui existe bien dans une bouteille fermée avec un fond d'eau de mer, à une seule température et de l'air au-dessus, mais qui n'a pas de sens pour le globe (§ 7-4) parce que l'air est en contact avec des océans entre $-1,5^\circ\text{C}$ et $+33^\circ\text{C}$, dont les pressions partielles p_{CO_2} océan varient d'un facteur presque 4 entre les tropiques et les hautes latitudes,
- ignorer (« *on n'a pas vu de croissance de la biosphère* ») que l'absorption du dioxyde de carbone croît par la végétation comme la pression de CO_2 dans l'air comme vu au § 7-5.

Figure 14-4 Flux de ^{10}Be produit par les rayons cosmiques, comme le ^{14}C ; noter l'échelle de droite
Source : slide 19 de https://indico.cern.ch/event/52576/attachments/970791/1379192/cern_colloquium_kirkby.pdf



Les flux de rayons cosmiques qui produisent ^{10}Be et ^{14}C varient significativement en raison inverse du champ magnétique solaire que la figure 14-4 montre avoir beaucoup crû de 1870 à 1950.

14-6

14-7 Autres remarques sur le texte de Revelle (1965) et les arguments de ses continuateurs

Sont annoncés :

- la fusion de la calotte antarctique : *Nous pouvons arriver à une durée plus courte [400 ans] pour la fusion en supposant un changement du bilan radiatif de la Terre dont une partie irait faire fondre la glace : un changement de 2% qui peut arriver en l'an 2000, dû à +25% sur le CO_2 de l'air ⁸⁷ ajouterait, $2 \cdot 10^{22}$ calories par an [84 ZJ /an ⁸⁸]*
- *une montée du niveau des mers de 40 pieds [+12,2 m] par siècle*
- *le changement du volume des eaux des mers d'environ 5% depuis le dernier maximum glaciaire ⁸⁹ ... changerait le volume de dioxyde de carbone de l'air de 10% à 15% ...*

En l'an 2000 l'accroissement du CO_2 atmosphérique sera de près de 25% [en réalité + 49 ppm /320 ppm = +15% par rapport à 1965] peut produire des changements mesurables et peut-être marqués du climat et presque certainement causera des changements significatifs de la température et d'autres propriétés de la stratosphère ⁹⁰.

... le progrès de la modélisation mathématique avec des très grands ordinateurs permettra dans les deux ou trois prochaines années de faire des prédictions utiles.

Toutes des fables catastrophistes sont **fondées seulement** sur l'attribution aux combustibles fossiles de la décroissance de la quantité de ^{14}C dans les cernes de trois arbres sur 1860-1950 !

Et sur l'emploi inepte de la relation tampon

$$dp_{\text{CO}_2\text{eau}} / p_{\text{CO}_2\text{eau}} = 12.5 dp_{\text{CO}_2\text{air}} / p_{\text{CO}_2\text{air}} \text{ (dite relation de Revelle)}$$

proposée par Bert Bolin qui, devenu président de l'Organisation Météorologique Mondiale, sera le cofondateur de IPCC-GIEC (créé en 1988) et le président de cet organisme.

Revelle, président d'un comité « Climat » de l'AAAS apportera en 1983 tout son soutien à une publication de 519 pages Changing Climate: Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee (<https://www.nap.edu/download/18714>) qui justifie l'alarmisme climatique et les subventions du gouvernement américain à ses auteurs.

Al Gore appelle Revelle son « mentor ».

⁸⁷ $2\% \times 240 \text{ W/m}^2 = 4,8 \text{ W/m}^2$! les ppm Mauna Loa étaient 320 en 1965 et 369 en 2000 soit +49 ppm et non pas +25% $\times 320 \text{ ppm} = +80 \text{ ppm}$

⁸⁸ en prenant un flux solaire absorbé de 122 PetaWatt : $122 \text{ PW} \times 31,5 \text{ M secondes} \times 2\% = 770 \text{ ZJ/an}$; Revelle prend donc avec 84 ZJ/an, 11% de ses 2% qui n'iraient pas dans les océans (figure 3-3 du § 3-1 qui montre **+200 ZJ en 60 ans ou 3 ZJ/an pas 770 !**) mais, par des mécanismes inconnus et non révélés, iraient « chauffer » la calotte antarctique. Les premiers modèles informatiques [Hansen, 1980] disaient, pour +100% sur les ppm de CO_2 , +12°C en hiver et en Antarctique et en Arctique mais seulement +2°C en été ,

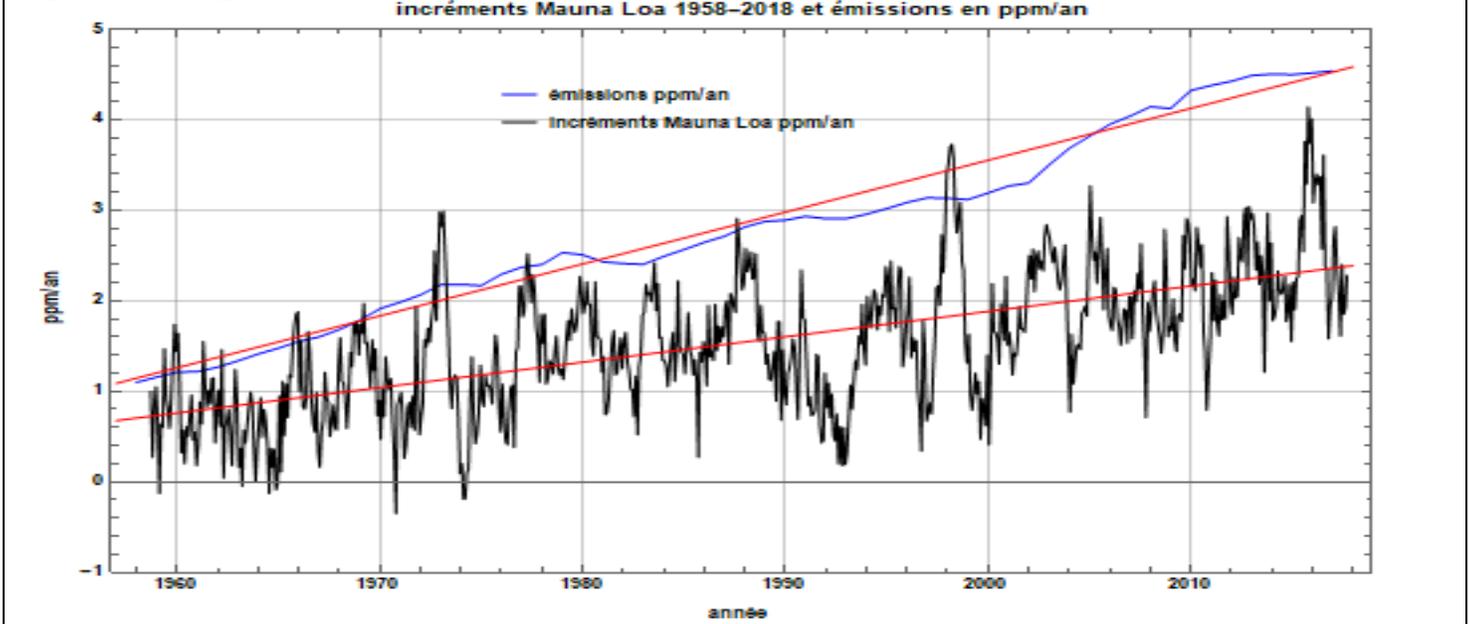
⁸⁹ $125 \text{ m} / 3800 \text{ m} = 3,3 \%$

⁹⁰ A l'époque le gouvernement américain cherchait tous prétextes pour empêcher l'utilisation de l'avion Concorde ; la préservation de la stratosphère et la couche d'ozone a été un des arguments avancés, d'où cette allusion à la stratosphère

15- Formules de Berne et de Hambourg, réponses impulsionnelles d'un réseau linéaire et d'un modèle en compartiments

La figure 7-11 a montré qu'il n'y a pas de corrélation ($R^2 = 0,014$!) entre les incréments observés (sur $dt = 12$ mois) au Mauna Loa (avec presque les mêmes au Pôle Sud) et les émissions anthropiques.

Figure 15-1 Figure 7-11 partielle



Ce qui n'empêche pas IPCC-GIEC et ses auteurs de poser **a priori** que toute la croissance des ppm est la conséquence des émissions anthropiques et de rien d'autre !

Revelle (1965) écrivait (p. 126) : "the CO₂ produced by this combustion is being injected into the atmosphere; about half of it remains there". [FMB, 2017] assure que 46% des émissions anthropiques reste perpétuellement dans l'air, ce que IPCC-GIEC appelle une « airborne fraction ».

Une formulation en apparence plus complexe emploie une fonction de transfert F(t) pour dire la série des ppm au Mauna Loa à partir de **la seule** série des combustibles fossiles, par convolution

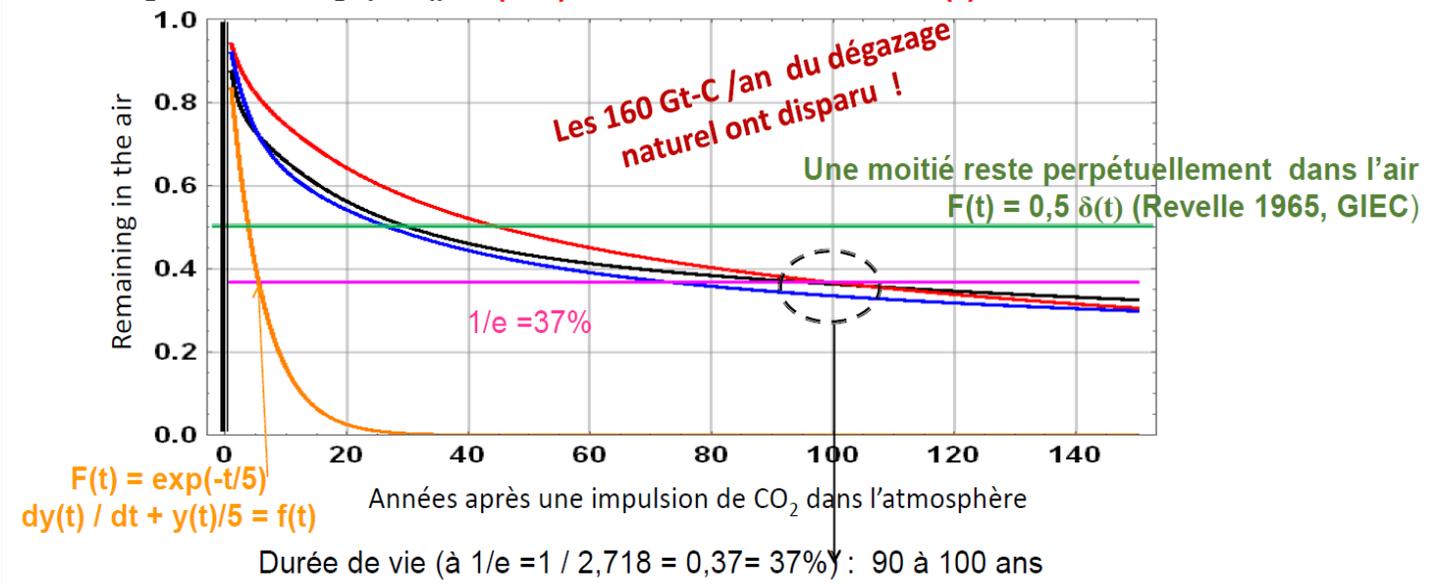
$$\text{ppmCO}_2 [t] - \text{ppmCO}_2[t_0] = \int_{t_0}^t F(t-t') \text{fossil}(t') dt'$$

Une impulsion de CO₂, fossil(t') = fonction de Dirac au temps t = 0 donne une réponse

$$\text{ppmCO}_2 [t] - \text{ppmCO}_2[0] = F(t).$$

Figure 15-1 Réponse impulsionnelle F(t) fonctions de Berne et de Hambourg (rouge, bleu et noir) et réalité en orange ; en vert la réponse impulsionnelle de 0,5 Dirac(t=0)

$$\text{ppmCO}_2 [t] - \text{ppmCO}_2[t_0] = \int_{t_0}^t F(t-t') \text{fossil_fuels}(t') dt' \quad F(t) \text{ avec 8 coefficients ajustables !}$$



$$F(t) = \exp(-t/5)$$

$$dy(t) / dt + y(t)/5 = f(t)$$

Durée de vie (à $1/e = 1 / 2,718 = 0,37 = 37\%$) : 90 à 100 ans

Pour $F(t) = 0,5$ fonction de Dirac (0,5 fois une impulsion unité au temps $t=t_0$) il vient :

$$\text{ppmCO}_2 [t] - \text{ppmCO}_2[t_0] = 0,5 \int_{t_0}^t \text{fossil}(t') dt',$$

soit 0,5 fois le cumul des émissions entre t_0 et t qui resterait perpétuellement dans l'air ... ce qui est bien sûr incompatible avec le renouvellement chaque année d'un cinquième du CO_2 de l'air (§ 7-5 et figure 7-7).

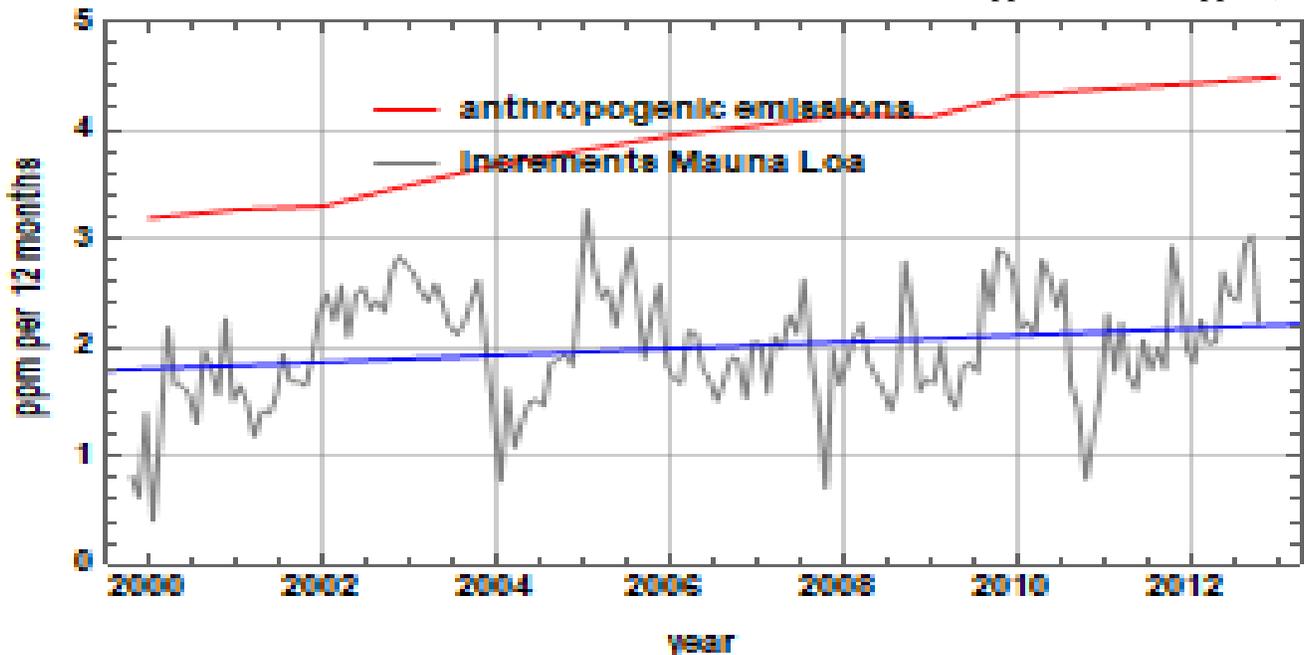
Des $F(t)$ déguisés en réponses d'un modèle en compartiments ou système d'équations différentielles linéaires résolu par transformations de Laplace sont en fait la « meilleure » fonction de transfert – avec 8 coefficients arbitraire ajustables librement - entre la courbe bleue de la figure 15-1 et la courbe noire très fortement lissée, par exemple par une moyenne mobile sur 7 an de façon à faire disparaître les « irrégularités ».

Ces $F(t)$, nommées fonctions de Berne et de Hambourg figurent dans les rapports du GIEC et servent à faire croire à une durée de vie de cent ans ($\lambda = 1/e = 37\%$) du carbone « anthropique » dans l'atmosphère proclamée dans d'innombrables articles.

Discussion

Le caractère absurde de ces approches où **on pose a priori ce qu'il faudrait démontrer** et fabrique un enrobage mathématique a été mis en évidence par le doublement de la production de charbon (2000-2010) avec +40% sur les émissions « anthropiques » entre 2000 et 2010, sans croissance des incréments des ppm au Mauna Loa qui ne reflète que les températures de la zone intertropicale rythmées par les El Niño.

Figure II-15-2 Sur 2000-2013, entre les deux grands El Niño de 1997-98 et de 2016-17 : émissions anthropiques passées de 3 ppm/an à 4,5 ppm/an et incréments (totaux naturels et anthropiques) observés au Mauna Loa sur 12 mois, qui sont eux restés autour de 2 ppm/(douze mois)
La courbe bleue de meilleure approximation est en ppm/(12 mois) : $1,8 + 0,031 (t - 1999,79)$
soit +0,03 ppm/an ou +0,3 ppm/(10 ans)



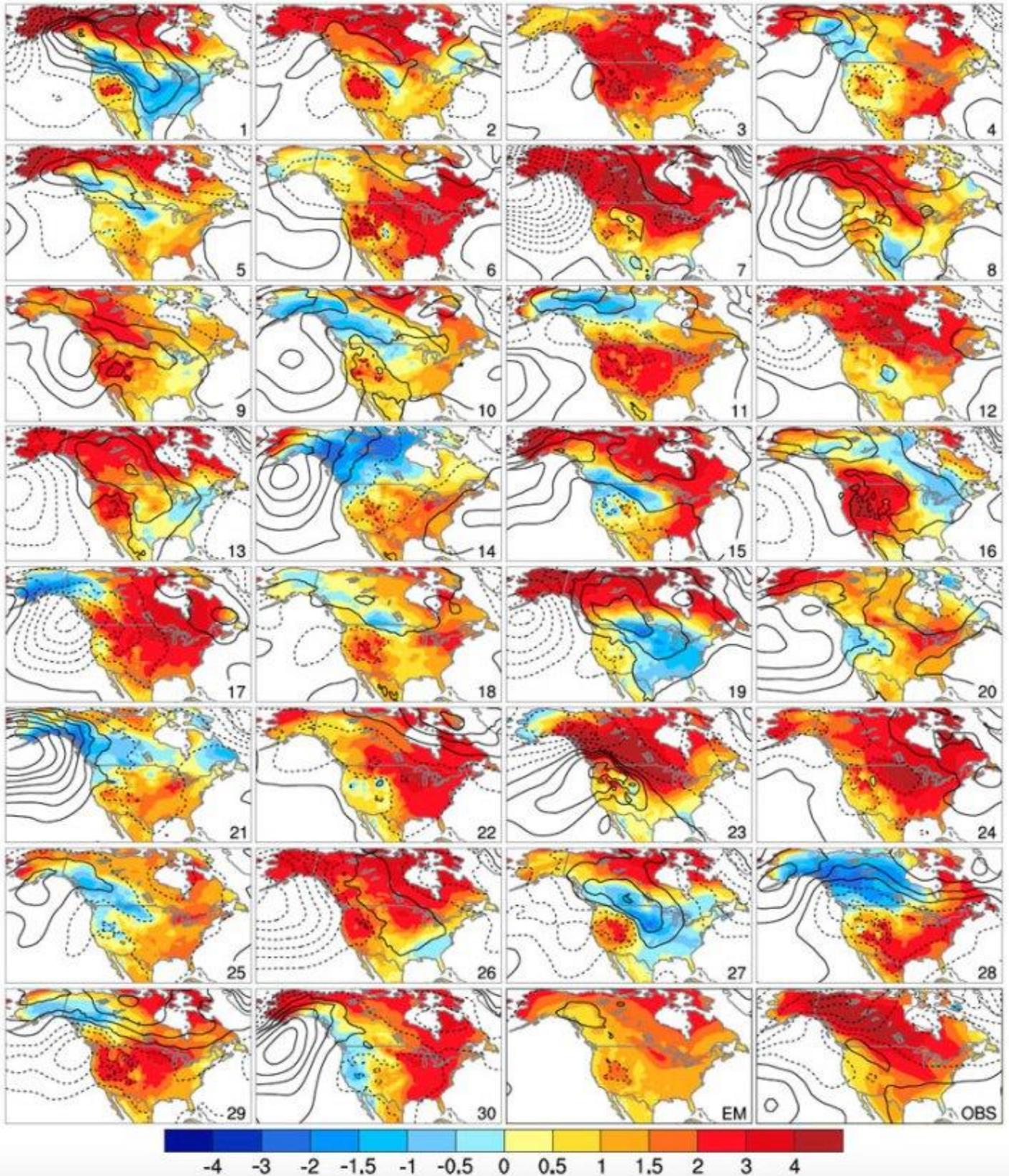
16- Modèles informatiques par discrétisation : effet Lorenz

La figure 16-1 montre 30 résultats du même programme qui a tourné avec des conditions initiales différentes d'un millièmètre de degré Celsius : sont représentées les tendances sur 1963-2013 des températures de surface en Amérique du Nord, entre -5°C (bleu) et $+5^\circ\text{C}$ (rouge).

L'effet Lorenz désigne l'instabilité des solutions de certains systèmes d'équations (non-linéaires) par rapport aux conditions initiales ; ça peut signifier ou que le système que les équations veulent décrire est effectivement « chaotique » ou que les équations employées ne décrivent pas correctement le système.

Cette instabilité des programmes de discrétisation des équations des fluides limite à quelques jours la qualité des prévisions de la météorologie ... qui sont inapplicables en climatologie.

Figure II- 16-1 Résultats d'un même programme avec trente conditions initiales différant d'un millièème de degré Celsius : *Winter temperature trends (in degrees Celsius) for North America between 1963 and 2012 for each of 30 members of the CESM Large Ensemble.*



Sources : <https://judithcurry.com/2016/10/05/lorenz-validated/>
<https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-15-0304.1>

Clara Deser *Forced and Internal Components of Winter Air Temperature Trends over North America during the past 50 Years: Mechanisms and Implications*

https://journals.ametsoc.org/doi/suppl/10.1175/JCLI-D-15-0304.1/suppl_file/10.1175_JCLI-D-15-0304.s1.pdf

17- Auteurs cités dans cette partie II

[L1] B. Legras (legras@lmd.ens.fr; www.lmd.ens.fr/legras) Les 64 slides du cours d'intitulé « *Physique de l'atmosphère bilan radiatif* » 2017, COURS 1 BILAN RADIATIF L3 et diplôme de l'ENS Sciences de la Planète Terre, 2017 en partie dans <http://www.lmd.ens.fr/legras/Cours/L3-meteo/intro.pdf>

[FMB1] François-Marie Bréon exposé à l'AFIS (2017)

[D1] M. Dufresne dans sa thèse HDR et son cours sur l'effet de serre à l'IUFM Créteil

[M] Manabe

GIEC, 2013 : Résumé à l'intention des décideurs, *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*

[sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, (27 pages)

https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf

https://www.slideserve.com/sybil-arnold/investigation-9/?utm_source=slideserve&utm_medium=website&utm_campaign=auto+related+load

<http://climatechangenationalforum.org/part-ii-history-of-climate-change-science-1969-1990-according-to-daniel-yergin-for-general-commentary-by-the-ccnf-scientist-community/>