Annexe 7 - Océans : Flux et stocks de vapeur d'eau et de CO2

1. Introduction :

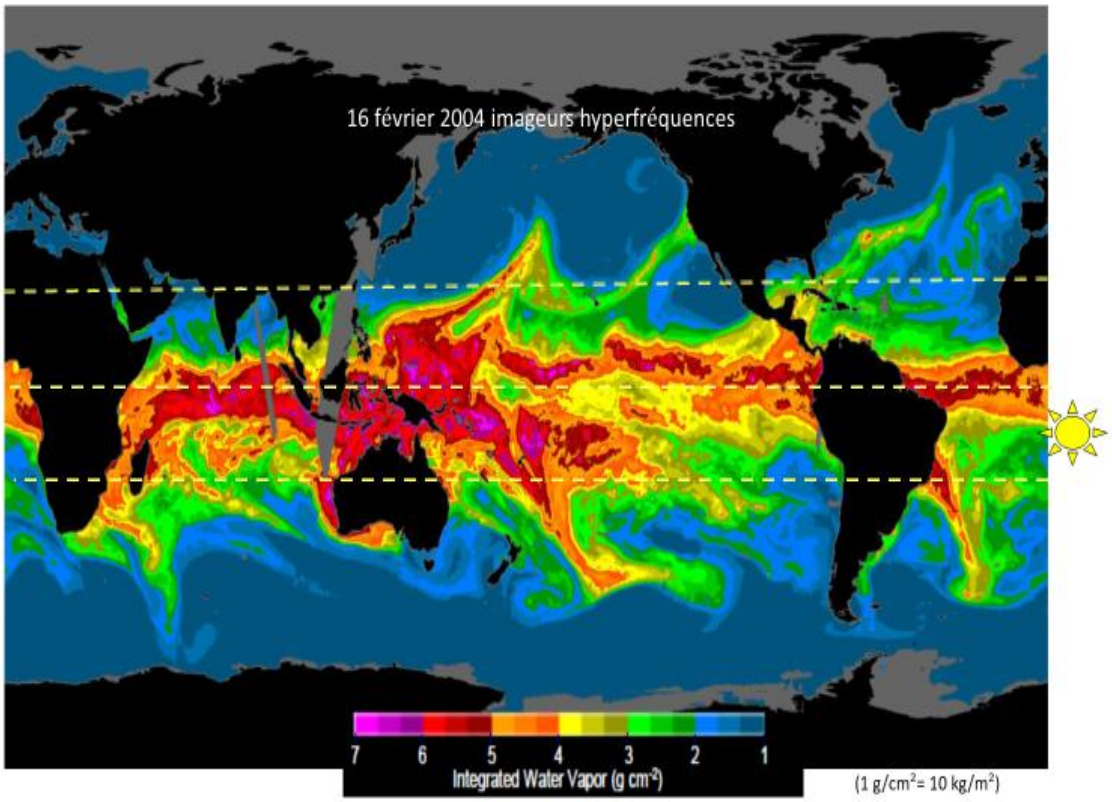
La vapeur d'eau est le premier « gaz trace » avec des cumuls assez variables sur toute la hauteur de l'air, de 5 kg/m² en zone subarctique en hiver à 75 kg/m² dans des zones de forte convection, entre les tropiques.

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 dans l'Annexe "IR Thermiques", 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 CO_2 parvenant au cosmos depuis la troposphère est de quelques W/m².

Figure 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



Camille Veyres (10/03/2019)

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 A **Stocks et flux**, en milliards de tonnes de carbone ou d'eau en Gt-C ou Gt-H_2O
1 Gt = 1 Tkg (Tera kg de 10^{12} kg)

	Océans	Sols & végétation	Atmosphère
Eau et vapeur d'eau stock	1,335 10^9		12,9
Flux /an évaporation	- 430 000	- 60 0000	
Flux / an précipitations	380 000	110 000	
Carbone stock	39 000	2 500	850
Flux /an dégazage	- 78	- 86	reçu =164 + em. anth.
Flux / an absorption	80	90 (hors respiration)	perdu = - 170

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

39 000 + 2500 + 850 = 42 350 Gt-C.

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 ¾ de la surface du globe et les basses couches de l'atmosphère y sont presque saturées en humidité ; l'évaporation au-dessus des mers,

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

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 $C_E = 1{,}5\ 10^{-3}$, nombre de Dalton.[1]

Une autre formule dit pour une vitesse du vent V, une température t(°C) et une humidité relative RH, avec a dépendant des unités, une évaporation :

$$a\,(1+ 0{,}6\,V)\,(p_{H2Osat} - p_{H2Oambiant}) = 0{,}3\,(1+ 0{,}6\,V)\,\exp[17{,}27\,t / (237{,}3 + t)]\,(1- RH) \text{ en mm/jour.}$$

Pour V=0 m/s, t= 32°C, RH = 80% = 0,8, il vient 0,5 mm/jour et sept fois plus à V=10 m/s.

[1] Application numérique pour 0°C et 30°C : ρ_{air} = 101325/(287 {273 K, 303 K})= {1,29; 1,16} kg/m^3 ; V_{10m} = 10 m/s; avec q_{sat} – q = 10% de q_{sat} ; w_{sat}= 0,622 E_{sat}/101325; q_{sat}= w_{sat}/ (1+w_{sat}); E_{sat}({273 K, 303K})= {611, 4231} Pa; évaporation = {7,2; 44,2} 10^{-6} kg/m²/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_{sat}(mbar) – e_{2m}(mbar)) $V_{2\,m}$ (m/s) où E est la pression de vapeur saturante, e_{2m} la pression de vapeur effective à 2 mètres, $V_{2\,m}$ le vent à 2 mètres
Pour d'autres expressions encore, voir G. Réméniéras *l'hydrologie de l'ingénieur* Eyrolles 1965, 456 pages.

Camille Veyres (10/03/2019)

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 [2] 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 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 2 Exemple de flux de chaleur latente (évaporation) pour un mois de juillet en W/m², exprimés en "chauffage" (négatif) de la surface : 200 W/m² 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

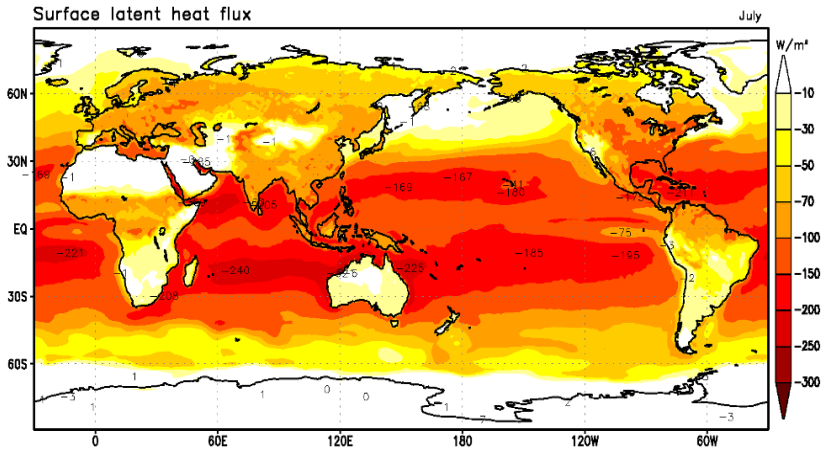
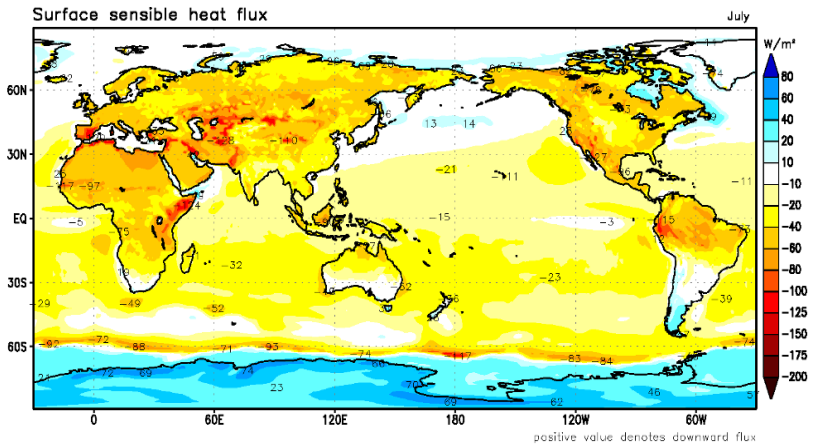


Figure 3 Flux de chaleur sensible (convection) pour un mois de juillet en W/m², exprimé en "chauffage" (négatif) de la surface ; source : http://ds.data.jma.go.jp/gmd/jra/atlas/eng/indexe_surface12.htm



[2] La chaleur latente en fonction de la température t(°C) et de la salinité s vaut en J/kg

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

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

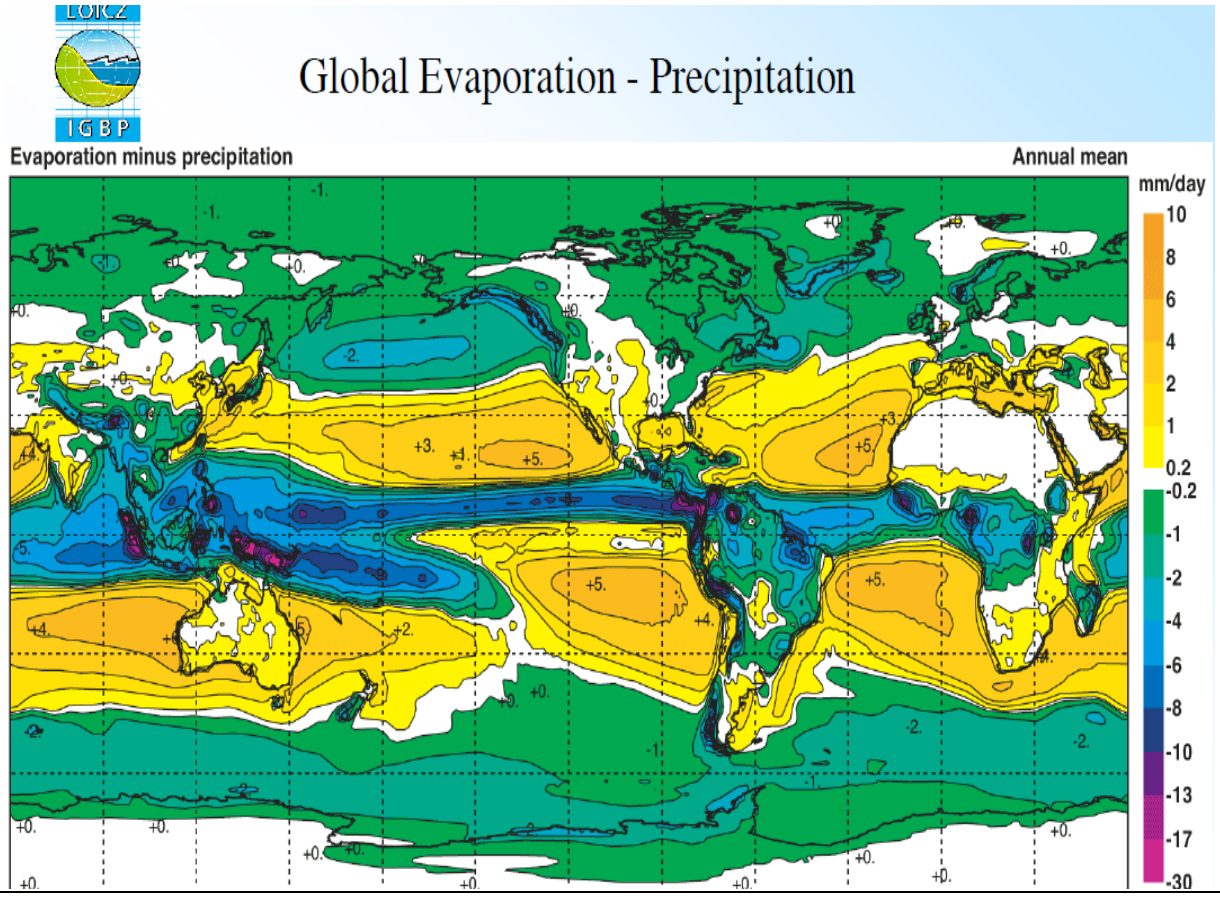
Camille Veyres (10/03/2019)

La figure 3 montre que les flux de chaleur sensible (ou convection) atteignent 100 W/m² (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/m² 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 4 montre bien comment les zones anticycloniques fournissent de la vapeur d'eau à la cheminée équatoriale et aux moyennes latitudes.

Figure 4 Bilan évaporation moins précipitation : noter les anticyclones dits des Açores, de Hawaï, de l'île de Pâques de Sainte Hélène 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



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 = Dissolved Inorganic Carbon, ou carbone minéral dissous.

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.

Camille Veyres (10/03/2019)

Ce carbone est en gros à 90% sous forme d'ion bicarbonate HCO_3^- , à 9% d'ion carbonate CO_3^{2-} et 1% en acide carbonique ou CO_2.

L'équilibre entre ces différentes espèces dépend fortement des températures comme le montre la calculette en ligne http://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/carbonate/ ou le graphique ancien (figure 5) du livre de Zeebe [3] (page 64) ou aussi les formules du manuel de Gérard Copin-Montégut.[4]

Figure 5 Figure du livre de Zeebe & Wolf-Gladrow (2003) montrant -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 µatm et 320 µatm

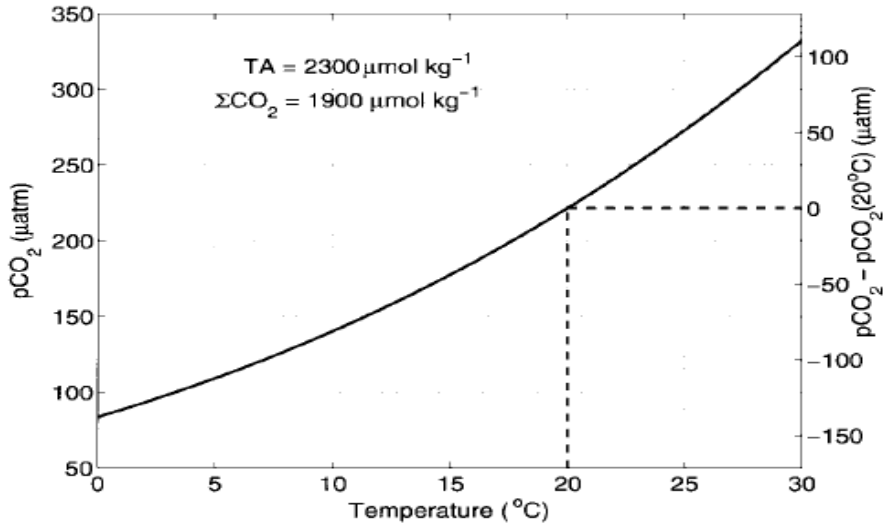


Figure 1.4.18: Seawater pCO_2 as a function of temperature (T). If measurements are made at 20°C (so-called discrete systems), large corrections may have to be applied to calculate pCO_2 at *in situ* T (cf. Goyet et al., 1993). The problem is less severe in so-called continuous systems where equilibration and *in situ* T are similar.

Le tableau B donne la pression partielle pour deux valeurs du DIC (2000 et 2100 µmole/kg) : elle varie dans un rapport 3,6 entre la limite de la banquise (l'eau de mer congèle vers -1,5°C, température variable selon la salinité) et la zone intertropicale.

Tableau B Effet de la température sur la pression partielle du CO_2 dans l'eau de mer
calculette en ligne de http://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/carbonate/
Salinité 34,78 per mil, Alcalinité 2311µ eq/kg

Dissolved Inorganic Carbon DIC µmole/kg	2000	2100	2000	2100	2000	2100
Température °C	**0°C**	**0°C**	**15°C**	**15°C**	**30°C**	**30°C**
$p_{CO2\ eau\ de\ mer}$ µatm	**129**	**217**	**251**	**419**	**464**	**763**
CO_2 aq µmol/kg	8,1	13,7	9,4	15,7	11,6	19,2
HCO_3^- µmol/kg	1789	1938	1775	1931	1967	1921
CO_3^{--} µmol/kg	211	148	217	154	222	160
pH	8,46	8,27	8,22	8,03	7,99	7,81

Le dégazage du CO_2 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.

[3] R. Zeebe & D. Wolf-Gladrow *CO_2 in sea water , equilibrium, kinetics, isotopes*, Elsevier, 2001-2003, 360 pages
[4] Gérard Copin-Montégut *Chimie de l'eau de mer*, Institut Océanographique, Paris, 1996, 320 pages

Camille Veyres (10/03/2019)

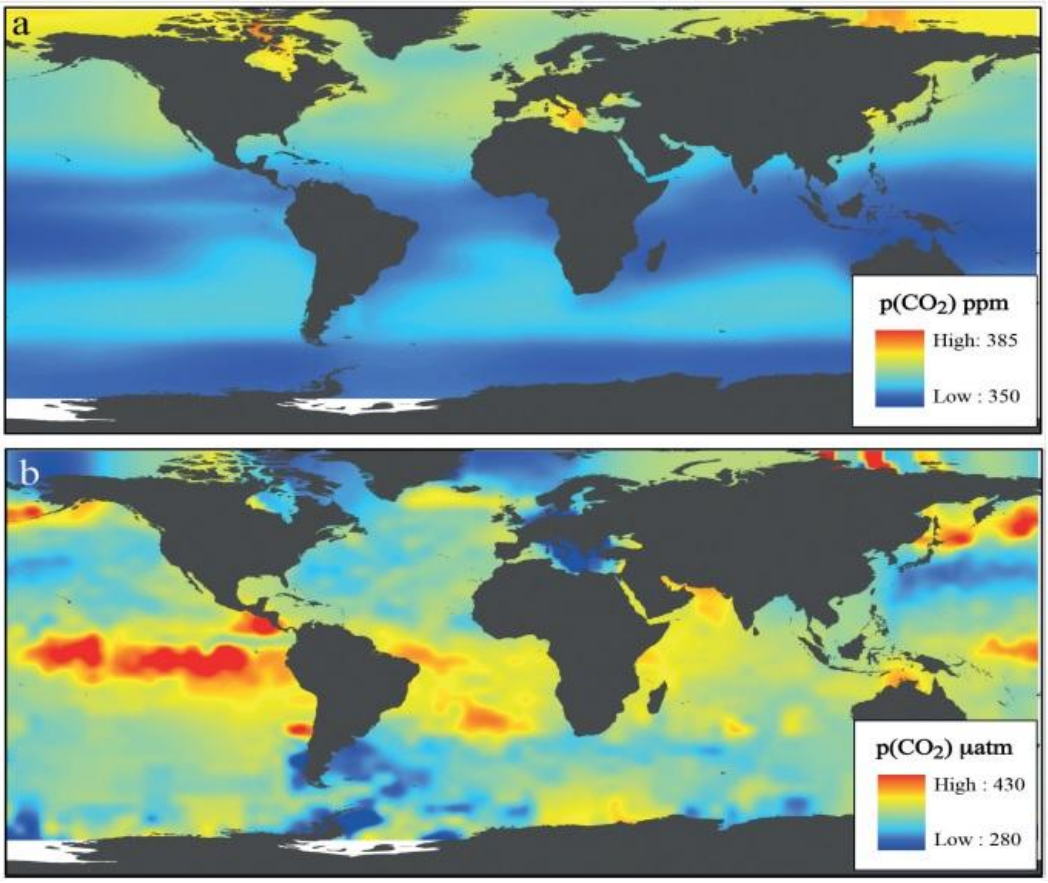
En zone intertropicale, les remontées de carbone de l'océan profond vers l'océan de surface sont de l'ordre de 270 Gt-C/an dont presqu'un tiers passe dans l'air.

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 CO_2 à l'océan de surface qui envoie ce carbone dans l'océan profond (265 Gt-C/an).

Marina Levy et al. 2013[5] 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 CO_2 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."***

La figure suivante 6 montre, sur des données assez anciennes, les pressions partielles dans l'air et dans l'eau.

Figure 6 Pressions partielles dans l'air et dans l'eau de mer [6] tiré d'un document publié par l'Union Européenne. Noter que les échelles de couleur sont différentes pour l'air et pour l'eau.



[5] 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.
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 CO_2 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.* "
[6] James P. Barry, Toby Tyrrell, Lina Hansson, Gian-Kasper Plattner, Jean-Pierre Gattuso *Atmospheric CO_2 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

5. Dioxyde de carbone : Flux annuels et stocks

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, puisque le flux absorbé croît avec 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 observations[7], été de +31% entre 1900 et 1999 [8].

Et sur 1960-2010 la dynamique annuelle du CO_2 a crû de 20% à 50% et plus selon la latitude.[9]

(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 XXème siècle.

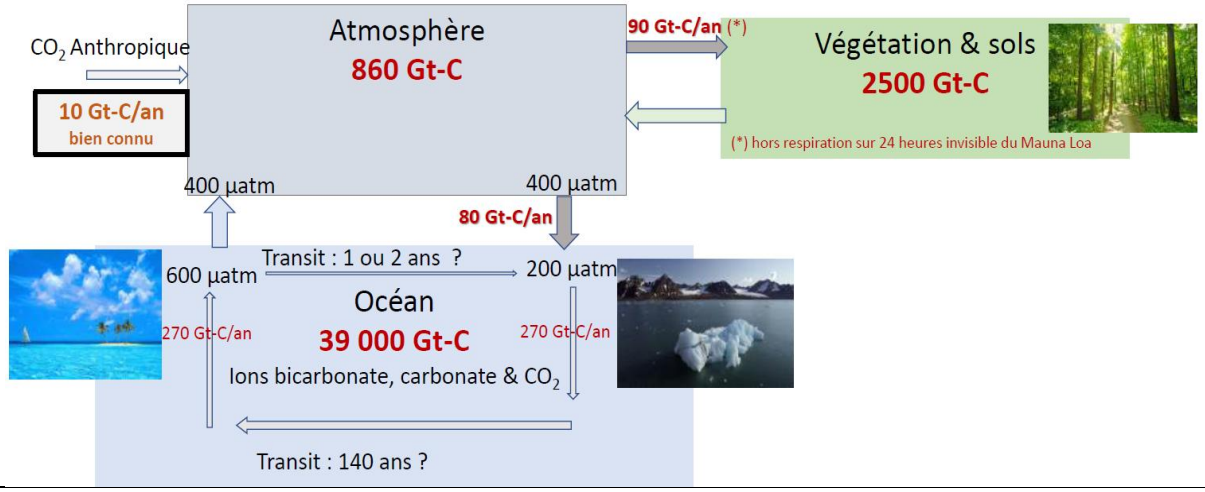
Le stock dans l'air noté y(t) varie comme la différence entre les entrées notées f(t) et les sorties qui sont y(t)/5

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

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

$$d\, y_{naturel}\,(t)/dt = \text{dégazage naturel} - y(t)_{naturel}\,/5.$$
$$d\, y(t)_{anthropique}\,/dt = \text{émissions anthropiques}(t) - y(t)_{anthropique}\,/5.$$

Figure 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).



[7] . 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

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

[9] 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. .

Les émissions anthropiques étant connues avec précision par les statistiques économiques, $y_{anthropique}(t)$ se calcule exactement [10] et est de l'ordre de 23 ppm ou 48 Gt-C soit 6% du CO_2 de l'air.
Pour des émissions constantes, $y(t)_{anthropique}$ 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 CO_2 de l'air.

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.

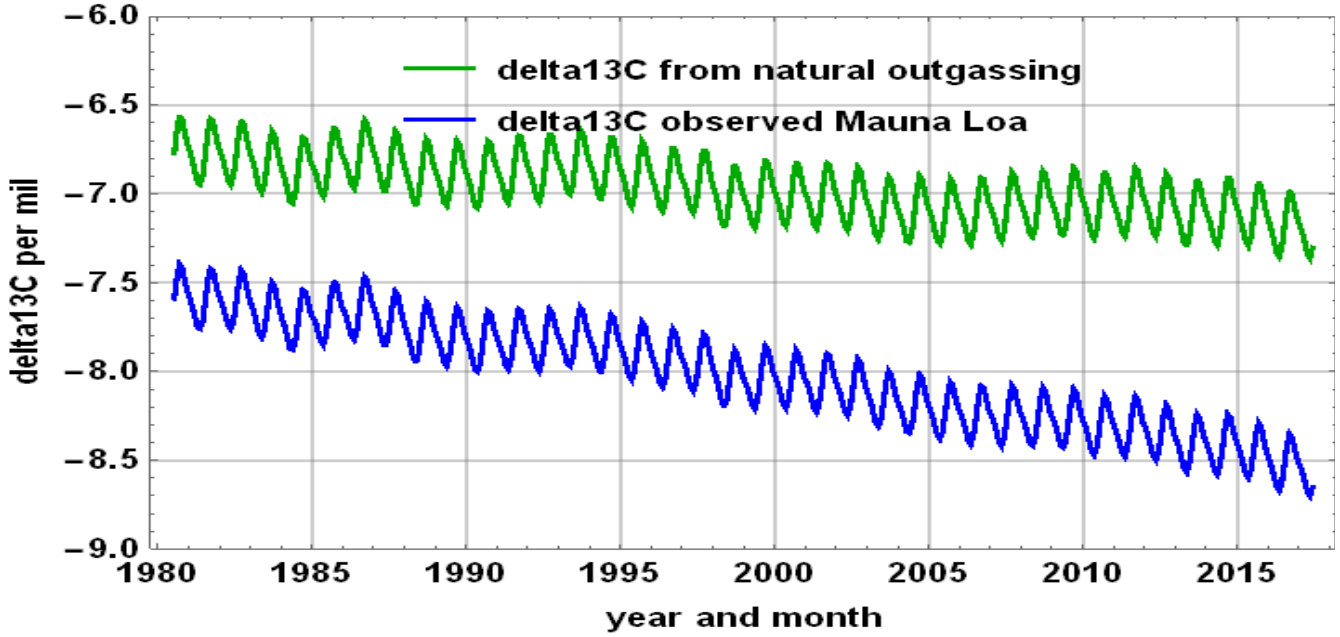
Le rapport des nombres d'atomes de ces isotopes est caractérisé par une fonction dite delta13C, exprimée en pour mille (abréviation : pm) : **$\square^{13}C = 1000\ (\ (^{13}C/^{12}C)\ /0{,}0112372 - 1\ )$.**

Les combustibles fossiles sont vers -25 pour mille pour le charbon 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) : **(-30 pm) (6%) + (-7.14 pm) (94%) = (-8.4 pm) c**orrespond aux observations de la courbe bleue de la figure 8**.**

Le dioxyde de carbone des dégazages naturels (courbe verte à la figure 8) a à peu près le delta13C de l'air ambiant 60 ans plus tôt.

Figure 8 Evolution des rapports isotopiques observés en bleu (observatoire du Mauna Loa), et des dégazages naturels, calculés en vert.



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 droite [11] ce qui est physiquement impossible.

[10] La solution de dy(t)/dt = f(t) – y(t)/5 s'écrit $y(t) = y(t_0)\exp[-(t-t_0)/5] + \int_{t0}^{t} \exp[-(t-t')/5]\, f(t')\, dt'$

[11] 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 2018 et dix pour cent en 1980 (les émissions ont presque doublé de 5,3 Gt-C en 1980 à 9,6 Gt-C en 2017), on aurait

6. Dioxyde de carbone : croissance observée à l'observatoire du Mauna Loa (alt. : 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.

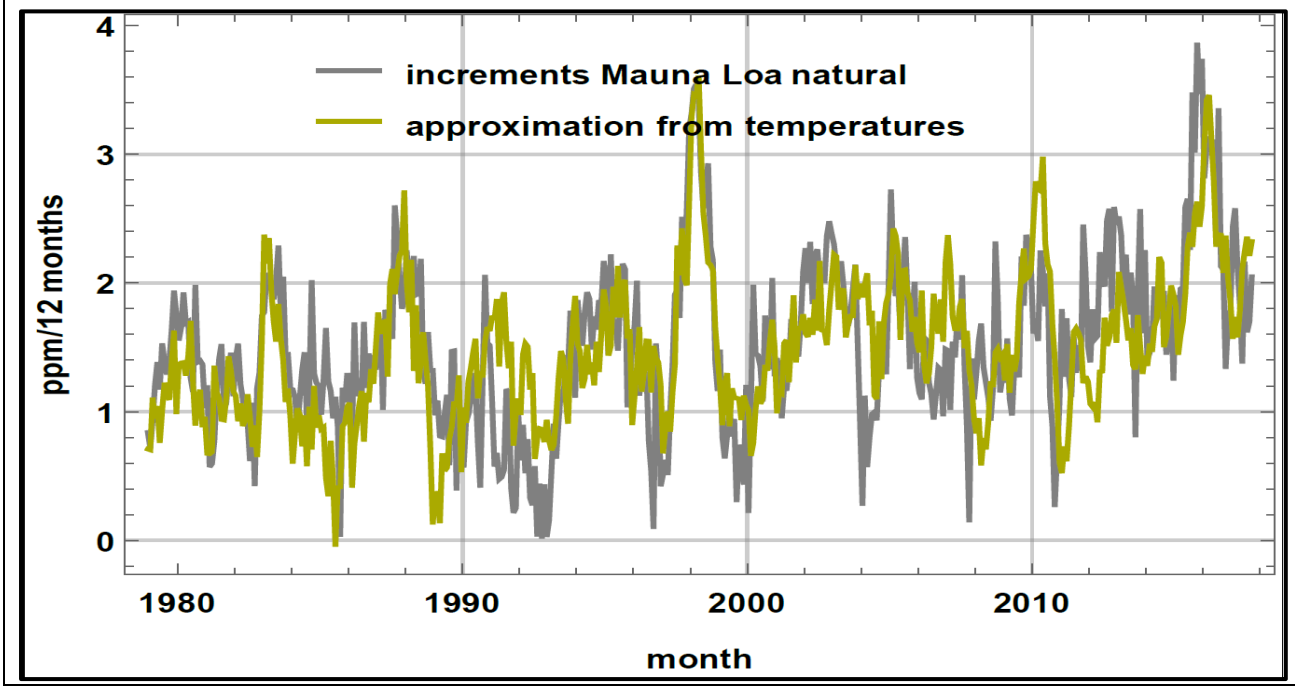
La figure 9 montre en gris foncé les différences d'une année à l'autre, pour le même mois, de $y_{naturel}(t)$ mesuré à l'observatoire du Mauna Loa. Les températures de la zone de dégazage sont représentées par les anomalies **AT(t)** des températures de la basse troposphère intertropicale mesurée par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

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

$$\mathbf{d\, y_{naturel}(t)/dt = a\, AT(t) + b} \quad \text{et donc} \quad \mathbf{y_{naturel}(t) - y_{naturel}(t_0) = \int_{t0}^{t} (a\, AT(t) + b)\, dt}$$

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 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 bas.



10% (-28) + 90% **(-5,33)** = (-7,6) et 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, et son delta13C ne peut donc pas croître (devenir moins négatif).

Camille Veyres (10/03/2019)

Des tests mathématiques [12] 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 (§ 4) et le renouvellement constant du carbone des océans de surface sont les justifications <u>physiques</u> de la corrélation observée.

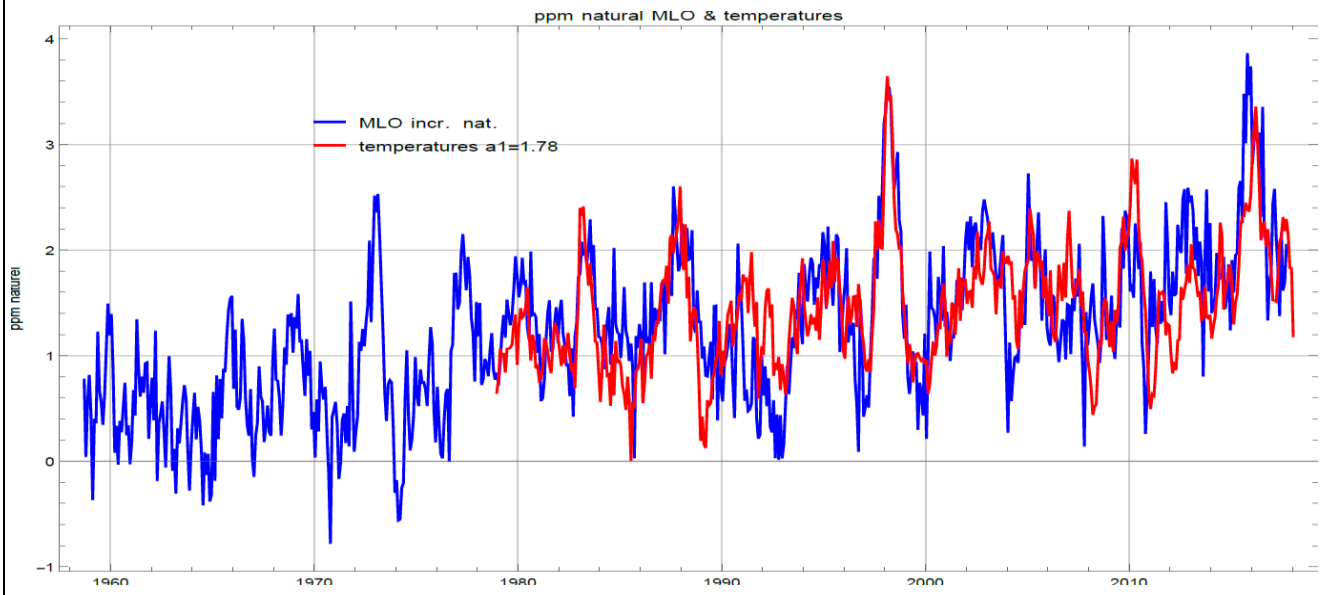
La figure 10 montre que si à l'observatoire du Mauna Loa (19°31'N, 155°34'W, altitude 3400 m) le dégazage de la zone intertropicale fait le gros des incréments, à l'observatoire du pôle sud (altitude 3200 m) c'est l'océan austral qui prédomine dans la régression linéaire.

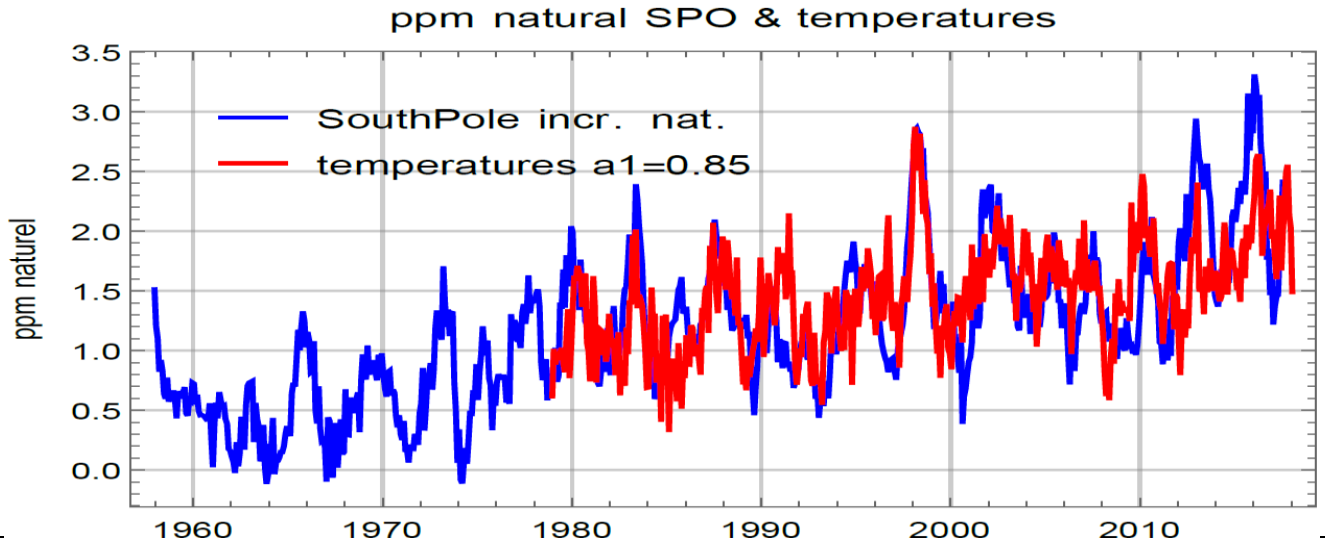
La figure 3 de l'Annexe "Le Climat" explique la synchronisation par les El Niño.

Figure 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.

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

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





[12] Dits de racine unité ou ADF et KPSS

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

La figure 11 vignette du haut présente :

- en bleu : 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 +0,7 ppm/an vers 1958 à +2,4 ppm/an en 2017

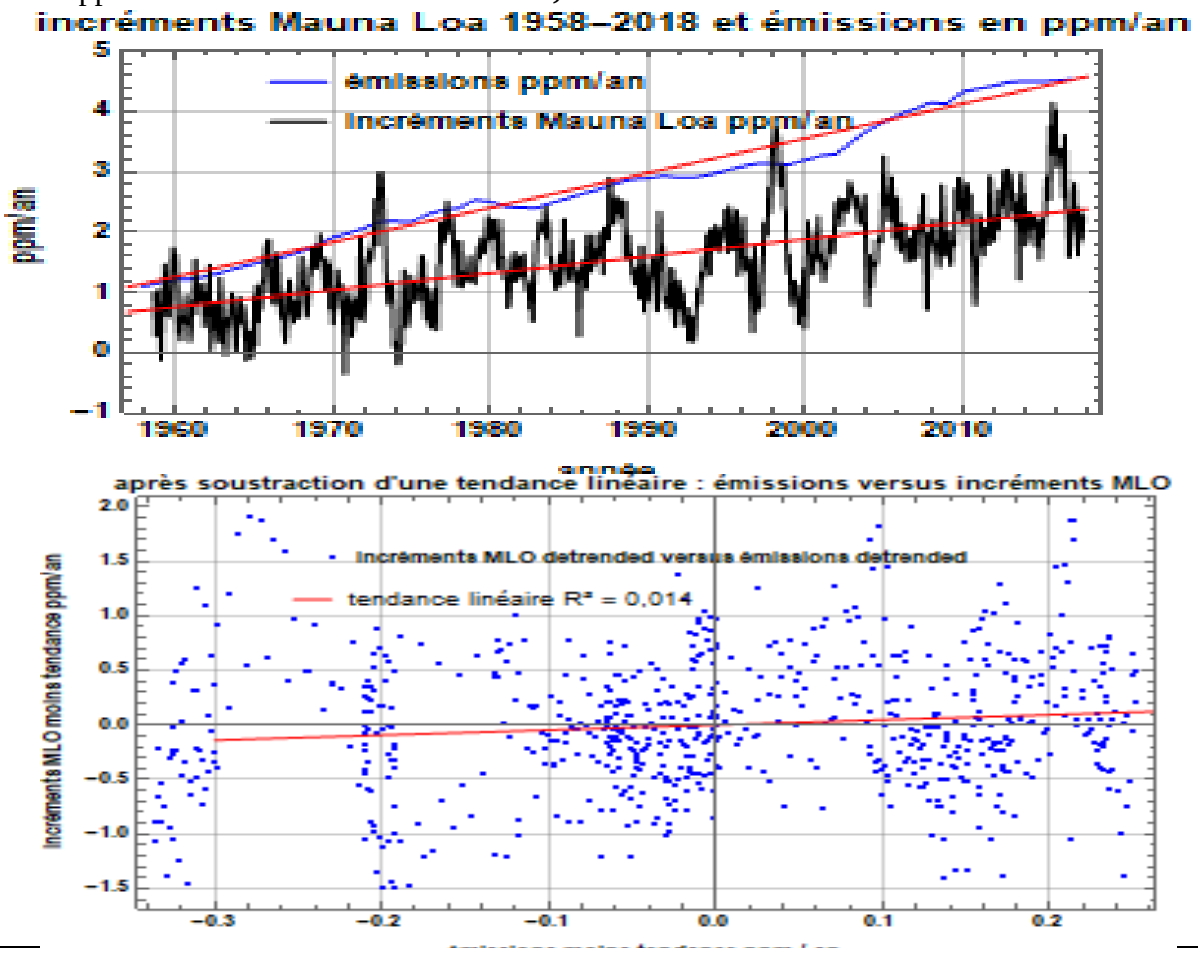
Deux tendances linéaires croissantes établissent-elles une relation de causalité ? Evidemment non !

Soustraire de chacune des deux séries des émissions et des incréments sa tendance linéaire, conduit au nuage de points de la vignette du bas : il n'y a aucune espèce de corrélation entre les deux séries résiduelles puisque leur coefficient de corrélation est $R^2 = 0{,}014$.

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 CO_2 dans l'air reflète les températures de la zone de dégazage ce qui est conforme aux lois de la physico-chimie du tableau 7-B corroborées par les figures 7-5 et 7-6.

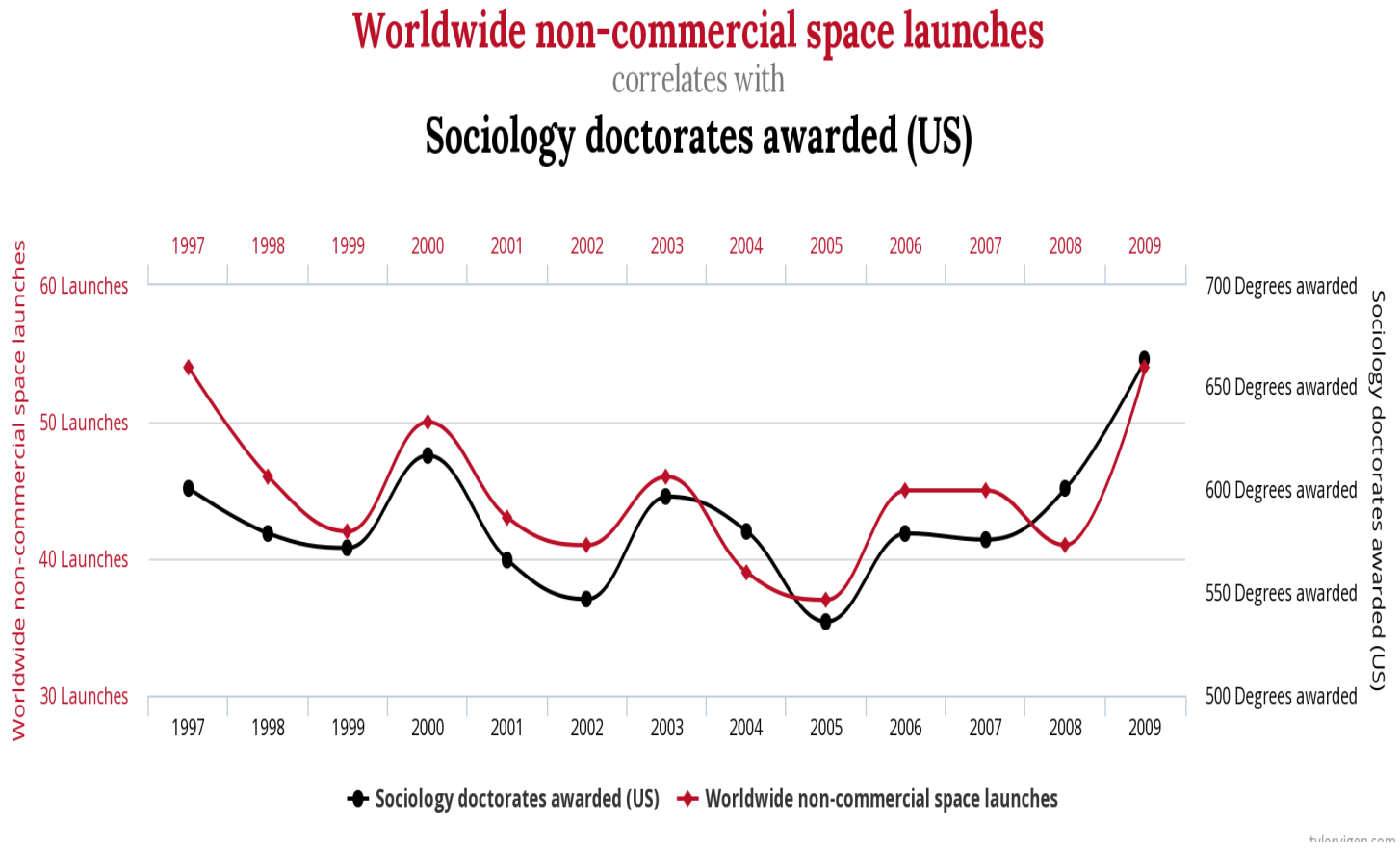
Figure 11 **Absence de corrélation réelle** entre les émissions venant des combustibles fossiles et la croissance des ppm observée au Mauna-Loa : **R^2= 0,014**



Camille Veyres (10/03/2019)

<u>Rappel de bon sens</u> : 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 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 [13] 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 [14] auteur du http://rocketscientistsjournal.com/

[13] 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
[14] http://notrickszone.com/2013/06/19/reader-jeff-glassman-comments-on-murry-salby-and-co2-climate-forcing/

8. Annexe : émissions anthropiques et ppm anthropiques dans l'atmosphère

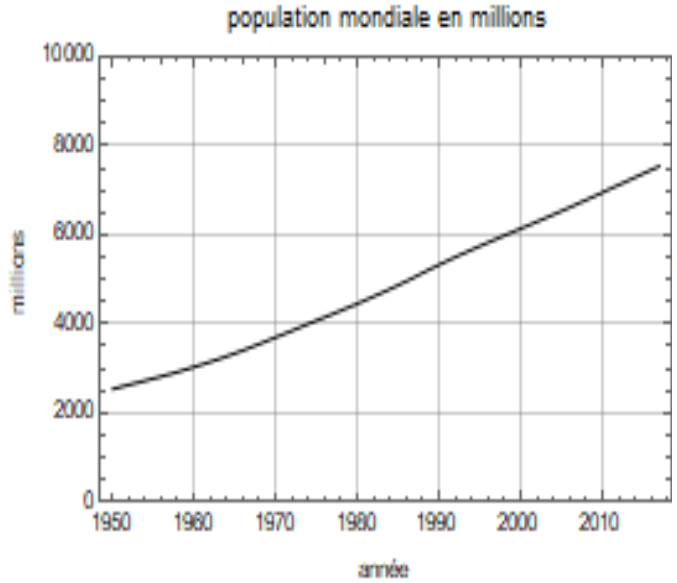
La figure 13 montre la population mondiale depuis 1950, les consommations de combustibles fossiles (en Mt-C/an et en t-C/tête) et des scénarios d'émissions d'ici 2100 de la forme (t est le temps) :

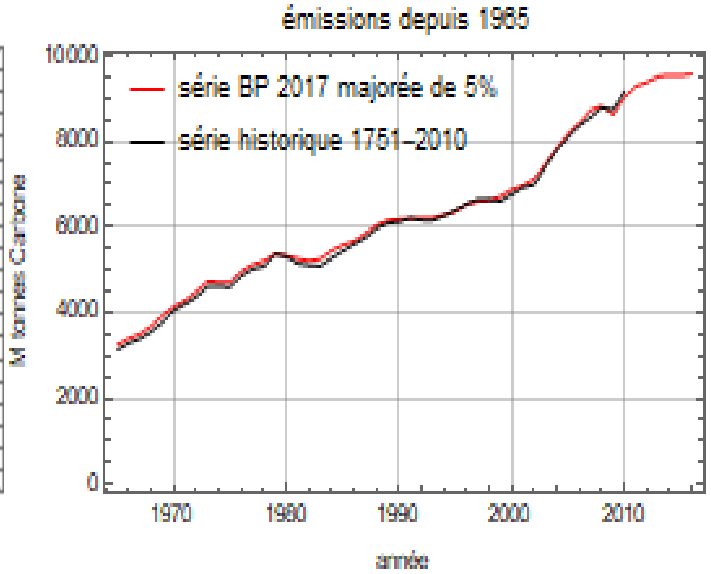
$$f(t) = a / (1+ \exp[- b (t-c)]),$$ dite **fonction logistique**.

Figure 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



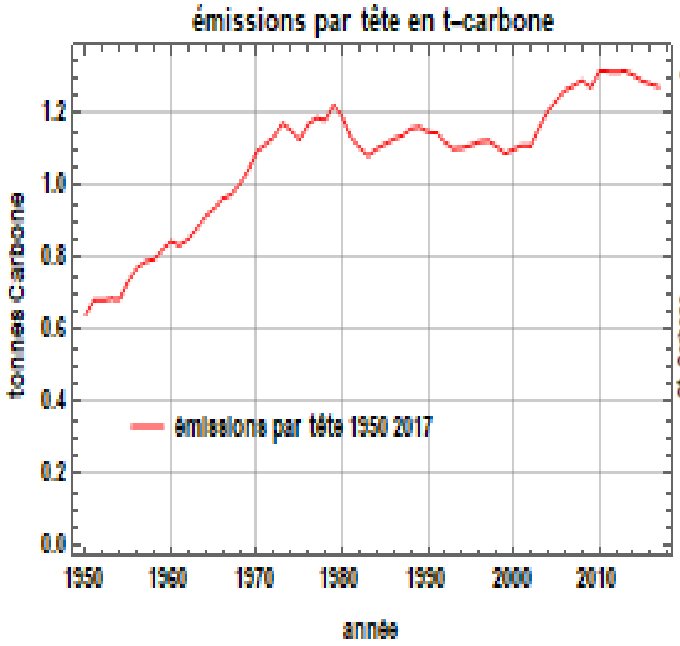


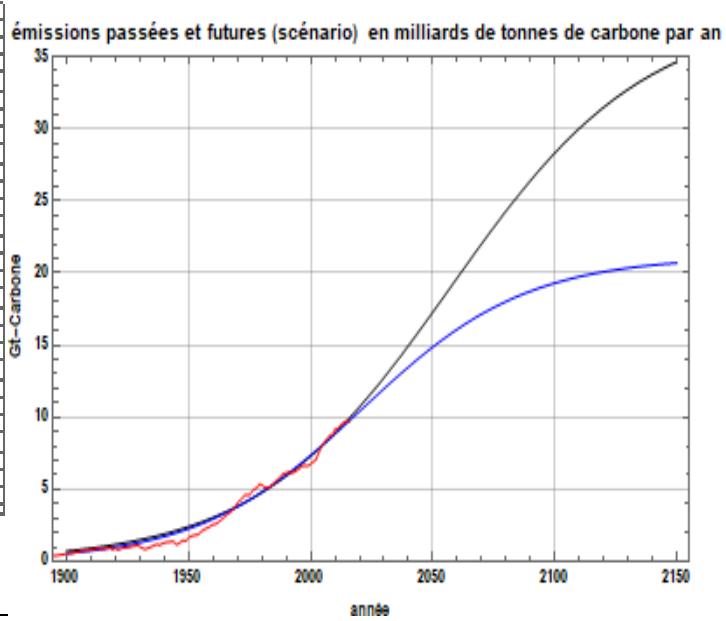
Emissions en tonne de carbone par tête et par an (1950-2017)

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

en noir : 38 / (1+ exp[-0.0251 (t - 2057)])

en bleu : 21 / (1+ exp[-0.0298 (t - 2021)])

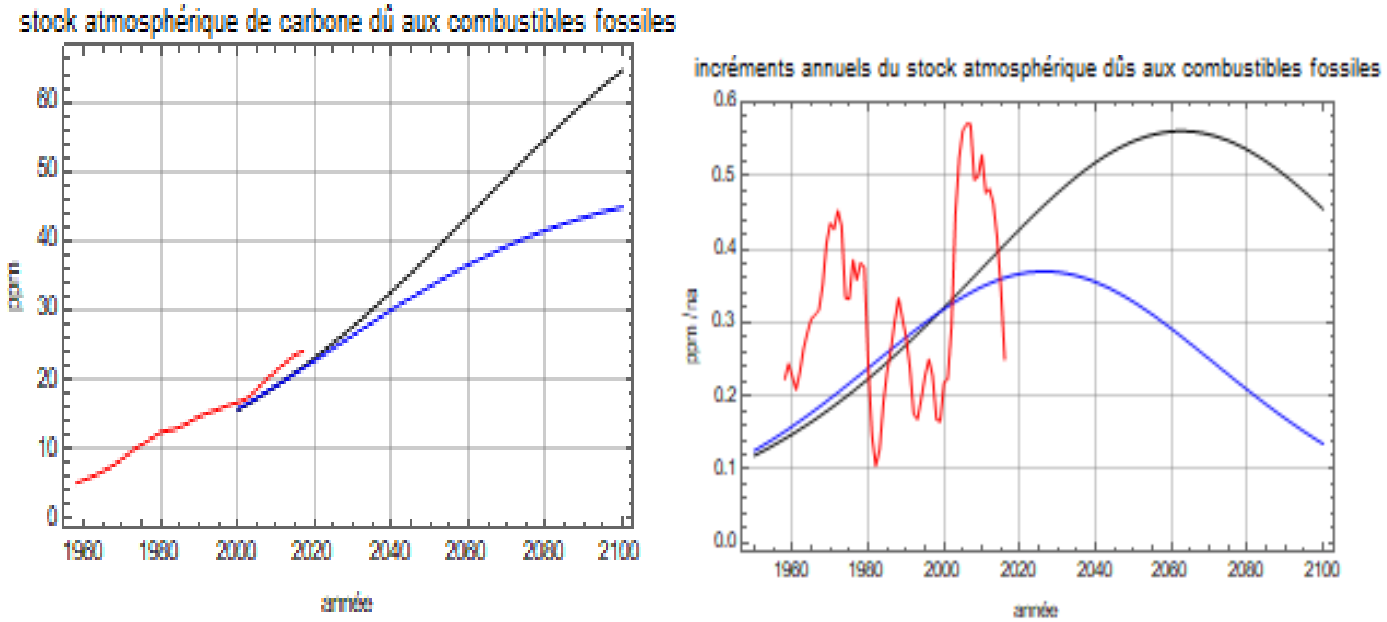




Les fonctions logistiques de la figure 14, vignette en bas à droite, permettent d'évaluer (figure 15) des évolutions possibles de $y_{anthropique}(t)$ et de sa dérivée $dy_{anthropique}$ /dt qui passe par un maximum lorsque la pente de la logistique est maximale en 2021 ou en 2057.

Camille Veyres (10/03/2019)

Figure 14 Exemples de calculs avec les logistiques précédentes en bleu et noir et calcul à partir des séries des combustibles fossiles en rouge avec une durée de vie de 5 ans.
Stock atmosphérique en ppm en 2100 : +20 ppm ou +40 ppm par rapport à 2017.
Incréments annuels du stock anthropique dans l'air en ppm/an



Noter que si les émissions étaient constantes, $y_{anthropique}(t)$ serait constant, égal à cinq fois ces émissions, et sa dérivée $dy_{anthropique}/dt$ serait nulle.

La figure 14 (vignette de gauche) suggère **+20 ppm et +40 ppm entre maintenant et 2100,** à ajouter au 406 ppm actuels : ces +5% ou +10% sur la quantité de dioxyde de carbone dans l'air ne sauraient avoir aucun « effet climatique » !

Les logistiques de la figure 13 en bleu et en noir, avec en 2100, des émissions de 21 Gt-C/an ou de 35 Gt-C/an, impliquent des quantités de carbone cumulées sur 2010-2100 de 1341 Gt-C ou de 1671 Gt-C, trois fois ou quatre fois les 430 Gt-C cumulés entre 1751 à 2016 ; les réserves prouvées sont actuellement estimées à presque 1000 Gt-C [15].

La logistique en noir correspond en gros au scénario RCP8.5 du rapport IPCC-GIEC AR5 de 2015, qui prédit que des émissions cumulées de 1685 Gt-C (comptées à partir de 2011 où l'on avait 390 ppm) amèneraient +545 ppm de CO_2 (soit + 1155 Gt-C dans l'atmosphère) en 2100 au lieu des +40 ppm de la figure 14, presque 14 fois plus !

Notons que pour ce scénario RCP8.5 :

- 1155 / 1685 = 69% des émissions *resteraient dans l'air* (sic !) perpétuellement, contre 44% actuellement si on 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,

[15] Selon BP stats 2018 les réserves prouvées seraient de 240 Gt pour le pétrole, 718 Gt et 318 Gt pour le charbon (anthracite et lignite) et 193 10^{12} m^3 gaz naturel ; en passant par des conversions en tep= tonne équivalent pétrole :
240 Gtep x (0,84 t-C/tep) + (718 Gt anthracite / (1.5 t-anthracite/tep) + 318 Gt lignite / (3 t-lignite/tep)) (1,08 t-C/tep) + (193 10^{12} m^3 gaz naturel) (0,00086 tep/m^3) (0,64 t-C/tep) = **939 Gt-C**

.

- +545 ppm en 90 ans soit **+6 ppm/an** de 2011 à 2100, **trois fois les actuels +2 ppm/an** (fig. 11, vignette gauche) dont environ +0,3 ppm/an effectivement anthropiques (fig. 14 vignette de droite),
- l'ajout d'autres gaz (méthane, etc.) permet d'arriver à 1310 ppm de CO_2 et *« équivalent CO_2 »* soit +9,6 ppm/an.

9. Annexe : consommation d'énergie primaire

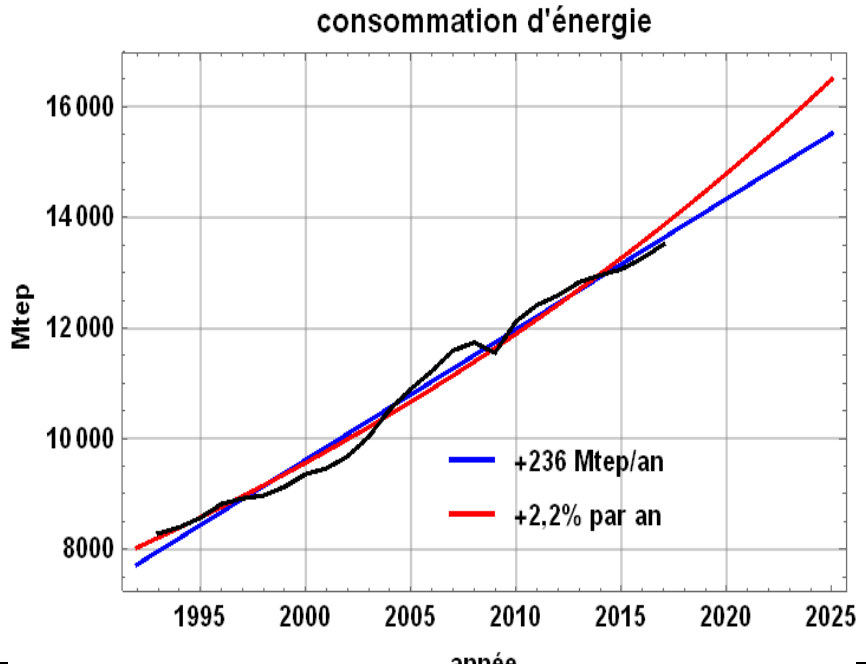
Les consommations mondiales de 2017 sont 4,6 Gtep en pétrole, 3,2 Gtep en gaz et 3,7 Gtep en charbon plus, en électricité, en Peta-Watt-heure, 2,7 en nucléaire, 4 en hydroélectrique, 0,4 en solaire et 1,1 en éolien.

Comme le rendement thermique des centrales électriques modernes « ultra-super-critiques » (vapeur à 620°C et 300 bar, avec des progrès incrémentaux [16] 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 [17] 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 15 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).



[16] 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.

[17] https://www.powermag.com/who-has-the-worlds-most-efficient-coal-power-plant-fleet/