

Pour revisiter le cycle du carbone

Camille Veyres (1), Jean-Claude Maurin (2)

(1) ingénieur

(2) professeur agrégé de physique

Correspondance à camille.veyres@polytechnique.org

Résumé :

La durée de vie d'une molécule de CO₂ dans l'air est d'environ cinq ans : 6% du CO₂ dans l'atmosphère provient des combustibles fossiles restés dans l'air, 94% provient du dégazage naturel des océans et les sols. L'augmentation de près de 40 % de la productivité de la végétation depuis 1900 est une conséquence majeure de l'augmentation de la masse de CO₂ dans l'air.

La corrélation mois par mois, depuis 1959, de la dérivée par rapport au temps de la série MLO (Mauna Loa Observatory) du CO₂ dans l'air et de l'anomalie de température de surface de la mer (SST) de la zone intertropicale de dégazage naturel océanique prouve que 94 % du CO₂ dans l'air est l'intégrale sur le temps des températures passées, **une conséquence de ces températures passées.**

Mathématiquement, la série temporelle du CO₂ au MLO est de type ARIMA avec I=1, ce qui signifie qu'elle doit être dérivée une fois par rapport au temps avant d'être corrélée avec la série SST.

Il n'y a pas de corrélation ($R^2 = 0,01$) entre les émissions venues des combustibles fossiles et les accroissements du CO₂ dans l'air.

Les quatre cinquièmes de la variation depuis 1959, -idem depuis 1870- de la teneur de l'air en CO₂ est une simple fonction linéaire de l'addition depuis 1959 -ou depuis 1870- des anomalies mensuelles des températures de surface des mers sur 20°S-20°N.

Les rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ au MLO confirment les 6% de "carbone fossile" dans l'air.

Des modèles simples des flux de carbone entre les trois réservoirs océans, atmosphère, et végétation & sols, avec un dégazage océanique simplement croissant ou calculé à partir de la SST intertropicale reproduisent à la fois les séries observées au MLO et les reconstructions de la productivité de la végétation.

Les théories et les modèles fondés sur la Airborne Fraction, la fonction de Bern, le temps d'ajustement, la rémanence dans l'air de 15% à 40% des émissions fossiles après 1000 ans, un goulot d'étranglement entre l'air et l'océan, un faible échange de carbone entre la surface et l'océan profond, la relation de Revelle ... se révèlent n'être que des leurres.

Le CO₂ dans l'air est essentiellement l'intégrale sur le temps des températures passées, une conséquence des températures qui pilotent le dégazage de l'océan et **ne peut donc pas être la cause des températures.**

Mots clés : climat, CO₂, cycle du carbone, ARIMA, dégazage océanique, ¹³C, ¹⁴C, Airborne fraction, fonction de Bern, modèles simples du cycle du carbone.

Notations

absorb(t) absorption annuelle de carbone par la végétation et les océans

AF Airborne Fraction

AT(t) Anomalie de température

degaz(t) libération annuelle de carbone par les océans, la végétation et les sols

f(t) flux de carbone, $f_{\text{fossil}}(t)$ flux venant des émissions de combustibles fossiles,

$f_{\text{logis}}(t) = 18 / (1 + \exp((2011-t)/29))$ approximation de $f_{\text{fossil}}(t)$

F(t), F1(t) (§ 6), F2(t) (§ 9.7, Fig. 27), FB(t) (§ 9.2) fonctions de réponse impulsionnelle

GGPP Global Gross Primary Productivity

Gt-C gigaton carbon

MLO Mauna Loa Observatory

NPP Net Primary Productivity

ppm part per million, partie par million

$p_{\text{CO}_2\text{air}}$, $p_{\text{CO}_2\text{seawater}}$ pressions partielles du CO₂ dans l'air et dans l'eau de mer (μatm)

R facteur tampon de Revelle entre 9.5 to 12.5

SST_{20°S-20°N}: Sea Surface Temperature Température de surface de la mer moyennée entre 20°S et 20°N

$y(t)$, $y_{\text{fossil}}(t)$, $y_{\text{natural}}(t)$: masses de carbone : total dans l'air, masse venant des combustibles fossiles et du dégazage naturel
 $y_{\text{air}}(t)$, $y_{\text{veg}}(t)$, $y_{\text{oce}}(t)$, $y_{\text{ocs}}(t)$, $y_{\text{ocd}}(t)$: masses calculées de carbone dans l'air, dans végétation & sols, dans l'océan, l'océan de surface, dans l'océan profond (deep)
 $y_{\text{MLOlogis}}(t) = 281 \text{ ppm} + 390 \text{ ppm}/(1 + \exp((2045 - t)/36.8))$ extension de y_{MLOppm}
 $y_{\text{MLOppm}}(t)$ teneur en ppm de l'air en dioxyde de carbone observée au MLO
 $z(t)$ cumul des émissions combustibles fossiles jusqu'au temps t
 $\tau(t)$ rapport stock/ écoulement d'un réservoir

1. Introduction

Cette contribution vient à la suite de plusieurs articles importants sur le cycle du carbone qui ont donné lieu à des discussions argumentées : [Köhler et 6 coauteurs, 2017], [Harde, 2017], [Harde, 2019], [Berry, 2021], [Godwin, 2020], après [Essenhigh 2009] et [Cawley, 2011], après [Hocker, 2010] et après [Beenstock, 2012] et [Pretis, 2013]. Elle intègre des résultats de [Lévy, 2013], [Campbell, 2017], [Haverd, 2020], [Segalstad, 1997].

2. Les cycles de l'eau, du carbone et de la chaleur lente et sensible

Les différences d'insolation et de température entre la zone intertropicale et les hautes latitudes provoquent un transfert de chaleur latente (évaporation puis condensation), de chaleur sensible et de matière (eau, vapeur d'eau, air, CO_2) des océans chauds vers les océans froids et vers les continents, par le mouvement de l'air et des océans de surface ; l'océan est le **principal réservoir** d'eau, de carbone mobile et de chaleur. La pression partielle du CO_2 dans l'eau de mer varie comme la puissance 12,5 de la température (absolue, en Kelvin) de cette eau (voir § 10.) et, pour une même quantité de carbone contenu, est, en zone intertropicale vers 32°C , 3,2 fois plus grande que vers 5°C . Le contraste des températures de surface impose donc qu'il y ait une zone de dégazage océanique de carbone et une zone d'absorption séparées de plusieurs milliers de kilomètres. Ces dégazages et absorptions de l'ordre de 100 Gt-C/an entre l'air et les océans de surface se prolongent entre les océans de surface et l'océan profond comme exprimé par [Levy, 2013] :

"We find that climatological physical fluxes of dissolved inorganic carbon (DIC) are two orders of magnitude larger than the other carbon fluxes and vary over the globe at smaller spatial scale. 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."

3. 82% de l'augmentation du CO_2 dans l'air entre 1959 et 2020 est due au dégazage naturel induit par les températures de surface de la mer entre 20°S et 20°N .

La respiration autotrophe des plantes est invisible des observatoires du Mauna Loa (MLO, Mauna Loa Observatory) ou du Pôle Sud (SPO, South Pole Observatory) loin de toute végétation et à près de 3000 m d'altitude ; en surface des variations sur 24 heures de la teneur de l'air en CO_2 de 100 ppm sont courantes (par exemple en juillet au Luxembourg [Massen, 2006], [Massen 2011]) avec un minimum diurne et un maximum nocturne.

La zone entre 20°S et 20°N est aux trois quarts océanique. La figure 7.3.5 de [IPCC, 2007] pour l'année 1990 (360 ppm au MLO) et pour le préindustriel suggère une durée moyenne de séjour d'une molécule de CO_2 dans l'air de l'ordre de 5 ans, soit une demi-vie de 3.5 ans, puisque chaque année 20% du CO_2 de l'air est absorbé.

[IPCC, 2001] §1.3 suggère une absorption nette de carbone par la végétation NPP (Net Primary Productivity) de l'ordre de $GPP/2$ (GPP est la Gross Primary Productivity) ; [Haverd 2020] montre que la Global Gross Primary Productivity, GGPP, était 104 Gt-C/an en 1900 et 146 Gt-C/an en 2016 d'où une NPP de 50 Gt-C/an en « préindustriel », 52 Gt-C/an en 1900, 63 Gt-C/an en 1990 et 73 Gt-C/an en 2016 et plus après. Ces indications recourent celles de [Donohue, 2013], [Graven, 2013], [Nemani, 2003], [Prestzsch, 2014], [Zhu, 2016].

Le tableau 1 montre que le rapport stock à flux sortant est resté autour de cinq ans depuis le préindustriel.

Tableau 1 Flux de carbone en Gt-C/an absorbés par les océans et par la végétation, et stocks dans l'atmosphère			
Absorption :	Préindustriel (1850 ?)	1990	2020
par l'océan	70	92 [IPCC, AR4]	102
par la végétation	50 [Haverd 2020]	61 [IPCC, AR4]	73 [Haverd 2020]
Gt-C & ppm dans l'air	600 & 283 ppm	754 & 356 ppm	875 & 413 ppm
Rapport stock/flux	5 ans	4,9 ans	5 ans

La masse totale $y(t) = y_{\text{natural}}(t) + y_{\text{fossil}}(t)$ de carbone dans l'air est la solution de $dy(t)/dt = f(t) - y(t)/5$, où $f(t)$ est le flux entrant somme du flux $f_{\text{fossil}}(t)$ venu des combustibles fossiles et du flux $f_{\text{natural}}(t)$ des dégazages naturels des océans et des sols.

Par linéarité de l'équation différentielle, $dy_{\text{fossil}}(t)/dt = f_{\text{fossil}}(t) - y_{\text{fossil}}(t)/5$ donc

$$y_{\text{fossil}}(t) = \int_{1750}^t \exp(-(t-t')/5) f_{\text{fossil}}(t') dt' \text{ et } y_{\text{natural}}(t) = y(t) - y_{\text{fossil}}(t),$$

où $y(t)$ est la série des mesures du Mauna Loa Observatory depuis la mi-1958.

Quoique $f_{\text{natural}}(t)$ soit mal connu, $y_{\text{natural}}(t)$ est la différence de deux quantités connues avec précision. $f_{\text{fossil}}(t)$ vient des séries économiques, séries CDIAC [Boden] sur 1751 à 2010 et, depuis 1965, série de BP statistical review majorée de 5% pour coïncider avec les 45 dernières années du CDIAC (effet des cimenteries). Les émissions d'une année sont à dater du milieu de l'année (les émissions de l'année 2020 sont constatées à la date 2020.99 ou 2021.0 et seront à dater de 2020.5) ou bien sont à interpoler mois par mois entre les dates 2020.0 (émissions de 2019) et 2021.0 (émissions de 2020).

La logistique $f_{\text{logis}}(t) = 18/(1 + \exp((2011-t)/29))$ approche $f_{\text{fossil}}(t)$ et simplifie certains calculs.

Des durées de séjour du dioxyde carbone dans l'air de 4,5 ans ou de 5,5 ans ne modifient presque pas les incréments $dy_{\text{fossil}}(t)/dt$ qui ne diffèrent que de moins de 0.1 ppm/ (12 mois) (figure 1). L'incertitude sur la durée de vie n'aura donc que fort peu d'effet sur le calcul de $dy_{\text{natural}}(t)dt$.

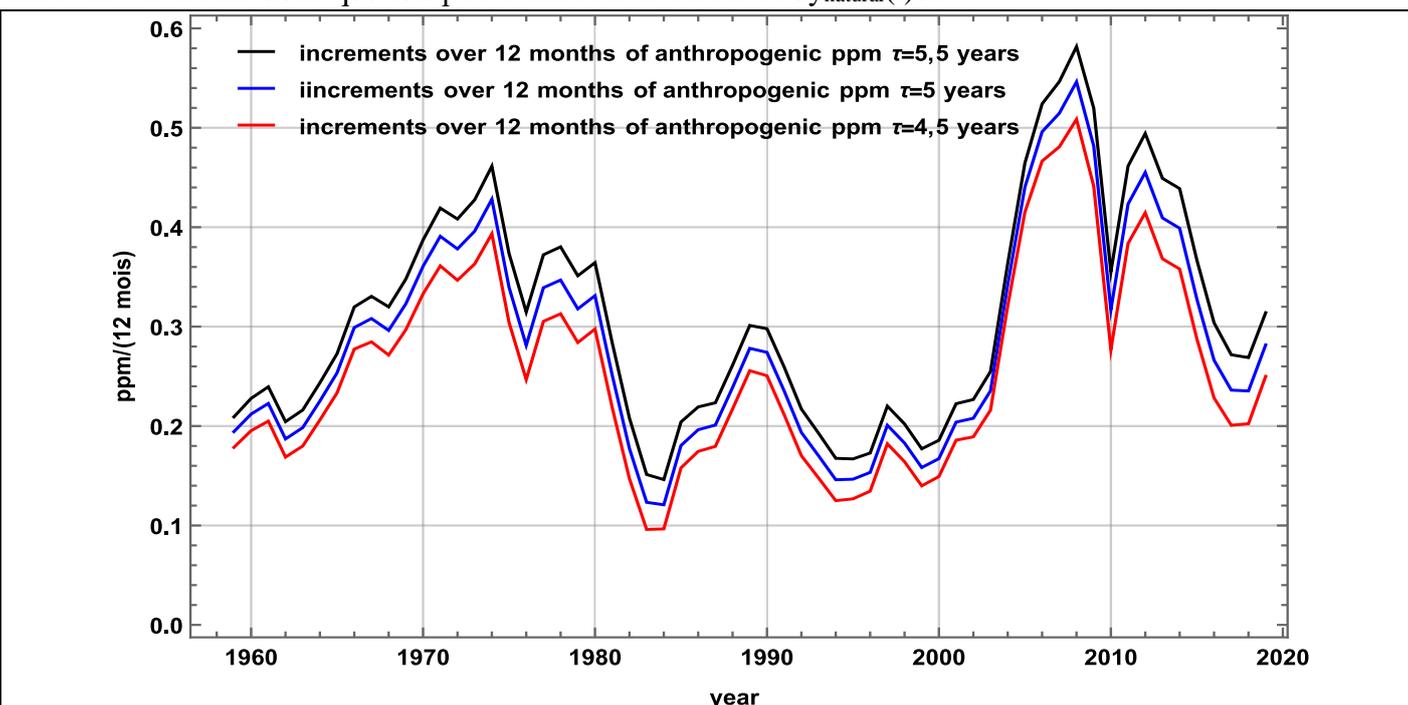


Figure 1 Contribution anthropique $dy_{\text{fossil}}(t)/dt$ à l'accroissement annuel du CO_2 calculée pour trois durées de séjour τ du dioxyde de carbone dans l'air : 4,5 ans, 5 ans et 5,5 ans

Pour désaisonnaliser les variations des ppm du stock $y_{\text{natural}}(t)$ dans l'atmosphère nous prendrons des incréments sur 12 mois **centrés au milieu des 12 mois**

$$dy_{\text{natural}}(t) / dt = y_{\text{natural}}(t + 6 \text{ mois}) - y_{\text{natural}}(t - 6 \text{ mois})$$

La figure 2 montre que $dy_{\text{natural}}(t)/dt$ est fortement corrélé avec $2.975 (AT(t) + 0.253^\circ\text{C})$ où $AT(t)$ est l'anomalie des températures de la surface des mers de la série HadISST entre 20°S et 20°N , de 1870 à 2020 (corrélations sans lissage). Le coefficient de détermination de la corrélation sur 1959-2020 sans lissage par moyenne mobile est $R^2 = 0.54$ ou $R = 0.74$, malgré les perturbations induites par de grandes éruptions volcaniques. Un lissage par moyenne mobile sur 12 mois amène $R = 0.83$ mais au prix de la perte de la force du test statistique [Munshi, 2019].

L'addition des incréments mensuels entre les dates 1959 et 2020.0 est 79.8 ppm pour la courbe grise de la figure 2 et 78.4 ppm pour la courbe bleue : la série MLO est, entre ces dates, passée de 315.2 ppm à 412.7 ppm soit +97.5 ppm et y_{fossil} de 4.6 ppm à 21.9 ppm.

La somme de ces deux contributions $79 + (21.9 - 4.6) = 96.3$ ppm est proche des 97.5 ppm observés. La masse du carbone de combustibles fossiles resté dans l'air $y_{\text{fossil}}(t)$ a, sur 1959-2020, contribué $(21.9 - 4.6) = 17.3$ ppm, 18% de l'augmentation observée au MLO entre 1959 et 2020, et les dégazages naturels nets (absorption soustraite) 82%. Les « fossiles restés dans l'air » ne font que $21.9 \text{ ppm} / 413 \text{ ppm} = 5.3\%$ de la masse de carbone de l'atmosphère.

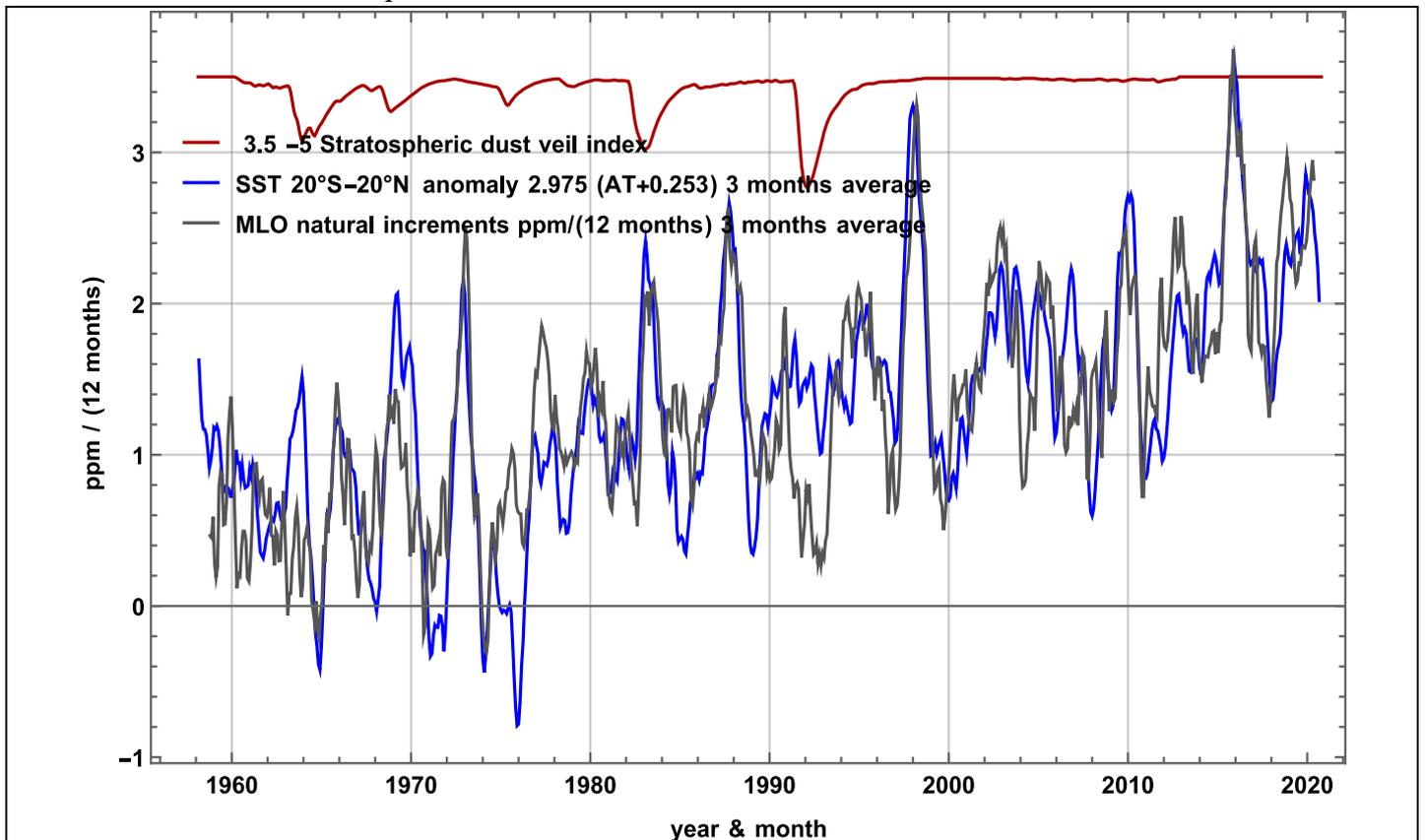


Figure 2 Courbe noire : incréments $y_{\text{natural}}(t + 6 \text{ mois}) - y_{\text{natural}}(t - 6 \text{ mois})$ tirés de la série MLO. Courbe bleue $2,975 (AT(t) + 0,253^\circ\text{C})$ où $AT(t)$ est l'anomalie de la série HadISST 20°S à 20°N (Rayner et al., GRL), téléchargée depuis knmi-climate explorer. Les incréments sont nuls pour $AT(t) = -0.25^\circ\text{C}$. La figure 12 montre cette série $AT(t)$ depuis 1870.

La courbe en rouge foncé est $3.5 + (-5)$ fois l'épaisseur optique de l'aérosol stratosphérique à 550 nm (data.giss.gov/modelforce/strataer downloaded from knmi-climate explorer) dont on voit les effets refroidissants. Un lissage par moyenne mobile sur 3 mois améliore la lisibilité du graphique mais n'est pas employé pour l'évaluation de la corrélation.

Entre 1870 et 1959, la somme des valeurs mensuelles de $2,975 (AT(t) + 0,253^\circ\text{C})$ est +33,2 ppm pour le dégazage naturel net cumulé ; $33,2 \text{ dégazage naturel} + 4,6 \text{ fossiles} = 37,8 \text{ ppm} = 315,2 \text{ ppm} - 277,4 \text{ ppm}$ est bien la différence entre 1959 et une hypothèse préindustrielle autour de 278 ppm.

Les discordances entre les courbes bleue et grise de la figure 2 sont petites par rapport aux fluctuations annuelles qui, au MLO, sont de +9 ppm entre septembre et avril et de -7 ppm de mai à septembre.

La température de la basse troposphère intertropicale (série UAH-MSU depuis décembre 1978) est déduite d'observations par satellite avec une excellente couverture géographique et temporelle ; elle est, à cause de la faible capacité thermique de l'air, très corrélée avec la température de surface des mers.

La figure 3 montre une corrélation entre $1.35 (AT(t)_{\text{UAH MSU } 20^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{N}} + 1.165^{\circ}\text{C})$ et $dy_{\text{natural}}(t)/dt$: $R^2 = 0.44$ (calculé sans lissage) ; le cumul des incréments de la courbe bleue est 67 ppm entre 1978.9 et 2020.6 et 68.1 ppm pour la courbe noire des incréments naturels vus au MLO.

$y_{\text{fossil}}(2020) - y_{\text{fossil}}(1978.9) = 21.8 - 10.7 = 11.1$ ppm et la somme des fossiles et des dégazages naturels 11.1 ppm + 67 ppm = 78.1 ppm est proche des +78.6 ppm de la série du MLO entre 1978.95 et 2020.6. La corrélation R est 0.666.

La contribution des dégazages naturels a donc, sur 1979-2020, été 67 ppm / 78.1 ppm = 86%, et celle des émissions anthropiques restées dans l'air, 14% de l'accroissement observé sur ces 41.6 ans.

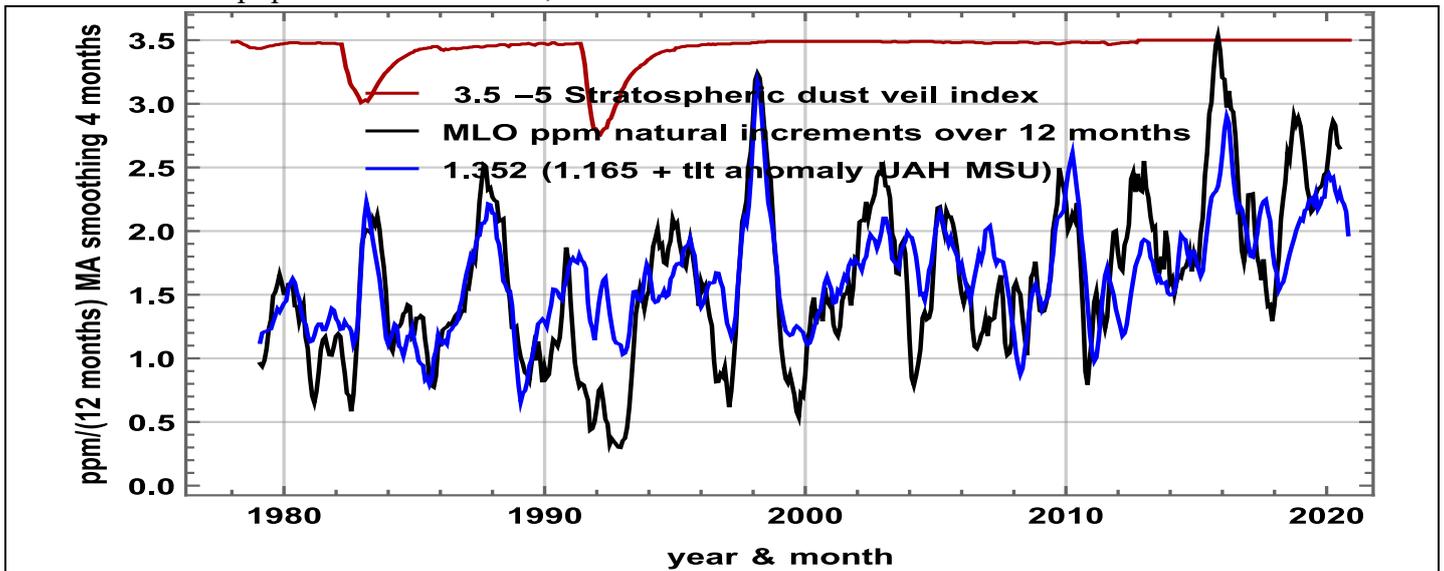


Figure 3 Comme à la figure 2, mais la courbe bleue est ici $1.352 (AT(t) + 1.165^{\circ}\text{C})$, $AT(t)$ anomalie des températures de la basse troposphère intertropicale série UAH MSU depuis décembre 1978.

La figure 4 montre encore que les températures pilotent la différence entre dégazage naturel et l'absorption du stock $y_{\text{natural}}(t)$: de 1991 à fin 1995 les émissions anthropiques ont été constantes, alors que les incréments sur 12 mois de $y_{\text{MLOppm}}(t)$ ont été 0.48 ppm/(12 mois) sur les 9 mois centrés sur octobre 1992, quatre fois moins que les 2.1 ppm/(12 mois) sur les 9 mois centrés sur octobre 1994, après la fin du refroidissement amené par les poussières volcaniques. Ce refroidissement aurait augmenté l'absorption aux moyennes latitude et réduit le dégazage intertropical.

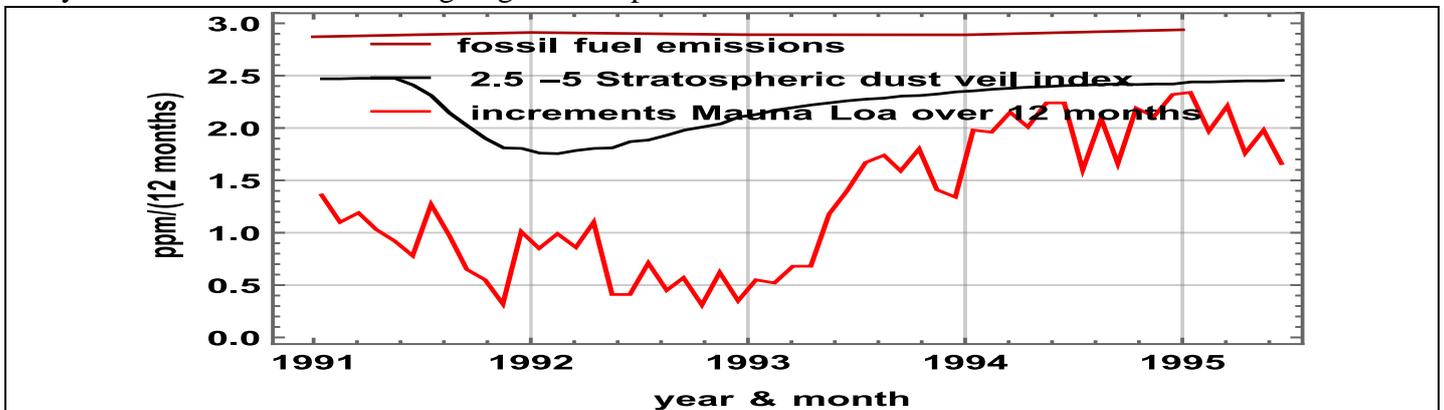


Figure 4 Courbe brune en haut : émissions de combustibles fossiles ppm/an
 Courbe noire : indice du voile de poussières stratosphériques (NASA GISS)
 Courbe rouge : croissance des ppm au MLO: 0,5 ppm/(12 mois) sur les 9 mois centrés sur octobre 1992 et 2,21 ppm/(12 mois) sur les 9 mois centrés sur octobre 1994.

4. Les émissions anthropiques ne corrèlent pas avec la croissance $dy(t)/dt$ des ppm

La figure 5 montre que l'autocorrélation de la série des émissions « fossiles » est très différente de celle de la série $dy(t)/dt = y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ des accroissements des ppm observés au MLO.

L'autocorrélation de $dy(t)/dt$ est très voisine de l'autocorrélation de la série des anomalies des températures de surface de mers entre 20°S et 20°N.

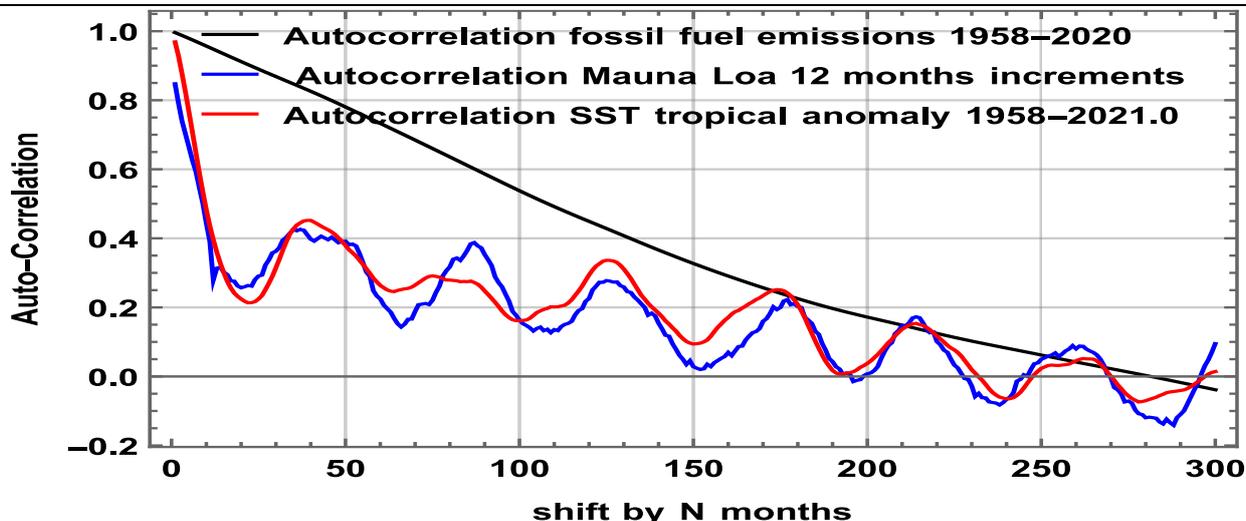


Figure 5 Autocorrélations des trois séries : émissions fossiles (en noir), températures de surface des mers de la zone de dégazage (en rouge) et incréments $dy(t)/dt = y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ des ppm au MLO (en bleu).

Le tableau ci-dessous montre que le doublement de la production de charbon entre 2003 et 2012 avec +40% sur les émissions fossiles a multiplié par 3.3 la tendance linéaire des émissions « fossiles » par rapport à celle de la décennie précédente alors que la tendance des incréments $y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ des ppm sur les mêmes décennies était, elle, divisée (!) par presque 3.

Tendances linéaires sur :	1990-2003	2003-2013	facteur
Emissions combustibles “fossiles” (ppm/12 mois)/an	0.0337	0.113	x 3.35
Incréments observés au MLO (ppm/12 mois)/an	0.0749	0.0259	x 0.35

Ce que montre la figure 6. La récupération après l'éruption du volcan Pinatubo qui a fait chuter les températures et le dégazage et/ou augmenté l'absorption (voir détail à la figure 4) perturbe le calcul de la tendance linéaire sur 1990-2003.

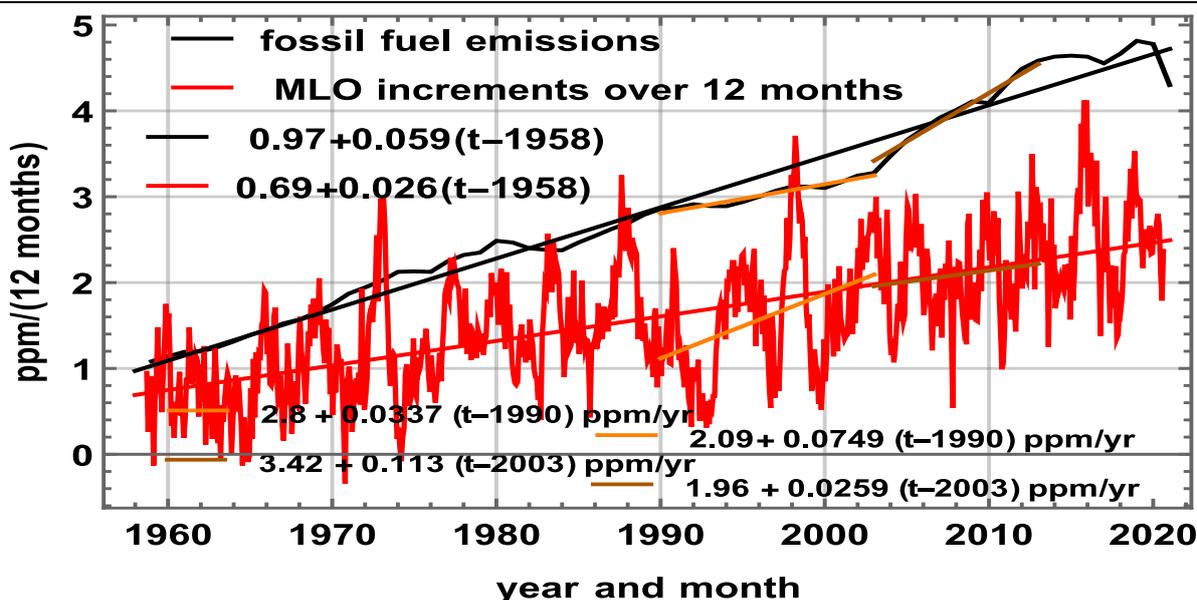


Figure 6 Séries des incréments des ppm MLO (en rouge) et des émissions fossiles (en noir) et leurs tendances linéaires (les droites rouge et noire).

Les tendances linéaires sur 1958-2020 (les lignes rouges et noires) seront soustraites des courbes rouges et noires pour laisser les séries "détrended" sans tendance et éviter les fausses corrélations.

La figure 7 montre la non-corrélation de $dy(t)/dt = y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ et de $f_{\text{fossil}}(t)$ sur les séries obtenues après soustraction des tendances linéaires : le coefficient de détermination R^2 est 0.01 !

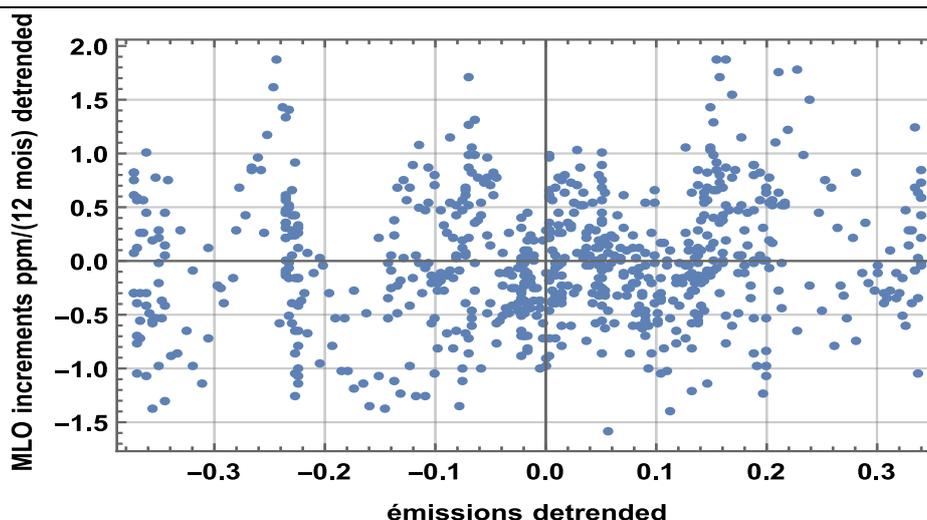


Figure 7 Corrélation entre les incréments $y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ des ppm au MLO (axe vertical) et les émissions (axe horizontal) pour les séries sans tendance (detrended). Coefficient de détermination $R^2 = 0.009$; voir : [Munshi, 2017], [Podobnik, 2007].

La contribution anthropique à $dy(t)/dt$ a été tracée à la figure 1, mais est trop faible pour être visible : sa grandeur est proche du bruit des observations des ppm.

Munshi [2017, 2018, 2019, 2020] a montré que même avec des moyennes prises sur 1, 2, 3, 4 et 5 ans, la concentration de l'air en CO_2 ne réagit pas aux émissions de combustibles fossiles.

En outre, les incertitudes sur les flux naturels (tableau 1) sont de l'ordre de grandeur des émissions de combustibles fossiles : par conséquent, les attributions qui collent bien (par exemple [IPCC, 2013] Fig. 6.1) sont des exemples de raisonnement circulaire. [Munshi] : *"The balance presented by the IPCC with inferred flows thus forces an exact balance by way of circular reasoning. Therefore, the IPCC carbon cycle balance does not contain useful information."*

5. Identification des paramètres des séries temporelles des ppm et des températures

5.1. Séries temporelles ARIMA

Il existe des techniques bien connues pour éviter les corrélations parasites et pour modéliser les séries temporelles ([Wolfram], [Maddala, 1998]).

L'analyse de la série temporelle des ppm MLO (et SPO) montre que c'est une série SARIMA autorégressive intégrée avec $I = 1$, de type MA et un terme saisonnier $I=1$

$$\text{SARIMAProcess}[0.0003, \{\}, 1, \{-0.427, -0.096\}, \{12, \{-0.098\}, 1, \{-0.752\}\}, 0.104]$$

Avec L_x un décalage de x mois $y(t)$ est la solution de

$$(1-L_1)(1 + 0.098 L_{12}) (1-L_{12}) y(t) = 0.0003 + (1 - 0.427 L_1 - 0.096 L_2) (1 - 0.752 L_{12}) e(t)$$

$e(t)$ bruit gaussien de variance 0.104. La figure 8 montre en noir la série observée en bleu la meilleure prédiction et en orange, vert et jaune trois tirages aléatoires du processus, sans aucune valeur prédictive.

La dérivée $y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois})$ est un processus autorégressif AR

$\text{ARProcess}[0.116, \{0.64, 0.15, 0.020, 0.013, 0.083\}, 0.15]$, $y(n) = 0.116 + 0.64 y(n-1) + 0.15 y(n-2) + \dots + e(n)$ avec $e(n)$ de variance 0.15 dont deux tirages aléatoires, évidemment sans aucune valeur prédictive sont à la figure 8.

L'anomalie de la température de surface des mers entre 20°S et 20°N (figure 2, courbe bleue) est un processus ARMA avec une forte autocorrélation d'un mois au mois précédent (figure 5) mais n'est pas une marche aléatoire $\text{ARMAProcess}[0.0082, \{0.956\}, \{0.125, 0.120\}, 0.0038]$

$y(n) = 0.0082 + 0.956 y(n-1) + 0.125 e(n-1) + 0.12 e(n-2) + e(n)$ avec $e(n)$ de variance 0.0038 dont deux tirages aléatoires sont à la figure 8 en bas, sans valeur prédictive.

Les émissions (en Gt-C/an) depuis 1751 sont ARIMA I=2 mais, depuis 1980 ARIMA I = 1,
 $ARIMAProcess[0.0444, \{-0.252, 0.521\}, 1, \{0.152, -0.177\}, 0.0071]$
 $y(n) - y(n-1) = 0,0444 - 0.252(y(n-1) - y(n-2)) + 0,521 (y(n-2) - y(n-3)) + e(n) + 0.152 e(n-1) - 0.177 e(n-2)$
 $e(n)$ de variance 0.00771.

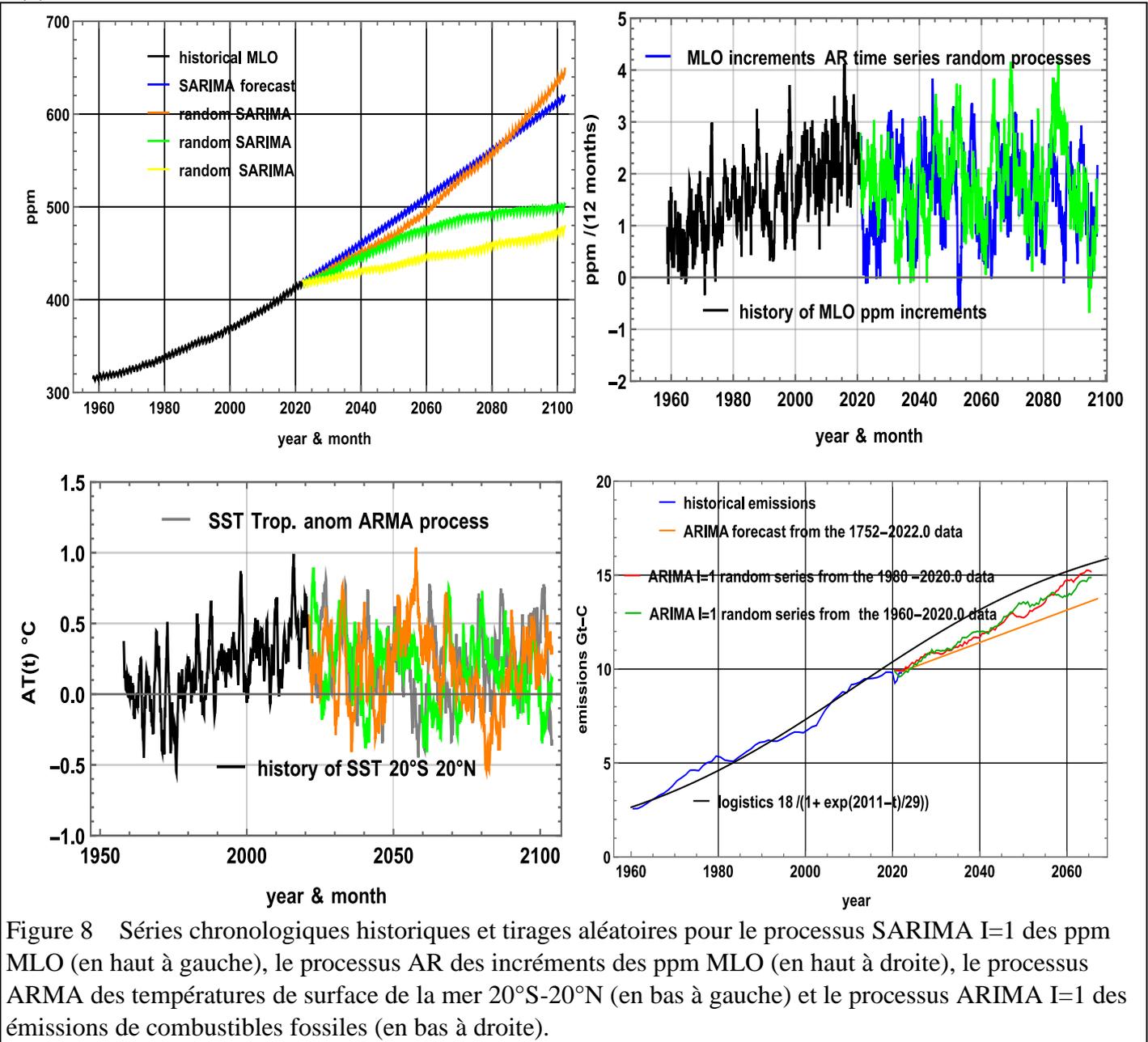


Figure 8 Séries chronologiques historiques et tirages aléatoires pour le processus SARIMA I=1 des ppm MLO (en haut à gauche), le processus AR des incréments des ppm MLO (en haut à droite), le processus ARMA des températures de surface de la mer 20°S-20°N (en bas à gauche) et le processus ARIMA I=1 des émissions de combustibles fossiles (en bas à droite).

La seule conclusion solide, mathématique, de ces exercices est que la série ARIMA des ppm avec I = 1 **DOIT être dérivée une fois par rapport au temps** avant tout essai de corrélation avec une série stationnaire ARMA, et que l'on ne peut chercher **que et rien d'autre qu'une** relation du type $dy(t)/dt = a (AT(t) - AT_0)$, où AT(t) est une anomalie des températures.

Les ppm de CO₂ dans l'air sont donc essentiellement l'intégrale sur le temps des températures passées, une conséquence des températures.

Notez que si les incréments ppm étaient proportionnels aux émissions de combustibles fossiles qui sont ARIMA avec I = 1, le cumul de ces incréments serait, à un facteur près, la série des ppm du MLO et devrait être I = 2 : or cette série est I=1. Les incréments des ppm au MLO sont une série stationnaire autorégressive alors que les émissions sont ARIMA, I = 1. La conjecture d'une Airborne Fraction (discutée au §9.1) est donc fausse.

5.2. Des trucs pour tromper : des séries temporelles faites de cumuls de grandeurs généralement positives et un usage abusif des moyennes mobiles.

Les séries temporelles dont les termes sont des cumuls de quantités généralement positives apparaissent toujours bien corrélées, même si ces quantités sont entièrement aléatoires. La taille effective de l'échantillon est réduite par la réutilisation des nombres puisque le premier nombre x_1 est utilisé $n-1$ fois, x_2 l'est $n-2$ fois ...et les degrés de liberté DF deviennent sans signification. Citons [Munshi] : *“Therefore although strong correlation and regression coefficients can be computed from the time series of cumulative values, these statistics have no interpretation because they are illusory.”*

Deux lignes droites sont parfaitement corrélées (mais ça n'a aucun sens !), d'où le lissage féroce souvent pratiqué sur certaines séries temporelles avec des moyennes mobiles pour donner un air de vraisemblance à une causalité inexistante.

Le nombre effectif de degrés de liberté, DF, pour une série de longueur n lissée par une fenêtre mobile de longueur w devient : $n^2/(n-w+1)/w - k$. Pour une série mensuelle de 60 ans $n = 720$ et $w = 60$ (comme souvent utilisé pour la Airborne Fraction), $DF = 11$ au lieu de 718.

6. Quelques modélisations simples : stocks et flux

[IPCC, 2013] indique que les stocks et les flux sont connus à plus ou moins 10% près. Nous supposons ici que les masses de carbone des trois réservoirs sont : océan 38000 Gt-C, atmosphère 875 Gt-C, végétation & sols vers 2500 Gt-C, que les flux annuel vers l'atmosphère sont 1/360 du stock « océans » et 1/40 du stock « végétation & sols » et que le flux annuel de l'atmosphère vers l'océan est 11.5% du stock atmosphérique, et le flux annuel de l'atmosphère vers la végétation 8.5% du stock atmosphérique.

Schéma des échanges entre les réservoirs avec quatre flux exprimés en fraction du stock du réservoir cédant
 $(y_{\text{végétation \& sols}(t)} \ 1/40 \rightarrow) \ (\leftarrow 8.5\% \ y_{\text{air}(t)} \ 11.5\% \rightarrow) \ (\leftarrow 1/\tau(t) \text{ ou } 1/360 \ y_{\text{océan}(t)})$

Le flux absorbé par la végétation (net de la respiration) supposé être GGPP/2 (avec la GGPP de [Haverd 2020]) est représenté à la figure 9 avec son approximation par 8,5% des ppm MLO convertis en Gt-C avec avant 1959 un prolongement par $y_{\text{MLOlogis}}(t) = 281 + 390/(1 + \exp((2045 - t)/36.8))$.

Les trois équations différentielles pour les masses de carbone dans l'air, dans la végétation & les sols, et dans l'océan sont, sur un intervalle de temps $[0, 120]$ correspondant à 1900-2020 :

$$y_{\text{veg}}'(t) = - y_{\text{veg}}(t)/40 + 0.085 y_{\text{air}}(t), \quad y_{\text{air}}'(t) = - y_{\text{air}}(t)/5 + y_{\text{veg}}(t)/40 + y_{\text{oce}}(t)/360 + f_{\text{fossil}}(t),$$

$$y_{\text{oce}}'(t) = - y_{\text{oce}}(t)/360 + 0.115 y_{\text{air}}(t), \quad \text{avec } y_{\text{air}}(0), y_{\text{veg}}(0), y_{\text{oce}}(0) \text{ donnés.}$$

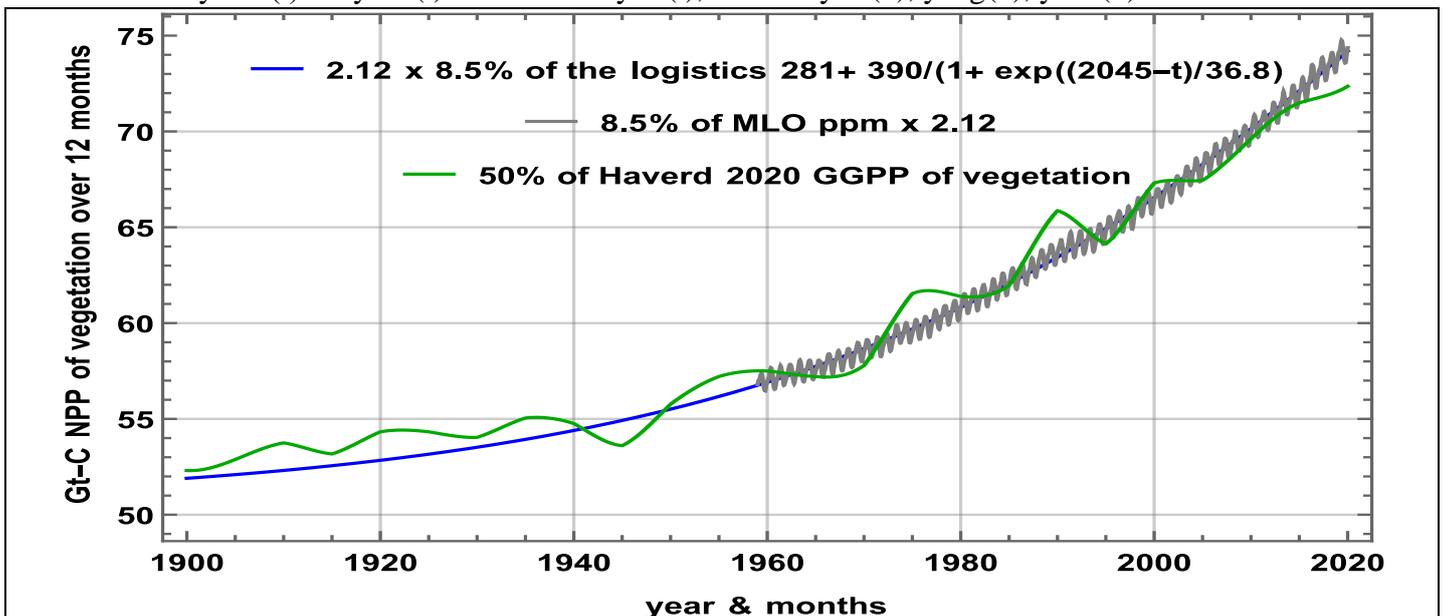


Figure 9 : Net Primary Productivity NPP de la végétation (en vert) en Gt-C/an et son approximation par 8.5% de la masse de carbone de l'air selon la série MLO en gris et selon son extrapolation logistique en bleu

La figure 10 montre ce que devient une impulsion unité de carbone au temps $t = 0$ dans l'air ($f_{\text{fossil}}(t) = 0$ pour $t > 0$, $y_{\text{air}}(0) = 1$, $y_{\text{veg}}(0) = y_{\text{oce}}(0) = 0$) : elle décroît en $\exp(-t/5)$ pendant les premiers 10 ans et tend vers 2,1% au bout de 200 ans car ce carbone se répartit finalement entre les trois réservoirs à proportion de leurs masses, soit pour l'atmosphère : $875 / (875 + 2500 + 38000) = 2.1\%$.

La courbe noire qui décrit la masse de carbone restée ou revenue à l'air après des séjours dans les deux autres réservoirs est bien approchée par la réponse impulsionnelle

$$F1(t) = 0.021 + 0.928 \exp(-t / 4.73) + 0.0416 \exp(-t / 70.46)$$

avec $F1(30) = 5\%$, $F1(100) = 3,1\%$; $F1(t)$ est très différente de la réponse impulsionnelle de Bern (figure 10, courbe rouge) qui prétend dire la fraction d'une impulsion de carbone restée dans l'air ou revenue à l'air. Le réservoir « végétation & sols » en vert à la figure 10, absorbe rapidement le carbone de l'air, passe par un maximum à 34% à $t = 14.4$ ans puis restitue son carbone : il contient encore 9,2% de l'impulsion initiale à $t = 200$ ans et 6% à long terme.

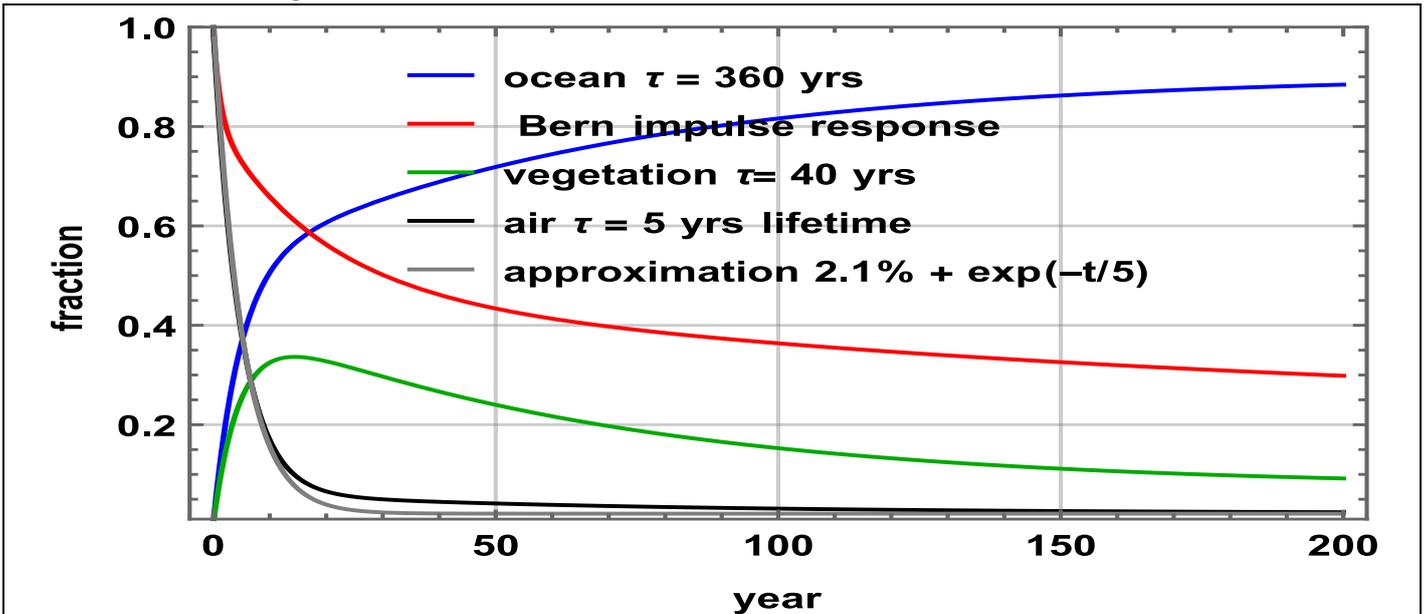


Figure 10 Répartition entre les trois réservoirs d'une impulsion unité de carbone au temps $t = 0$. La courbe noire $F1(t)$ et la grise $2.1\% + \exp(-t/5)$ diffèrent d'au plus 0.027.

La figure 11 montre la convolution de $F1(t)$ avec la série des émissions (c'est le carbone fossile restant dans l'air ou retourné dans l'air après absorption et dégazage) (courbe rouge) et la convolution de $\exp(-t/5)$ avec la série d'émissions (c'est le carbone fossile resté dans l'air, pas encore absorbé) (courbe orange). Les émissions de combustibles fossiles représentent, depuis 1900, environ 17% (carbone resté dans l'air) ou 23% (carbone encore dans l'air ou retourné dans l'air après absorption(s) et dégazage(s)) de l'augmentation de y_{MLOppm} en 2020 par rapport au « préindustriel ».

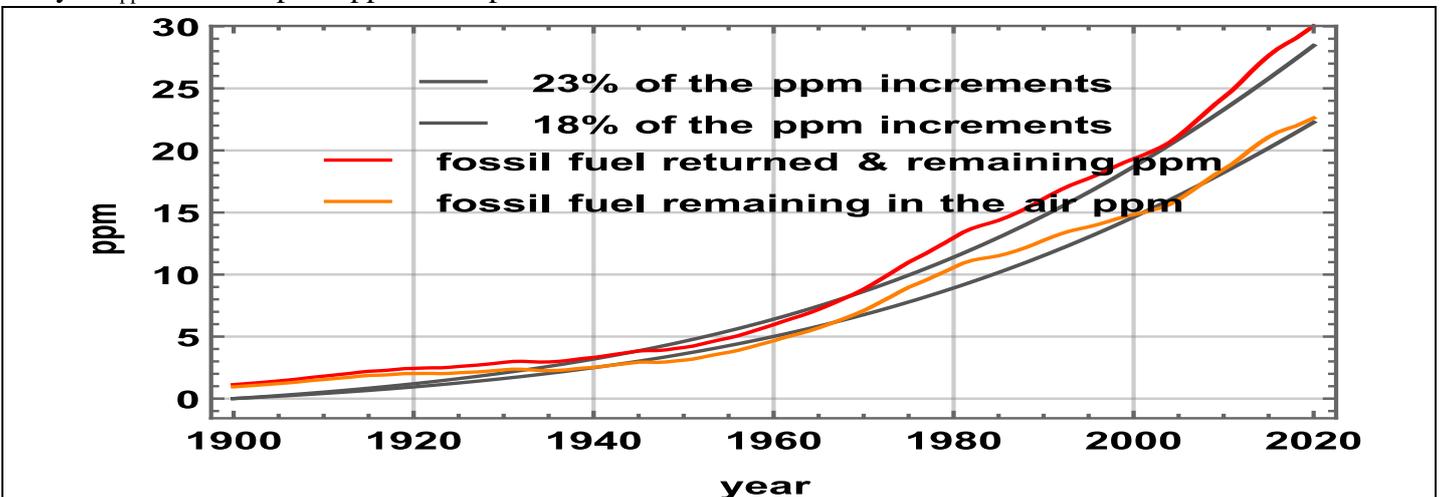


Figure 11 Ordres de grandeur des masses de carbone « fossiles » restées dans l'air (orange) et restées ou revenues à l'air (courbe rouge) et en gris leurs approximations par une fraction du cumul de $f_{\text{fossil}}(t)$ entre 1900 et l'année t .

La quasi-constance, sur la figure 11, de la contribution des fossiles à la croissance des ppm (18% ou 23%) peut surprendre : c'est que la série des émissions $f_{\text{fossil}}(t)$ régresse sur l'anomalie des températures de la surface des océans, ce qui est une pure coïncidence entre le développement industriel et économique depuis 1900 et la sortie du petit âge de glace que l'on voit à la figure 12.

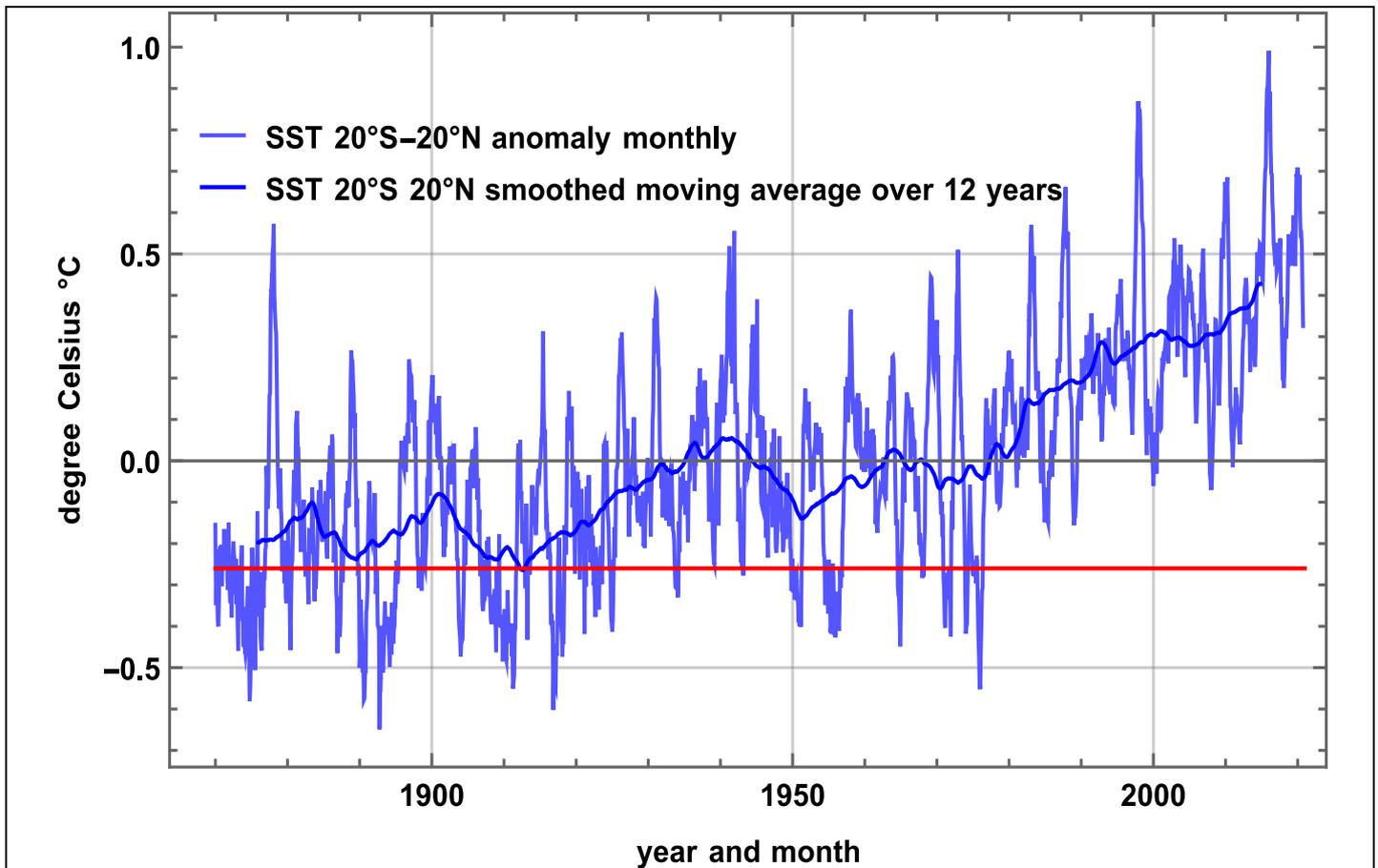


Figure 12 Températures de surface de la zone intertropicale de dégazage de 1870 à 2020, en anomalie mois par mois et avec un lissage par moyenne mobile sur 12 ans.

Le trait rouge est l'anomalie (-0.25°C) de la température qui rend nul le dégazage net (voir figure 2).

Pour retracer l'évolution depuis 1900, les équations exprimant les variations des stocks des trois réservoirs sont avec les quatre flux et le flux venant des combustibles fossiles, en prenant $t=0$ en 1900 :

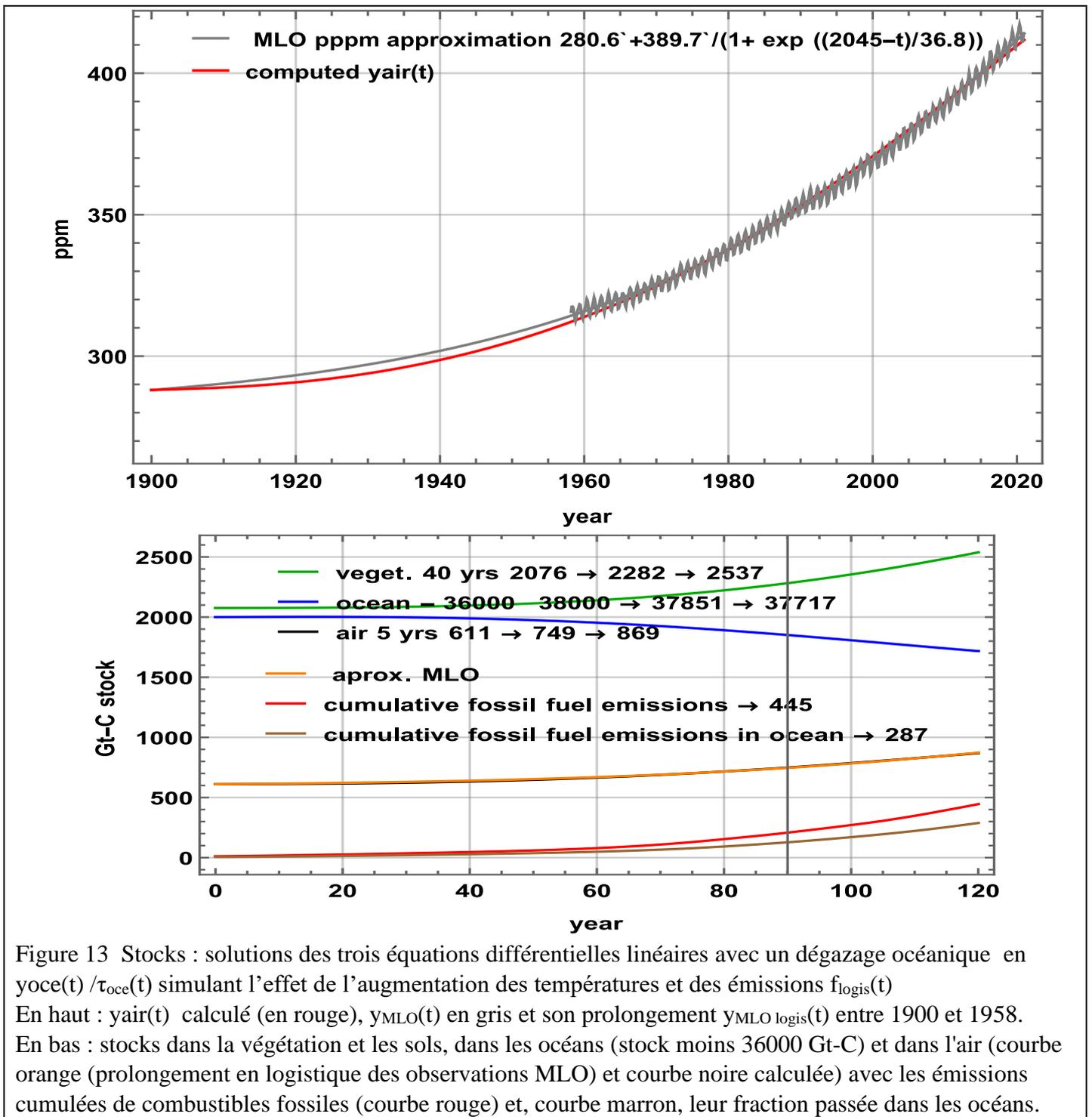
$$\begin{aligned} \text{yair}'(t) &= -\text{yair}(t)/5 + \text{yveg}(t)/40 + \text{yoce}(t)/\tau_{\text{oce}}(t) + f_{\text{fossil}}(t), \\ \text{yveg}'(t) &= -\text{yveg}(t)/40 + 0.085 \text{yair}(t) \\ \text{yoce}'(t) &= -\text{yoce}(t)/\tau(t) + 0.115 \text{yair}(t), \\ \text{yair}(0) &= 610.6 \text{ Gt-C}, \text{yveg}(0)=2076 \text{ Gt-C}, \text{yoce}(0)=38000 \text{ Gt-C}, \end{aligned}$$

Un $\tau_{\text{oce}}(t) = 543 - 217 |\sin(\pi(t+4) / 333)| - 2.2 \text{ Sign}[\sin(\pi(t+4) / 333)]$ modélise approximativement l'effet des températures sur le dégazage de l'océan qui, selon [IPCC, 2007] (Fig. 7.3.5), est passé de 70 Gt-C/an en 1850 à 92 Gt-C/an en 1990 : $\tau_{\text{oce}}(0) = 543$, $\tau_{\text{oce}}(60) = 481$, $\tau_{\text{oce}}(90) = 419$, $\tau_{\text{oce}}(120) = 362$ (en prenant $t=0$ en 1900).

Les stocks calculés sont représentés à la figure 13 : les ppm MLO observés bien approchés.

Les flux nets vont de l'océan vers la végétation et vers l'air ; la masse de carbone dans le compartiment "végétation & sols" a depuis 1900 augmenté de $2537 - 2076 = 461$ Gt-C et la masse de carbone dans l'air de 258 Gt-C ; comme les océans ont absorbé 287 Gt-C du carbone venu des émissions (en tenant compte à la fois du carbone fossile qui est resté dans l'air et de celui qui y est revenu), ne laissant que 158 Gt-C dans les deux autres compartiments, ce qui est sorti des océans est $461 + 258 - 158 = 561$ Gt-C.

Les océans ont donc apporté 562 Gt-C et les combustibles fossiles 158 Gt-C, soit 78% et 22% du carbone supplémentaire réparti entre les deux compartiments air et végétation & sols.



Ce carbone supplémentaire a augmenté la productivité de la végétation de près de 40% depuis l'époque préindustrielle, soit 40% de nourriture en plus pour tout ce qui vit sur Terre, plantes, animaux et humains.

Les flux sont représentés sur la figure 14 ; leurs valeurs en « préindustriel » et en 1990 sont proches de celles indiquées sur la figure 7.3.5 de [IPCC, 2007].

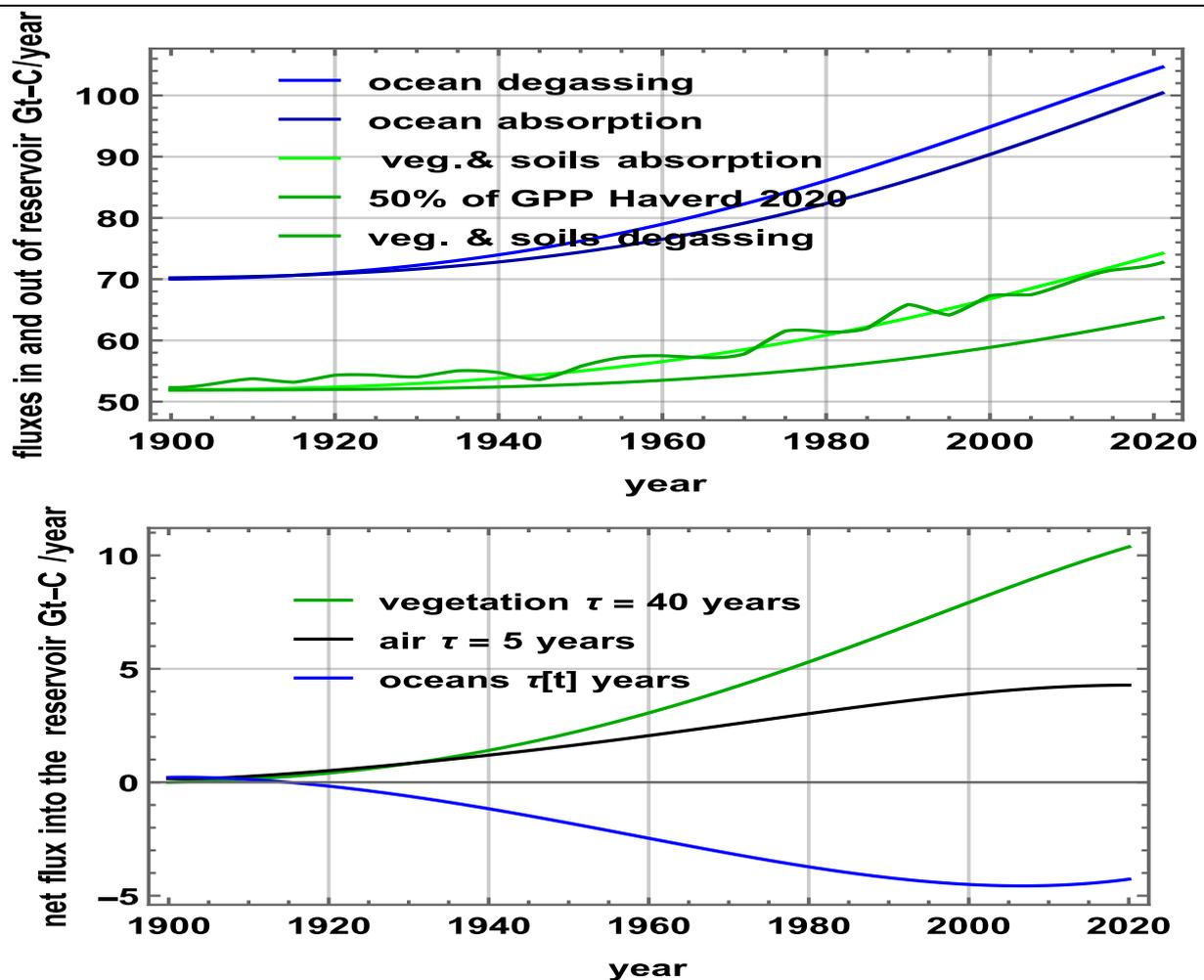


Figure 14 En haut : évolution des flux depuis 1900 compatibles avec (1) les ppm observés au MLO, (2) la GGPP de [Haverd, 2020] et (3) des indications de la figure 7.3.5 de [IPCC, 2007] ; émissions modélisées par $f_{\text{logis}}(t)$.

En haut de haut en bas : dégazage océanique, absorption océanique, NPP de la végétation, et dégazage de la végétation et des sols ; la courbe verte ondulée est une approximation de la NPP tirée de [Haverd, 2020].

En bas : flux nets en Gt-C/an vers la végétation (en vert), vers l'air (en noir) et venant des océans (flux net négatif) en bleu.

Un meilleur $\tau_{\text{occ}}(t)$ tiré des températures sera vu plus loin.

Les flux absorbés et dégazés en ppm/(12 mois) vus du MLO sont précisés à figure 15 : les lignes continues sont le résultat des calculs précédents, les courbes avec les variations saisonnières partent des observations avec pour seule hypothèse une durée de vie de cinq ans et donc une absorption en $y_{\text{MLO}}(t)/5$ (courbe bleue). Le dégazage naturel en rouge calculé par $dy_{\text{MLO}}(t)/dt + y_{\text{MLO}}(t)/5 - f_{\text{fossils}}(t)$ est depuis 1959 passé de 62.7 à 80.3 ppm/an, soit +17.6 ppm/an.

Les émissions fossiles en noir sont passées de 1.1 à 4.7 ppm/an (avant effets « COVID ») soit +3.6 ppm/an.

Supposons que $dy_{\text{naturel}}(t)/dt$ continue à +2.1 ppm/an sa moyenne sur 2010-2020. Un arrêt complet et soudain des émissions anthropiques en 2021.0 réduirait progressivement le stock de carbone d'origine « fossile » resté dans l'air, 23 ppm en 2021.0 selon la courbe bleue de la figure 16. Le dégazage naturel fait que le minimum $y(2024.9)$ sera 4.3 ppm en dessous de $y(2021.0)$ et que $y(2029.6) = y(2021.0)$. La diminution transitoire de 4 ppm sera imperceptible car les variations saisonnières au MLO sont - 7 ppm de mai à septembre et +9 ppm de septembre à mai.

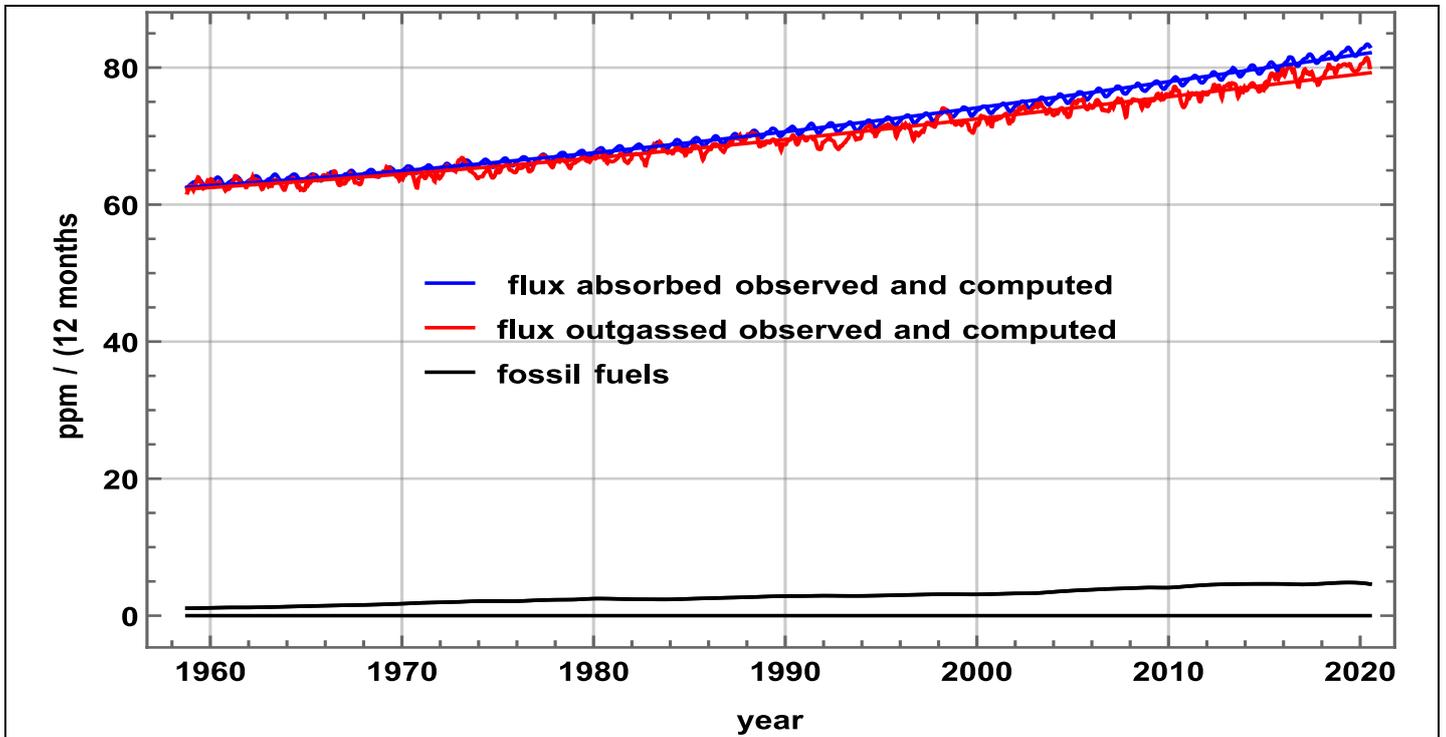


Figure 15 Flux entrant et sortant de l'atmosphère.

Lignes sans variations saisonnières : flux tirés des trois équations différentielles couplées.

Courbe ondulée bleue : stock MLO divisé par cinq ; courbe ondulée rouge : dégazage naturel calculé par $y(t + 6 \text{ mois}) - y(t - 6 \text{ mois}) + y(t)/5 - f_{\text{fossil}}(t)$, où $y(t)$ est la série MLO mois par mois.

Courbe noire en bas : $f_{\text{fossil}}(t)$.

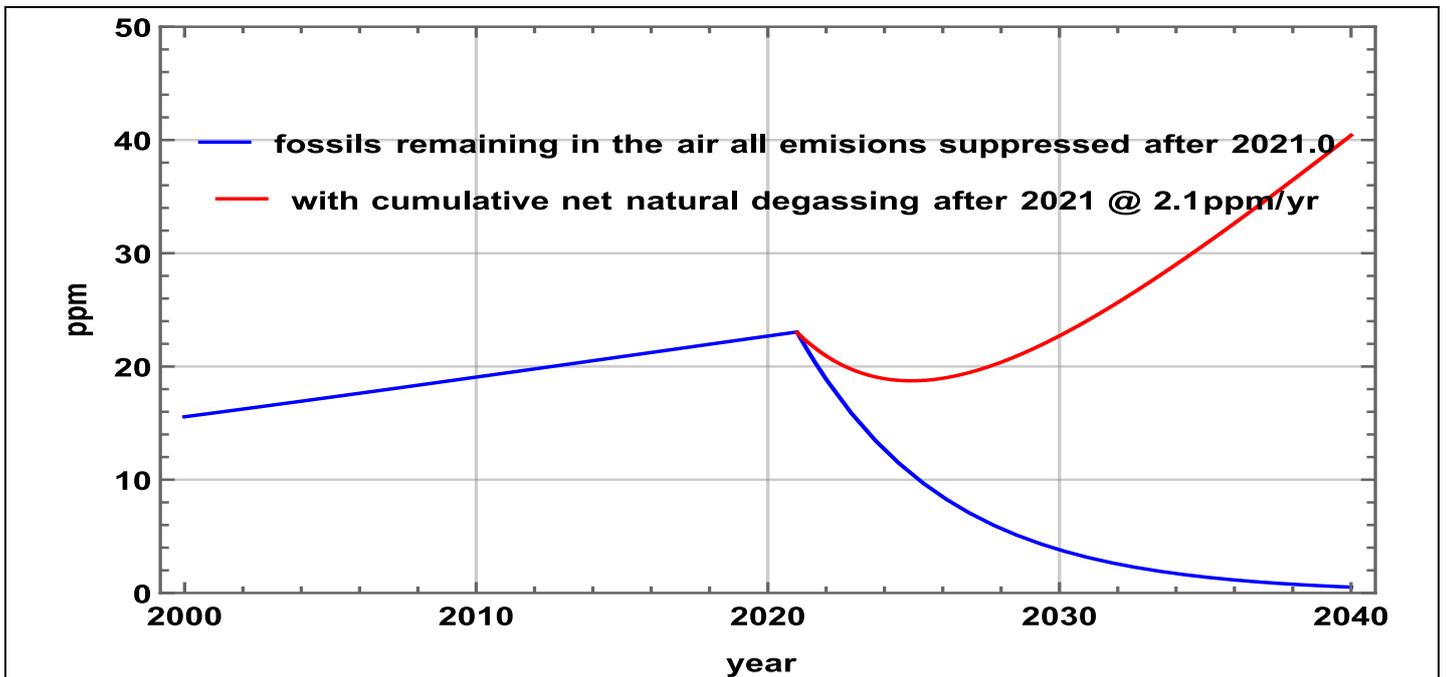


Figure 16 Effet sur les ppm restés dans l'air (courbe bleue) d'un hypothétique arrêt complet des émissions anthropiques en 2021.0 ($f_{\text{logistics}}(t) = 0$ pour $t > 2021.0$). En rouge avec ajout de l'effet des dégazages naturels nets pris à leur valeur moyenne observée sur 2010-2020 : +2.1 ppm/an.

En 2021.0, il reste 23 ppm dans l'air et 30,7 ppm restent et/ou reviennent après absorption et dégazage. Le minimum de la courbe rouge est 18,7 ppm en 2024,9, quatre ans après l'arrêt complet des émissions (voir [Berry, 2021]) ; il n'est que de $23 \text{ ppm} - 18,7 \text{ ppm} = 4,3 \text{ ppm}$ inférieur au maximum de 2021.0.

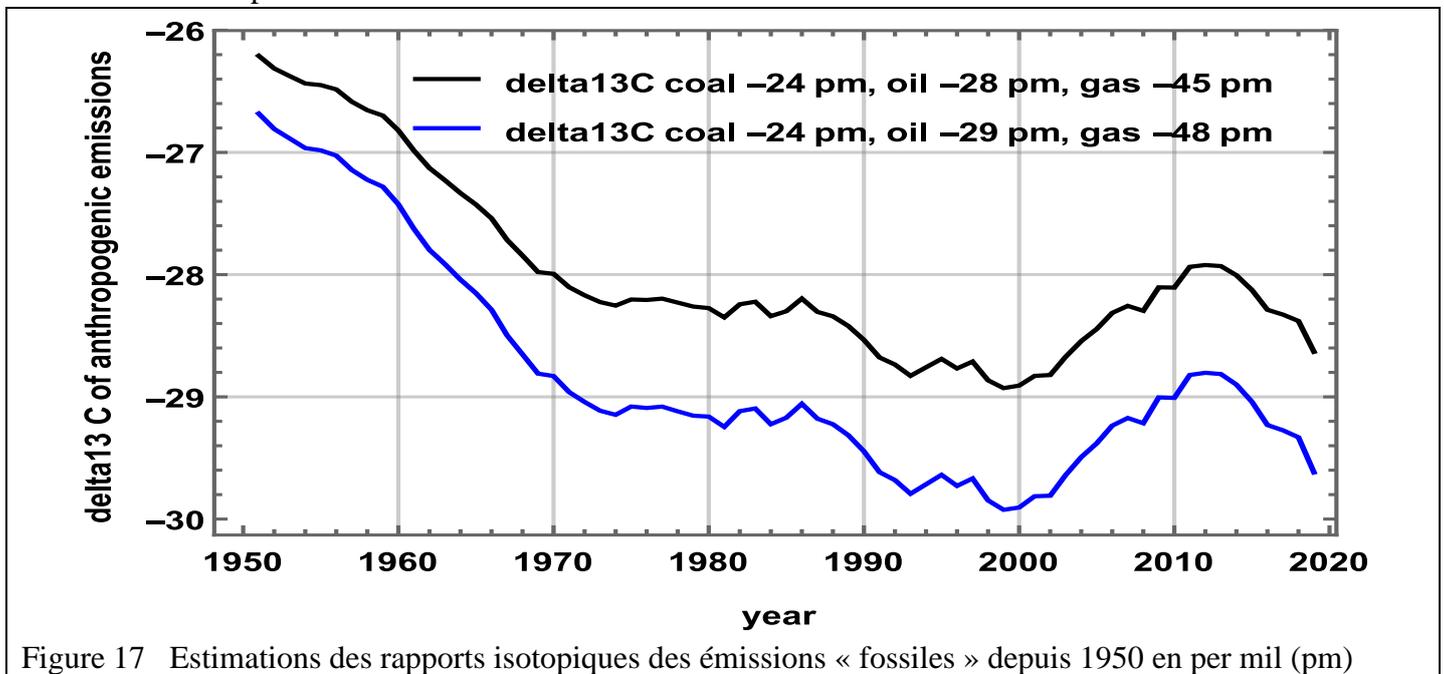
Les principales conclusions sont :

- le dégazage océanique piloté par les températures de surface a apporté les quatre cinquièmes du supplément de carbone venu dans l'atmosphère depuis 1900, les combustibles fossiles le dernier cinquième ;
- le CO₂ de combustibles fossiles resté dans l'air ne fait que 6% du CO₂ de l'air ; le reste vient des dégazages naturels
- arrêter les émissions anthropiques ne saurait avoir aucun effet sinon transitoire et ne portant que sur quelques ppm : au bout de 4 ans, diminution de 4 ppm seulement et retour à la croissance naturelle des ppm pilotée par les températures.

7. Sur les rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$

Le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ est un test extrêmement sensible du pourcentage de carbone provenant de combustibles fossiles dans l'air. Il dément de nombreuses affirmations selon lesquelles "le CO₂ des combustibles fossiles reste éternellement dans l'air".

Le $\delta^{13}\text{C}$ des émissions anthropiques dépend des proportions relatives de carbone venant du charbon, du pétrole et du gaz naturel, avec une variabilité d'un gisement à l'autre. La figure 17 montre l'évolution estimée avec beaucoup de charbon avant 1950, le développement du gaz naturel dans les années 1980, le doublement de la production de charbon de 2002 à 2012.



Une série continue de $\delta^{13}\text{C}$ observés depuis 1980 est tracée à la figure 18 :

- en noir en bas le $\delta^{13}\text{C}$ observé au MLO,
- en gris au-dessus le $\delta^{13}\text{C}$ des dégazages naturels après soustraction de l'effet de $y_{\text{fossil}}(t)$ resté dans l'air calculé comme la convolution de $\exp(-t/5)$ avec le produit $f_{\text{fossil}}(t) \delta^{13}\text{C}(t)$ des émissions et de leur signature isotopique vue à la figure 16,
- en vert en haut le $\delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}$ des dégazages naturels, après soustraction de l'effet des fossiles restés dans l'air ou revenus à l'air après absorption et dégazage, calculé par convolution de la réponse impulsionnelle $F1(t)$ du § 6. avec le produit $f_{\text{fossil}}(t) \delta^{13}\text{C}(t)$.

Par exemple en 2017.45 (juin) y_{fossil} resté dans l'air était 5.2% des 407 ppm observés, et le CO₂ « fossiles » resté ou revenu à l'air après des cycles d'absorption et de dégazage 7%. On a en pm = per mil,

$$(-8.68 \text{ pm}) = (-29.6 \text{ pm}) 5.2\% + (-7.5 \text{ pm}) 94.8\% \text{ courbe grise}$$

$$(-8.68 \text{ pm}) = (-28.6 \text{ pm}) 7\% + (-7.2 \text{ pm}) 93\% \text{ courbe verte.}$$

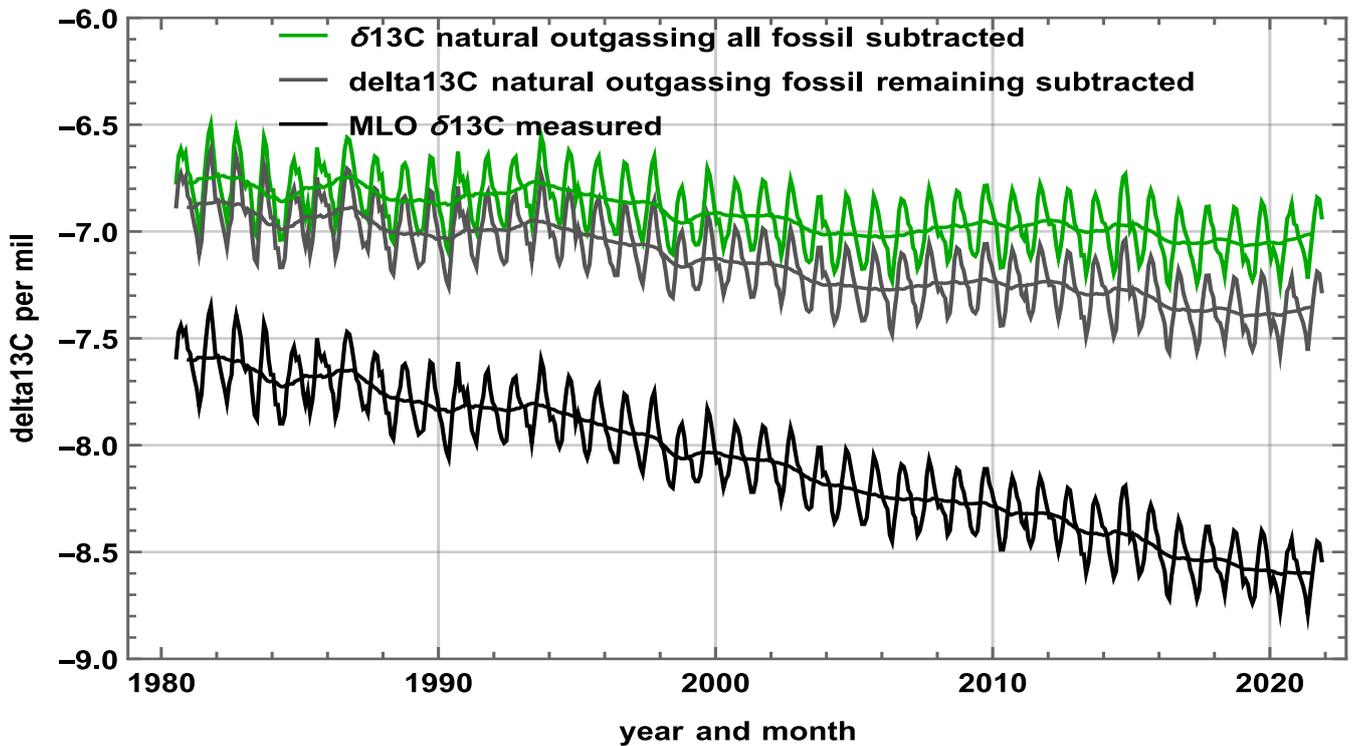


Figure 18 Evolution des $\delta^{13}\text{C}$ mesurés au MLO en noir, du $\delta^{13}\text{C}$ des dégazages naturels (dont le carbone fossile revenu à l'air) en gris et du $\delta^{13}\text{C}$ des dégazages naturels sans ces « fossiles revenus à l'air » (courbe verte). Les courbes sans effets saisonniers sont obtenues par lissage par moyenne mobile sur 12 mois.

La figure 19 montre que le $\delta^{13}\text{C}_{\text{natural}}$ (courbe grise épaisse en bas de la fig. 19 et courbe grise en haut de la fig. 18) diminue d'août à mai alors qu'au MLO les ppm augmentent : le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 dégazé par l'océan est de -1,5 pm plus négatif que celui de l'air : voir [Roy-Barman & Jeandel, 2011] p.110 fig. 3.11.

La température de la surface des mers en moyenne sur 20°S - 20°N augmente de fin juillet à avril avec un maximum à la mi-mars (passage du Soleil sur l'équateur) et un minimum entre mi-juillet et début août.

Le MLO à $19^\circ 32'$ Nord est au bord de cette zone 20°S - 20°N .

Le $\delta^{13}\text{C}_{\text{natural}}$ augmente (devient moins négatif) de mai à septembre lorsque la température et les ppm au MLO diminuent.

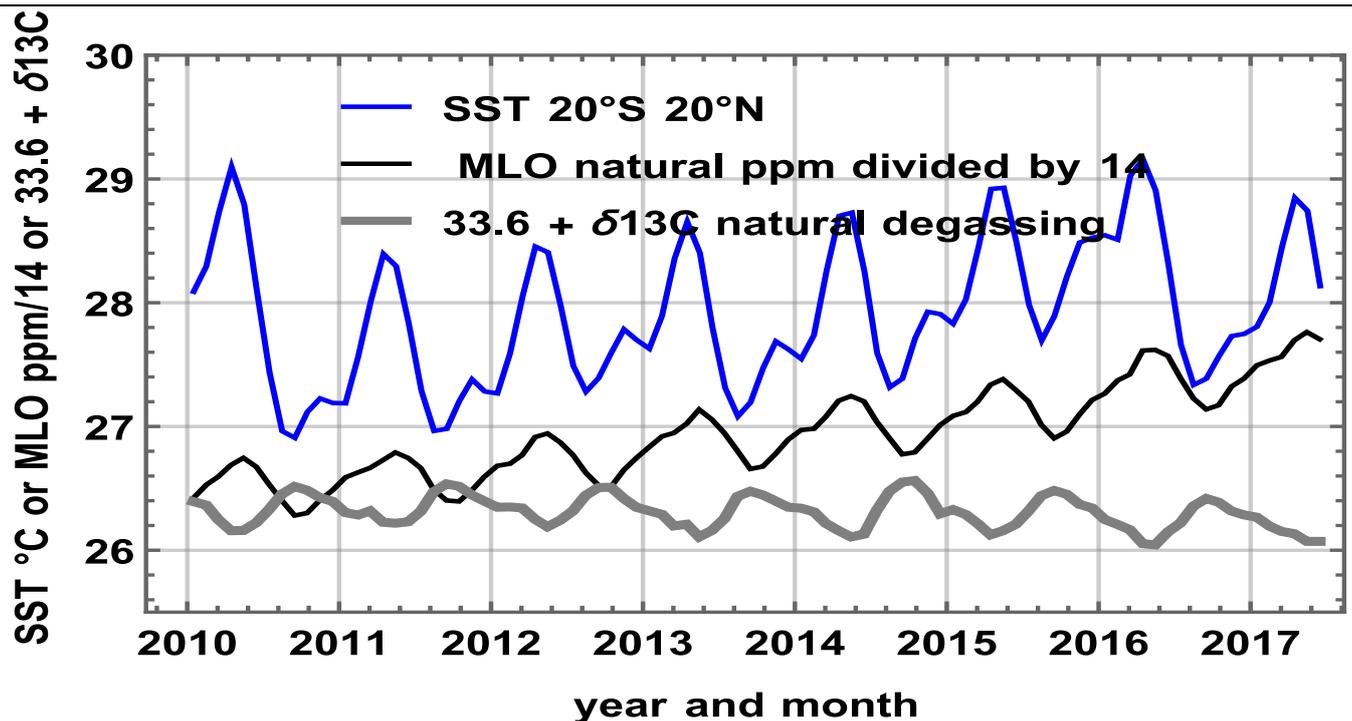


Figure 19 Evolution depuis 2010.0 des températures moyenne de surface des mers (en $^\circ\text{C}$) entre 20°S and 20°N (courbe bleue), de $y_{\text{natural}}(t)/14$ au MLO (courbe noire) et de $33.6 + \delta^{13}\text{C}_{\text{natural}}(t)$ (ligne grise épaisse)

La figure 20 montre les incréments sur 12 mois de $\delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}$ (représenté par la courbe verte, figure 18) centrés au milieu des 12 mois : ces incréments sont négatifs pendant les grands El Niños et légèrement positifs le reste du temps.

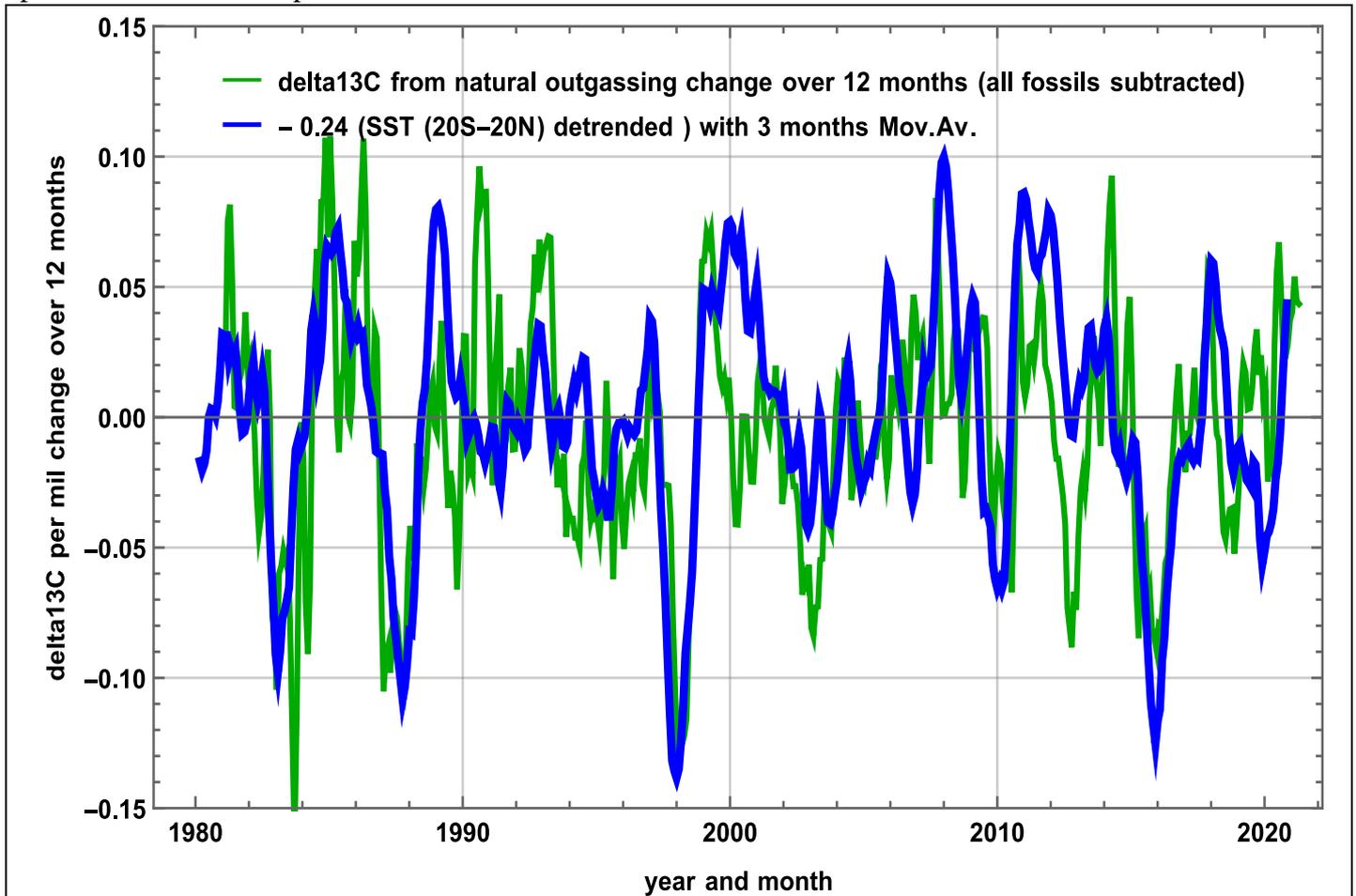


Figure 20 Avec lissage par moyenne mobile sur 3 mois

Courbe verte : incréments sur 12 mois $\delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}(t + 6 \text{ mois}) - \delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}(t - 6 \text{ mois})$ centrés au milieu des 12 mois. Ce $\delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}(t)$ est celui de la courbe verte de la figure 18, trouvé par soustraction de l'effet des fossiles restés dans l'air ou revenus à l'air après absorption et dégazage.

Courbe bleue : fonction $-0.24 \text{ AT}_{\text{SSTdetrended}}(t)$ de l'anomalie $\text{AT}_{\text{SST}}(t)$ des températures de la surface des mers entre 20°S et 20°N diminuée de sa tendance $0.113^\circ\text{C} + 0.0086 (t-1980)$

La figure 20 montre que la légère diminution de $\delta^{13}\text{C}_{\text{naturel}}$ depuis 1980 (figure 18, courbe verte) peut être une conséquence du dégazage induit par la température, par l'effet du fractionnement isotopique qui donne au CO_2 océanique dégazé un $\delta^{13}\text{C}$ de 1 ou 2 per mil inférieur à celui de l'air [Roy-Barman, 2011].

La partie positive de la courbe verte pourrait venir d'une absorption croissante par la végétation (fig. 13 & 14 et croissance de la productivité GGPP) : le $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique est autour de -25 pm ou moins (plantes de type C3) et autour de -12 pm (plantes tropicales de type C4).

8. Un examen plus précis du dégazage océanique

Un $\text{flux}_{\text{océans \& fossiles}}(t) = 7.29 (\text{AT}_{\text{SST}}(t) + 0.27^\circ\text{C}) + f_{\text{fossil}}(t - 0.5)$ tracé sur la figure 21 permet de retrouver le stock de carbone atmosphérique (la série MLO prolongée jusqu'en 1900) noté $y_{\text{air}}(t)$ et la productivité primaire nette $\text{NPP}(t) = \text{GGPP}(t)/2$ de la végétation depuis 1900 [16] dont le stock est noté $y_{\text{veg}}(t)$.

Les équations sont :

$$y_{\text{air}}'(t) = \text{flux}_{\text{océans \& fossiles}}(t) + y_{\text{veg}}(t) / 40 - 52.5 (y_{\text{air}}(t) / y_{\text{air}}(0))^a (y_{\text{veg}}(t) / y_{\text{veg}}(0))$$

$$y_{\text{veg}}'(t) = 52.5 (y_{\text{air}}(t) / y_{\text{air}}(0))^a (y_{\text{veg}}(t) / y_{\text{veg}}(0)) - y_{\text{veg}}(t) / 40$$

$$y_{\text{air}}(0) = 610.6 \text{ Gt-C ou } 288 \text{ ppm en } 1900, y_{\text{veg}}(0) = 40 \times 52.5 = 2100 \text{ Gt-C en } 1900 \text{ et } a = 0.45$$

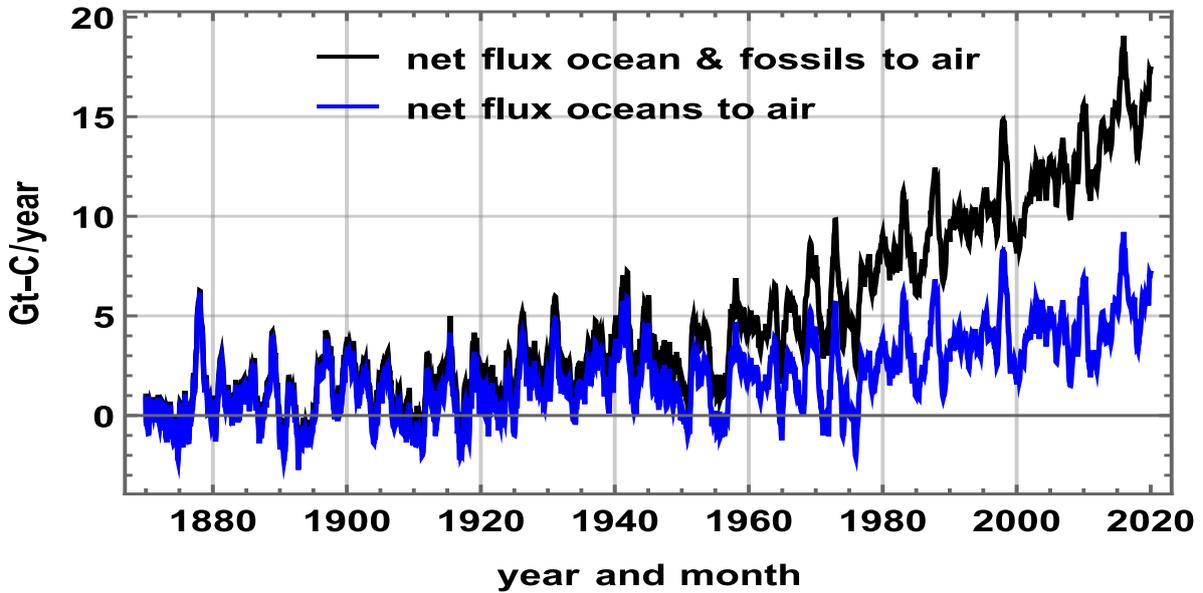


Figure 21 Flux océanique net $7.296(AT_{SST}(t) + 0.27^{\circ}C)$ Gt-C/an et (en noir) $flux_{Oceans\&fossil}(t)$

La $NPP(1900) = 52,5Gt-C/an$ est la moitié de la $GGPP(1900)$ de $105 Gt-C/an$ [Haverd, 2020] ; $NPP(t)$ croît comme le volume de la végétation et comme une puissance ($a = 0,45$) de $y_{air}(t)$.

La figure 22 montre que $y_{air}(t) - y_{air}(0)$ correspond bien aux observations du MLO et que la croissance du stock $y_{veg}(t) - y_{veg}(0)$ (courbe en vert foncé) est proche de

$$y_{veg1}(t) = \exp(-t/40) (y_{veg}(0) + \int_0^t \exp(t'/40) GGPP(t')/2 dt),$$

tracée en vert clair (courbe ondulante) : ce $y_{veg1}(t)$ est la solution de

$$dy_{veg1}(t)/dt = -y_{veg1}(t) / 40 + NPP(t).$$

La végétation absorbe annuellement en moyenne 8,4% du carbone de l'air (plage 8.3% à 8.55%).

Les chiffres de 2020 (à $t = 120$) sont à quelques Gt-C près ceux de la fig.13.

Les émissions fossiles cumulées sont proches de $y_{veg}(t) - y_{veg}(0)$; c'est une pure coïncidence : les flux entrants sont bien mélangés dans l'atmosphère et ne peuvent être attribués à un flux sortant.

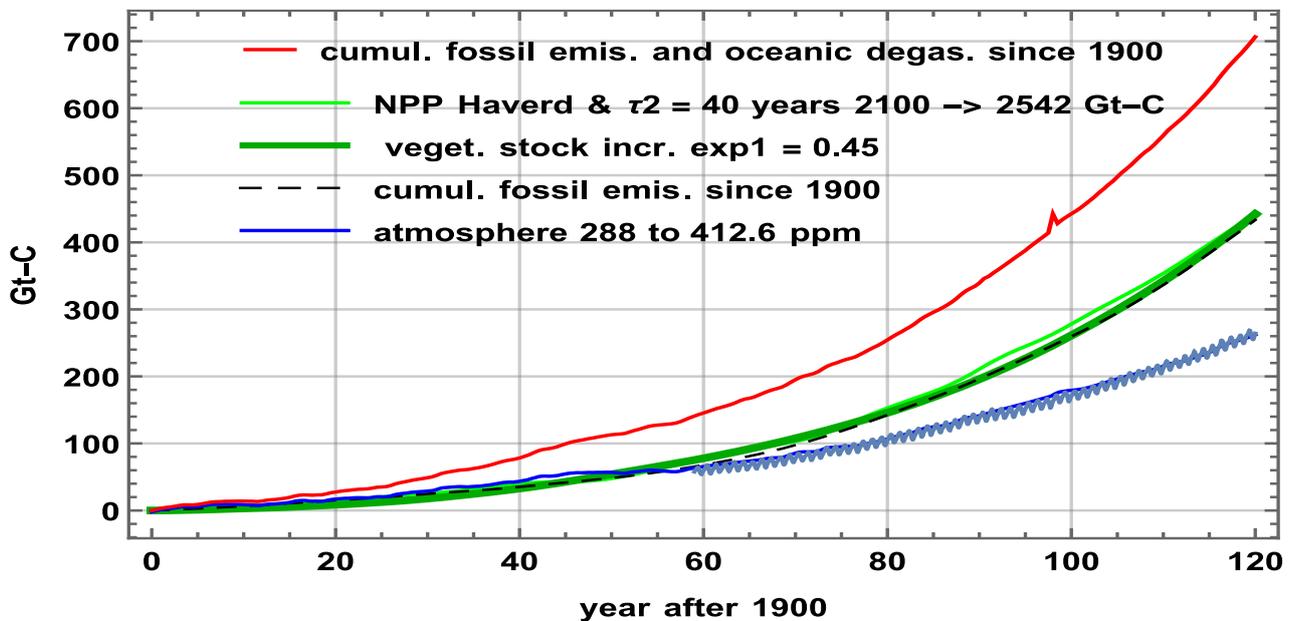


Figure 22 Valeurs calculées du changement de la masse de carbone dans l'atmosphère depuis 1900 (différence d'avec les 288 ppm de 1900) (courbes bleues) et dans la végétation et les sols (courbe vert foncé). La courbe vert clair est la masse de carbone dans la végétation et les sols calculée à partir de $GGPP(t)/2$ avec une durée de vie de 40 ans. En rouge le cumul du flux $flux_{Oceans\&fossil}(t)$ venu des océans et des fossiles et en tireté noir le cumul des émissions des combustibles fossiles.

La $GGPP$ et les incréments des ppm calculés sont, à la figure 23, comparés à leurs valeurs de référence.

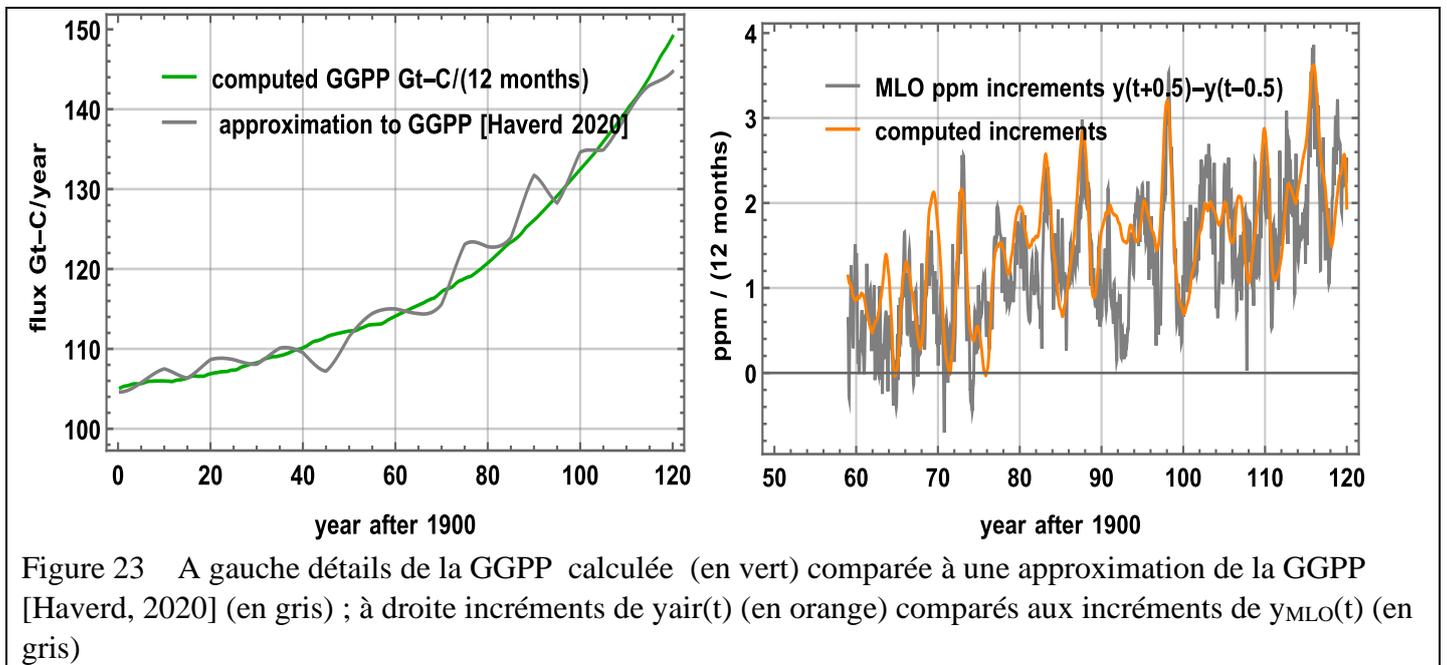


Figure 23 A gauche détails de la GGPP calculée (en vert) comparée à une approximation de la GGPP [Haverd, 2020] (en gris) ; à droite incréments de $y(t)$ (en orange) comparés aux incréments de $y_{MLO}(t)$ (en gris)

La figure 22 ne saurait faire oublier que les flux entre air et océan sont de l'ordre de 100 Gt-C/an (figure 14) : le **flux net** de l'océan est (figure 19) passé de 0,77 Gt-C/an (moyenne sur 1900-1910) à 5 Gt-C/an (moyenne sur 2010-2020) mais le **flux dégazé** est, lui, passé de 70 Gt-C/an vers 1900 à environ 106 Gt-C/an en 2020.0.

Les fossiles ne font que $10 / (10 + 106 + 64) = 5.6\%$ du flux entrant dans l'air qui à $t = 2020$ est :

$dy(t)/dt + y(t)/5 = 2.12 \times 2.5 \text{ ppm/an} + 875 \text{ Gt-C} / 5 = 180 \text{ Gt-C/an}$ et $10 / (10 + 106) = 8,6\%$ du flux entrant dans l'ensemble des deux réservoirs atmosphère et végétation & sols.

9. Examen de quelques modèles ou théories

Un modèle n'a pas valeur de démonstration ; il sert seulement à justifier des mécanismes, si et seulement si tous ses résultats sont conformes aux observations, **à toutes les observations**. Reproduire approximativement la seule courbe des ppm du MLO est une condition nécessaire mais nullement suffisante ; la croissance de la productivité de la végétation [Haverd, 2020] doit aussi être reproduite ; et les hypothèses faites ne doivent pas être contraire à la physique : voir discussion dans [Harde, 2019].

Trois « théories » différentes, incompatibles entre elles et incompatibles avec des chiffres de la figure 6.1 p.471 du rapport [IPCC, 2013], sont mises en avant par [Köhler et al., 2017] et par le GIEC : ce sont les notions de Airborne Fraction, de réponse impulsionnelle type Bern et de temps d'ajustement.

9.1. La Airborne Fraction AF

9.1.1. Introduction

Comme $y(t) = 5 f(t) - 5 dy(t)/dt = 5 (\text{degaz}(t) + f_{\text{fossil}}(t)) - 5 dy(t)/dt$, toute augmentation des dégazages naturels $\text{degaz}(t)$ invaliderait la figure politiquement essentielle [IPCC, 2018] SR15, figure 2.3 qui prédit la croissance des températures en fonction du seul cumul des émissions anthropiques $f_{\text{fossil}}(t)$ depuis 1876.

Pour que les émissions des combustibles fossiles soient le seul et unique moteur de la croissance de $y(t)$ il faut que $y(t) - y(t_0) = \int_{t_0}^t (\text{degaz}(t') + f_{\text{fossil}}(t') - \text{absorb}(t')) dt' = AF \int_{t_0}^t f_{\text{fossil}}(t') dt'$ donc que

$$\int_{t_0}^t (\text{absorb}(t') - \text{degaz}(t')) dt' = (1 - AF) \int_{t_0}^t f_{\text{fossil}}(t') dt' \text{ pour tous les couples } (t_0, t),$$

donc $\text{absorb}(t) - \text{degaz}(t) = (1 - AF) f_{\text{fossil}}(t)$.

L'absorption et le dégazage naturels, aux causes physiques différentes et de l'ordre de 180 Gt-C/an et 175 Gt-C/an, seraient donc liés par une relation qui via $f_{\text{fossil}}(t)$ ne dépend que des conditions économiques. Serait-ce surnaturel ?

9.1.2. TCRE, ECS et AF

Notons $z(t)$ le cumul des émissions anthropiques depuis 1876 ; $y(t)$ est la masse de carbone dans l'air ; $y(1876) = 2.12 \times 284$ ppm. Le GIEC propose deux expressions différentes du réchauffement global :

- la TCR (Transient Climate Response) $T(t) - T(t_0) = A z(t)$ (figure 2.A.3 de [IPCC, 2018] SR15, $A = 2.4^\circ\text{C}/1000 \text{ Gt-C}$),
- la ECS (Equilibrium Climate Sensitivity) $T(t) - T(t_0) = B \ln(1 + AF z(t)/y(t_0))$, B entre $1.5^\circ\text{C} / \ln(2)$ et $4.5^\circ\text{C} / \ln(2)$.

Ces formules devraient être identiques à un facteur x près de l'ordre de 70% appliqué à la ECS.

$A z(t) = x B \ln(1 + AF z(t)/y(t_0))$ donne $AF = y(t_0) / z(t) (\exp(A z(t) / (x B)) - 1)$ tracé à la figure 24 pour quelques valeurs de B , lié à la sensibilité climatique ECS.

La figure 24 montre que $A = 2,4^\circ\text{C}/1000 \text{ Gt-C}$ associé à un AF raisonnable correspond aux estimations les plus élevées de l'ECS entre 3°C et $4,5^\circ\text{C}$ (courbes bleue et rouge) ; un ECS de 2°C impose un très improbable $AF = 100\%$ en 2020 !

Un $AF = 43\%$ souvent cité impose, pour $x = 70\%$ et $t = 2020$, une sensibilité ECS (ou "réchauffement à long terme" pour un doublement du CO_2) de $3,8^\circ\text{C}$ et un "réchauffement moyen global" transitoire (disons au moment du doublement des ppm) de $70\% \times 3,8^\circ\text{C} = 2,7^\circ\text{C}$; au rythme actuel de $+2 \text{ ppm/an}$, cela pourrait arriver dans 200 ans.

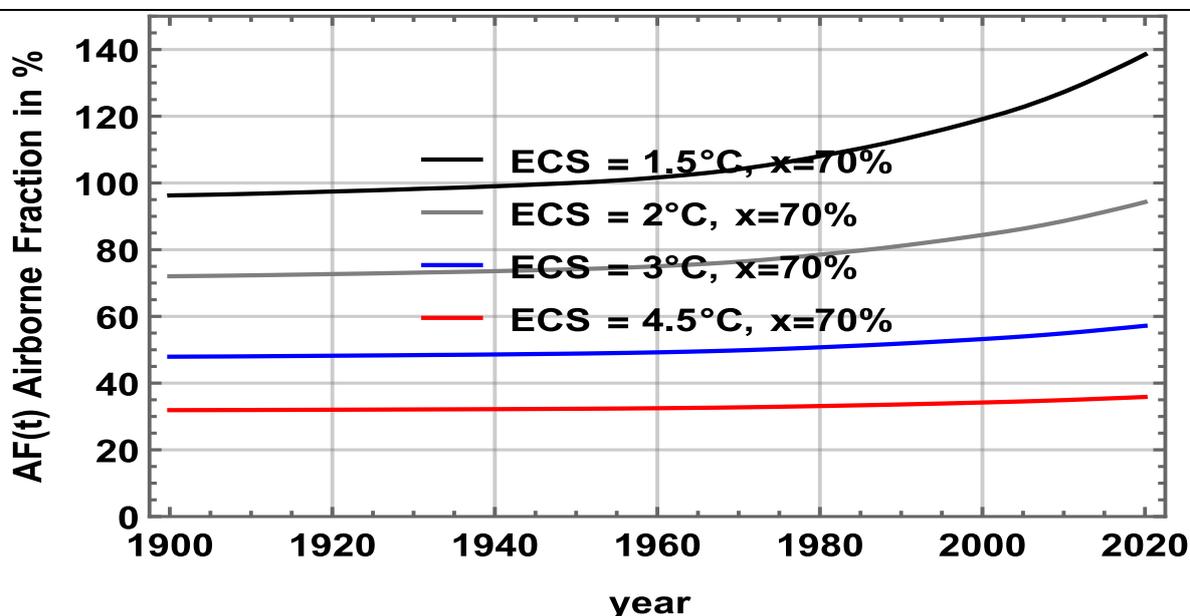


Figure 24 Valeurs de la Airborne Fraction en pourcent déduites de la figure 2.A.3 de [IPCC, 2018] et d'estimations de la sensibilité climatique à l'équilibre ECS

Mais ces spéculations sur le réchauffement causé par plus de CO_2 dans l'air sont absurdes puisque la croissance du CO_2 dans l'air est, comme montré au § 3., essentiellement une conséquence des températures et que la notion même de Airborne Fraction suppose que les plantes et les océans discriminent les molécules de CO_2 selon leur origine.

9.1.3. Comment calculer la Airborne Fraction AF ?

$AF(t)$ a bien des estimations du quotient $(dy(t)/dt)/f_{\text{fossil}}(t)$ des valeurs mensuelles de la série à un rapport de leurs valeurs cumulées $(y(t) - y(t_0)) / \int_{t_0}^t f_{\text{fossil}}(t') dt'$ où t_0 est 1751 ou 1876 ou 1959 ou tout autre temps.

$y_{\text{MLOlogis}}(t)$ du § 6. est utilisé pour $t < 1959$. Les résultats pour $t_0 = 1751$, 1959 , et $t_0 = t-1$ an sont tracés à la figure 25. Ils sont incompatibles et, avant 1965, proches de, ou supérieurs à, 100%.

Comme rappelé au § 5.2. chercher des corrélations entre des valeurs cumulées d'incrément généralement positifs est un non-sens.

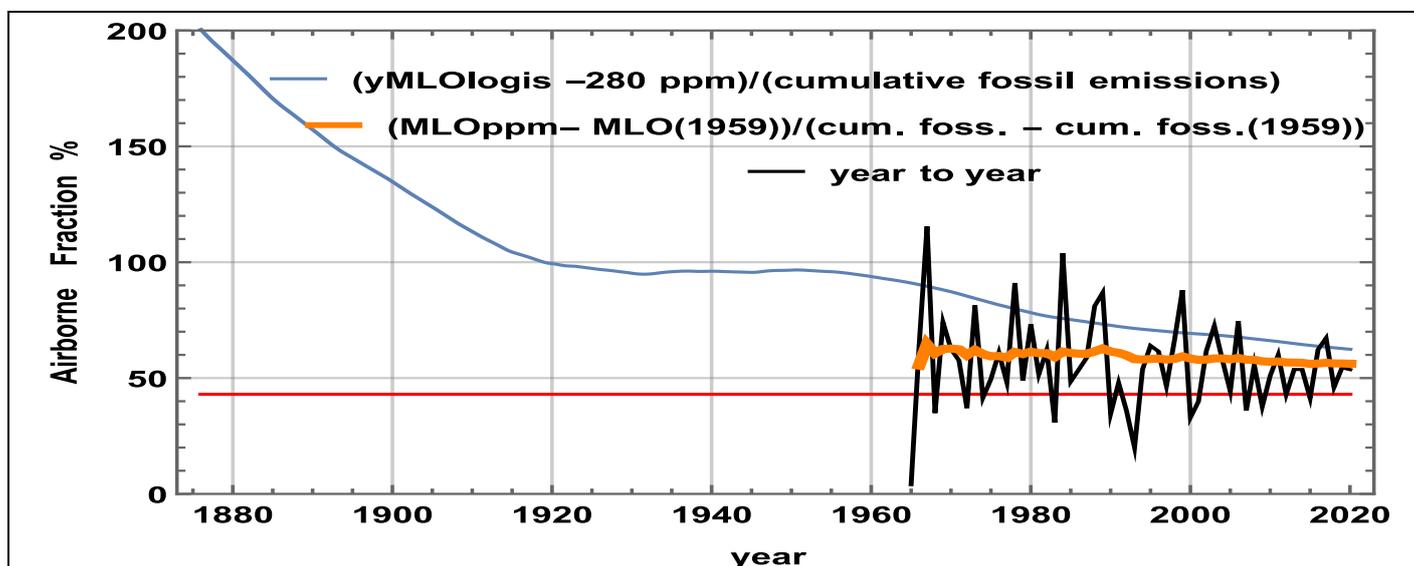


Figure 25 Airborne Fraction AF(t) % calculée pour quelques définitions.

Courbe bleue $(y_{MLOlogis}(t) - 280 \text{ ppm}) / \int_{1751}^t f_{fossil}(t') dt'$

Courbe noire $(y_{MLOs}(t) - y_{MLO}(t-1)) / \text{fossil}(t-1)$ année par année

Courbe orange $(y_{MLO}(t) - y_{MLO}(1959)) / \int_{1959}^t f_{fossil}(t') dt'$

Ligne rouge $AF = 43\%$ proposé par divers auteurs

[Hansen, 2013] a constaté que sa *Airborne Fraction* (calculée avec une moyenne glissante sur 7 ans !) est passée de 60% en 2000 à 42% en 2011 ; il a attribué ce fait non à l'ineptie de son « modèle » mais à des propriétés magiques du charbon « chinois » qui, dans les années 2000, aurait très extraordinairement dopé la croissance de la végétation !

9.1.4. Le $\delta^{13}C$ montre que les émissions ne restent pas dans l'air.

[IPCC, 2013] § 6 page 467, dit : “About half of the emissions remained in the atmosphere (240 Gt-C) since 1750”

Comme 240 Gt-C représente 29% du carbone dans l'air à la date 2011,0, le $\delta^{13}C$ de l'air aurait dû être : $29\% (-28) + 71\% (-6,5) = -12,7$ per mil. Mais le $\delta^{13}C$ observé à cette date (figure 18) vaut -8.36 per mil !

9.1.5. Le “puits” de carbone varie en $y(t)/5$ et non pas comme $dy(t)/dt$

[IPCC, 2013] § 6 page 467, dit : “About half of the emissions remained in the atmosphere (240 Gt-C) since 1750 ... Globally, the size of the combined natural land and ocean sinks of CO_2 approximately followed the atmospheric rate of increase, removing 55% of the total anthropogenic emissions every year on average during 1958–2011. ”

Le « puits » naturel de carbone $\text{absorb}(t) - \text{degaz}(t)$ varie donc comme $a dy(t)/dt$ (*the rate of increase*), d'où

$$dy(t)/dt = \text{degaz}(t) + f_{fossil}(t) - \text{absorb}(t) = f_{fossil}(t) - a dy(t)/dt$$

donc $dy(t)/dt = f_{fossil}(t) / (1 + a) = AF f_{fossil}(t)$ avec $AF = 1/(1+a)$, par exemple $a = 0.818$, $AF = 45\%$.

Mais il est impossible que les émissions restent (*remained*) dans l'atmosphère car tout apport dans l'atmosphère sera, après un certain temps, réparti entre les trois réservoirs proportionnellement à leur fraction de la masse totale, soit environ 2,2% pour l'atmosphère : figure 10.

9.1.6. Les émissions sont mélangées avec le dégazage naturel et ne peuvent pas être affectées aux trois réservoirs année par année.

La figure TS.4 [GIEC, 2013], page 51, montre une répartition des émissions entre plusieurs puits, année par année ; la légende de cette figure est : “Annual anthropogenic CO_2 emissions and their partitioning among the atmosphere, land and ocean from 1750 to 2011. ... The emissions and their partitioning include only the fluxes that have changed since 1750, and not the natural CO_2 fluxes (e.g., atmospheric CO_2 uptake from weathering, outgassing of CO_2 from lakes and rivers and outgassing of CO_2 by the ocean from carbon”

delivered by rivers; see Figure 6.1) between the atmosphere, land and ocean reservoirs that existed before that time and still exist today.”

Cette répartition année par année des émissions de l'année (figure TS.4) est incompatible avec le mélange dans l'atmosphère des émissions avec le dégazage naturel vingt fois plus important, et avec la circulation du carbone entre les trois grands réservoirs. Ce mélange dans l'atmosphère ne prend que quelques semaines ou mois pour une durée de vie moyenne de 5 ans.

Les flux naturels sont dits n'avoir pas changé depuis 1750 : la répartition de la figure TS.4 ne comprend que *“the fluxes that have changed since 1750 not the natural CO₂ fluxes”* (!) ; le dégazage océanique vu au § 3. est tabou : l'IPCC ne mentionne que le *“outgassing of CO₂ by the ocean from carbon delivered by rivers”* et non le dégazage des océans.

9.1.7. $dy(t)/dt$ et $f_{fossil}(t)$ ne sont pas corrélés

L'équation $dy(t)/dt = AF f_{fossils}(t)$ a été **démontrée impossible** par la figure 5 (autocorrélations très différentes des séries $dy(t)/dt$ et $f_{fossils}(t)$) et par la figure 7 (**coefficient de détermination $R^2 = 0,01$** entre ces deux séries « detrended » après soustraction à chacune de sa tendance linéaire).

9.1.8. AF et TCRE sont incompatibles avec la conservation de la matière.

$dy(t)/dt = AF(t) f_{fossil}(t)$ et la conservation de la matière $dy(t)/dt = \text{degaz}(t) + f_{fossil}(t) - y(t) / \tau(t)$ imposent $y(t) = \tau(t) (\text{degaz}(t) + (1 - AF(t)) f_{fossil}(t))$; la croissance de la masse de carbone dans l'atmosphère est alors $y(t) - y(1900) = \tau(t) \text{degaz}(t) - \tau(1900) \text{degaz}(1900) + \tau(t) (1 - AF(t)) f_{fossil}(t)$ et ne peut être indépendante du dégazage naturel que si $\tau(t) \text{degaz}(t) = \tau(1900) \text{degaz}(1900)$. Avec $\text{degaz}(1900) = 122 \text{ Gt-C/an}$, $\text{degaz}(2020) = 168 \text{ Gt-C/an}$, $\tau(1900) = 5 \text{ ans}$, $\tau(2020) = 5 \times 122 / 168 = 3,6 \text{ ans}$, la croissance $y(2020) - y(1900)$ est

$$\tau(t) (1 - AF(t)) f_{fossil}(t) = 3.6 \text{ ans} \times 55\% \times 4.7 \text{ ppm} = \underline{9.3 \text{ ppm}}$$

bien moindre que les $413 \text{ ppm} - 288 \text{ ppm} = \underline{137 \text{ ppm}}$ communément admis.

9.1.9. AF impose que l'absorption soit quasi-constante depuis 1750 ou depuis 1900.

Si maintenant on suppose le dégazage constant, pour respecter l'hypothèse de base du TCRE selon laquelle l'augmentation de la masse de carbone dans l'air est entièrement due aux émissions cumulées de combustibles fossiles $\text{degaz}(t) = \text{degaz}(1900) = \text{absorb}(1900)$, il vient

$$\text{absorb}(t) = \text{degaz}(t) + a dy(t)/dt = \text{absorb}(1900) + (1 - AF) f_{fossil}(t)$$

$\text{absorb}(t)$ n'aurait alors depuis le préindustriel crû de 55% des émissions soit, pour

$$f_{fossil}(2020) = 10 \text{ Gt-C/an}, \text{ une différence } \text{absorb}(2020) - \text{absorb}(1900) = \underline{+5.5 \text{ Gt-C/an}}.$$

C'est dix fois moins que ce qu'il faut pour répondre aux observations (figure 14 de la croissance de la productivité de la végétation) et cinq fois moins que ce qui est écrit par le GIEC dans le même rapport AR5 : la figure 6-1 p.471 de [IPCC, 2013] dit +20 (océans) + 14,1/2 (végétation en NPP) = +27 Gt-C/an et la figure 13 ci-dessus +30 (océans) +22 (végétation) = +52 Gt-C/an.

9.1.10. $\text{absorb}(t) = \text{degaz}(1900) + a dy(t)/dt$ est contraire à la physique

Physiquement, l'absorption ne peut dépendre que de la pression partielle du CO₂ dans l'air, donc que de la masse totale $y(t)$ de carbone et non pas de $dy(t)/dt$, sa dérivée par rapport au temps !

$\text{absorb}(t)$ ne peut pas non plus dépendre du seul $f_{fossil}(t)$ qui ne fait en 2019 que 6% du CO₂ entrant dans l'atmosphère, et n'en faisait que 2% en 1958.

On a en réalité **$\text{absorb}(t) = y(t) / 5$** et non pas $\text{absorb}(t) = \text{degaz}(1900) + a dy(t)/dt$

Comme vu plus haut, chaque année, **un cinquième du CO₂ de l'air est absorbé, sans distinction aucune selon l'origine des molécules.**

9.1.11. Pour conclure:

Les §§ 9.1.2 à 9.1.10 ont montré que les concepts AF et TCRE n'ont aucune signification physique.

Les émissions de combustibles fossiles représentées sur la figure 10 seront à terme réparties entre les trois réservoirs au prorata de leurs masses, laissant $875 / (875 + 2500 + 38000) = 2,1\%$ dans l'air, ce qui est bien différent des chiffres que l'on peut deviner avec la figure 25.

9.2. La fonction de Bern ou réponse impulsionnelle :

Le GIEC [IPCC, 2007], page 213 note a de la table 2-14 dit : "The CO₂ response function used in this report is based on the revised version of the Bern Carbon cycle model used in Chapter 10 of this report (Bern2.5CC; Joos et al. 2001) using a background CO₂ concentration value of 378 ppm. The decay of a pulse of CO₂ with time t is

$$\text{Bern1}(t) = 0.217 + 0.259 \exp(-t/172.9) + 0.338 \exp(-t/18.51) + 0.186 \exp(-t/1.186) "$$

Cette expression détaillée dans [unfccc, 2002] est encore invoquée dans le rapport du AR5 WG3 de 2013. Des valeurs de cette réponse impulsionnelle $\text{FB}(t) = \text{Bern1}(t)$ sont $\text{FB}(30) = 50\%$, $\text{FB}(100) = 37\%$, $\text{FB}(200) = 30\%$. Six paramètres arbitraires ont été choisis de façon que $y_{\text{FB}}(t) = 298 \text{ ppm} + \int_{1750}^t \text{FB}(t-t') f_{\text{fossil}}(t') dt'$ suive bien la série $y_{\text{MLO}}(t)$, bien que 298 ppm soit différent des 278 ppm que l'on dit souvent être la référence préindustrielle.

Mais cette ressemblance est un cas de fausse corrélation entre des valeurs cumulatives d'incrément positifs ou généralement positifs : $f_{\text{fossil}}(t)$ est toujours positif et $dy(t)/dt$ est positif la plupart du temps. Des incréments positifs aléatoires feraient également l'affaire !

Les incréments $y_{\text{MLO}}(t + 0.5) - y_{\text{MLO}}(t - 0.5)$ et $y_{\text{FB}}(t + 0.5) - y_{\text{FB}}(t - 0.5)$ ne sont corrélés que si l'on oublie de soustraire de chaque série sa propre tendance linéaire : voir figure 7, § 4.

Par définition de la réponse impulsionnelle $y(t) - y(0) = \int_0^t F(t-t') f_{\text{fossil}}(t') dt'$ avec $F(t) = a_0 + \sum a_i \exp(-t/b_i)$,
 $dy(t)/dt = \int_0^t (dF/dt)(t-t') f_{\text{fossil}}(t') dt' + F(0) f_{\text{fossil}}(t)$ pour $f_{\text{fossil}}(0) = 0$ (préindustriel).
 $dF/dt = \sum (- a_i/b_i) \exp(-t/b_i)$ et $F(0) = a_0 + \sum a_i = 1$

Le dégazage naturel est supposé constant égal à $\text{degaz}(0)$ donc $dy(t)/dt = \text{degaz}(0) + f_{\text{fossil}}(t) - \text{absorb}(t)$ et
 $\text{absorb}(t) = \text{degaz}(0) + f_{\text{fossil}}(t) - dy(t)/dt = \text{degaz}(0) + \sum (a_i/b_i) \exp(-t/b_i) \int_0^t \exp(t'/b_i) f_{\text{fossil}}(t') dt'$, soit
 $\text{absorb}(t) = \text{absorb}(0) + \sum (a_i/b_i) \exp(-t/b_i) \int_0^t \exp(t'/b_i) f_{\text{fossil}}(t') dt'$.

Cette expression de $\text{absorb}(t)$ ne dépend pas de la masse totale $y(t)$ de carbone dans l'air mais des seules émissions $f_{\text{fossil}}(t)$ ce qui paraît surnaturel car physiquement l'absorption dépend de la pression partielle et donc de la seule masse $y(t)$ de carbone dans l'air.

Une application numérique montre que $\text{absorb}(t)$ aurait crû de 5 Gt-C/an depuis le préindustriel **dix fois moins** que ce que dit la figure 14 et **cinq fois moins** que ce que dit le GIEC AR5, figure 6.1.

La fonction de Berne défie le sens commun : elle ne s'applique pas au dégazage naturel et suppose que la végétation et les océans discriminent les molécules de CO₂ selon leur origine " naturelle " ou " fossile ". Pour des variantes, voir [Joos, 1996], [Joos, 2014] qui suppose un océan moyen à une température moyenne pour faire disparaître les flux de 100 Gt-C/an dégazé et absorbé par les océans.

9.3. Un "Adjustment time" ou "atmospheric lifetime" entre 50 ans et 200 ans

Cette théorie rappelle *The streetlight effect, or the drunkard's search principle* : en effet dans

$$dy_{\text{air}}(t)/dt - f_{\text{fossil}}(t) = \text{degaz}(t) - \text{absorb}(t)$$

seul le terme de gauche est connu avec précision (la zone bien éclairée par le réverbère), alors que les flux dégazage naturel et absorption sont estimés avec une incertitude considérable (20% selon la légende de la figure 6.1 de [IPCC, 2013]).

$$dy_{\text{air}}(t)/dt - f_{\text{fossil}}(t) \text{ en ppm/an régresse (mal) sur } - (y_{\text{air}}(t) - 291.5 \text{ ppm}) / 50.8,$$

$$\text{donc } d (y_{\text{air}}(t) - 291.5) / dt + (y_{\text{air}}(t) - 291.5) / 50.8 = f_{\text{fossil}}(t) ; 291.5 \text{ ppm} = y_{\text{air}}(1914)$$

$$y_{\text{air}}(t) - 291.5 = \exp(- (t - 1750) / 50.8) (y_{\text{air}}(1750) - 291.5 + \int_{1750}^t \exp((t'-1750) / 50.8) f_{\text{fossil}}(t') dt').$$

Par construction cet $y_{\text{air}}(t)$ redonne assez bien les ppm observés au MLO.

Si pour ne pas invalider la figure politiquement essentielle [IPCC, 2018] SR15, figure 2.A.3,

$T(t) - T(t_0) = A z(t)$ où $z(t)$ est le cumul des émissions anthropiques depuis 1876 on suppose la constance des dégazages depuis 1876, $\text{degaz}(t) = \text{degaz}(1876) = \text{absorb}(1876)$, il vient

$$\text{absorb}(t) - \text{absorb}(1876) = \text{absorb}(t) - \text{degaz}(t) = (y_{\text{air}}(t) - 291.5) / 50.8$$

soit en 2020, un supplément d'absorption de $(413 - 291) / 51 = 2.4$ ppm/an ou +5 Gt-C/an par rapport au préindustriel, dix fois moins que ce que dit la figure 13 et cinq fois moins que ce que dit la figure 6.1 de [IPCC, 2013].

La notion d'*ajustement time* est donc aussi bizarre que $AF(t)$ ou $Bern1(t)$.

[Harde, 2019] fait remarquer qu'un soudain passage de l'absorption de $y_{air}(t)/5$, à la fin de l'année 1751, début de l'industrialisation, à $degaz(1751) + (y_{air}(t) - 291.5) / 50.8$ est difficile à croire.

9.4. Une durée de vie de mille ans dans l'atmosphère ?

Le GIEC (page 472, Box 6-1) écrit "*phase 1. Within several decades of CO₂ emissions, about a third to half of an initial pulse of anthropogenic CO₂ goes into the land and ocean, while the rest stays in the atmosphere ... Within a thousand years, the remaining atmospheric fraction of the CO₂ emissions (see Section 6.3.2.4) is between 15% and 40%, depending on the amount of carbon released (Archer et al., 2009b).*"

C'est impossible pour une impulsion de quelques Gt-C, car la circulation du carbone entre les océans, la végétation et les sols et l'atmosphère fait que d'une impulsion il ne reste après 200 ans que 2,1 % dans l'air (figure 10) ; des 450 Gt-C venus (à la date 2020.0) de la combustion de charbon pétrole et gaz il ne restera que moins de 10 Gt-C ou 5 ppm, insignifiants par rapport aux variations saisonnières vues au MLO, -7 ppm entre mai et septembre et + 9 ppm entre septembre et mai (figure 19).

Les flux entre réservoirs font **qu'à terme une impulsion** de carbone dans l'un des réservoirs **se répartit entre les réservoirs à proportion de leurs masses** ; ces flux de carbone sont, comme les flux d'eau et de vapeur d'eau, une conséquence des contrastes des températures entre latitudes et ne peuvent être escamotés comme on le fait en supposant un océan « moyen » à une « température moyenne » [Caldeira, 2003], [Plass, 1956], [Joos, 1996], [Joos, 2014].

Discuter d'impulsions de carbone en centaines ou en milliers de Gt-C ([IPCC, 2013], FAQ 6.2, figure 2, p. 545) dans une analyse des effets d'émissions humaines de quelques Gt-C/an (*initial pulse of anthropogenic CO₂*), est très bizarre.

9.5. Sur le goulot d'étranglement du CO₂ océanique ou "CO₂ bottleneck"

[Köhler, 2017] (comme [Revelle, 1965]) affirme : "*Only this 1% of DIC in the surface ocean, found as dissolved CO₂, can exchange with the atmosphere. Thus, the carbonate chemistry represents a bottleneck for the oceanic uptake of anthropogenic CO₂ emitted to the atmosphere.*"

En réalité les conversions entre les diverses formes CO₂ hydraté, HCO₃⁻ et CO₃²⁻ sont quasi-instantanées (moins d'une minute) et ce sont, à alcalinité donnée, le DIC et la température qui déterminent la pression partielle du CO₂ dans l'eau de mer : aucun goulot d'étranglement !

9.6. Sur la relation de Revelle $d p_{CO_2_{océan}} / p_{CO_2_{océan}} = R d DIC / DIC$

Cette relation entre les dérivées logarithmiques de la pression partielle du CO₂ dans l'eau de mer et de la teneur de l'eau de mer en carbone inorganique dissous (DIC), avec un coefficient R entre 9 et 12.5, n'a de sens qu'à une température donnée. (voir § 10 ci-dessous).

Elle ne peut pas être appliquée à un « océan moyen » à une « température moyenne » ! Pour une carte des températures de surface des océans, en temps réel voir : http://images.remss.com/sst/sst_data_daily.html.

Comme la pression partielle $p_{CO_2_{océan}}$ varie comme $T^{12.5}$ (§ 10.) il y a une zone intertropicale qui dégaze (figure 2) et une zone plus froide qui absorbe ; le carbone de l'océan de surface est renouvelé en permanence par du carbone remontant de l'océan profond [Levy, 2013] (275 Gt-C/an remontant pour 100 Gt-C/an dégazés et un stock de 300 Gt-C dans l'océan de surface de la zone de dégazage, supposé de profondeur 100 m) et par descente de l'océan de surface vers l'océan profond (275 Gt-C/an descendant dont 100 Gt-C/an absorbé).

Il est donc impossible de croire le GIEC qui écrit : "*The time taken for atmospheric CO₂ to adjust to changes in sources or sinks is of order 50- 200 years, determined mainly by the slow exchange of carbon between surface waters and deeper layers of the ocean ... Consequently, CO₂ emitted into the atmosphere today will influence the atmospheric concentration of CO₂ for centuries into the future*".

Le *adjustment time* (50-200 years) a été vu au § 9-3.

On verra dans [Joos, 1996] (p. 402) des expressions de la pression partielle de CO₂ en fonction du DIC avec une température de l'eau de mer entre 17.7°C et 18.3°C supposée être la moyenne des températures de surface des océans.

9.7. L'utilisation de quatre équations différentielles avec les chiffres de la figure 6.1 du GIEC 2013 montre que ces chiffres sont erronés.

Le texte associé (p. 470 col. 2) est : “Reservoir turnover times, defined as reservoir mass of carbon divided by the exchange flux, range from a few years for the atmosphere to decades to millennia for the major carbon reservoirs of the land vegetation and soil and the various domains in the ocean.”

[Berry, 2021] utilise ces chiffres de la figure 6.1 de [IPCC, 2013] avec un τ propre à chaque réservoir, quotient du stock préindustriel par le flux sortant préindustriel dit par le GIEC ; pour chaque réservoir de stock $y(t)$, la relation de conservation de la matière s'écrit $dy(t)/dt = -y(t)/\tau + f(t)$ où $f(t)$ est le flux entrant dans le réservoir.

Ces flux et les quotients des stocks par les flux sont [Berry, 2021] en Gt-C et en années (les décimales dépourvues de sens physique ne servent qu'à faciliter les vérifications numériques) :

végétation & sols à air 108 Gt-C et $\tau = 2500/108 = 23.15$ ans

air à végétation 108 et $\tau = 589/108 = 5.45$ ans

air à océan de surface 60.4 et $\tau = 589/60.4 = 9.75$ ans

océan de surface à air 60.4 et $\tau = 900/60.4 = 14.9$ ans

océan profond à océan de surface 102 et $\tau = 37100/102 = 363.7$ ans

océan de surface à océan profond 102 et $\tau = 900/102 = 8.82$ ans.

Les stocks sont notés $y_{air}(t)$ dans l'air, $y_{veg}(t)$ dans végétation & sols, $y_{ocs}(t)$ dans l'océan de surface, $y_{ocd}(t)$ dans l'océan plus profond : il vient quatre équations couplées où $f_{fossil}(t)$ désigne les émissions « fossiles » :

$$y_{air}'(t) = -y_{air}(t) (1/5.45 + 1/9.75) + y_{veg}(t)/23.15 + y_{ocs}(t)/14.91 + f_{fossil}(t)$$

$$y_{veg}'(t) = -y_{veg}(t)/23.15 + y_{air}(t)/5.45,$$

$$y_{ocs}'(t) = -y_{ocs}(t) (1/14.90 + 1/8.82) + y_{air}(t)/9.75 + y_{ocd}(t)/363.72,$$

$$y_{ocd}'(t) = -y_{ocd}(t)/363.72 + y_{ocs}(t)/8.82$$

avec les conditions initiales $y_{air}(0) = 589$, $y_{veg}(0) = 2500$, $y_{ocs}(0) = 900$, $y_{ocd}(0) = 37100$.

Pour $f_{fossil}(t) = f_{logis}(t) = 18/(1 + \exp((2011-t)/29))$, la répartition des fossiles entre les quatre réservoirs est tracée à la figure 26 (c'est pratiquement la figure 11 de [Berry, 2021]) : +193 Gt-C dans la végétation et les sols (courbe verte), +143 Gt-C dans l'océan profond, +69.5 Gt-C dans l'atmosphère (courbe grise épaisse), +37 Gt-C dans l'océan de surface (courbe orangée).

Noter la **grosse différence entre la courbe grise en bas de la figure 24, $y_{air}(t) - 589$ Gt-C**, résultant du calcul, et la **courbe bleue en haut $2.12 y_{MLOppm}(t) - 589$** prolongée avant 1958 avec une approximation logistique des ppm au MLO : $280.6 + 389.7 / (1 + \exp((2045 - t)/36.8))$

Cette discordance majeure invalide l'hypothèse d'un océan de surface séparé de l'océan profond avec un océan « puits » de carbone.

Le modèle simple qui découle de la figure 6.1 de [IPCC, 2013] ne peut donc pas rendre compte de la croissance des ppm observée au MLO : au lieu de +286 Gt-C dans l'atmosphère (courbe du MLO et son extension logistique) on n'a que +69 Gt-C (courbe grise épaisse en bas de la figure 26).

Ceci prouve encore l'importance de l'apport net de l'océan aux deux autres réservoirs qui se déduit des figures 2, 13 et 14 mais semble tabou pour le GIEC et ses auteurs.

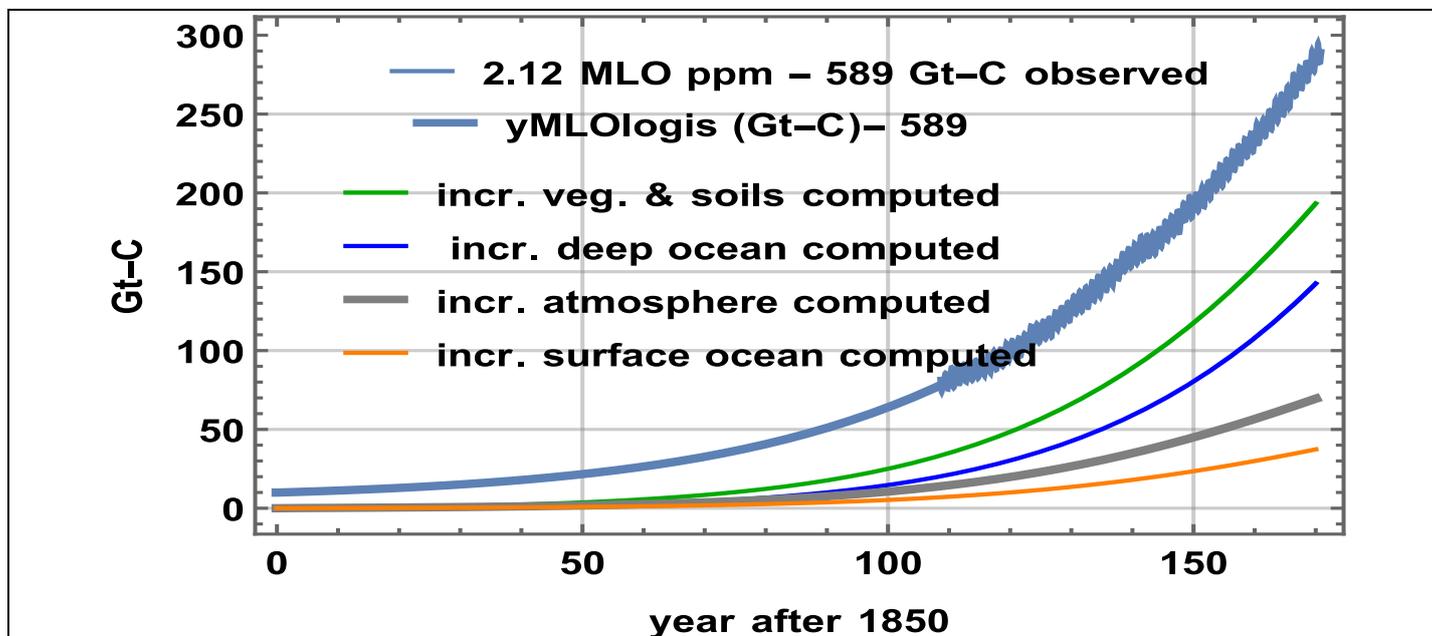


Figure 26 : Stocks calculés présentés sous forme d'incrément par rapport à leur valeur en 1850 (le préindustriel) avec des stocks et des flux initiaux conformes à [GIEC, 2013] : le carbone des combustibles fossiles est réparti entre les quatre réservoirs ([Berry, 2021]) : vert : végétation et sols, bleu : océans profonds, gris épais : air, orange : océan de surface. L'incrément par rapport à 1850 de la série MLO (en Gt-C) et son extension logistique est la courbe en bleu foncé épaisse en haut, très différente de la courbe grise épaisse en bas.

Les quatre équations dérivées de la figure 6.1 de [IPCC, 2013] déterminent une réponse impulsionnelle $F_2(t)$ à une impulsion unitaire de carbone dans l'atmosphère (figure 27) : $F_2(10 \text{ ans}) = 16\%$, $F_2(30 \text{ ans}) = 9\%$.

D'une impulsion de 10 Gt-C, 0,75 ppm est encore dans l'air 10 ans après et 0,5 ppm au bout de 20 ans !

$F_2(t)$ est à quelques % près le $F_1(t)$ de la Figure 10 qui utilise les stocks et les flux de l'année 2019.

$F_1(t)$ et $F_2(t)$ sont très différents de la fonction de Bern et de la Fraction Airborne :

$F_1(20) = 7\%$, $F_2(20) = 11\%$, $FB(20) = 56\%$, $AF = 50\%$.

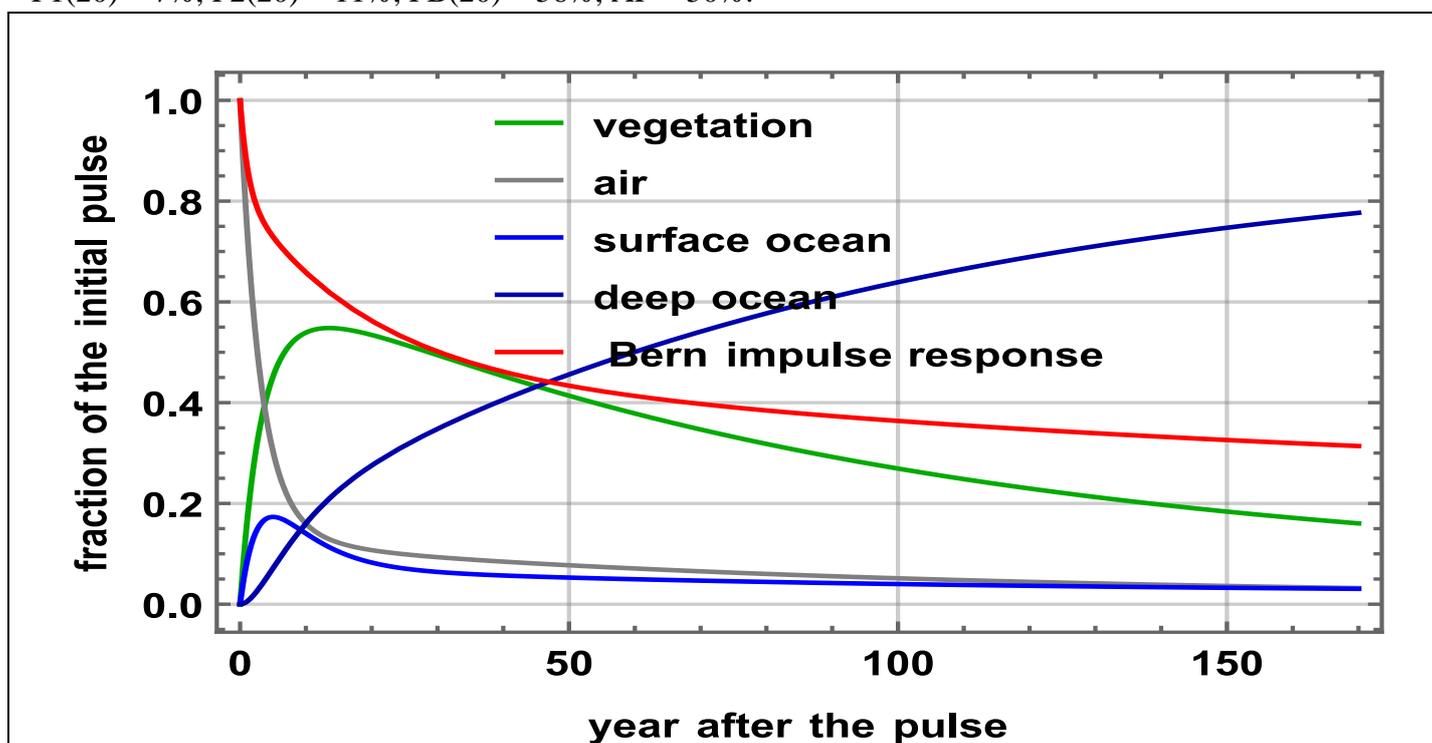


Figure 27 Réponse à une impulsion unité de carbone dans l'air selon les données de la figure 6.1 de [IPCC, 2013]. Ce qui reste ou revient dans l'air après absorptions et dégazages est (courbe grise en bas) en $F_2(t) = 3.4\% + 85.8\% \exp(-t/3.17) + 10.7\% \exp(-t/52.8)$. Comparer avec $F_1(t)$ de la fig. 9.

Nous avons donc deux grosses contradictions dans [IPCC, 2013] :

- des flux (figure 6.1) qui limitent le carbone supplémentaire dans l'air depuis la période préindustrielle à +69 Gt-C au lieu de +285 Gt-C ($285 = 875 \text{ Gt-C} - 590 \text{ Gt-C}_{\text{préindustriel}}$),
- l'affirmation d'une réponse impulsionnelle de type Bern : *Within a thousand years, the remaining atmospheric fraction of the CO₂ emissions (see Section 6.3.2.4) is between 15% and 40%*, (figure 27, courbe rouge) alors que le calcul avec les flux et stocks proposés par [IPCC, 2013] fig. 6.1 dit 3,4% à long terme (courbe grise en bas de la figure 27).

9-8) Il est dit et répété que l'océan est un puits de carbone qui absorbe le quart du carbone anthropique.

Le seul flux supplémentaire par rapport au préindustriel à répartir entre les réservoirs « air » et « végétation & sols » serait alors 75% des émissions anthropiques ; une paire d'équations décrit la répartition entre air et végétation & sols, avec la NPP de 52 Gt-C/an en 1900, moitié de la GGPP de [Haverd, 2020], et un rapport stock / (flux sortant) de 35 ans pour la végétation et les sols :

$$y_{\text{air}}'(t) = 0.75 f_{\text{fossil}}(t) + y_{\text{veg}}(t) / 35 - 52 (y_{\text{air}}(t) / y_{\text{air}}(0))^a (y_{\text{veg}}(t) / y_{\text{veg}}(0))$$

$$y_{\text{veg}}'(t) = 52 (y_{\text{air}}(t) / y_{\text{air}}(0))^a (y_{\text{veg}}(t) / y_{\text{veg}}(0)) - y_{\text{veg}}(t) / 35$$

$$y_{\text{air}}(0) = 610.6 \text{ Gt-C ou } 288 \text{ ppm en } 1900, y_{\text{veg}}(0) = 35 \times 52 = 1820 \text{ Gt-C en } 1900.$$

L'exposant a exprime la fertilisation de la végétation par plus de CO₂ dans l'air. Un très faible exposant de fertilisation $a = 0,08$ permet de retrouver les 414 ppm du MLO en 2020, mais les variations des deux stocks atmosphère et végétation & sols, tracées à la figure 28, sont sans rapport avec les observations !

Le flux absorbé par la végétation (en NPP) serait selon ce calcul, passé de 52 Gt-C/an en 1900 à 55 Gt-C/an en 2020 ce qui est bien différent des 73 Gt-C/an en 2016 de [Haverd, 2100].

Le cumul des flux de carbone (en rouge) entrant dans l'air est, de 1958 à 1980, moindre que la croissance du stock dans l'air observé au MLO par rapport aux 288 ppm ou 610.6 Gt-C de l'an 1900.

Ces résultats invalident encore l'hypothèse d'un océan puits de carbone. Il faut un apport net de l'océan.

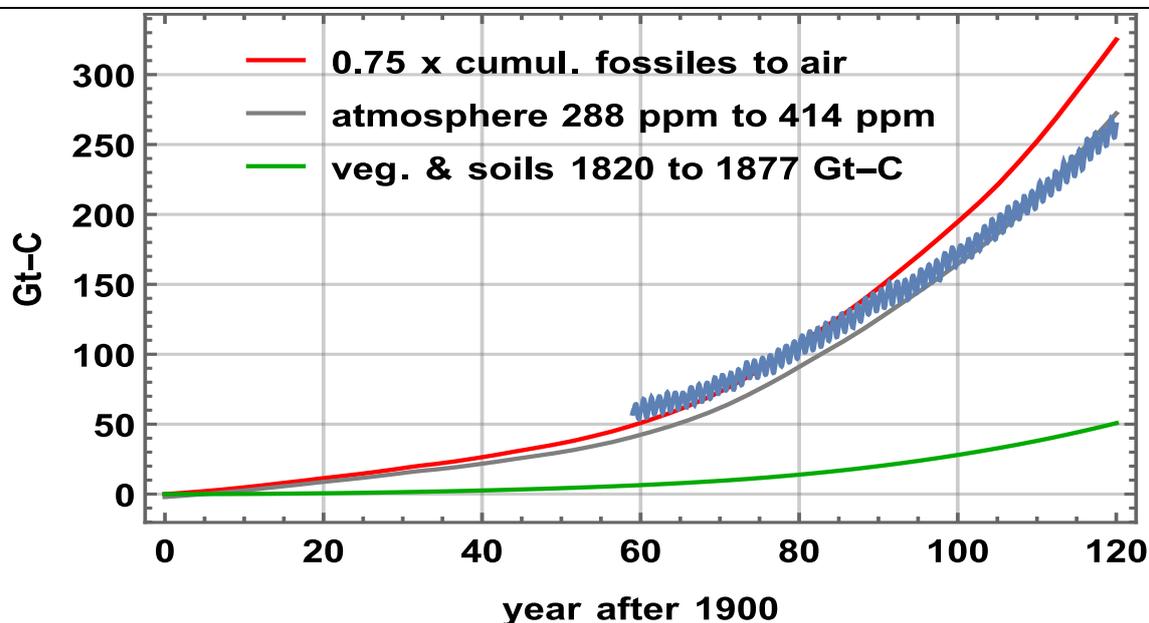


Figure 28 Cas de l'océan puits de carbone ne laissant que 75% des émissions à l'air et à la végétation : répartition entre atmosphère et végétation & sols ; en bleu la courbe du MLO diminuée de 610.6 Gt-C

9.9. Des centaines de millénaires ? (100 000 ans et plus)

[IPCC, 2013] p. 472, Box 6.1: *Multiple Residence Times for an Excess of Carbon Dioxide Emitted in the Atmosphere: "the removal of all the human-emitted CO₂ from the atmosphere by natural processes will take a few hundred thousand years (high confidence) as shown by the timescales of the removal process shown in the table below (Archer and Brovkin, 2008)".*

Le CO₂ « humain » a une demi-vie de 3.5 ans, soit une division du stock initial par 4 en 7 ans. Le « *time scale of the removal process* » est 3,5 ans pas des centaines de millénaires !

Si l'on prend en compte le carbone revenu à l'air après une ou plusieurs séquences d'absorption et de dégazage, on n'a, comme vu au § 6, au bout de 30 ans que $F1(30) = 5\%$ du « *human emitted CO₂* » soit 10.6 ppm pour 450 Gt-C cumulé ce qui est proche de la dynamique saisonnière observée au MLO, et, à terme, 2,1% soit 4,5 ppm pour 450 Gt-C cumulé.

Le mélange de carbone dans les réservoirs et entre les réservoirs impose ces 2.1% qui sont simplement le rapport de la masse du réservoir atmosphère à la somme des masses des trois réservoirs.

9-10. Des réservoirs en équilibre statique, ou comment fabriquer une fonction de Bern ?

La fonction de Bern tracée en rouge sur la figure 10 a été vue au § 9-2. Un équilibre statique entre trois réservoirs, sans aucune circulation forcée par le contraste des températures qui pour les océans, force le dégazage en $yoce(t)/\tau(t)$, et pour les sols force le pourrissement de la matière organique végétale ($yveg(t)/40$ ou analogue) exprime l'analogie de trois bassins de volumes différents avec une surface liquide commune : si le niveau de l'un des trois réservoirs ou bassins devait augmenter, ce bassin libérerait du liquide vers les deux autres. Les équations d'équilibre statique avec un coefficient u peuvent fournir les ppm du MLO mais pas la croissance de la NPP de la végétation. Les équations sont

$$yair'(t) = -u (yair(t) / 610.6 - yveg(t) / yveg0) - u (yair(t) / 610.6 - yoce(t) / yoce0),$$

$$yveg'(t) = -u (yveg(t) / yveg0 - yair(t) / 610.6),$$

$$yoce'(t) = -u (yoce(t) / yoce0 - yair(t) / 610.6),$$

avec des conditions initiales d'équilibre $yair(0) = 610.6$, $yveg(0) = yveg0$, $yoce(0) = yoce0$ et trois cas :

($yveg0 = 1800$, $yoce0 = 38000$), ($yveg0 = 1800$, $yoce0 = 900$) et ($yveg0 = 600$, $yoce0 = 900$) selon que l'on ignore, ou non, l'océan profond ou/et les sols ; $u=5.75$.

Les réponses impulsionnelles de ces trois cas se calculent avec $yair(0) = 1$, $yveg(0) = 0$, $yoce(0) = 0$ et sont tracées à la fig. 29 : la courbe noire est, au-delà de 50 ans, proche de $FB(t)$.

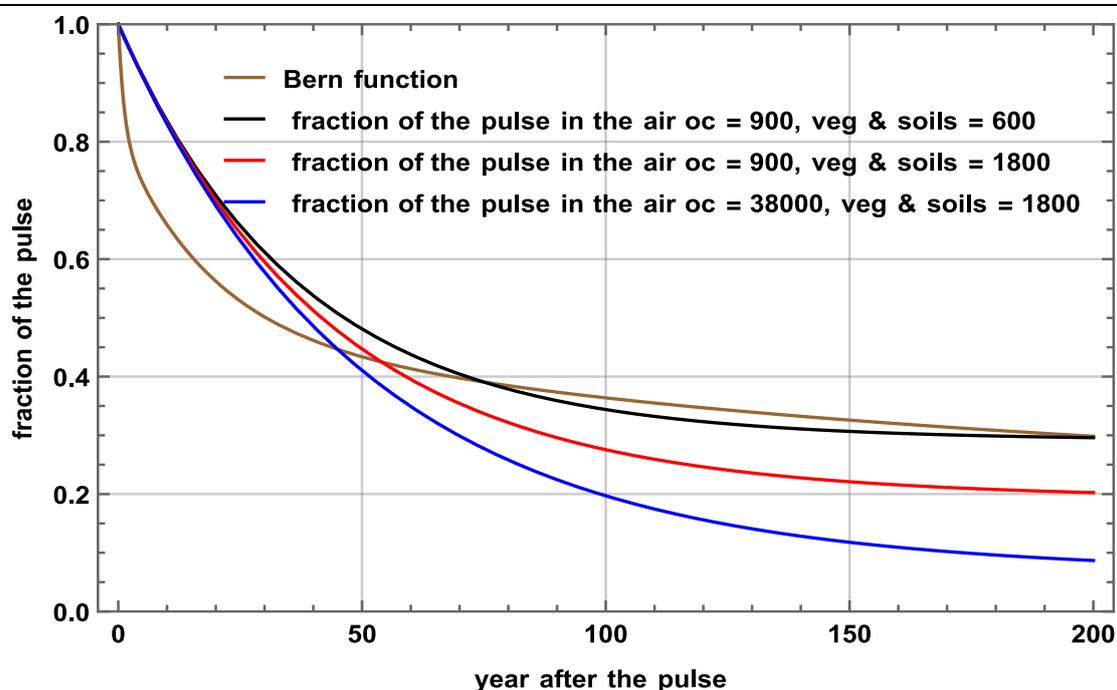


Figure 29 Équilibre statique entre trois réservoirs : fonctions de réponse impulsionnelle pour différentes tailles des réservoirs communiquant avec l'atmosphère ; la courbe noire vaut, à $t = 50$, 48% contre 43% pour Bern, recoupe Bern à $t = 75$ ans, vaut 34% à 100 ans et 30% à 200 ans ; $u = 5.75$.

Avec pour seule perturbation le flux $f_{fossil}(t) = f_{logis}(t+1900)$ (voir § 9.7.) ces équations deviennent

$$yair'(t) = -u (yair(t) / 610.6 - yveg(t) / yveg0) - u (yair(t) / 610.6 - yoce(t) / yoce0) + f_{logis}(t+1900)$$

$$yveg'(t) = -u (yveg(t) / yveg0 - yair(t) / 610.6),$$

$$yoce'(t) = -u (yoce(t) / yoce0 - yair(t) / 610.6),$$

avec des conditions initiales d'équilibre $yair(0) = 610.6$, $yveg(0) = yveg0$, $yoce(0) = yoce0$.

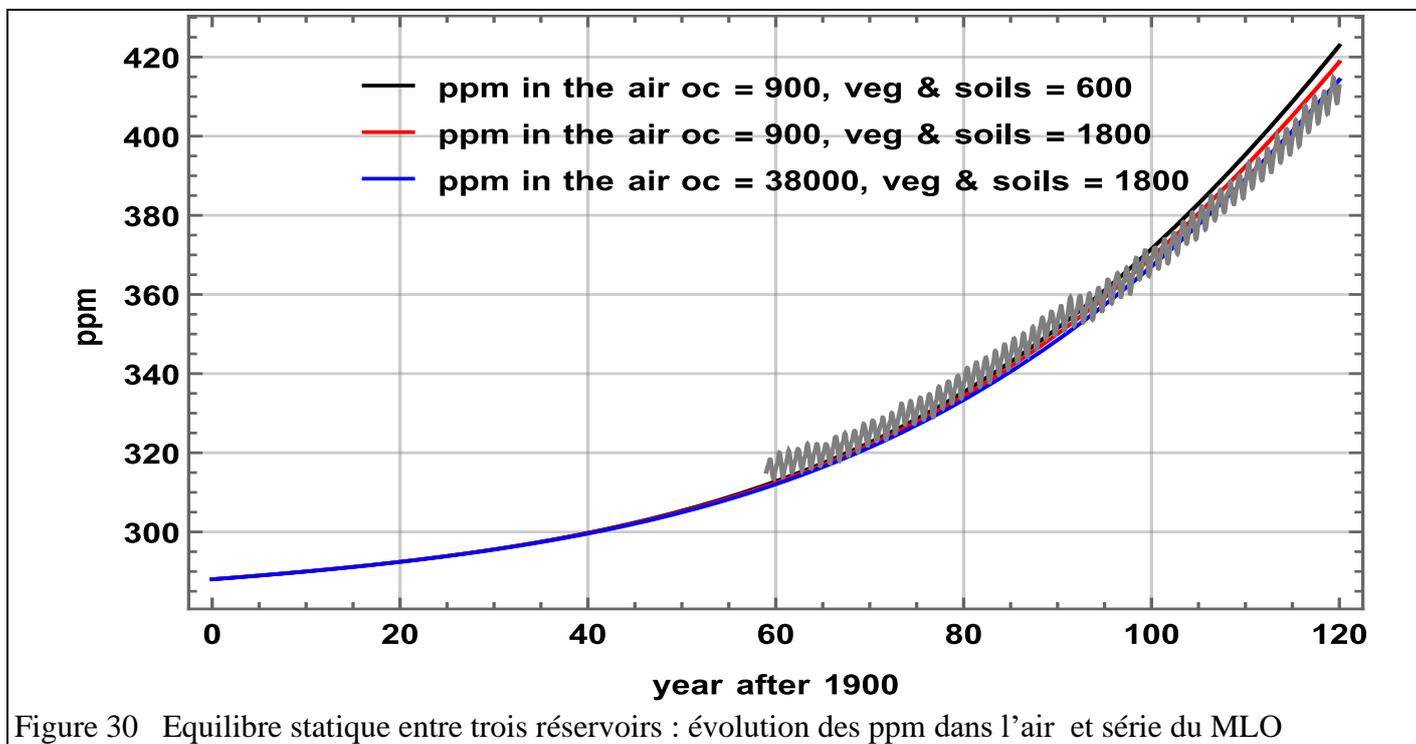


Figure 30 Equilibre statique entre trois réservoirs : évolution des ppm dans l'air et série du MLO

Si les yair(t) de la figure 30 paraissent presque vraisemblables, **la croissance de la masse de carbone dans végétation & sols (figure 31) est presque six fois trop faible**. Elle est la plus forte pour (yveg0 = 1800, yoce0 = 900). Pour les océans les courbes (non montrées) ressemblent à celles de la figure 31 ; l'accroissement du flux de l'air vers l'océan arrive à 2 Gt-C/an au bout de 120 ans et est plus fort pour un volume initial yoce0 = 38000.

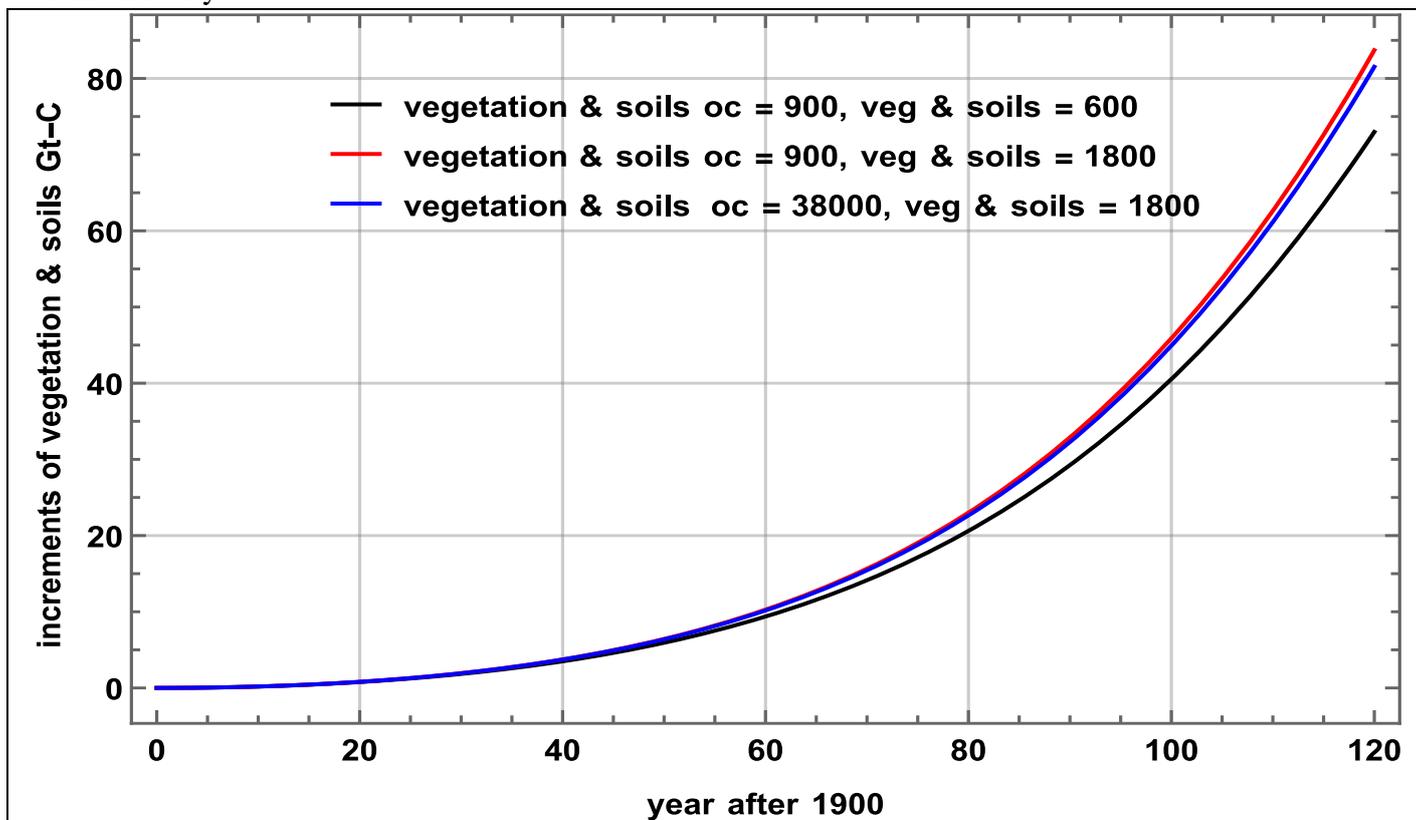


Figure 31 Equilibre statique : évolution de la masse du carbone dans végétation & sols pour les trois paires de valeurs initiales ; $u = 5.75$. La réalité (fig. 13) est de l'ordre de +450 Gt-C, presque six fois plus !

Contrairement aux cas des § 9-7 et 9-8, la masse de carbone dans l'air paraît vraisemblable, mais c'est le **principe même de l'équilibre statique qui est invraisemblable** car les flux calculés entre air et végétation et entre air et océans sont de 2 à 2.5 Gt-C/an, **quarante fois** plus faibles que ceux de la figure 6.1 de [IPCC, 2013] et que les flux vus à la figure 14.

9.11. Rappels historiques

Une recette pour que le CO₂ des combustibles fossiles reste dans l'air avec un AF = 50% a été donnée par [Revelle, 1965] : poser AF= 50% **a priori** et mettre les océans en dehors du cycle du carbone (§ 9.6) avec $\frac{dp_{CO_2ocean}}{p_{CO_2ocean}} = R \frac{dDIC}{DIC}$ et l'hypothèse audacieuse d'un "océan moyen à une température moyenne" et pour embrouiller le lecteur crédule, mettre en avant une variation de -1% à -2% entre 1850 et 1950 du rapport ¹⁴C/¹²C dans l'air (examinée au §11-1 ci-dessous) pour conclure:

"In the past the usual scientific belief has been that by far the larger part of any added CO₂ would be absorbed in the ocean. This is undoubtedly true if we consider a sufficiently long time period, of the order of thousands or even perhaps hundreds of years ... but over shorter times only the uppermost layer takes part in exchanges with the air..."

Cet argument et les prétendus modèles qui en découlent, sont invalidés par le renouvellement permanent du carbone de l'océan de surface des zones de dégazage, dont le stock de 300 Gt-C **est alimenté par une remontée de 275 Gt-C/an**, et des zones d'absorption dont le stock de 300 Gt-C perd 275 Gt-C/an vers l'océan profond.

Le premier rapport du GIEC [IPCC, 1990] montre un schéma avec 90 Gt-C/an dégazés, 92 Gt-C/an absorbés mais, entre océans de surface et océan profond, seulement 37 Gt-C/an remontant et 39 Gt-C/an descendant. Le rapport AR4 dit, pour 1990, 90.6 Gt-C/an dégazés et 92.2 Gt-C/an absorbés, 900 Gt-C dans l'océan de surface (sans doute 300 Gt-C dans la zone qui dégaze, 300 Gt-C dans les zones qui absorbent et 300 Gt-C dans les zones intermédiaires en équilibre avec l'air), et entre océan de surface et océan profond 101 Gt-C/an remontant et 102.8 Gt-C/an descendant (dont 11 Gt-C/an en débris organiques) : c'est encore presque trois fois moins que les 275 Gt-C/an déjà vus.

10) Sur le carbone dans l'eau de mer

Un flux sortant de 100 Gt-C/an sur la bande 20°S-20°N (34% de la surface du globe) à 75% océanique soit 130 M km² correspond à un flux moyen de 64 moles-C/an/m². Pour de l'eau de mer à 2100 μmole-C/kg, il faut une remontée de 30 m/an et trois fois plus si le tiers seulement du carbone qui remonte est dégazé vers l'atmosphère.

Comme vu à la figure 2, le dégazage océanique net (net de l'absorption océanique) a fait 80% de la croissance des ppm depuis 1959.

Mais pour le GIEC un dégazage océanique net est tabou car il invalide les représentations telles que la figure p. 105 de [IPCC, 2018] SR15, Figure 2.3 *Temperature changes from 1850–1900 versus cumulative CO₂ emissions since 1st January 1876* où le cumul des émissions humaines est prétendu avoir causé :

(a) tout l'accroissement du CO₂ et par là,

(b) tout le réchauffement depuis 1876 : "Solid lines with dots reproduce the globally averaged near-surface air temperature response to cumulative CO₂ emissions plus non-CO₂ forcings as assessed in Figure SPM10 of WGI AR5."

La réalité (§§ 2 et 3) est que le réchauffement a causé 80% de la croissance du CO₂ et que les émissions restées dans l'air, environ 22 ppm sur 413 ppm (en 2020.0) ne peuvent avoir aucun effet « climatique ».

10.1. Rappels

L'océan est de très loin le principal réservoir de carbone circulant, potentiellement inépuisable si l'on considère le carbonate de calcium des sédiments marins. L'eau de mer a presque partout presque la même composition (principe de Dittmar, 1884) et contient en mole/kg :

H₂O : 53.56, Na⁺ : 0.4685, Mg²⁺ : 0.05308, Ca²⁺ : 0.01028, K⁺ : 0.01021, Sr²⁺ : 0.00009, B : 0.00042, Cl⁻ : 0.54591, SO₄²⁻ : 0.02823, CO₃²⁻ & HCO₃⁻ : 0.002, Br⁻ : 0.000842, F⁻ : 0.00007,

soit 0.60561 moles par kg de charges positives hors H⁺ et 0.603282 moles de charges négatives hors carbonates, borates et OH⁻ ; la différence 605610 - 603282 = 2328 micro-mole/kg est dite Alcalinité totale notée TAlk qui est aussi identique à [HCO₃⁻] + 2 [CO₃²⁻] + [B(OH)₄⁻] + [OH⁻] - [H⁺].

[x] désigne le nombre de mole par kilogramme d'eau du composé x.

Les équilibres des carbonates dans l'eau de mer ([Copin-Montégut, 1996], [Dickson, 1996 & 2010]) sont décrits par cinq constantes d'équilibre fonctions de la salinité et de la température ; la fugacité f_{CO_2} du CO_2 dans la phase gazeuse s'en tire : $f_{CO_2} = [CO_2^*] / k_0$,

$[HCO_3^-] = k_1 [CO_2^*] / [H^+]$, $[CO_3^{2-}] = k_2 [HCO_3^-] / [H^+]$, $[B(OH)_4^-] = k_b [B(OH)_3] / [H^+]$, $[H^+] = k_{h2o} / [OH^-]$ avec les notations salinité S, température absolue T, $\ln(x)$ logarithme népérien, $a^{**}b$ pour a à la puissance b et le point décimal : $bt[S] = 1.188 \cdot 10^{** -5} S$

$\ln(k_0[T, S]) = -60.2409 + 93.4517 (100 / T) + 23.3585 \ln[T / 100] + S (0.023517 - 0.023656 (T / 100) + 0.0047036 (T / 100)^{**2})$

$\ln(k_b[T, S]) = (-8966.9 - 2890.53 S^{**0.5} - 77.942 S + 1.728 S^{**1.5} - 0.0996 S^2) / T + 148.0248 + 137.1942 S^{**0.5} + 1.62142 S + (-24.4344 - 25.085 S^{**0.5} - 0.2474 S) \ln[T] + 0.053105 S^{**0.5} T$

$\ln(k_1[T, S]) = 2.83655 - 2307.1266 / T - 1.5529413 \ln[T] - (0.20760841 + 4.0484 / T) S^{**0.5} + 0.08468345 S - 0.00654208 S^{**1.5} + \ln[1 - 0.001005 S]$

$\ln(k_2[T, S]) = -9.226508 - 3351.6106 / T - 0.2005743 \ln[T] - (0.10690177 + 23.9722 / T) S^{**0.5} + 0.1130822 S - 0.00846934 S^{**1.5} + \ln[1 - 0.001005 S]$

$\ln(k_{h2o}[T, S]) = 148.96502 - 13847.26 / T - 23.6521 \ln[T] + (-5.977 + 118.67 / T + 1.0495 \ln[T]) S^{**0.5} - 0.01615 S$.

Mêmes relations dans [Dickson 1996, 2010] qui emploie et des logarithmes décimaux et des logarithmes népériens).

DIC désigne le carbone inorganique dissous : $DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$ et TAlk est l'alcalinité totale (Total Alkalinity), différence des charges totales des ions majeurs des sels dissous hors carbonates et borates, donc $TAlk = [HCO_3^-] + 2 [CO_3^{2-}] + [B(OH)_4^-] + [OH^-] - [H^+]$; en supposant que le bore total $[B(OH)_3] + [B(OH)_4^-]$ est une fraction fixe bt de la salinité S, il vient $[B(OH)_4^-] = bt [S] k_b / (k_b + [H^+])$.

$x = [OH^-]$ est la solution proche de 10^{-6} de l'équation suivante :

$$(x k_1 / k_{h2o} + x^{**2} \frac{2 k_1 k_2}{k_{h2o}^{**2}}) DIC / (1 + x k_1 / k_{h2o} + x^{**2} \frac{k_1 k_2}{k_{h2o}^{**2}}) + bt[S] x k_b / (k_{h2o} + x k_b) - k_{h2o} / x + x = TAlk$$

La figure 32 montre les plages de température correspondant à l'absorption (pression partielle de CO_2 dans l'eau de mer moindre que disons 410 μatm) et les plages de température imposant un dégazage, par exemple à plus de 410 μatm .

On voit aussi ce que vaut l'approximation simple tracée en tiretés de

$$p_{CO_2 \text{ eau de mer}}(\mu atm) = 400 (T(K) / 299)^{12.5} (DIC(\mu mole/kg) / 2000)^{10.4} (2328 / TAlk(\mu mole/kg))^{10.3} .$$

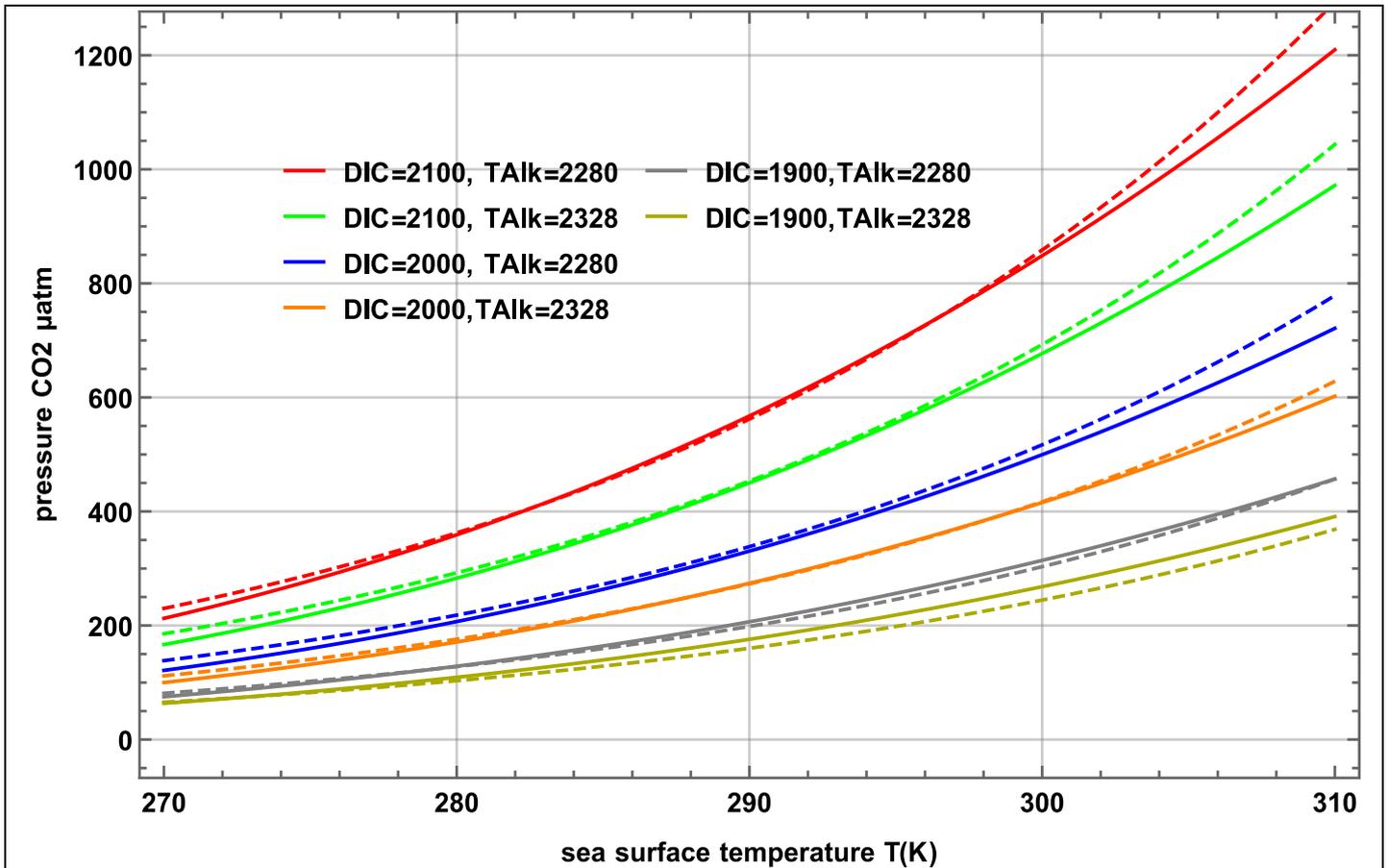


Figure 32 Calcul selon [Copin-Montégut, 1996] de la pression partielle du CO₂ dans l'eau de mer pour diverses valeurs de DIC, TAlk et T(K) en surface ; en tiretés une approximation par $400 (T / 299)^{12.5} (DIC / 2000)^{10.4} (2328 / TAlk)^{10.3}$ pour S=35, avec DIC et TAlk en μmol/kg

La formule de Takahashi en $\exp(0,0433 (T - T_{ref}))$ exprime la croissance de $p_{CO_2\text{eau de mer}}$ avec la température : elle est très proche de l'expression en $T^{12.5}$ (figure 33).

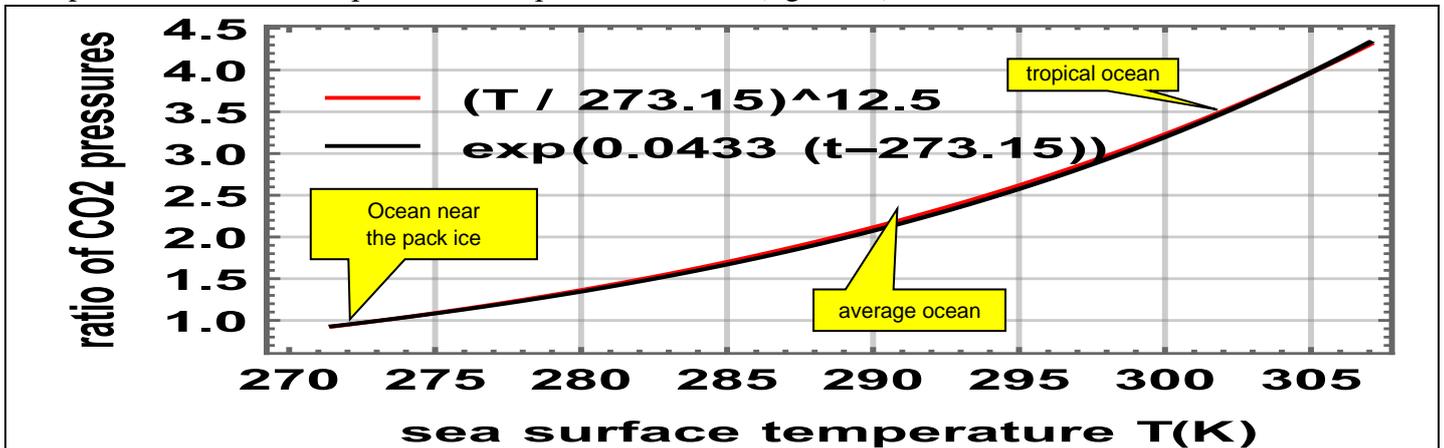


Figure 33 Croissance des pressions partielles avec la température de l'eau de mer : expression en $T^{12.5}$ et formule de Takahashi en $\exp(0,0433 (T - T_{ref})) = \exp(12,5 ((T/288,7) - (T_{ref}/288,7)))$ avec $T_{ref} = 273.15$

La température de l'eau de mer va de 32°C dans quelques zones intertropicales à -1,5°C dans des eaux salées au bord de la banquise. La moyenne globale des températures de surface des océans oscille entre 290 K et 293 K selon la saison.

Le flux de dioxyde de carbone entre l'océan de surface et l'air découle de la différence des pressions partielles [Wanninkhof, 1999, 2013] et vaut :

$$k \times K_0 \times (p_{CO_2\text{eau}} - p_{CO_2\text{air}}) \text{ avec } k = 0.251 (S_c / 660)^{-0.5} < U^2 > .$$

Il dépend faiblement de la salinité. $S_c(t)$ est le nombre de Schmidt, $S_c(t) = 2073.1 - 125.62 t + 3.6276 t^2 - 0.043219 t^3$ où t est la température en °C de l'eau de mer. Le facteur $(S_c / 660)^{-0.5}$ croît de 0.54 à 1 et à 1.37 quand t passe de -1.5°C à +20°C et à +32°C. $< U^2 >$ est le moment du second ordre de la vitesse du vent ;

selon la figure 5 de [Wanninkhof, 2013] il va de 30 m²/s² près de l'équateur à 100 m²/s² à 50°N et peut-être 120 m²/s² voire 150 m²/s² à 50°S.

Des cartes des pressions partielles du CO₂ dans l'air et dans l'eau sont présentées par [Barry, 2010].

Un changement de température de +1°C augmente la pression de partielle de 4,2% à 300 K (4,7% à 273 K) : une différence (p_{CO₂eau} - p_{CO₂air}) de (500 μatm - 400 μatm) devient (521 μatm - 400 μatm) = +21 μatm et +21% sur le dégazage alors qu'une différence (420 μatm - 400 μatm) devient (438 μatm - 400 μatm) soit +18 μatm et +90% sur le dégazage. De plus la variabilité du carré de la vitesse du vent et celle de la température de surface rendent difficile l'estimation des flux.

10.2. La profondeur de la couche à 2250 μmol / kg est probablement variable

Nombre d'articles considèrent la couche limite entre l'eau et l'air, les derniers cent microns ou les derniers centimètres ou décimètres avec de nombreuses mesures océanographiques. Mais le flux dégazé est déterminé par la différence entre le DIC 100 m sous la surface et celui qui, en surface, est en quasi-équilibre avec l'air. Ce DIC à 100 m est, par exemple dans l'Atlantique [Millero, 2007], 2250 μmol/kg entre 15°S et 15°N mais 2100 μmol/kg autour de 30°S et de 40°N. En surface le flux du dégazage ou de l'absorption amène le DIC à quelque 2000 μmol/kg (courbes bleue et orange de la figure 32). Des mesures [Sutton, 2019] en surface des mers montrent une très grande variabilité de p_{CO₂sea water} avec des valeurs moyennes annuelles entre 250 μatm et 490 μatm selon les sites (l'air au MLO était alors vers 370 ppm), une amplitude saisonnière de 60 μatm à 337 μatm près des côtes, de 8 μatm à 71 μatm au large et de 11 μatm à 178 μatm dans les zones à récifs coralliens.

Une division -très schématique- de l'océan de surface en cinq zones géographiques, l'intertropicale qui dégaze, deux zones intermédiaires en équilibre avec l'air et, enfin, deux zones plus proches des pôles qui pompent le CO₂ de l'air montre que l'absorption dépend surtout du rapport des températures des deux dernières zones : si p_{CO₂eau de mer} = p_{CO₂air} à 35°N, la différence (p_{CO₂air} - p_{CO₂eau de mer}) des pressions partielles à 50°N sera en p_{CO₂air} (1 - (T(50°N) / T(35°N))^{12,5}), par exemple

$$p_{CO_2air} (1 - ((273,15 + 5) / (273,15 + 20))^{12,5}) = 0,48 p_{CO_2air}.$$

Selon la force de la remontée de carbone la position de la couche à 2250 μmol / kg sera plus ou moins proche de la surface ; elle serait en surface lors d'époques géologiques à plus de 1500 ppm dans l'air.

10.3. Il n'y a pas d'équilibre statique des pressions partielles de CO₂ entre l'air et l'océan de surface !

Pour {T_{alk}= 2300 μmol /kg, S=35} un équilibre statique avec l'air à 400 ppm demanderait :
à 0°C : DIC = 2184 μmol/kg (2100 à 10°C), contre un DIC observé de 1950 à 2000 μmol / kg
à 30°C: DIC = 1939 μmol/kg, contre un DIC observé de 2100 à 2000 μmol / kg dans les eaux qui remontent au dégazage intertropical.

Il ne peut donc pas y avoir d'équilibre statique entre l'océan de surface et l'air ; les flux permanents de l'océan vers l'air en intertropical et de l'air vers l'océan aux moyennes et hautes latitudes, modulés par les températures de surface des océans sont de l'ordre de 100 Gt-C/an (figure 14) soit, chaque année, environ 2 millièmes seulement du carbone inorganique dissous contenu dans l'océan.

11. Sur le ¹⁴C, sur les ppm tirés des glaces, et sur les fausses corrélations entre des cumuls de quantités positives

11.1. Sur l'isotope ¹⁴C

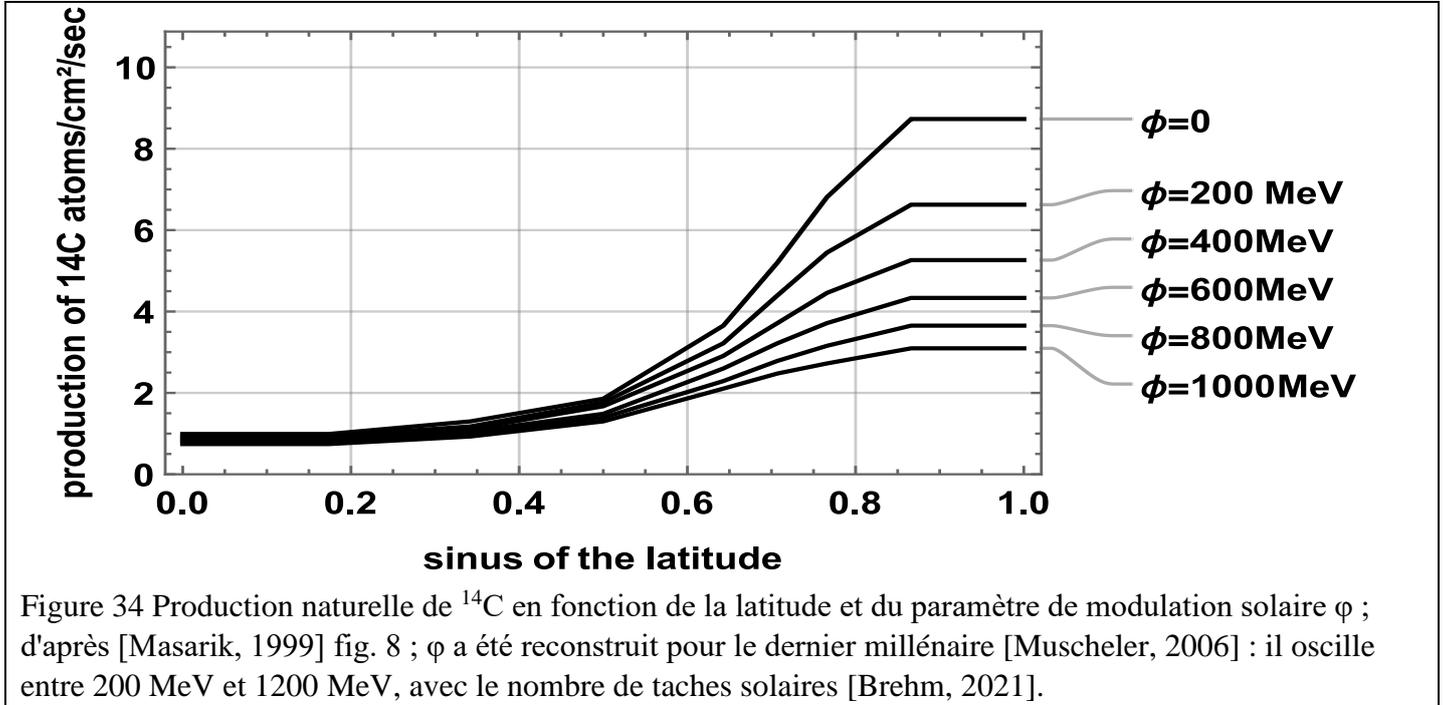
[Revelle, 1965], cité au § 9-11, a utilisé le ¹⁴C pour dissiper "the usual scientific belief of the past" ; le Δ¹⁴C est invoqué par [NOAA, 2021] pour détourner l'attention de la croissance inchangée des ppm au MLO malgré une forte réduction des émissions en 2020 due à la COVID.

La production de ¹⁴C de période radioactive 8267 ans, (décroissance en exp(-λ t) avec

$\lambda = 1 / (8267 \times 365.2425 \times 86400) = 3.8332 \cdot 10^{-12}$ /seconde) par des réactions nucléaires de l'azote de l'air avec des neutrons produits dans l'atmosphère par le flux de rayons cosmiques (essentiellement des protons) ou des particules solaires est un marqueur de l'activité magnétique du soleil.

Le champ magnétique terrestre écarte les particules de faible énergie (< 10 GeV) sauf autour des pôles ; la production de ^{14}C , 2 atomes /cm²/s en moyenne soit 7.5 kg/an de ^{14}C , se fait pour environ 55% dans la stratosphère plus épaisse aux hautes latitudes (figure 34).

L'activité d'un échantillon est exprimée en nombre de désintégrations par seconde, en unité Bq.



Les essais thermonucléaires [Hua, 2010] ont de 1952 à 1976 envoyé dans la stratosphère une masse estimée à quelque 1440 kg de ^{14}C ($620 \cdot 10^{26}$ Bq), masse passée progressivement dans la troposphère (renouvellement annuel d'un cinquième (?) de la masse de la (basse) stratosphère : [Stohl, 2003], [Holton, 1995], [Diallo, 2017]) et de là dans la végétation et les sols et dans les océans, soit +2% sur la masse totale de ^{14}C circulant entre les trois réservoirs, masse qui serait de l'ordre de $7.5 \text{ kg/an} \times 8267 \text{ ans} = 62 \text{ tonnes}$ si l'activité solaire ne variait pas. ([Levin, 2010] dit pour la production naturelle $2.1 \cdot 10^{26}$ Bq soit $4.9 \text{ kg } ^{14}\text{C}$ par an).

Les essais thermonucléaires auraient produit :

$(1440 \text{ kg} / (0.014 \text{ kg/mole} \times 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atomes/mole})) / (8267 \times 365.25 \times 86400) / (10^{12}) = 237 \text{ 428 TeraBq}$
souvent arrondi à $250 \cdot 10^{15}$ Bq.

L'industrie relâcherait quelques centaines de TeraBq/an, disons 500, ce qui correspondrait à :

$$500 \cdot 10^{12} (1/\lambda) / (6.022 \cdot 10^{23}) \cdot 0.014 (\text{kg/mole}) = 3.03 \text{ kg/an de } ^{14}\text{C}.$$

n^{C} et n^{14} désignant les nombres d'atomes de carbone et de ^{14}C dans l'échantillon ou l'atmosphère,

$$\Delta^{14}\text{C} = 1000 (-1 + X (n^{14}/n^{\text{C}}) (1 - 2 (25 + \delta^{13}\text{C}) / 1000))$$

vaut -1000 pour les combustibles fossiles dépourvus de ^{14}C .

$X n^{14}/n^{\text{C}}$ est le rapport de l'activité (nombre de désintégrations par seconde) de l'échantillon à l'activité de la référence $A_{\text{ABS}} = 0.95 \times 0.238 \text{ Bq/(g-C)}$.

$$X = (n^{\text{C}}/n^{14})_{\text{référence}} = 8.5 \cdot 10^{14} = \lambda N_{\text{A}} / (A_{\text{ABS}} m_{\text{C}}) = 3.8332 \cdot 10^{-12} \times 6.0223 \cdot 10^{23} / (0.95 \times 0.238 \times 0.012011).$$

Pour $\delta^{13}\text{C} = -8 \text{ ‰}$, $(1 - 2 (25 + \delta^{13}\text{C}) / 1000) = 0.966$ et $\Delta^{14}\text{C} \text{ ‰} = f n^{14}/n^{\text{C}} - 1000$ avec $f = 8.21 \cdot 10^{14}$.

Pour $\Delta^{14}\text{C} = 0 \text{ ‰}$, $n^{14}/n^{\text{C}} = 1.22 \cdot 10^{-12}$: une augmentation de 10% de n^{14} ferait passer $f n^{14}/n^{\text{C}}$ de 1000‰ à 1100‰ et $\Delta^{14}\text{C}$ de 0‰ à 100‰.

Les reconstructions historiques du $\Delta^{14}\text{C}$ utilisées pour les calibrations des dates au « carbone 14 » du dernier millénaire vont de +20‰, pendant les minima solaires du petit âge glaciaire, à -20‰.

La figure 35 présente des observations faites en Nouvelle Zélande depuis 1955, avec une interruption entre juillet 1997 et juin 1999. $\Delta^{14}\text{C} = -18\text{‰}$ en décembre 1954.

La décroissance a, de 1965 à 2010, été assez régulière avec l'effet d'émissions fossiles sans ^{14}C passées de 1.4 ppm/an en 1964 (319 ppm au MLO) à 4.2 ppm/an en 2010 (388 ppm au MLO).

Une exponentielle ajustée sur le $\Delta^{14}\text{C}$ observé (droite jaune sur la figure 35) a une pente de -43‰/an en 1965 et de $-2,9 \text{‰/an}$ en 2010.

Le $\Delta^{14}\text{C}$ de $y_{\text{natural}}(t)$ calculé comme au § 3., en déduisant la contribution des combustibles fossiles calculée pour une durée de vie de 5 ans, a une pente de -38‰/an en 1965 et de -3‰/an en 2010 (droite bleue ajustement exponentiel, figure 35).

Comme $\Delta^{14}\text{C}\text{‰} = f n^{14}/n^{\text{C}} - 1000$, avec le $\Delta^{14}\text{C}$ de -18‰ en 1954 (avec 311 pm et 660 Gt-C), $n^{14}/n^{\text{C}} = (1000\text{‰} - 18 \text{‰}) / (8.21 \cdot 10^{14}) = 1.2 \cdot 10^{-12}$, et la masse de ^{14}C dans l'air "avant la bombe" était de $((14/12) \times (660. \cdot 10^{12} \text{ kg}) \times 1,2 \cdot 10^{-12} = 924 \text{ kg}$, soit environ 1,5% du stock "naturel" supposé de 62 tonnes.

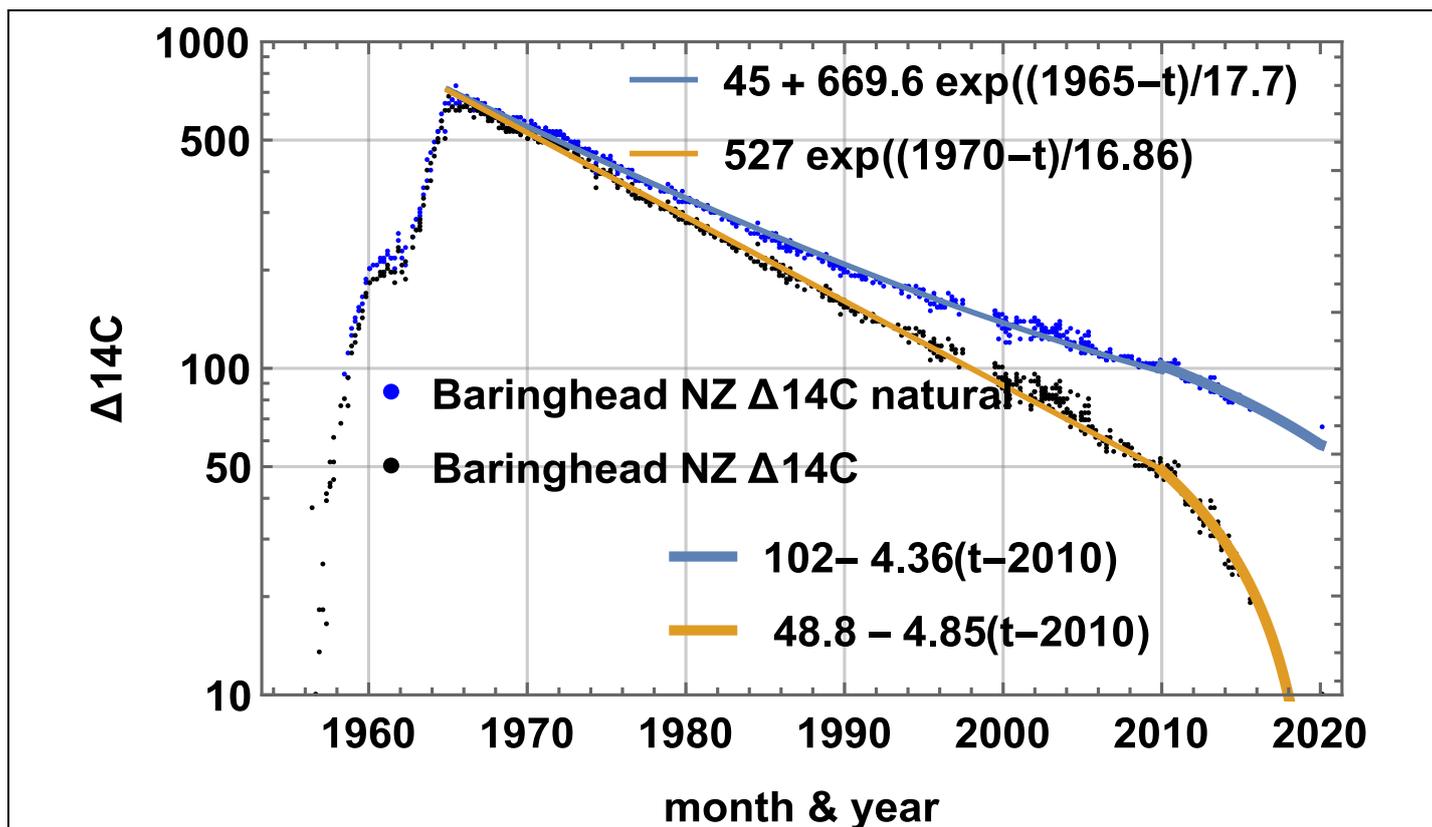


Figure 35 Points noirs : observations du $\Delta^{14}\text{C}$ en Nouvelle Zélande en surface depuis 1955 [Turnbull, 2017]. Points bleus : $\Delta^{14}\text{C}$ ‰ de $y_{\text{natural}}(t)$ après soustraction de la contribution des combustibles fossiles de $\Delta^{14}\text{C}$ ‰ = -1000‰ calculée pour une durée de vie de 5 ans (§ 3.). $\Delta^{14}\text{C} = -18\text{‰}$ en décembre 1954. Les approximations par des exponentielles sont en défaut après 2010 ; une droite $48.8\text{‰} - 4.85\text{‰} (t-2010)$ (courbe jaune épaisse) serait la meilleure approximation.

$f n^{14}/n^{\text{C}}$ a diminué de $2,9\text{‰/an}$ (en 2010) tandis que n^{C} augmentait de $0,5 \text{‰/an}$ à $0,6 \text{‰/an}$ (moyenne de $+2.2 \text{ ppm}/(12 \text{ mois})$ entre 2000 et 2020 mais en variant entre 0.54 et $4.12 \text{ ppm}/(12 \text{ mois})$) ; n^{14} a augmenté de $+0,2 \text{‰/an}$ à $+0,3 \text{‰/an}$.

La figure 36 traduit $\Delta^{14}\text{C}$ en masse de ^{14}C dans l'air en étendant -abusivement- à l'ensemble de l'atmosphère les observations faites en surface, pertinentes pour la seule troposphère : voir [UNSCEAR, 2000], figures II et III pour un exemple d'étude de la circulation entre stratosphère et troposphère.

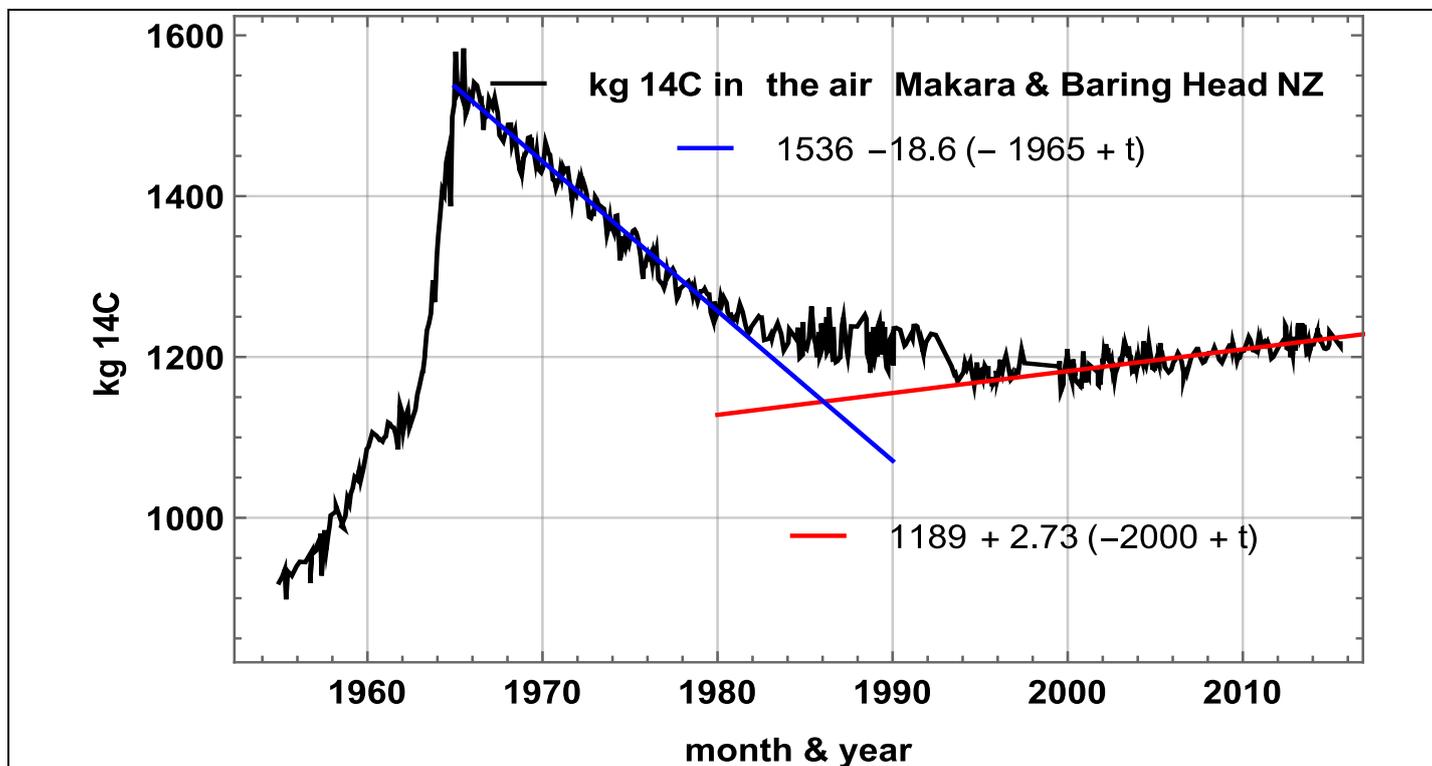


Figure 36 Masse de ^{14}C dans l'air calculée à partir du n^{C} du Mauna Loa en supposant que le rapport n^{14}/n^{C} tiré des observations de la figure 33 vaut pour tout le globe et toute l'atmosphère (troposphère et stratosphère) de masse $5.148 \cdot 10^{18}$ kg. La contribution industrielle de l'ordre de 2 à 3 kg/an de ^{14}C serait à rapprocher de la pente $+2.73$ kg/an de la droite rouge.

Le retournement de la tendance de -18.6 kg/an avant 1980 à $+2.73$ kg/an après 2000 ne semble pas avoir été expliqué et dément bien des affirmations sur la masse de CO_2 des combustibles fossiles dépourvus de ^{14}C restée dans l'air.

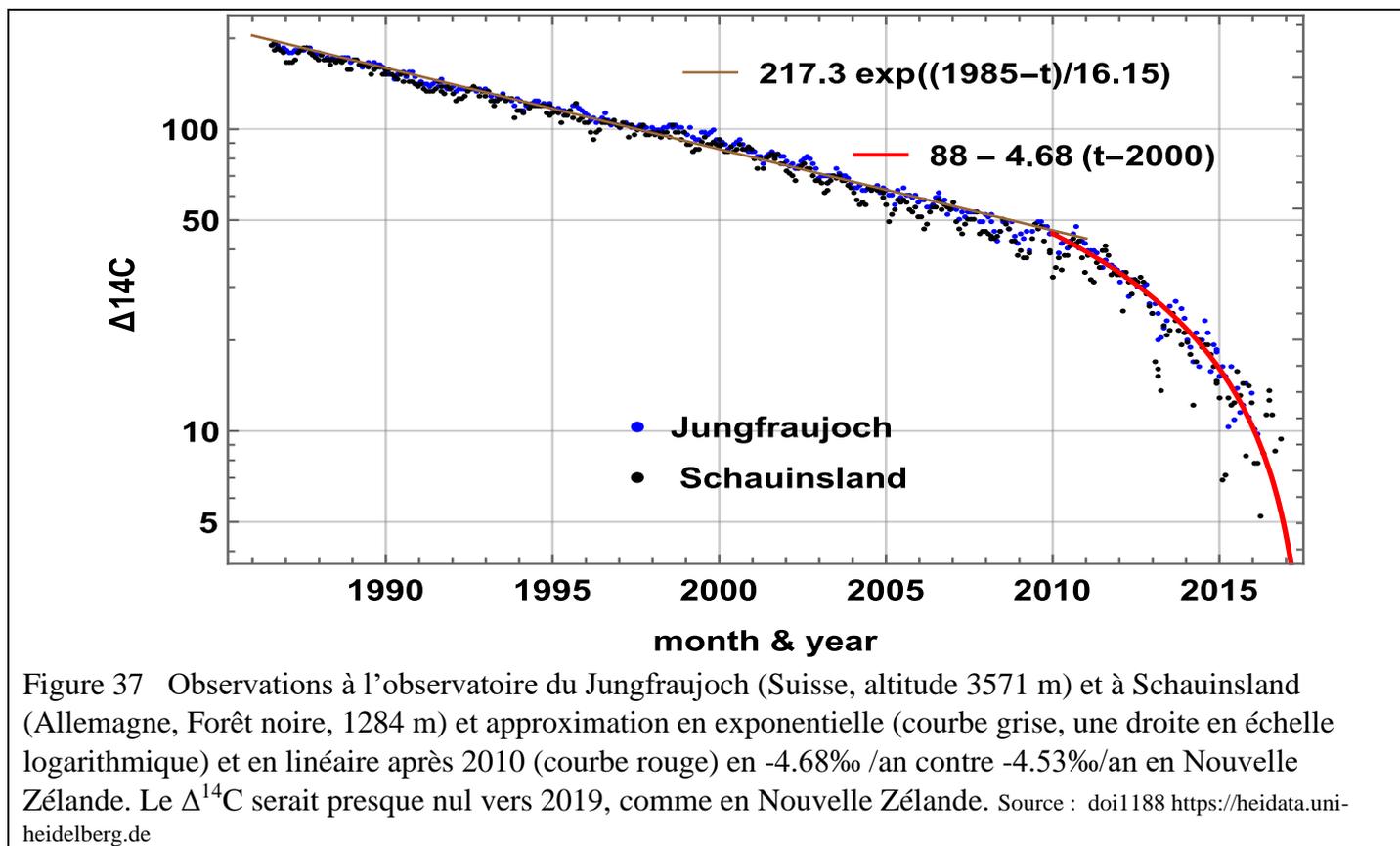
Ce retournement pourrait venir de la fin du vidage du réservoir stratosphérique de ^{14}C constitué par les essais thermonucléaires, des émissions de ^{14}C de l'industrie (2 ou 3 kg/an), d'une moindre appétence de la végétation pour l'isotope lourd causée par une plus grande disponibilité de ^{12}C sur les dernières décennies, d'éventuelles fluctuations liées au soleil et du retour à l'air de ^{14}C après absorption dans les années 1970-1990 par la végétation et les sols.

La figure 37 montre le même retournement pour le $\Delta^{14}\text{C}$ observé en Suisse et en Allemagne de juillet 1986 à novembre 2016 : après 2010, pente de -4.68% /an contre -4.85% /an à la figure 35.

La croissance de la masse de ^{14}C n'est pas expliquée dans [Levin, 2010] où le mot *fossil* apparaît 74 fois, le mot *anthropogenic* 22 fois : “While until the 1990s the decreasing trend of $\Delta^{14}\text{CO}_2$ was governed by equilibration of the atmospheric bomb ^{14}C perturbation with the oceans and terrestrial biosphere, the largest perturbation today are emissions of ^{14}C -free fossil fuel CO_2 . This source presently depletes global atmospheric $\Delta^{14}\text{CO}_2$ by $12\text{--}14\%$ yr^{-1} , which is partially compensated by $^{14}\text{CO}_2$ release from the biosphere, industrial ^{14}C emissions and natural ^{14}C production.”.

Notons que le « moins 12% /an à moins 14% /an » de “This source presently depletes global atmospheric $\Delta^{14}\text{CO}_2$ ” est en réalité, en 2010, -2.9% /an pour l'exponentielle et -4.8% /an pour l'approximation linéaire!

Pas plus d'explication dans [Graven, 2020] où les mots *fossil* et *anthropogenic* apparaissent 111 fois et 12 fois.



11.2. Comment invoquer le ^{14}C pour faire croire à des choses impossibles ?

Voyons maintenant l'usage du ^{14}C par [Revelle,1965].

Trois conditions sont posées a priori :

- (1) $AF = 50\%$ cf. § 9.1: ce qu'il faudrait prouver est donc présumé !
- (2) $dp_{\text{CO}_2\text{océan}}/p_{\text{CO}_2\text{océan}} = R d\text{DIC} / \text{DIC}$ with $R=12.5$: (cf. § 9-11) l'océan profond est mis hors circuit avec l'hypothèse absurde d'un océan moyen à une température moyenne en équilibre avec l'atmosphère,
- (3) the "fossil fuel combustion as the sole source of additional CO_2 " cf. §§ 3. à 8.

Revelle calcule à partir de ces présumés, de multiples couples (B, M) des masses de carbone des réservoirs "Biosphère" B et "Marine" M échangeant du carbone avec l'atmosphère, à partir d'une variation de -1% à -2% (valeur la plus probable) du rapport n^{14}/n^{C} entre 1850 et 1950, tirée de de mesures de la radioactivité de bois. La masse de carbone, en Gt-C, A dans l'air et le cumul $z(t)$ des émissions « fossiles » étaient en 1850, $A = 599$ (ou 283 ppm), $z(1850) = 1$ et, en 1950, $A = 653$ (ou 308 ppm), $z(1950) = 60$.

Les paires (B, M) avec $B + M = 4A$ et une mince couche océanique superficielle échangeant avec l'air $M = 1.5A$ semblent préférées comme les plus « vraisemblables » ce qui – implicitement- justifierait les conditions posées a priori !

Curieux raisonnement qui dispense de prouver ces a priori dont la fausseté a été montré tout au long des paragraphes précédents. Le tableau 2 montre $y_{\text{fossil}}(t)$ en ppm calculés avec $F1(t)$ du § 6 (le $F2(t)$ de la fig. 27 donne presque les mêmes résultats), $A = y_{\text{MLOlogis}}(t)$ et $\Delta^{14}\text{C} = -3.2\%$ en préindustriel vers 1850 ; les $\Delta^{14}\text{C}$ calculés sont proches des observations compilées par [Brehm, 2021](Extended Data fig. 4).

Pour $\delta^{13}\text{C} = -7\%$, le $X n^{14}/n^{\text{C}}$ calculé a diminué de -1.5% entre 1850 et 1950 ce qui est bien entre « -1% à -2% », et ça sans hypothèses bizarres posées a priori !

année	1850	1900	1950	1954 (Makara,NZ)
$y_{\text{fossil}}/y_{\text{MLOlogis}}$ en ppm	0.1/283,	1.1/288,	4/308,	4.7/311,
$\Delta^{14}\text{C}$ calculé	-3.6%	-7.1%	-18%	-18.4% (observé)
$X n^{14}/n^{\text{C}}$	1.0336	1.03	1.0187	1.01826
$y_{\text{fossil}}/y_{\text{MLOlogis}}$ en ppm	0.3/283,	3.3/288,	16/308,	17/311,
$\Delta^{14}\text{C}$ pour Bern1(t)	-4.3%	-14.5%	-54%	-59%

Le $\Delta^{14}\text{C}$ tiré de la fonction de Bern calculé à la dernière ligne du tableau 2, montre son incongruité.

Comme le montrent le § 3. et la figure 12, sur la période 1870-1959, les températures SST_{20°S-20°N} ont amené +33,2 ppm et les combustibles fossiles +4,6 ppm ; cela est cohérent avec le tableau 2 et réfute la condition a priori (3) : "*fossil fuel combustion as the sole source of additional CO₂*".

11.3. Les cycles glaciaires et interglaciaires depuis 750 000 ans

Les géologues avaient à la fin du XIX^{ème} siècle établi l'existence d'alternances de périodes ou ères glaciaires et interglaciaires aux causes alors inconnues ; Croll a (1864, 1875) proposé l'effet de changements des paramètres orbitaux de la Terre et Arrhenius (1896) des fluctuations (d'origine inconnue) de la teneur de l'air en gaz carbonique : les formules d'Arrhenius avec les spectres corrects (connus depuis les années 1930) d'absorption de la vapeur d'eau et du CO₂ en infrarouge thermique disent seulement +0,2°C pour un doublement de la teneur de l'air en CO₂ ; [Plass, 1956] a essayé de ressusciter les idées d'Arrhenius (en ne tenant, écrit-il, pas compte de la vapeur d'eau) ; Eriksson et Welander [Eriksson, 1956] ont tenté de trouver des fluctuations spontanées des teneurs de l'air en CO₂.

En 1963 la US Conservation Foundation (fusionnée avec le WWF dans les années 1990) a lancé l'idée que le CO₂ des combustibles fossiles allait faire monter dangereusement le niveau des mers et rédigé une synthèse des travaux de Keeling, Plass et Eriksson invités à une conférence [Conservation, 1963] ; cette idée a été développée dans le rapport de Roger Revelle [Revelle, 1965] : *le dioxyde de carbone des combustibles fossiles cette pollution invisible*.

G. Roe [Roe, 2006] a, sur les derniers 750 000 ans, montré une parfaite corrélation entre la dérivée par rapport au temps du volume des glaces (deux reconstitutions indépendantes) et l'insolation calculée par Milankovitch (1920, 1930, 1941) : la question des ères glaciaires semble définitivement résolue et sans CO₂, gaz dont la variation de la teneur dans l'air entre deux dates est à un coefficient près l'addition sur le passé, entre ces deux dates, des températures de la zone océanique de dégazage.

Les teneurs en CO₂ tirées depuis la fin des années 1990 de carottes de glace en Antarctique sont un reflet très déformé de teneurs de l'air : le lissage temporel dans le névé où les premiers 120 m de neige et de glace voient une fermeture progressive et aléatoire des interstices entre cristaux reliant une couche profonde à la surface, et la perte de CO₂ chassé par la compression ne permettent pas de dire la véritable teneur de l'air de surface en CO₂.

Le « *parallélisme* » invoqué par [IPCC, 1990] p. xiv of Policymakers Summary "*Thirdly, measurements from of ice cores going back 160,000 years show that the Earth's temperature closely paralleled the amount of carbon dioxide and methane in the atmosphere (see Figure 2). Although we do not know the details of cause and effect, calculations indicate that changes in these greenhouse gases were part, but not all, of the reason for the large (5-7°C) temperature swings between ice ages and interglacial periods*" est un leurre : en réalité les variations des températures modulent les dégazages et par là la teneur de l'air en CO₂ comme vu aux figures 2, 3, 5, 11 et 12, 19, 20.

Les *changements dans les gaz à effet de serre* ne sont ni le tout ni même une partie des grandes variations de température dont ils sont une conséquence.

11.4. Les fausses corrélations entre cumuls de quantités positives ou généralement positives

Des séries temporelles dont les termes sont des cumuls de quantités généralement positives paraissent toujours bien corrélées, même si ces quantités sont entièrement aléatoires. Citons [Munshi, 2016]:

"Empirical evidence of the causal chain that links fossil fuel emissions to rising atmospheric CO₂ and a warming trend consists primarily of correlations between cumulative values (Khesghi, 2005) (Canadell, 2007) (Botzen, 2008) (Brovkin, 2004) (Meinshausen, 2009) (Matthews, 2009) (Solomon, 2009) (Anderson, 2011) (Arora, 2011) (IPCC, 2007) (IPCC, 2014). However, this line of evidence is weakened by the spuriousness of correlations between cumulative values (Munshi, Responsiveness of Atmospheric CO₂ to Anthropogenic Emissions, 2015) (Munshi, The Spuriousness of Correlations between Cumulative Values, 2016)."

Comme vu au §6, figure 10, d'une émission il ne reste dans l'air, même avec les recyclages à travers la végétation et les sols ou les océans, que 10% au bout de 14.3 ans et 5% au bout de 30 ans ; il n'y a donc pas de lien possible entre le cumul des émissions humaines et le « réchauffement » en surface qui, lui, découle de l'insolation en surface.

12. Récapitulation

La durée de vie d'une molécule de CO₂ dans l'air est de l'ordre de cinq ans, sa demi-vie de 3.5 ans ; ce point - admis par le GIEC- fait que moins de 6% du CO₂ de l'atmosphère est venu de combustibles fossiles et resté dans l'air et que 94% est venu des dégazages naturels.

La bonne corrélation mois par mois depuis 1959 entre la dérivée temporelle de la série du MLO (Observatoire du Mauna Loa) des teneurs de l'air en CO₂ et la série des anomalies des températures de la surface des mers de la zone intertropicale qui fait le gros du dégazage océanique démontre que 94% du CO₂ de l'air sont l'intégrale sur le temps des températures passées, une conséquence des températures.

Mathématiquement la série temporelle du MLO (mois par mois) est de type ARIMA avec I = 1 ce qui impose de la dériver par rapport au temps avant de rechercher une corrélation avec une série faiblement stationnaire telle que la série mensuelle des anomalies des températures de la surface des mers entre 20°S et 20°N.

Les quatre cinquièmes de la variation depuis 1959, - et même depuis 1870 - de la teneur de l'air en CO₂ sont simplement une fonction linéaire simple de l'addition depuis 1959 -ou depuis 1870 - des anomalies des températures de la zone intertropicale prises mois par mois.

Les rapports isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ du MLO (§ 7) confirment qu'il n'y a, en 2020, pas plus de 22 ppm fossile restés dans l'air (5,3 % du carbone de l'air), voire 30 ppm avec ce qui est revenu à l'atmosphère après un ou plusieurs cycles d'absorption par la végétation ou par les océans et de dégazage naturel.

Décarboner ne peut donc avoir aucun effet ! Au mieux – 4 ppm quatre ans après un hypothétique arrêt complet - et instantané - des émissions « fossiles » alors que la croissance naturelle est de l'ordre de +2 ppm/an (figure 16).

Des modèles très simples de la circulation des flux de carbone entre les trois réservoirs océans, atmosphère et végétation & sols, avec un dégazage océanique pris soit simplement croissant (§ 6.) soit reflet exact des températures de surface des mers de la zone intertropicale (§ 8., figure 21) restituent bien les observations des ppm dans l'air (série du MLO) et les reconstitutions de la GGPP (Global Gross Primary Productivity) de la végétation passée de 104 Gt-C/an à 146 Gt-C/an entre 1900 et 2016.

La croissance du dégazage océanique de 70 Gt-C/an vers 1900 à 90 Gt-C/an vers 1990 et 105 Gt-C/ an en 2020 est de l'ordre de grandeur de ce qu'admet le GIEC (AR4 fig. 7.3.5).

Le § 9. a réfuté les théories et modèles utilisant la *Airborne Fraction*, la *fonction de Bern*, *l'adjustment time*, la rémanence dans l'air de 15% à 40% des émissions fossiles au bout de 1000 ans, le goulet d'étranglement entre air et océan, l'absence d'échanges de carbone entre océan de surface et océan profond, la relation de Revelle appliquée à un océan moyen supposé à une température moyenne (pour escamoter complètement les contrastes des températures entre latitudes), des flux de carbone entre océan de surface et océan profond entre le tiers et le neuvième du flux trouvé par [Levy, 2013], un océan puits de carbone qui absorbe le quart des émissions fossiles, etc.. Ces théories ne sont que des leurres incompatibles avec les observations, en particulier celles de la croissance depuis 1900 de l'absorption du CO₂ par la végétation et par les océans. Voir [Godwin, 2020] pour une analyse de certains articles.

Ces théories supposent souvent que la végétation et les océans ont le pouvoir surnaturel de discriminer entre les molécules de CO₂ de l'air : celles venues des dégazages naturels seraient absorbées sans délai, celles venues des combustibles fossiles ne seraient pas absorbées.

Le CO₂ de l'air est essentiellement l'intégrale sur le temps des températures passées, une conséquence des températures qui pilotent les dégazages océaniques et ne saurait donc être la cause des températures.

Références

- [Barry, 2010] 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
- [Beenstock, 2012] Beenstock M., Y. Reingewertz, and N. Paldor *Polynomial cointegration tests of anthropogenic impact on global warming*, *Earth Syst. Dynam.*, 3, 173-188, doi:10.5194/esd-3-173-2012, 2012 <https://www.earth-syst-dynam.net/3/173/2012/esd-3-173-2012.pdf>
- [Berry, 2019] Edwin X Berry, *Human CO₂ Emissions Have Little Effect on Atmospheric CO₂*, *International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences*. Vol. 3, No. 1, 2019, pp. 13-26. doi: 10.11648/j.ijaos.20190301.13 <https://edberry.com/blog/climate-physics/agw-hypothesis/contradictions-to-ipccs-climate-change-theory/>
- [Berry, 2019] E. X Berry, “A fatal flaw in global warming science”. Basic Science of a Changing Climate. Porto University, Portugal. Sep 7; 2018. https://www.portoconference2018.org/uploads/1/1/7/3/117342822/11_edwinberryportosep7final.pdf
- [Berry, 2019] E. X Berry, “Contradictions to IPCC’s climate change theory”. Annual meeting of the American Meteorological Society, Phoenix; 2019. <https://ams.confex.com/ams/2019Annual/meetingapp.cgi/Paper/349565>
- [Berry, 2021] *Carbon cycle model shows nature controls CO₂ level* <https://edberry.com/blog/climate/climate-physics/preprint3/>
- [Boden] Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres. 2017. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center at Appalachian State University, Boone North Carolina, <https://energy.appstate/CDIAC>
- [BP, 2020] *Statistical Review of World Energy 2020* | 69th edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html#0>
- [Brehm, 2021] Brehm, N., Bayliss, A., Christl, M. et al. *Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings*. *Nat. Geosci.* **14**, 10–15 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00674-0>
- [Caldeira, 2003] Caldeira K & Wickett M E (2003). *Anthropogenic carbon and ocean pH*. *Nature* 425, 365
- [Campbell, 2017] Campbell J. E., et al. *Large historical growth in global terrestrial gross primary production*, *Nature*, 2017, 544 (7648), pp.84-87. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01606012>
- [Cawley, 2011] Cawley, Gavin *On the Atmospheric Residence Time of Anthropogenically Sourced Carbon Dioxide* Energy & Fuels · October 2011 https://www.researchgate.net/publication/263946928_On_the_Atmospheric_Residence_Time_of_Anthropogenically_Sourced_Carbon_Dioxide/link/5c136c98a6fdcc494ff2ddd7/download (33 pages)
- [Conservation, 1963] The Conservation Foundation (New York) *Implications of Rising Carbon Dioxide Content of the Atmosphere (1963): A Statement of Trends and Implications of Carbon Dioxide Research Reviewed at a Conference of Scientists* <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015004619030&view=1up&seq=1>
- [Copin-Montégut, 1996] Copin-Montégut, Gérard *Chimie de l’eau de mer*, Institut Océanographique Paris 1996, 319 pages
- [Dickson, 1996] Dickson, Andrew G., Christopher L. Sabine, James R. Christian Eds *Guide to Best Practices for Ocean CO₂ Measurements PICES SPECIAL PUBLICATION 3 IOCCP REPORT No. 8* https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/ftp/oceans/Handbook_2007/Guide_all_in_one.pdf
- [Dickson, 2010] Dickson, Andrew *The carbon dioxide system in sea water : equilibrium chemistry and measurements*, in *Guide to the best practices for ocean acidification research and data reporting*, 2010, Luxembourg Publications Office of the European Union, Edited by U. Riebesell, V. J. Fabry, L. Hansson and J.-P. Gattuso.

https://www.researchgate.net/publication/284774361_The_carbon_dioxide_system_in_seawater_Equilibrium_chemistry_and_measurements

- [Donohue, 2013] Randall J. Donohue, Michael L. Roderick, Tim R. McVicar, and Graham D. Farquhar *Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environments*, GRL, vol. 40, 3031–3035, doi:10.1002/grl.50563, 2013
- [Eriksson 1956] Eriksson E., P. Welander *On a mathematical model of the carbon cycle in nature*, Tellus, 1956, VIII, 2, pp. 155-175.
- [Essenhigh, 2009] *Potential Dependence of Global Warming on the Residence Time (RT) in the Atmosphere of Anthropogenically Sourced Carbon Dioxide*, Energy & Fuels, 2009, 235, 2773-2784
- [Gervais, 2014] Gervais, F. *Tiny Warming of residual anthropogenic CO₂* International Journal of Modern Physics B Vol. 28, No. 13 (2014) 1450095 (20 pages) [ref.](#)
- [Godwin, 2020] Brendan Godwin, *Critical Analysis of Kohler's Comment on Harde's Scrutinizing the Carbon Cycle*
https://www.researchgate.net/publication/340429266_Critical_Analysis_of_Kohler's_Comment_on_Harde's_Scrutinizing_the_Carbon_Cycle_Comment_on_Scrutinizing_the_carbon_cycle_and_CO2_residence_time_in_the_atmosphere_by_H
- [Graven, 2013] H. D. Graven , R.F. Keeling , S.C. Piper, P.K. Patra, Stephens BB, Wofsy SC, Welp LR, Sweeney C, Tans PP, Kelley JJ, Daube BC, Kort EA, Santoni GW, Bent JD. *Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960*, Science, 2013 Sept. 6; 341(6150):1085-9. doi: 10.1126/science.1239207. <http://science.sciencemag.org/content/341/6150/1085.full>
- [Graven, 2020] Graven, H., Keeling, R. F., & Rogelj, J. (2020). *Changes to carbon isotopes in atmospheric CO₂ over the industrial era and into the future*. Global Biogeochemical Cycles, 34, <https://doi.org/10.1029/2019GB006170>
- [Hansen, 2013] James Hansen, Pushker Kharecha, Makiko Sato *Doubling Down on Our Faustian Bargain* 29th March 2013, [Environmental Research Letters](#), Volume 8, Number 1 http://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2013/20130329_FaustianBargain.pdf
- [Harde, 2017] Hermann Harde *Scrutinizing the carbon cycle and CO₂ residence time in the atmosphere*, Global and Planetary Change [Volume 152](#), May 2017, Pages 19-26
- [Harde, 2019] Hermann Harde. *What Humans Contribute to Atmospheric CO₂: Comparison of Carbon Cycle Models with Observations*. Earth Sciences. Vol. 8, No. 3, 2019, pp. 139-159. doi: 10.11648/j.earth.20190803.13
- [Haverd, 2020] Vanessa Haverd et al. *Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations* Global Change Biology, 2020, 26, 2390-2402; DOI: 10.1111/gcb.14950 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcb.14950>
- [Haverd, 2020-b] <https://blog.csiro.au/yes-more-carbon-dioxide-in-the-atmosphere-helps-plants-grow-but-its-no-excuse-to-downplay-climate-change/>
- [Hocker, 2010] Lon Hocker <https://wattsupwiththat.com/2010/06/09/a-study-the-temperature-rise-has-caused-the-co2-increase-not-the-other-way-around/> (399 comments)
- [Holton, 1995] Holton James R. et al. *Stratosphere-Troposphere exchange* Reviews of Geophysics 33,4 ,Nov. 1995 pp.403-439
- [Hua, 2004] Quan Hua, Mike Barbetti *Review of tropospheric 14C bomb data for the carbon cycle modeling and age calibration purposes* Radiocarbon Vol 46, Nr 3, 2004, p 1273–1298
- [Hua, 2010] Hua Q., Barbetti, M., Rakowski, A., *Atmospheric Radiocarbon for the period 1950-2010* Radiocarbon Vol. 55, Nr 4, 2013, p 2059–2072
- [IPCC, 1990] First Assessment Report https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_first_assessment_1990_wg1.shtml
- [IPCC, 2001] IPCC AR3, WG1; discussion of Terrestrial and Ocean Biogeochemistry pp.191-197
- [IPCC, 2007] IPCC, AR4, WG1 : figure 7.3.5 <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- [IPCC, 2013] IPCC, AR5, WG1 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> flux figure 6-1 page 471 ; chapter 6
- [IPCC, 2018] SR15 report <https://www.ipcc.ch/sr15/download/>
- [Joos, 1996] Fortunat Joos, Michele Bruno, Roger Fink, Ulrich Siegenthaler, Thomas F. Stocker, Corinne Le Quére & Jorge L. Sarmiento (1996) *An efficient and accurate representation of complex oceanic and*

- biospheric models of anthropogenic carbon uptake*, Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 48:3, 394-417, DOI: 10.3402/tellusb.v48i3.15921 [ref.](#)
- [Joos, 2014] *Climate and carbon cycle representation in Integrated Assessment Models* <http://hassler-j.iies.su.se/courses/climate/joos09.pdf>
- [Köhler, 2017] Köhler, Peter, Judith Hauck, Christoph Völker, Dieter A. Wolf-Gladrow, Martin Butzin, Joshua B. Halpern, Ken Rice, Richard E. Zeebe *Comment on “Scrutinizing the carbon cycle and CO₂ residence time in the atmosphere” by H. Harde* Global and planetary change, 2017 (5 pages)
- [Levin 2010] Levin I., Naegler T. et al. *Observations and modelling of the global distribution and long-term trend of atmospheric ¹⁴CO₂* Tellus (2010), 62B, 26–46
- [Levy, 2013] 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
- [Maddala, 1998] G.S. Maddala, In-Moo Kim *Unit Roots, Cointegration and Structural Change*, Cambridge University Press, 1998, 505 pages.
- [Massen, 2006] https://meteo.lcd.lu/papers/co2_patterns/co2_patterns_1.html
- [Massen, 2011] Massen Francis , Ernst-Georg Beck *Accurate estimation of CO₂ background level from near ground measurements at non-mixed environments*
https://www.researchgate.net/publication/234004309_Accurate_Estimation_of_CO2_Background_Level_from_Near_Ground_Measurements_at_Non-Mixed_Environments
- [Masarik, 1999] Masarik J. and J. Beer *Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere* vol. 104, D10, pp. 12,099-12,111, May 27, 1999
- [Millero, 2007] Millero F. J. *The Marine Inorganic Carbon Cycle*, *Chemical Reviews*, **2007**, 107, (2), 308-341. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr0503557>
- [Munshi, 2016-a] Munshi, Jamal, *Dilution of Atmospheric Radiocarbon CO₂ by Fossil Fuel Emissions* (April 30, 2016) <http://ssrn.com/abstract=2770539> <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2770539>
https://www.academia.edu/24774435/DILUTION_OF_ATMOSPHERIC_RADIOCARBON_CO2_BY_FOSSIL_FUEL_EMISSIONS
- [Munshi, 2016 -b] Munshi, Jamal, *Effective Sample Size of the Cumulative Values of a Time Series* (October 16, 2016). SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2853163> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2853163>
- [Munshi, 2017] Munshi, Jamal, *Responsiveness of atmospheric CO₂ to Anthropogenic Emissions: A Note* (Aug. 21, 2015) http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2642639
- [Munshi, 2017-b] Munshi Jamal, *Responsiveness of Atmospheric CO₂ to Fossil Fuel Emissions: Updated* (July 5, 2017). SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2997420> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2997420>
- [Munshi, 2018-a] <https://tambonthongchai.com/> list of documents
- [Munshi, 2018-b] *Spurious Correlations in Climate Science* <https://tambonthongchai.com/2018/05/27/spurious/>
- [Munshi, 2019], <https://tambonthongchai.com/2019/04/30/illusory-statistical-power-in-time-series-analysis/>.
- [Munshi, 2020] <https://tambonthongchai.com/2020/12/>
- [Muscheler, 2006] R. Muscheler et al., *Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records*, Quaternary Science Reviews (2006), doi:10.1016/j.quascirev.2006.07.012
- [Nakamura, 1992] Nakamura T. et al. *Measurement of ¹⁴C concentrations of stratospheric CO₂ by accelerator mass spectrometry* Radiocarbon, vol. 34, n°3, 1992, pp. 26-46
- [NASA-GISS] <https://data.giss.nasa.gov/modelforce/ghgases/fig1A.ext.txt>
- [Nemani, 2003] R. R. Nemani et al. *Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999*, Science, New Series, Vol. 300, No. 5625 (Jun. 6, 2003), pp. 1560-1563
- [Plass, 1956] *The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change*, Tellus VIII (1956), 2 pp. 140-154
- [Podobnik, 2007] Boris Podobnik, H. Eugene Stanley *Detrended Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Non-stationary Time Series* Physical Review Letters
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.100.084102>
<https://arxiv.org/abs/0709.0281> <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.084102>
- [Pretis, 2013] Pretis F., D. F. Hendry, *Comment on “Polynomial cointegration tests of anthropogenic impact on global warming” by Beenstock et al. (2012) – some hazards in econometric modelling of climate change* Earth Syst. Dynam., 4, 375–384, 2013 www.earth-syst-dynam.net/4/375/2013/
doi:10.5194/esd-4-375-2013

- [Pretzsch, 2014] 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.
- [Revelle, 1965] Revelle Roger et al. appendix Y4 *atmospheric carbon dioxide* in *Restoring the quality of our environment* 1965, The White House, <http://climateandcapitalism.com/wp-content/uploads/sites/2/2014/06/Presidents-Advisory-Report-on-warming-1965.pdf>
- [Roe, 2006] Roe, G. *In defense of Milankovitch*, GRL, vol. 33, L24703, doi:10.1029/2006GL027817, 2006 [ref.](#)
- [Roy-Barman, 2011] M. Roy-Barman, C. Jeandel *Géochimie marine* Vuibert 2011 366 pages (page 110)
- [Segalstad, 1997] Segalstad, T. *Carbon cycle modelling and the residence time of natural and anthropogenic atmospheric CO₂: on the construction of the "Greenhouse Effect Global Warming" dogma* in Bate, R. (Ed.): "Global Warming: The Continuing Debate", European Science and Environment Forum (ESEF), Cambridge, England (ISBN 0-9527734-2-2), pages 184-219, 1998
- [Stohl, 2003] Stohl A. et al. *Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO* JGR Vol. 108, n°. D12, 8516, doi:10.1029/2002JD002490, 2003
- [Sutton, 2019] Sutton A. J. et al. *Autonomous seawater pCO₂ and pH time series from 40 surface buoys and the emergence of anthropogenic trends* Earth Syst. Sci. Data, 11, 421–439, 2019
<https://doi.org/10.5194/essd-11-421-2019>
- [Turnbull, 2017] Jocelyn C. Turnbull, Sara E. Mikaloff Fletcher, India Ansell, Gordon W. Brailsford, Rowena C. Moss, Margaret W. Norris, and Kay Steinkamp *Sixty years of radiocarbon dioxide measurements at Wellington, New Zealand: 1954–2014* Atmos. Chem. Phys., 17, 14771–14784, 2017
<https://doi.org/10.5194/acp-17-14771-2017> (F¹⁴C is corrected for isotopic fractionation and blank corrected)
- [unfccc, 2002] <https://unfccc.int/resource/brazil/carbon.html> *Parameters for tuning a simple carbon cycle model*
- [Wanninkhof, 1999] Wanninkhof, R., W.R. McGillis, *A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed*, GRL, vol. 26, n°13, pp.1889-1892, July 1999
- [Wanninkhof, 2009] Wanninkhof R., et al., *Advances in Quantifying Air-Sea Gas Exchange and Environmental Forcing* Annu. Rev. Mar. Sci. 2009. 1, pp. 213–244
- [Wanninkhof, 2013] Wanninkhof R., et al., *Global ocean carbon uptake: magnitude, variability and trends*, Biogeosciences, 10, 1983 – 2000, 2013 www.biogeosciences.net/10/1983/2013/doi:10.5194/bg-10-1983-2013
- [Wolfram] Wolfram <http://reference.wolfram.com/language/ref/UnitRootTest.html>
- [Zhu, 2016] Zaichun Zhu et al. *Greening the Earth and its drivers*, Nature Climate Change (April 2016)
doi:10.1038/nclimate3004 <http://sites.bu.edu/cliveg/files/2016/04/zhu-greening-earth-ncc-2016.pdf>

Sources des séries temporelles observées:

MLO ppm, aerosols, $\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$, Sea Surface Temperature:

Graven, H. et al. *Compiled records of carbon isotopes in atmospheric CO₂ for historical simulations in CMIP6* Geosci. Model Dev., 10, 4405–4417, 2017 [ref.](#) [CO₂](#), [CO₂](#) [Stratospheric aerosol optical depth at 550 nm](#) , $\delta^{13}\text{C}$ $\Delta^{14}\text{C}$, <https://niwa.co.nz/atmosphere/our-data/trace-gas-plots/carbon-dioxide>
[Sea Surface Temperature SST](#)

R. F. Keeling, S. C. Piper, A. F. Bollenbacher and S. J. Walker, *Scripps CO₂ Program* (<http://scrippsco2.ucsd.edu>), *Monthly atmospheric C13 concentrations (per mil) derived from flask air samples, Mauna Loa Observatory, Hawaii: Latitude 19.5N Longitude 155.6W Elevation 3397 m*

Turnbull (2017) : *Sixty years of radiocarbon dioxide measurements at Wellington, New Zealand: 1954–2014* <https://www.atmos-chem-phys.net/17/14771/2017/acp-17-14771-2017.pdf>

<ftp://ftp.niwa.co.nz/tropac/co2/14co2/>

Currie, Kim et al. *Tropospheric 14CO₂ at Wellington New Zealand : the world's longest record* Biogeochemistry, 2011,

https://www.academia.edu/13431571/Tropospheric_14CO2_at_Wellington_New_Zealand_the_world_s_longest_record

Hammer, S. Levin, I., 2017 *Monthly mean atmospheric $\delta^{14}C$ at Jungfraujoch and Schauinsland from 1986 to 2016* <https://heidata.uni-heidelberg.de/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.11588/data/10100>

http://www.hfsjg.ch/reports/2019/pdf/119_KUP_Leuenberger_Levin.pdf

Rayner, N.A. Parker, D.E. Horton, E.B. Folland, C.K., Alexander, L.V. Rowell, D.P., Kent E.C. Kaplan A. *Global analyses of sea surface temperature sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century* J.Geophys.Res. Vol.108 <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst> from

<https://climexp.knmi.nl>

K.W. Thoning A.M. Crotwell and J.W. Mund (2020) *Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from continuous measurements at Mauna Loa, Hawaii, Barrow Alaska, American Samoa and South Pole. 1973-2019* (NOAA) Global Monitoring Laboratory (GML) Boulder Colorado USA ref.

<http://data.giss.nasa.gov/modelforce/strataer> Bourassa, A , E.A. Robock et al., 2012: *Large volcanic aerosol load in the stratosphere linked to Asian monsoon transport* .Science 33778-81

doi:10.1126/science.1219371