

# Science, climat et énergie

Réflexions sur la science, le climat et l'énergie

## La croissance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est-elle exclusivement anthropique? (2/3)

🕒 12 juillet 2019 📁 atmosphère et CO<sub>2</sub>, Cycle du carbone 📌 atmosphère, CO<sub>2</sub> 👤 JC Maurin

### Carbone 14 et effet Bombe

par J.C. Maurin, Professeur agrégé de Physique

Les essais thermonucléaires (1952-1963) ont constitué une expérience d'ajout brutal de carbone 14 dans l'atmosphère. Le présent article utilise les observations de cet « effet bombe » pour estimer la durée de séjour du <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> et la taille des réservoirs avec lesquels l'atmosphère échange depuis 60 ans. Ces estimations sont en contradiction avec une croissance exclusivement anthropique du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Partie 1/3 de l'article (Carbone 14 et effet Suess)

#### 1. Le carbone 14 dans l'atmosphère [1]

Le carbone existe habituellement sous 3 formes isotopiques : <sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C et <sup>14</sup>C à l'état de traces.

	<sup>12</sup> CO <sub>2</sub>	<sup>13</sup> CO <sub>2</sub>	<sup>14</sup> CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> atmosphérique en 2015	98,89%	1,114%	≈ 10 <sup>-12</sup>
CO <sub>2</sub> anthropique	98,91%	1,092%	0

**Figure 1a.** [5] La différence entre CO<sub>2</sub> anthropique et CO<sub>2</sub> atmosphérique se trouve dans les proportions du mélange des isotopes : le CO<sub>2</sub> anthropique est appauvri en <sup>13</sup>C et <sup>14</sup>C.

La probabilité de désintégration du <sup>14</sup>C est constante, en conséquence le <sup>14</sup>C subsistant au temps t va suivre une loi de décroissance exponentielle.

	demi vie			τ		
Durée (années)	10	50	100	5730	8267	50000
Il subsiste	99,88%	99,40%	98,8%	50,00%	36,79%	0,24%
Il disparaît	0,12%	0,60%	1,2%	50%	63%	99,76%

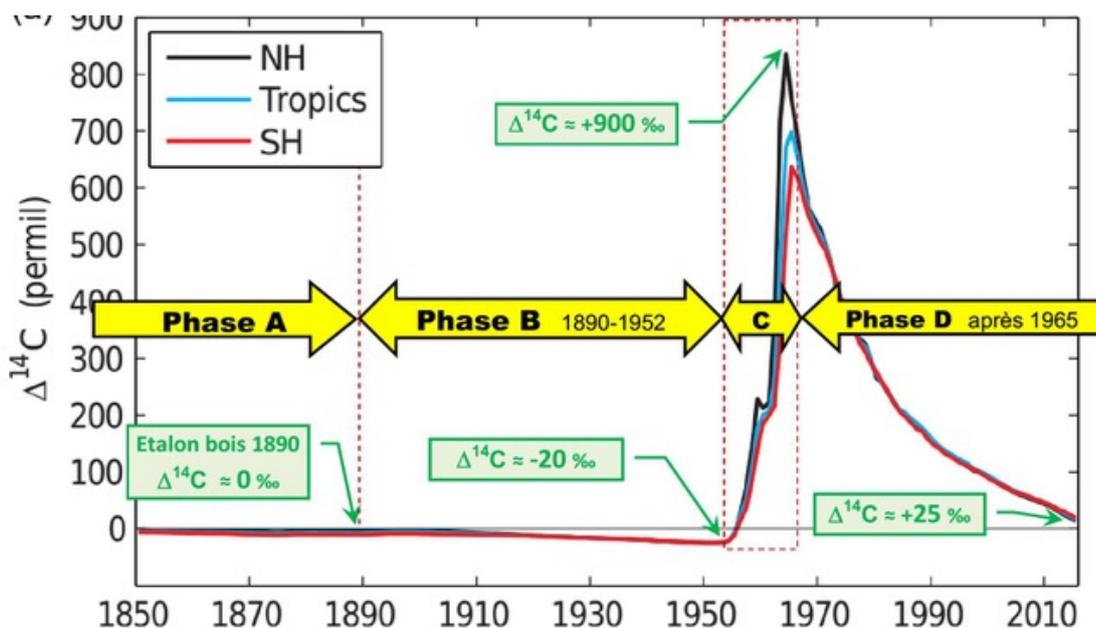
**Figure 1b.** [5] Quelques ordres de grandeurs pour la désintégration du carbone 14.

Pour 10 <sup>12</sup> atomes de carbone 12	Δ <sup>14</sup> C	Exemple
--	-------------------	---------

0 atome carbone 14	-1000 ‰	CO2 anthropique
≈ 1 atome carbone 14	0 ‰	≈ Atmosphère en 1890
≈ 2 atomes carbone 14	1000 ‰	≈ Atmosphère en 1963

**Figure 1c.** [5] On évalue le  $^{14}\text{C}$  en mesurant l'écart relativement à une référence étalon. La mesure est corrigée pour obtenir une grandeur normalisée  $\Delta^{14}\text{C}$ .

On a  $\Delta^{14}\text{C} = 0\text{‰}$  pour l'équilibre dynamique initial → production en haute atmosphère = disparition par désintégration. De nombreuses observations aboutissent à la reconstitution du carbone 14 dans l'atmosphère de la Figure 1d.



**Figure 1d.** Reconstitution du  $\Delta^{14}\text{C}$  pour le  $\text{CO}_2$  atmosphérique depuis 1850 (ici fig1). NH et SH correspondent aux hémisphères Nord et Sud.

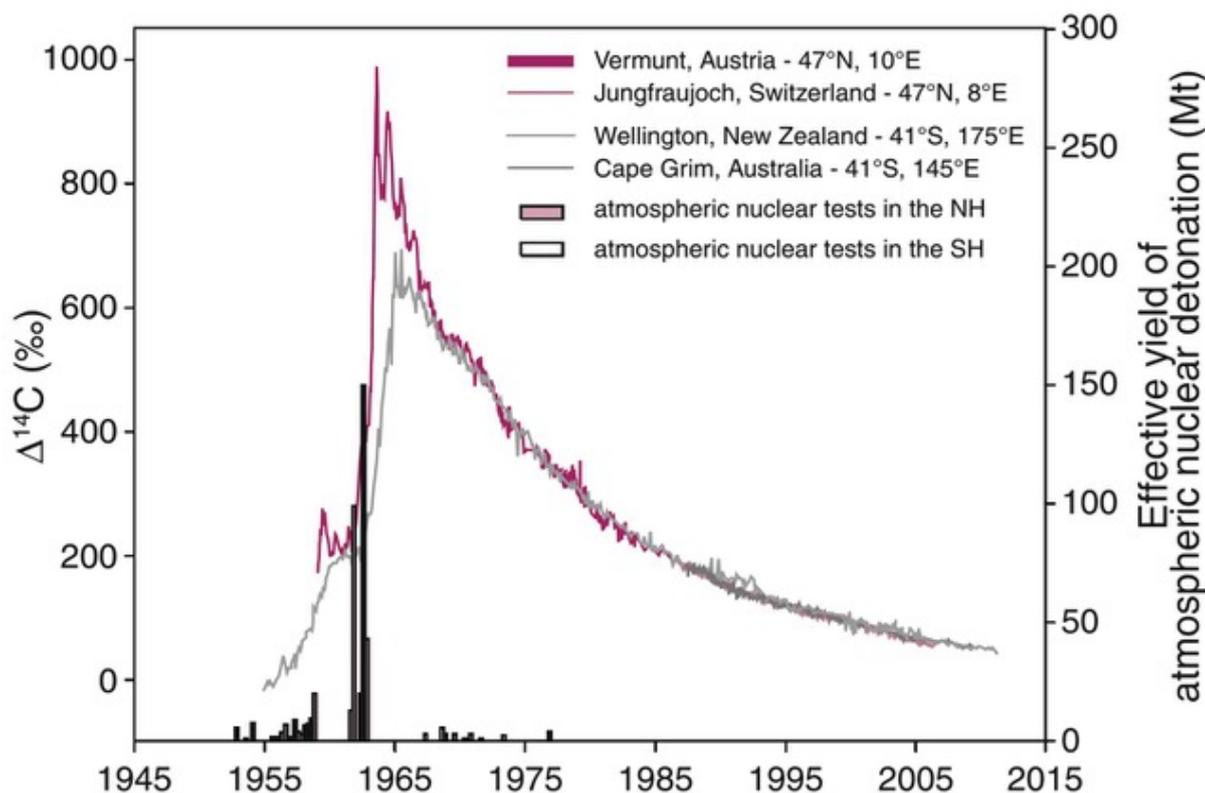
## 2. Interprétation des évolutions du carbone 14 (Fig.1d)

**Phase A.** La production de  $^{14}\text{C}$  par les neutrons cosmiques équilibre la désintégration du stock total de  $^{14}\text{C}$  →  $\Delta^{14}\text{C} = 0\text{‰}$

**Phase B.** L'atmosphère s'appauvrit en  $^{14}\text{C}$  : on passe de  $\Delta^{14}\text{C} = 0\text{‰}$  en 1890 vers  $\approx -20\text{‰}$  en 1952 (effet Suess).

**Phase C.** On constate que  $\Delta^{14}\text{C}$  passe de  $-20\text{‰}$  vers  $+900\text{‰}$ . Le tableau Fig. 2 indique que l'atmosphère en 1963 comporte presque 2 fois plus de molécules  $^{14}\text{CO}_2$  que l'atmosphère en 1952.

L'explosion d'une bombe H produit un flux de neutrons qui vont créer, à partir de l'azote atmosphérique, l'isotope  $^{14}\text{C}$  en grande quantité:  $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + 1p$ . Dans l'atmosphère,  $^{14}\text{C}$  s'oxyde rapidement en  $^{14}\text{CO}_2$ .



**Figure 2. Les phases C et D (ici fig 4.6) [2]** Essais thermonucléaires 52-63 puis décroissance de  $\Delta^{14}\text{C}$  suivant plusieurs observatoires. Les **barres noires verticales** représentent les essais thermonucléaires (UNCEAR). A l'exception de quelques essais vers 1967-1980 (France/Chine/U.K.), les essais thermonucléaires dans l'atmosphère se produisent presque totalement entre 1952 et 1963 dans l'hémisphère **Nord**. L'ajout de  $^{14}\text{C}$  date **principalement** des années **1961 -1963**.

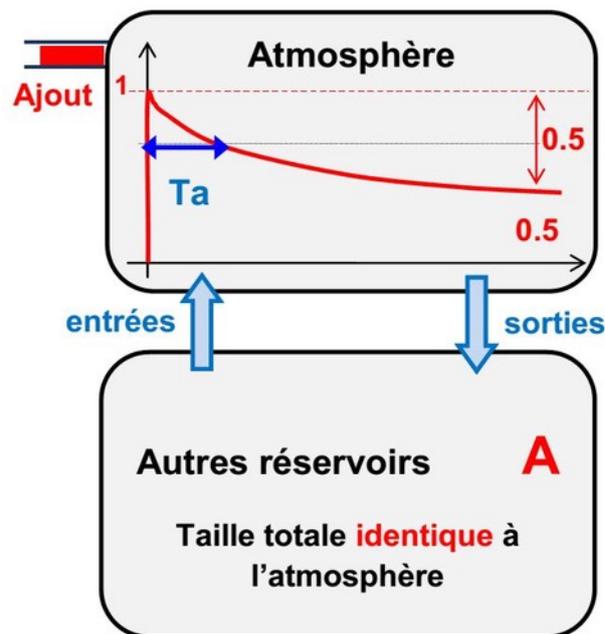
**Phase D** (Fig. 1d et 2). A la fin 1965,  $^{14}\text{CO}_2$  s'est presque réparti également dans les 2 hémisphères, le nombre de molécules  $^{14}\text{CO}_2$  dans l'atmosphère décroît ensuite très rapidement.

Les causes de cette décroissance sont  **multiples**  et sont discutées ci-après :

- Le tableau Fig.1b indique que la décroissance **radioactive** est presque négligeable : en 50 ans, il disparaît seulement 0.6 % du  $^{14}\text{C}$  issu des essais thermonucléaires mais les observations du  $\Delta^{14}\text{C}$  (Fig. 2) montrent une décroissance bien plus rapide.
- L'explication principale se trouve dans les échanges de  $\text{CO}_2$  entre l'atmosphère et d'autres réservoirs. Biosphère, océan, et autres absorbent le  $\text{CO}_2$  atmosphérique chargé en  $^{14}\text{CO}_2$  (les sorties) mais envoient dans l'atmosphère (les entrées) un  $\text{CO}_2$  **initialement** proche de l'**ancien** équilibre, donc peu chargé en  $^{14}\text{CO}_2$ . Progressivement, le carbone 14 des essais nucléaires se répartira entre les différents réservoirs : atmosphère, océan, biosphère, etc. Les entrées et sorties finiront par échanger le  $^{14}\text{CO}_2$  de façon presque égale : on atteint un équilibre provisoire ( $\approx 50$ ans selon Fig.5b).
- Ensuite, la lente désintégration radioactive éliminera la totalité du  $^{14}\text{C}$  des essais atomiques. Cette élimination sera presque complète en quelques dizaines de millénaires selon le tableau Fig.1

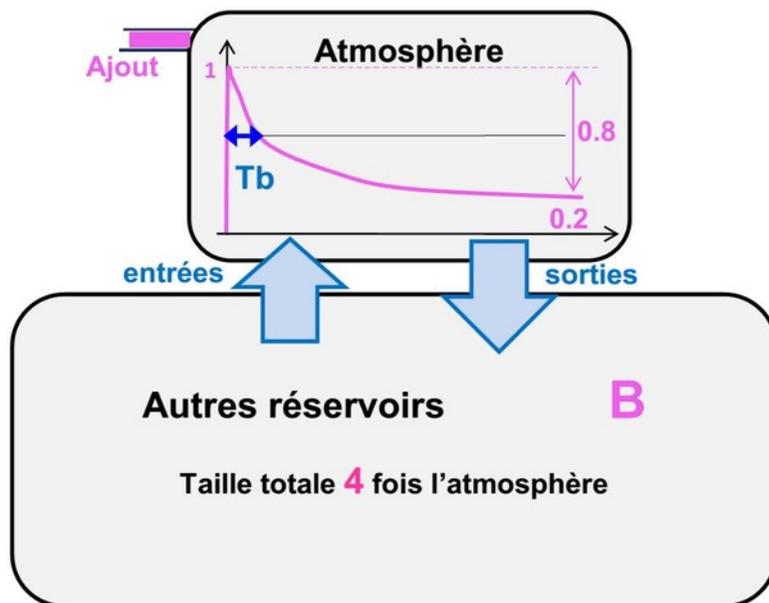
### 3. Echanges entre réservoirs

Dans les échanges de  $\text{CO}_2$  entre atmosphère et autres réservoirs, comment estimer la vitesse des échanges et la taille des réservoirs ?



**Figure 3a.** Schéma A : Échanges lents entre réservoirs de taille comparable. Un ajout instantané va dans un premier temps se répartir dans l'atmosphère en environ 2 ans selon la Figure 2. L'atmosphère **échange** ensuite avec d'autres réservoirs, la vitesse des échanges est symbolisée par les flèches bleues → si les échanges sont lents alors la durée  $T_a$  est grande.

A long terme, l'asymptote nous renseigne sur la **taille apparente** des réservoirs : pour une asymptote  $\approx 0,5$  cela indique que l'on échange avec des réservoirs dont la taille apparente est **comparable** à celle de l'atmosphère. A long terme, l'atmosphère du schéma A contiendra 1/2 de l'ajout initial (0,5) tandis que les autres réservoirs contiendront l'autre moitié de l'ajout initial. On a  $0,5/0,5 = 1$ , ainsi, une mesure sur l'asymptote permet d'estimer la **taille apparente** des autres réservoirs.

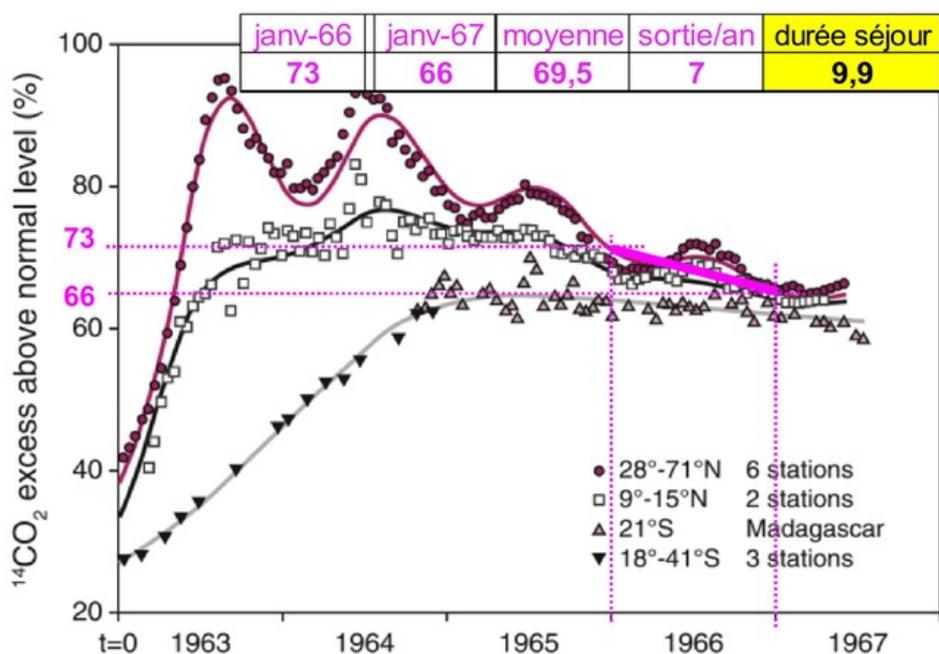


**Figure 3b.** Schéma B : Échanges rapides entre réservoirs de tailles différentes. La taille des flèches bleues symbolise ici une vitesse d'échange rapide et  $T_b$  est une durée plus courte que  $T_a$ . Pour avoir seulement 0,2 = 1/5 de l'ajout initial qui reste dans l'atmosphère, il est nécessaire que l'échange se fasse entre des réservoirs de tailles **très différentes**. Lorsque la répartition est presque terminée, l'asymptote indique que l'ajout est réparti entre réservoirs tels que  $0,8/0,2 = 4$ . Les autres réservoirs ont donc une **taille apparente** 4 fois plus

grande que l'atmosphère. A terme, la répartition de l'ajout initial est de 20 % dans l'atmosphère et 80 % dans les autres réservoirs.

## 4. Durée de séjour pour $^{14}\text{CO}_2$

Pour caractériser la **vitesse** des échanges on peut utiliser la durée de séjour, celle-ci est définie par le rapport  $[\text{CO}_2] / \text{sortie annuelle}$ . Si les sorties annuelles représentaient par exemple 25% du taux de  $\text{CO}_2$ , alors l'atmosphère se renouvellerait en 4 ans (durée de séjour). A partir de l'effet Suess en 1950 ([ici](#) § 6) on a obtenu une durée de séjour comprise entre 7 et 13 ans pour le  $\text{CO}_2$  **anthropique**. L'effet Bombe permet une autre estimation de la durée de séjour, mais pour  $^{14}\text{CO}_2$



**Figure 4. Estimation de la durée de séjour pour  $^{14}\text{CO}_2$**  [5] et Fig 4.8 [ici](#). L'échelle verticale correspond à  $10 \times \Delta^{14}\text{C}$ , elle est donc en %. Les oscillations annuelles dans l'hémisphère Nord (en violet) indiquent probablement des échanges saisonniers avec la végétation. L'estimation  $[\text{CO}_2] / \text{sortie annuelle} = 69.5 / 7 = 9,9$  ans est obtenue avec les mesures de 6 stations de l'hémisphère Nord en 1966.

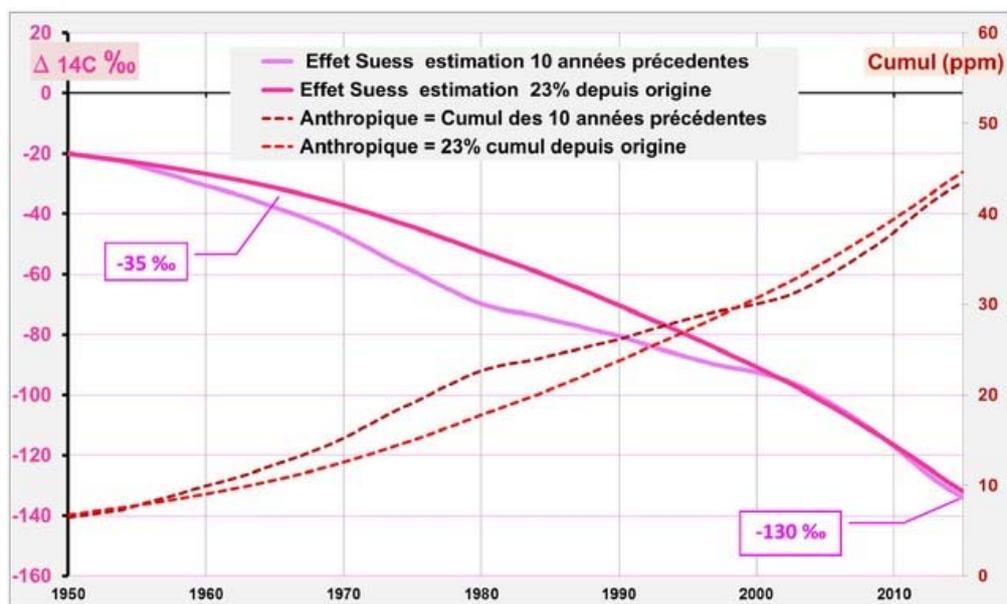
Le choix de l'année **1966** permet d'avoir une estimation des sorties uniquement vers les autres réservoirs car :

- d'une part, la répartition entre hémisphères est presque terminée en 1966.
- d'autre part, 70% du carbone 14 est encore dans l'atmosphère et seulement 30% est passé dans les autres réservoirs: les entrées en 1966 sont encore très peu différentes de la période précédant les essais nucléaires.

On a donc une durée de séjour  $\approx 10$  ans pour le  $^{14}\text{CO}_2$  (Fig.4). Pour d'autres estimations de la durée de séjour, voir [ici](#) en page 13).

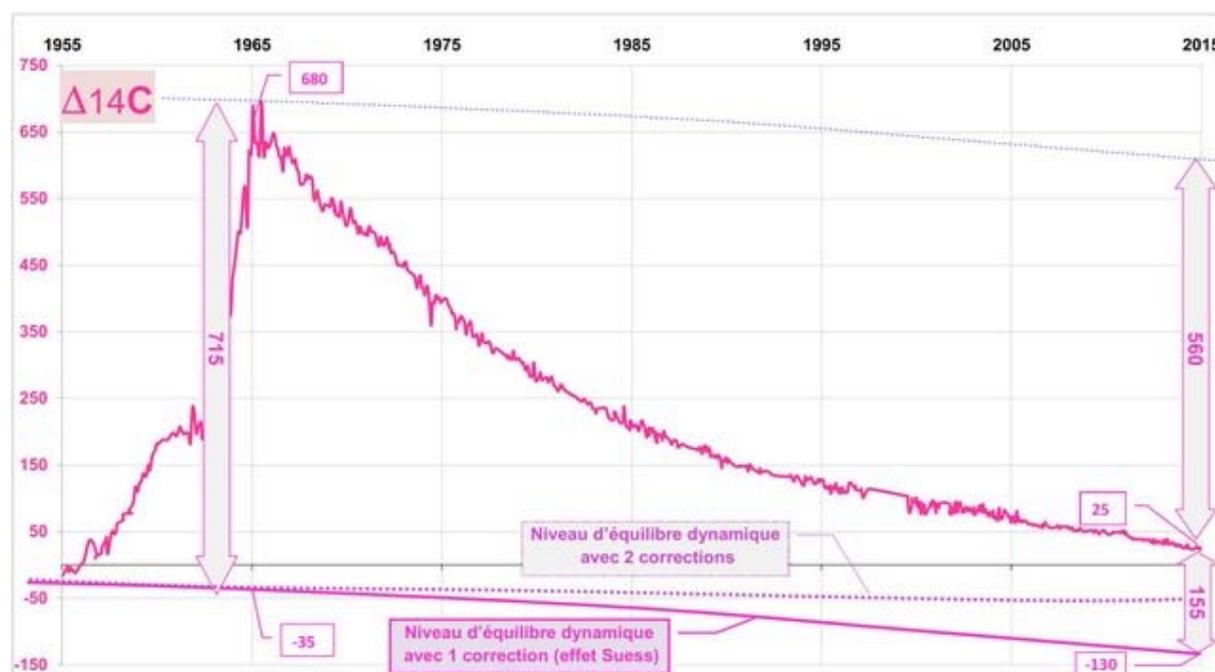
## 5. Etude de la décroissance du $\Delta^{14}\text{C}$ (phase D de la Figure 1d).

Pour pouvoir estimer la taille apparente des réservoirs, il faut **au préalable** estimer quel est le niveau d'équilibre en 2015. Celui-ci n'est pas resté stable depuis 1950 ( $\Delta^{14}\text{C} = -20 \text{ ‰}$ ) car, d'une part, l'homme injecte du CO2 anthropique (effet Suess), ce qui diminue  $\Delta^{14}\text{C}$ , d'autre part, l'industrie nucléaire et les quelques essais nucléaires des années 67-80 ont produit des neutrons donc du  $^{14}\text{C}$ , ce qui augmente  $\Delta^{14}\text{C}$ . Les 2 corrections ont donc des effets opposés.



**Figure 5a** [5] [2]. Une estimation de l'effet SUESS est réalisée à partir de l'effet SUESS de 1950, en corrigeant via le rapport des émissions anthropiques entre 1950 et 2015. La correction peut aussi être calculée par comparaison des émissions anthropiques des 10 années précédentes soit (1940-1950) versus (2005-2015). Les 2 calculs donnent:  $\Delta^{14}\text{C} \approx -130 \text{ ‰}$ . en 2015 et  $\Delta^{14}\text{C} \approx -35 \text{ ‰}$ . en 1965. Cette correction est utilisée à la Fig. 5b.

On peut désormais estimer la taille apparente des réservoirs (cf. §3) qui échangent avec l'atmosphère depuis 1965.



**Figure 5b Evolution de  $\Delta^{14}\text{C}$**  [4] [5]. On utilise les données [4] de Wellington (Baring Head et Makara dans

l'hémisphère Sud) afin que la répartition soit presque terminée entre hémisphères. Avec correction du seul effet Suess, le rapport  $560/155 = 3.6$  indique que l'atmosphère échange le  $^{14}\text{CO}_2$  avec des réservoirs  $\approx 3.6$  fois plus grands.

La proportion restant dans l'atmosphère est  $\approx 155/715 = 22\%$  alors que 78% sont passés dans les autres réservoirs. La décroissance de  $\Delta^{14}\text{C}$  est donc proche du schéma **B** de la Fig. 3b.

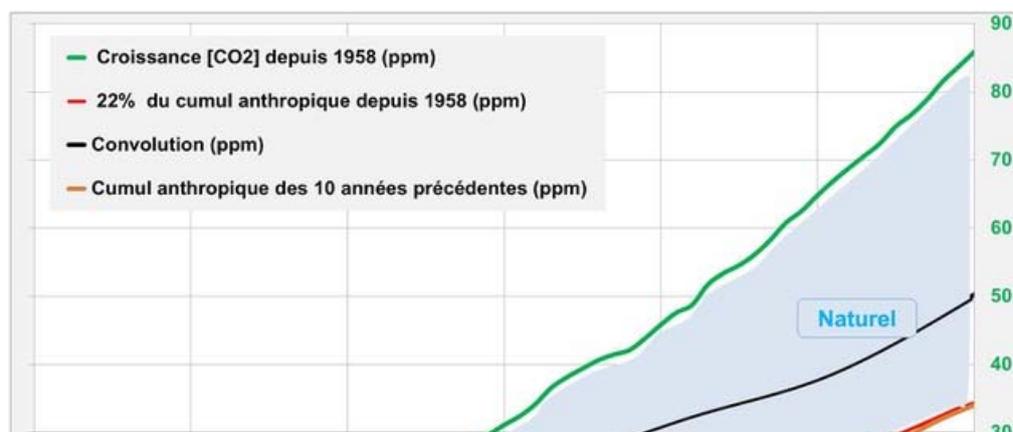
	<b>1950</b>	<b>1965</b>	<b>2015</b>
<b>Observations</b>	<b>-20</b>	<b>680</b>	<b>25</b>
Correction effet Suess	-20	-35	-130
Correction industrie nucléaire	0	1	80
<b>Niveau d'équilibre dynamique</b>	<b>-20</b>	<b>-34</b>	<b>-50</b>
<b>Observations - Niveau équilibre</b>	<b>0</b>	<b>714</b>	<b>75</b>
il reste dans l'atmosphère		<b>10,5%</b>	<b>75</b>
il est sorti de l'atmosphère		<b>89,5%</b>	<b>639</b>

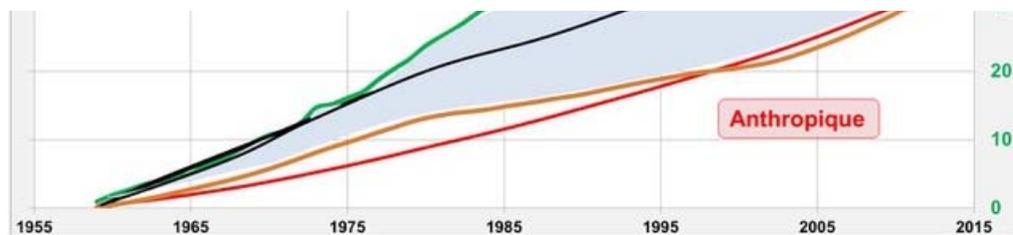
**Figure 5c.** Une seconde correction concerne l'industrie nucléaire, productrice de neutrons, qui provoquent une genèse supplémentaire de carbone 14. Cette correction agit donc *a contrario* de l'effet Suess, et sa valeur, difficile à estimer, serait comparable. [2] P. Jean-Baptiste 2003. Le tableau donne un exemple de l'effet des 2 corrections simultanées : on arrive à une estimation des autres réservoirs  $\approx 639/75 = 8.5$  fois plus grands que l'atmosphère.

Le calcul de la Figure 5b est donc prudent : les autres réservoirs sont **au moins** 3.6 fois plus grands que l'atmosphère (max 22 % dans l'atmosphère et min 78 % dans les autres réservoirs), sans qu'il soit possible de faire un calcul précis.

**Remarques :** Les molécules  $^{14}\text{CO}_2$  et  $^{12}\text{CO}_2$  diffèrent par leur masse **mais** le fractionnement isotopique est inférieure à 10%. La molécule  $^{14}\text{CO}_2$  n'est pas stable, **mais** la décroissance radioactive en 50 ans du carbone 14 n'est que de -0.6%. Sur 50 ans, les molécules doivent donc avoir des comportements proches, à défaut d'être identiques.

Les observations montrent qu'il faudrait utiliser des échanges avec des réservoirs au moins 3,6 fois plus grands que l'atmosphère. Les échanges sont rapides : il faudrait considérer un renouvellement du  $\text{CO}_2$  atmosphérique en moins de 10 ans (Fig.4). La Figure 5d illustre la conséquence de ces estimations.





**Figure 5d** [5] [3]. L'augmentation de la taille des réservoirs entraînerait une proportion (Fig.5b) pour le CO<sub>2</sub> anthropique restant dans l'atmosphère  $\approx 155 / 715 \approx 22\%$  (courbe rouge). Une deuxième estimation utilise la durée de séjour (Fig.4) : le CO<sub>2</sub> anthropique présent dans l'atmosphère correspondrait au cumul anthropique des 10 années précédentes (courbe marron). Une troisième estimation (courbe noire) correspond à la convolution des émissions anthropiques avec l'effet bombe de la Fig.5b (corrections Suess + industrie nucléaire).

Ces 3 estimations sont toutes inférieures à la croissance du CO<sub>2</sub> mesurée à Mauna Loa (courbe verte). Pour retrouver la totalité de la croissance du CO<sub>2</sub> mesurée à MLO, il est nécessaire de **compléter** par des apports nets **non** anthropiques, c'est-à-dire naturels (surface bleue). La croissance depuis 1958 (+86 ppm) serait alors mixte : en partie anthropique et en partie naturelle, sans qu'il soit possible de calculer exactement la répartition anthropique /naturelle.

**La fin de l'article (à suivre) montrera que l'on peut directement comparer la courbe « effet Bombe » de la Fig.5b avec une courbe analogue correspondant à la thèse du groupe intergouvernemental GIEC.**

## 6. Références

1. Propriété du carbone 14 : [RadiocarbonDetermination](#) Fiche IRSN

2. Variabilité naturelle et anthropique pour <sup>14</sup>C :

– H.E. Suess, « Radiocarbon Concentration in Modern Wood», *Science*, vol. 122, n°3166,1955, (DOI [10.1126/science.122.3166.415-a](https://doi.org/10.1126/science.122.3166.415-a)).

– Stuiver & Quay 1981 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0012821X81900406?via%3DiHub>

– Tans, De Jong & Mook1979 <https://www.nature.com/articles/280826a0>

– P. Jean-Baptiste, M. Paterne 2003 DOI: [10.1051/radiopro:2003017](https://doi.org/10.1051/radiopro:2003017)

3. Emissions anthropiques : [CDIAC](#).

– [CO<sub>2</sub>] dans l'atmosphère [ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_annmean\\_mlo.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt)

– [CO<sub>2</sub>] avant 1958 <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/law/law2006.txt>

4. Données<sup>14</sup>CO<sub>2</sub> New Zealand : <ftp://ftp.niwa.co.nz/tropac/co2/14co2/>

Données <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> Austria : <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/cent-verm.html>

Turnbull (2017) : <https://www.atmos-chem-phys.net/17/14771/2017/acp-17-14771-2017.pdf>

5. La feuille de Calcul « **Carbone 14 effet bombe** » met en forme les données d'observations.

Partie 1/3 de l'article (Carbone 14 et effet Suess)

(Visited 354 times, 1 visits today)

 Post Views: 2 592