

ADDENDUM

Estimations des flux naturels dans le modèle MPO

JC Maurin 2026

Le modèle MPO se conforme aux 3 compartiments et aux 4 flux naturels utilisés dans les rapports du GIEC.

Cette simplification est mise en œuvre ici sur une période limitée, couvrant les années **1980 à 2025**.

Stocks : 1 ppm → 7,8 Gt-CO₂ = 7,8 × 10¹² kg de CO₂ → 2,12 Gt-C = 2,12 × 10¹² kg de carbone

Flux : 1ppm/an → 2,12 Gt-C/an ; 1 Gt-C/an → 3,67 Gt-CO₂/an → 0,47 ppm/an

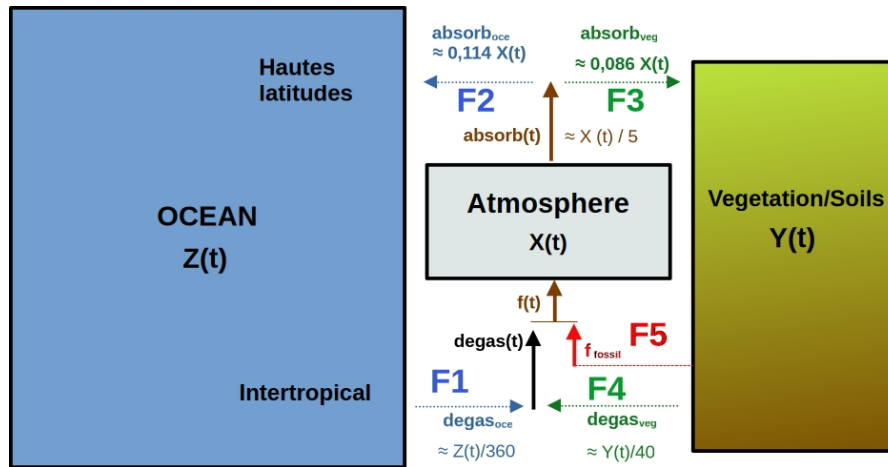


Figure 1 : Les notations des 5 flux et des stocks des 3 compartiments (figure 15 dans [Revisiting the carbon cycle](#))

1. Les flux sortant de l'atmosphère F2 et F3

1.1 Dimensionnement de F3

Le flux 3 est calibré de manière à :

- correspondre aux estimations de la NPP selon [Haverd et al 2009](#).
- être proportionnel à la concentration du CO₂ atmosphérique.
- quasi compatible avec les 6 rapports WG1 du GIEC → $F3 \approx 0,078 X(t)$

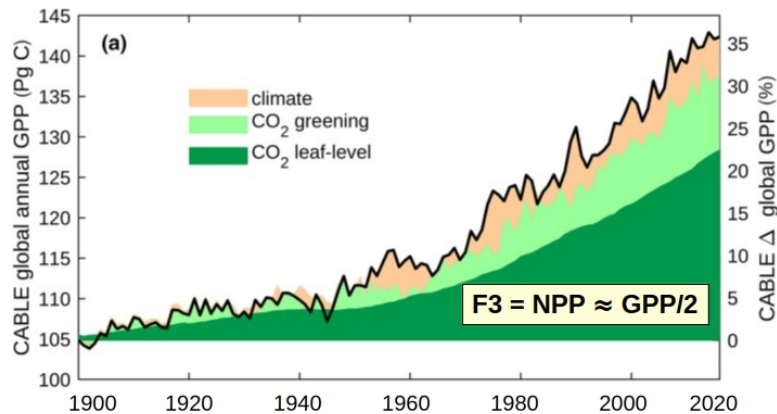


Figure 2 : $GPP \approx 2 * NPP$ selon figure 2 dans [Haverd et al,2019](#) <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/gcb.14950>

Pour la fixation **pluriannuelle effective** du carbone par la végétation, c'est-à-dire via le flux F3, on doit utiliser la Net Primary Production → $NPP \approx GPP/2$ avec $GPP = \text{Gross Primary Production}$ ([voir ici](#)).

Dates	Assessment Report	Flux en Gt-C /an					X(t) = [CO ₂] en Gt-C	Durée de séjour (an) = X(t) / (flux 2 + flux 3)	
		Flux 2	F2/X(t)	Flux 3 si GPP	Flux 3 si NPP	F3/X(t)		Si flux 3 = GPP	Si flux 3 = NPP
1990	AR1 fig 1.1	92	12,3 %	102	51	6,8 %	750	3,87	5,24
1995	AR2 fig 2.1	92	12,3 %	GPP ?	61,8	8,2 %	750	GPP ?	4,88
2001	AR3 fig 3.1a	90	11,9 %	120	60	7,9 %	730? 755	3,60	5,03
2007	AR4 fig 7.3	92,2	12,1 %	122,6	61,3	8,0 %	762	3,55	4,96
2013	AR5 fig 6.01	80	9,7 %	123	61,5	7,4 %	829	4,08	5,86
2021	AR6 fig 5.12	79,5	9,1 %	142	71	8,2 %	870	3,93	5,78
Moyenne (F2+F3) / X(t) = 19 % = 1 / 5,3 11,2 % + 7,8 % = 19 %			11,2 % = Moyenne		Moyenne = 7,8 %		Moyenne durée de séjour (an)	3,8	5,3

Figure 3 : Selon les 6 rapports WG1 du GIEC, en moyenne on a $F2 \approx 0,112 X(t)$ et $F3 \approx 0,078 X(t)$

On adopte finalement $F3 = 0,086 X(t)$, compatible avec [Haverd 2009](#) et proche de $0,078 X(t)$ = moyenne des 6 rapports WG1 du GIEC.

1.2 Dimensionnement de F2

Le flux 2 est calibré de manière à être :

- proportionnel à la concentration du CO₂ atmosphérique.
- quasi compatible avec la [figure 3.1a](#) du rapport AR3 WG1 du GIEC → F2 ≈ 90 Gt-C/an vers 2000
- compatible avec le choix précédent de F3 = 0,086 X(t).

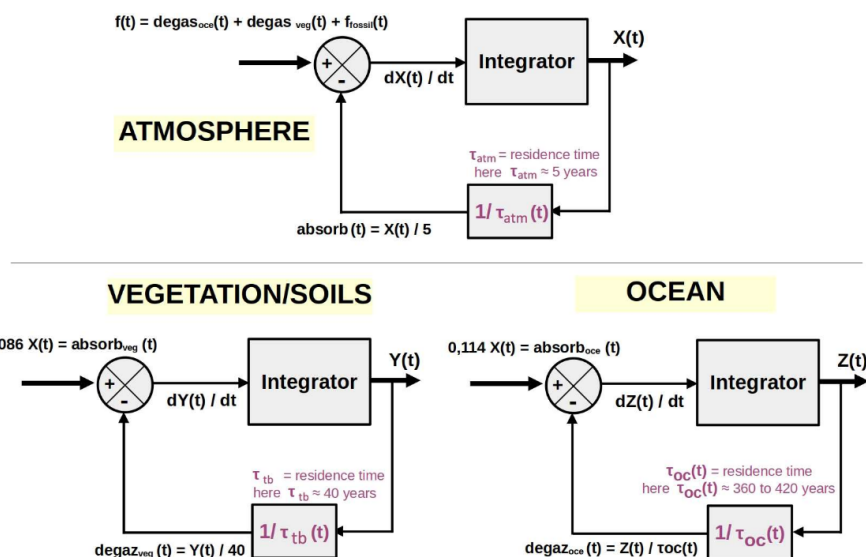


Figure 4 : Les 3 compartiments ont un modèle simple en commun mais des durées de séjour dissemblables → $\tau = \text{Stock} / \text{flux sortant}$ (figure 14 dans [Revisiting the carbon cycle](#))

Le modèle MPO adopte une durée de séjour constante de 5 ans dans l'atmosphère.

On a donc $(F2 + F3) = X(t)/5 = F2 + 0,086 X(t)$. On adopte finalement $F2 = 0,114 X(t)$.

2. Les flux entrant dans l'atmosphère F1 et F4

On se conforme aux modèles simples de la figure 4 : les flux seront dimensionnés par une expression utilisant les stocks $Y(t)$ et $Z(t)$ ainsi que la durée de séjour du compartiment.

Le chiffrage va exploiter les observations **1980-2025** (taux et $\delta^{13}\text{C}$) du CO₂ atmosphérique.

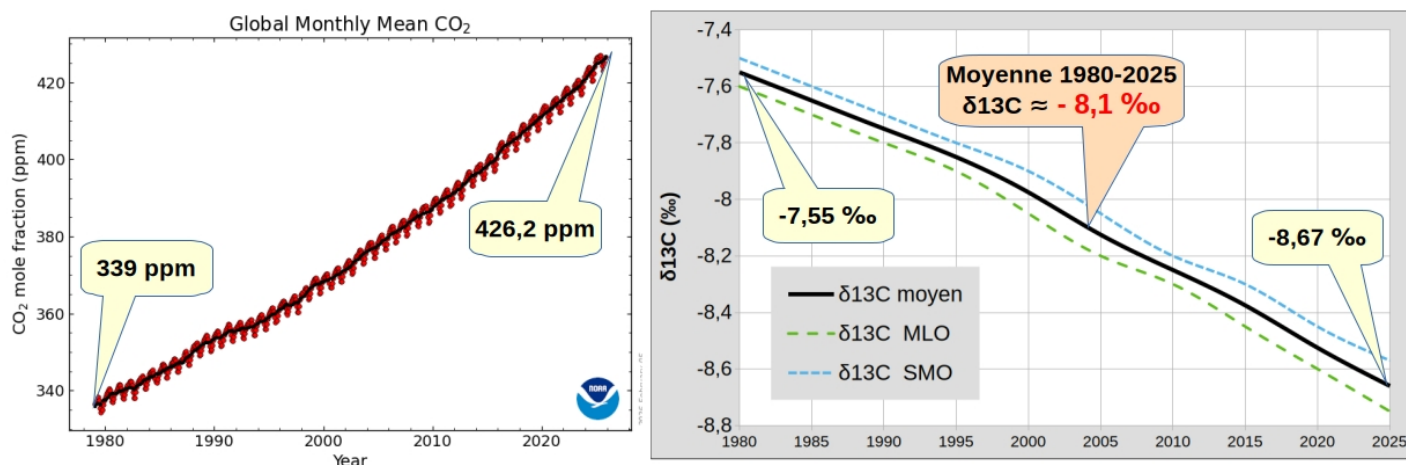


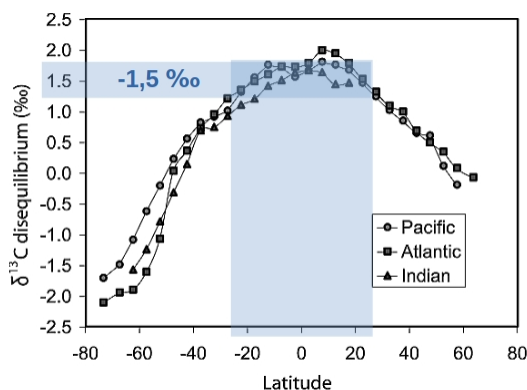
Figure 5 Taux de CO₂ atmosphérique **global** selon [NOAA](#) (1 ppm → 2,12 Gt-C); $\delta^{13}\text{C}$ dans l'atmosphère selon [Scripps CO2](#)

Entre 1980* et 2025 le taux de CO₂ dans l'atmosphère augmente : $426,2 - 339 = +87,2 \text{ ppm}$ soit l'apport net ≈ +185 Gt-C. Cet apport net **doit être tel que $\delta^{13}\text{C} = -13,0 \text{ ‰}$** car entre 1980 et 2025 on a :

$$\text{ppm} : (339 * -7,55) + (87,2 * -13,0) = (426,2 * -8,67)$$

$$\text{Gt-C} : (719 * -7,55) + (185 * -13,0) = (904 * -8,67)$$

* 1980 car on doit disposer des mesures de $\delta^{13}\text{C}$ et du taux de CO₂ dans les 2 hémisphères.



Plantes	ratio	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	ratio x δ
C3	85 %	-25	-21,3
C4	14 %	-13	-1,8
CAM	1 %	-18	-0,2
Moyenne =			-23,3

Figure 6 : Pour $\delta^{13}\text{C}$, l'apport net océan intertropical est < de 1,5 ‰ à l'atmosphère (fig 8 Quay et al., 2003) → $-8,1 - 1,5 \approx -9,6\text{‰}$
 Pour l'apport net Végétation/Sols, $\delta^{13}\text{C}$ dépend du type de végétation → en moyenne on a $\delta^{13}\text{C} \approx -23,3\text{‰}$

2.1 Dimensionnement des apports nets vers l'atmosphère depuis Océan et Végétation/sols

- Entre 1980 et 2025 le flux anthropique apporte 360* Gt-C à l'atmosphère, mais la croissance n'est que de 185 Gt-C. Selon le modèle du GIEC, les compartiments Océan et Végétation/Sols absorberaient environ la moitié des 360 Gt-C anthropique, en sorte de retrouver la croissance de 185 Gt-C observée dans l'atmosphère.

* $\sim 1260 \text{ Gt-CO}_2$ soit $\sim 343 \text{ Gt-C}$ selon [World Energie Outlook](#) mais le GIEC ajoute environ 5 % de LUC → $343 * 1,05 \approx 360 \text{ Gt-C}$

- On désigne par z l'apport net venu de l'océan et par y l'apport net venu de Végétation/Sols. Selon le modèle GIEC, on aurait donc $z \approx y \approx -(360-185)/2 = -87,5 \text{ Gt-C}$ (les 2 compartiments seraient des puits de carbone). Le tableau ci-dessous monte que les observations contredisent ce modèle du GIEC.

Bilan 1980-2025	Anthropique	Océan	Végétation/sols	Apport net
Atmosphère in (Gt-C)	360			
Atmosphère out (Gt-C)				
Net (Gt-C)	360	-87,5	-87,5	185 Gt-C
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-29	-9,6	-23,3	-40,9 ‰
Net x $\delta^{13}\text{C}$	-10440	837	2040	-7563

Figure 7a : Le modèle GIEC **ne permet pas** de retrouver un apport net de 185 Gt-C avec $\delta^{13}\text{C} = -13\text{‰}$
 $360 + -87,5 + -87,5 = 185$; mais $-10440 + 837 + 2040 = -7563$ et $-7563 / 185 = -40,9 \text{‰}$

- Selon le modèle MPO (en contradiction avec le modèle GIEC) l'océan intertropical est une **source nette vis-à-vis de l'atmosphère** c'est-à-dire que z est positif → $F1 > F2$.

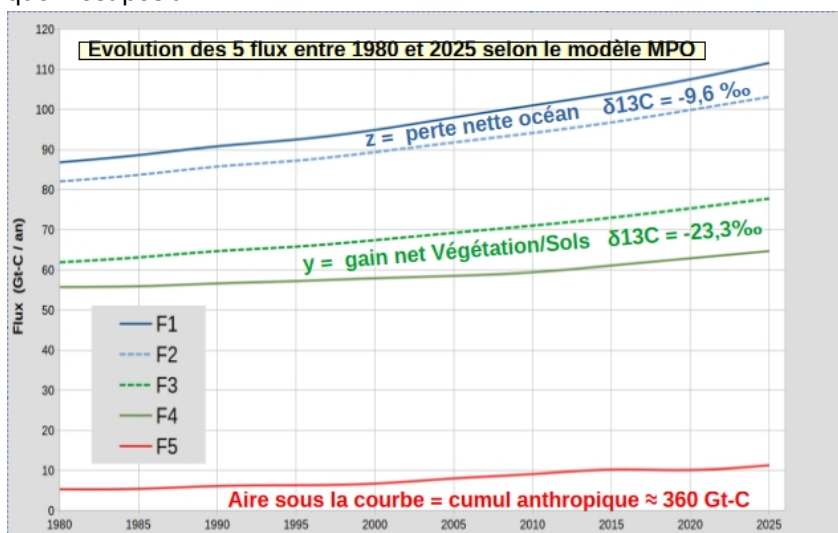


Figure 7b : Selon MPO, l'Océan est une source nette pour l'atmosphère ($F1 > F2$) alors que Végétation/Sols est un puits ($F3 > F4$). Toutefois la somme (Océan + Végétation/Sols) **constitue globalement un puits** ($y > z$) vis-à-vis de l'atmosphère.

Afin de respecter les observations de la fig.5 (elles impliquent un apport total net de 185 Gt-C avec $\delta^{13}\text{C} = -13,0 \text{‰}$ entre 1980 et 2025) on doit simultanément avoir (en Gt-C) :

$$360 + z + y = 185$$

$$(360 * -29) + (z * -9,6) + (y * -23,3) = 185 * -13,0$$

La résolution du système de 2 équations donne : $z = 288 \text{ Gt-C}$ et $y = -463 \text{ Gt-C}$.

L'apport net de l'océan = z est bien positif mais la nature est globalement un puits car $(y + z)$ est négatif.

Ces 2 apports nets y et z entre 1980 et 2025 permettent d'avoir une contrainte sur chacun des flux $F1$ et $F4$.

2.2 Dimensionnement de $F1$

$F1$ sera quasi compatible avec la [figure 3.1a](#) du rapport AR3 WG1 qui propose $F1 \approx 90 \text{ Gt-C/an}$ vers 2000

Contrainte 1 : L'océan doit fournir un apport net de 288 Gt-C en 45 ans ($F1 > F2$).

Estimation grossière en Gt-C/an : $288 / 45 = 6,4 \rightarrow$ avec $F1 \approx F2 + 6,4$ on respecte un apport net de 288 Gt-C en 45 ans.

On rappelle que $F2$ est estimé par $F2(t) = 0,114 X(t)$.

De préférence à l'estimation grossière, on adopte finalement $F1 = Z(t) / \tau_{oc}$ avec une durée de séjour **variable** (pour **1980-2025**, $\tau_{oc} \approx 335$ à 440 ans) qui permet de respecter la contrainte 1 mais aussi d'avoir τ_{oc} fonction de $SSTi$ (température en surface de l'océan intertropical).

2.3 Dimensionnement de $F4$

Contrainte 2 : Végétation/Sol doit fournir un apport net de -463 Gt-C en 45 ans ($F3 > F4$).

Estimation grossière en Gt-C/an : $-463 / 45 = -10,3 \rightarrow$ avec $F4 \approx F3 - 10,3$ on respecte l'apport net de -463 Gt-C en 45 ans. On rappelle que $F3$ est estimé par $F3(t) = 0,086 X(t)$.

De préférence à l'estimation grossière, on adopte finalement $F4 = Y(t) / \tau_{veg}$ avec $\tau_{veg} \approx 40$ ans, permettant de respecter la contrainte 2.

____ Résumé ____

- Le dimensionnement des 4 flux naturels repose principalement sur les observations de $[CO_2]$ et $\delta^{13}C$.
- Ces données sont obtenues grâce aux mesures effectuées dans plusieurs observatoires repartis sur les 2 hémisphères entre 1980 et 2025.
- Les estimations des 4 flux naturels proposées par le modèle MPO restent globalement proches ($\pm 25 \%$ à l'exception de $F1$) de celles proposées par le GIEC.