LE CYCLE DU CARBONE (2)

Webinaire n°4
Du 28 novembre 2024
Michel Jauzein,
Professeur de Science des Sols

Arts et Métiers Sciences et Technologies

1. Les stocks et les flux de C sur la planète
2. Combien de temps le CO_2 persiste dans l'atmosphère ?
3. Importance et rapidité des processus aux interfaces océaniques et continentaux ?
4. CO_2 et changement climatique?

Arts et Métiers Sciences et Technologies

1 – LES STOCKS ET LES FLUX DE CARBONE SUR LA PLANÈTE

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Rappel des stocks estimés de carbone
En Gigatonnes de Carbone (GtC # PgC)

Deux stocks géologiques :

Carbonates	30000000 - 50000000 GtC
Kérogène	5000000 - 15000000 GtC

Un stock océanique carbonaté : 35000 - 40000 GtC

Trois stocks organiques aux interfaces :

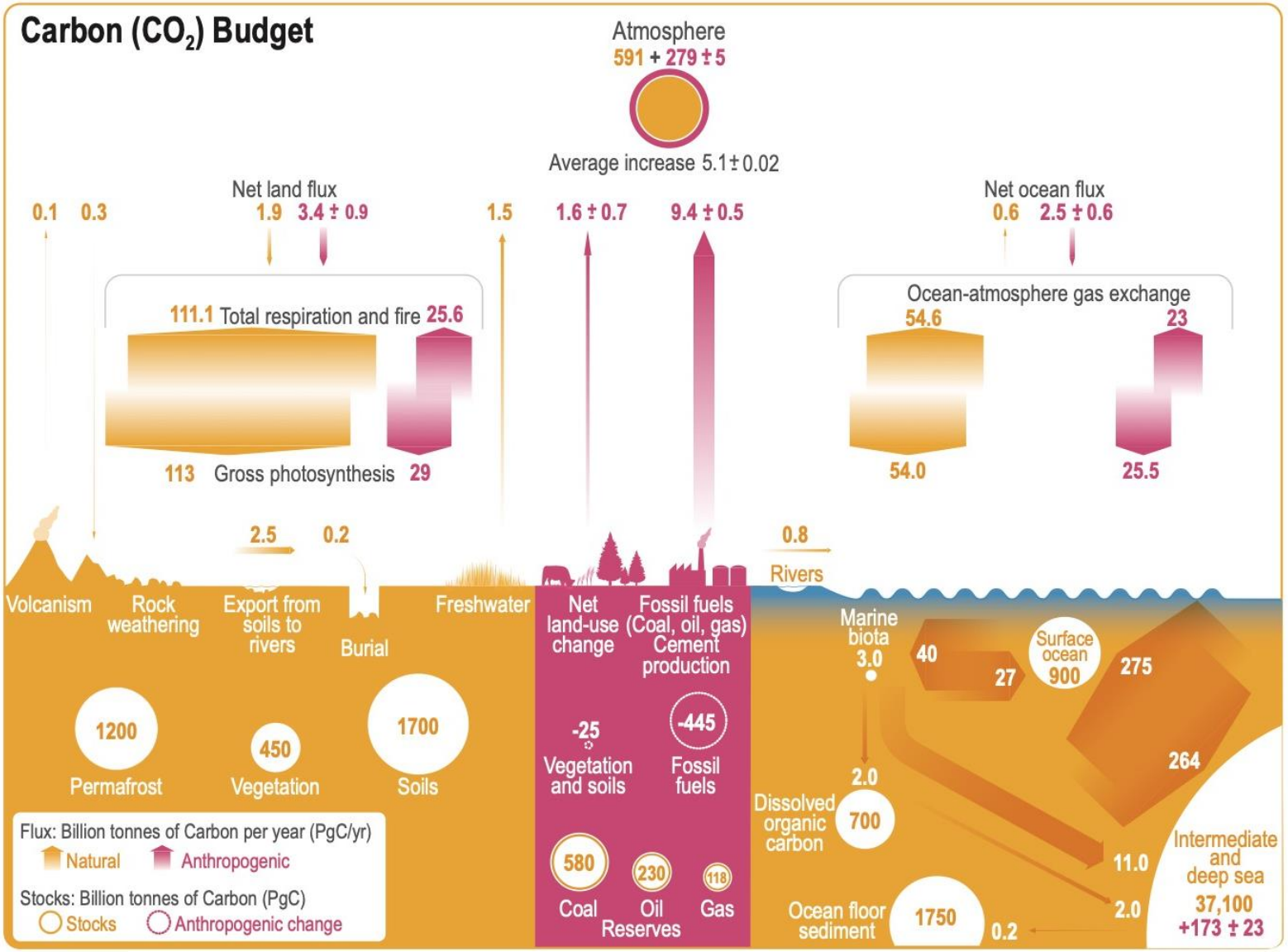
Sols	1500 - 2500 GtC
Sous-Sols gelés	1500 - 2000 GtC
Sédiments marins	1500 - 2000 GtC

Les autres stocks océanique, atmosphérique et géologique :

CO_2 atmosphérique	600 - 900 GtC
C organique des océans	600 - 800 GtC
Biomasse continentale	400 - 700 GtC
Gaz exploitable	400 - 1500 GtC
Charbon exploitable	400 - 600 GtC
Pétrole exploitable	150 - 300 GtC

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Cycle actualisé du carbone GIEC 2021

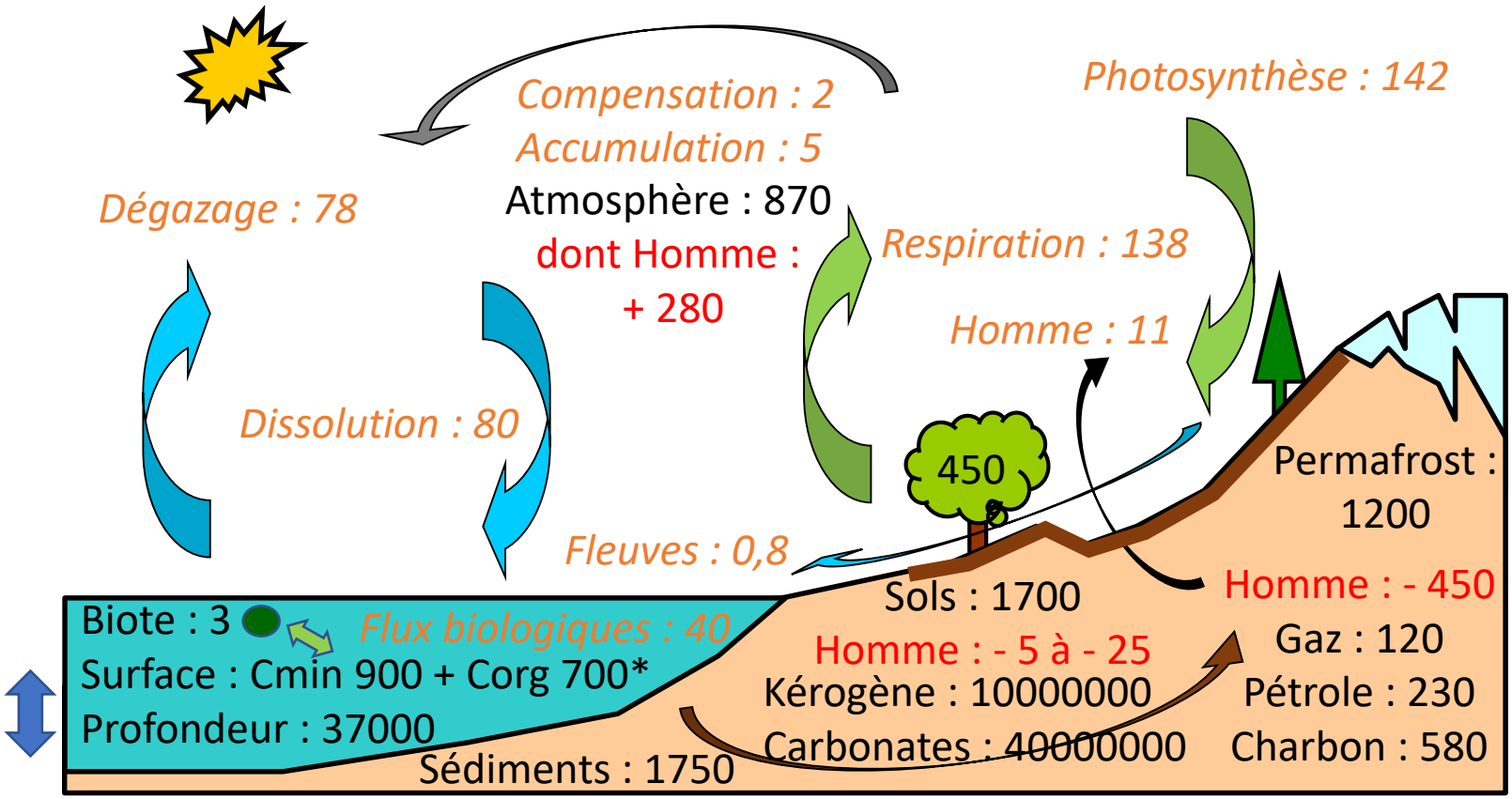


IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

©

Stocks et Flux de C sur la planète

Unités : Gt # Pg; *Gt/an # Pg/an*



Flux verticaux : 280 *Sédimentation : 0,2 à 0,3*

**Corg, biosynthèse : 2*

Accumulation océanique : 2,5 à 2,6 ? Homme : + 170 à + 200

© Schéma personnel, Michel Jauzein, 2024

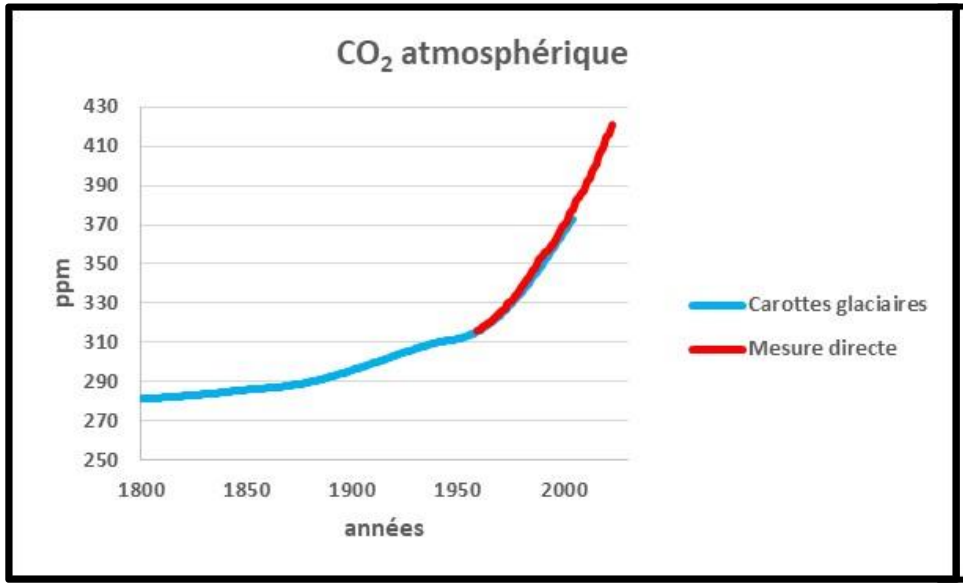
Les données disponibles :

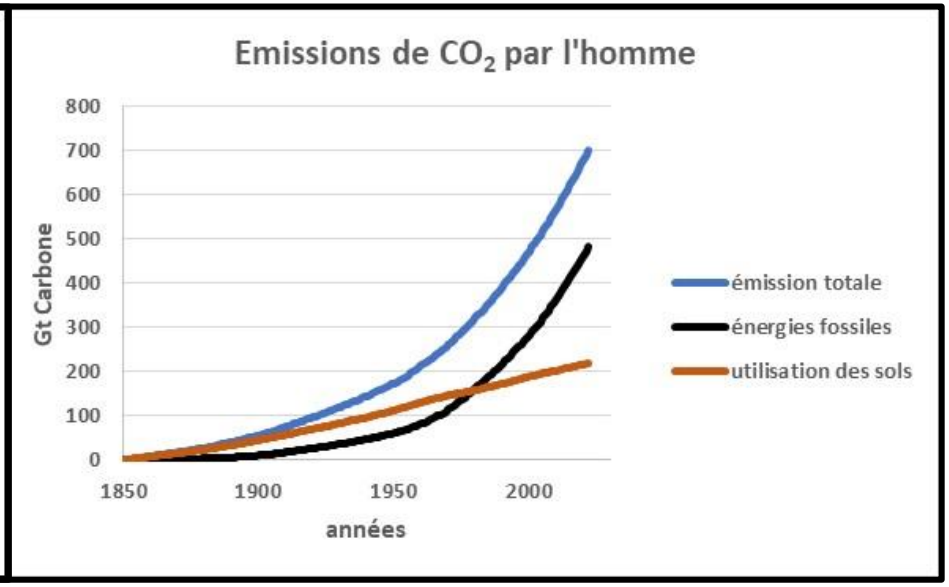
- ***Evolution du taux de CO_2 dans l'atmosphère depuis 225 ans***

Un taux qui augmente de plus en plus rapidement depuis 1800 en ppmV

- ***Quantité de CO_2 émise par l'homme en hausse similaire***

Des sources de deux types : énergies fossiles et utilisation des sols





© data « calottes glaciaires » : (NOAA) Frank, D.C., J. Esper, C.C. Raible, U. Büntgen, V. Trouet, B. Stocker, and F. Joos. 2010. Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. Nature, 463, 527-532. doi: 10.1038/nature08769
Data « Mesure directe » : Dr. Xin Lan, NOAA/GML (gml.noaa.gov/ccgg/trends/) and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/).

© data « énergies fossiles » : Friedlingstein et al. 2023 ; data « utilisation des sols » :

1. Hansis, E., Davis, S. J., and Pongratz, J.: Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes, Global Biogeochemical Cycles, 29, 1230-1246, 2015.
2. Houghton, R. A. and Castanho, A.: Annual emissions of carbon from land use, land-use change, and forestry from 1850 to 2020, Earth Syst. Sci. Data, 15, 2025–2054, https://doi.org/10.5194/essd-15-2025-2023, 2023.
3. Gasser, T., Crepin, L., Quilcaille, Y., Houghton, R. A., Ciais, P. and Obersteiner, M.: Historical CO 2 emissions from land use and land cover change and their uncertainty, Biogeosciences , 4075–4101, 2020.

2 – COMBIEN DE TEMPS LE CO_2 PERSISTE DANS L'ATMOSPHÈRE ?

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Bilan global suite aux émissions humaines

- ***Le taux de CO_2 est passé de 280 ppm à plus de 420 ppm***
  - **Ceci correspond à une hausse du stock de *590 GtC* à *870 GtC***
  - **Soit une accumulation d'environ *+ 280 GtC***
- ***Le flux anthropique de CO_2 cumulé est bien supérieur***
  - **Il atteint *+ 730 GtC* si on ajoute les flux liés aux énergies fossiles et aux changements d'utilisation des sols qui sont respectivement estimés à :**

    + 490 GtC* et *+ 240 GtC
- ***Où la différence a-t-elle été transférée ? - 450 GtC***
  - **Une partie s'accumule dans les océans : *+ 170 GtC suivant GIEC 2021***
  - **Une autre partie sédimente dans les océans : *+ 45 GtC à + 65 GtC***
  - **L'autre compartiment « puit » est constitué par les plantes et les sols :**

    + 215 GtC à + 235 GtC* d'accumulation dans les plantes et les sols, diminuée de la quantité relarguée par les changements d'occupation des sols *- 240 GtC*, soit un bilan négatif entre *- 5 GtC* (pour l'estimation de la sédimentation à *0,2 GtC par an* sur 225 ans, affichée sur le schéma du GIEC 2021) et *- 25 GtC* *(valeur affichée sur le schéma du GIEC 2021, qui porterait l'estimation de la sédimentation à 0,3 GtC par an sur 225 ans)

Le concept de mélangeur parfait :

- ***Compartiment contenant un stock de matière S***

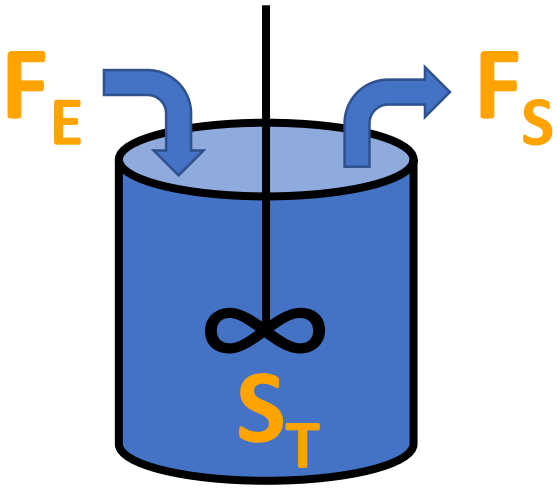
  Carbone atmosphérique actuel : ***870 GtC***

- ***Traversé par un flux de matière F***

  Flux continental : ***140 GtC par an***

  Flux océanique : ***80 GtC par an***

  Flux total : ***220 GtC par an***



$F = F_E$ # F_S

$S = S_T$ # constante

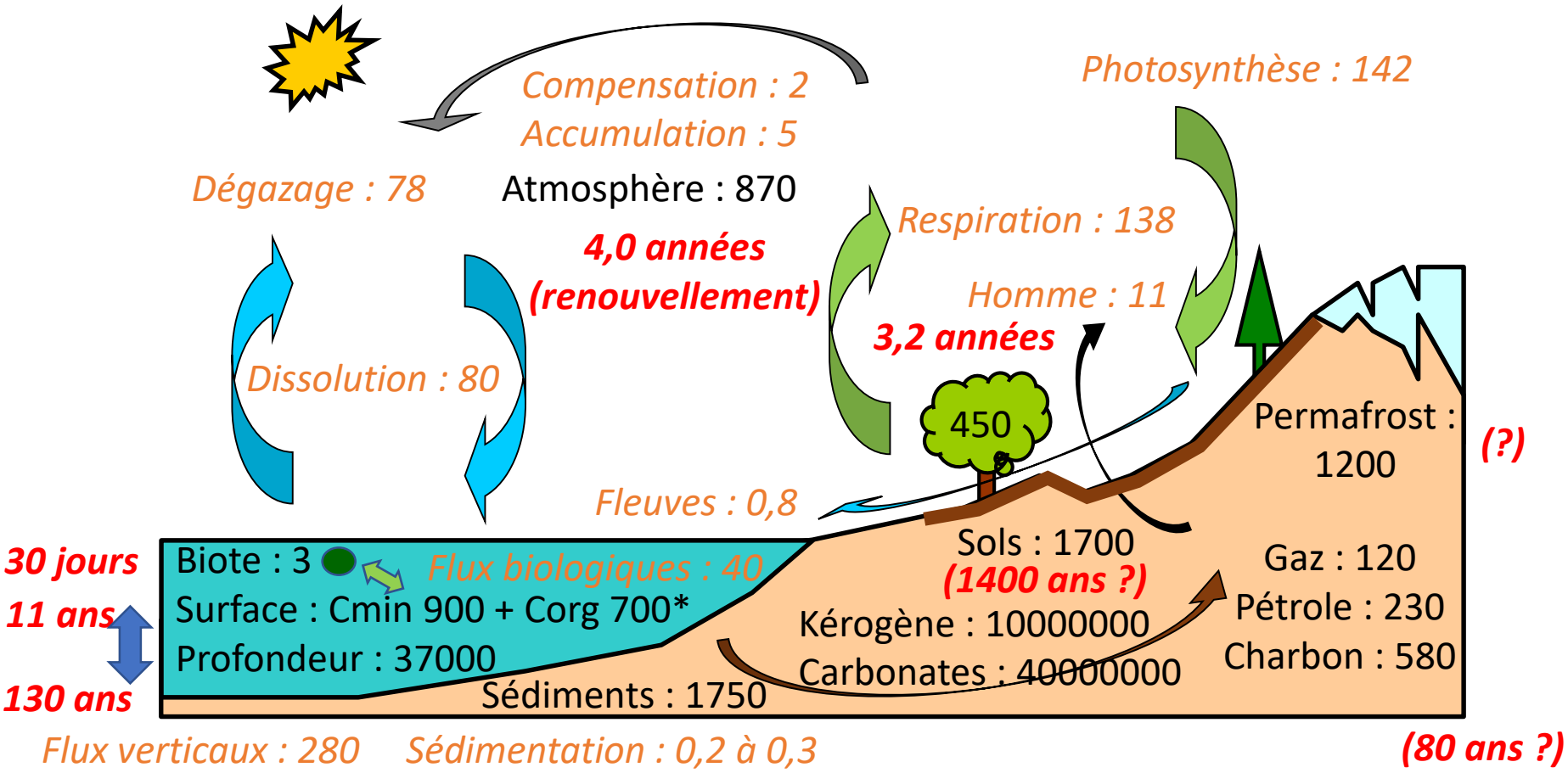
temps de séjour moyen τ :

$\tau = S / F$

τ_{atm} # 870 / 220 # <u>4,0 ans</u>

Temps de séjour du C dans les compartiments

Unités : Gt # Pg; *Gt/an # Pg/an* ; ***années ou jours***



*Corg, biosynthèse : 2

350 ans

© Schéma personnel, Michel Jauzein, 2024

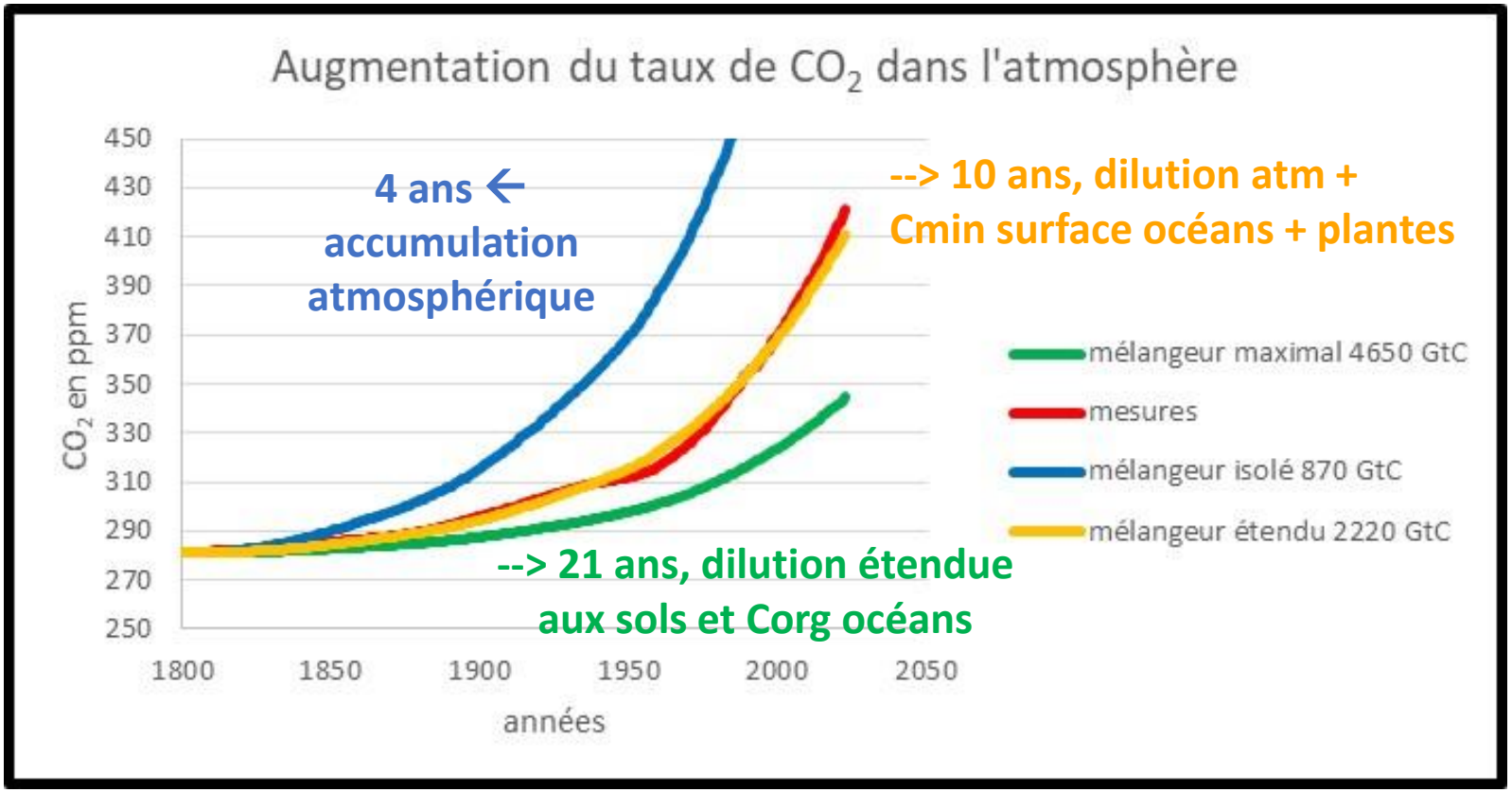
Stock de carbone en mélange ?

- ***Deux simulations en mélangeur isolé plus ou moins étendu***

Stock étendu à la totalité de la surface des océans, des sols et des plantes :
870 + 900 + 700 + 450 + 1700 = 4650 Gt C

Stock étendu aux C minéral de la surface des océans et aux plantes :

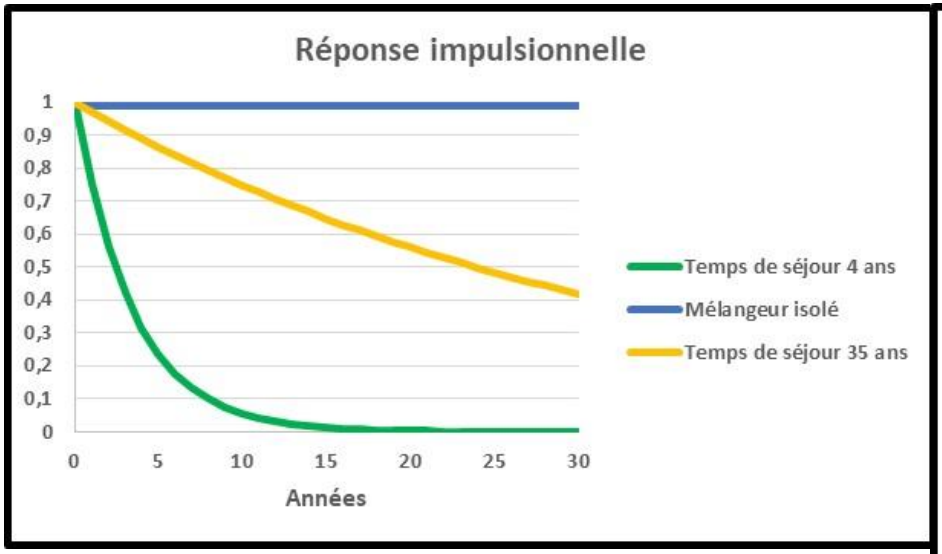
870 + 900 + 450 = 2220 Gt C

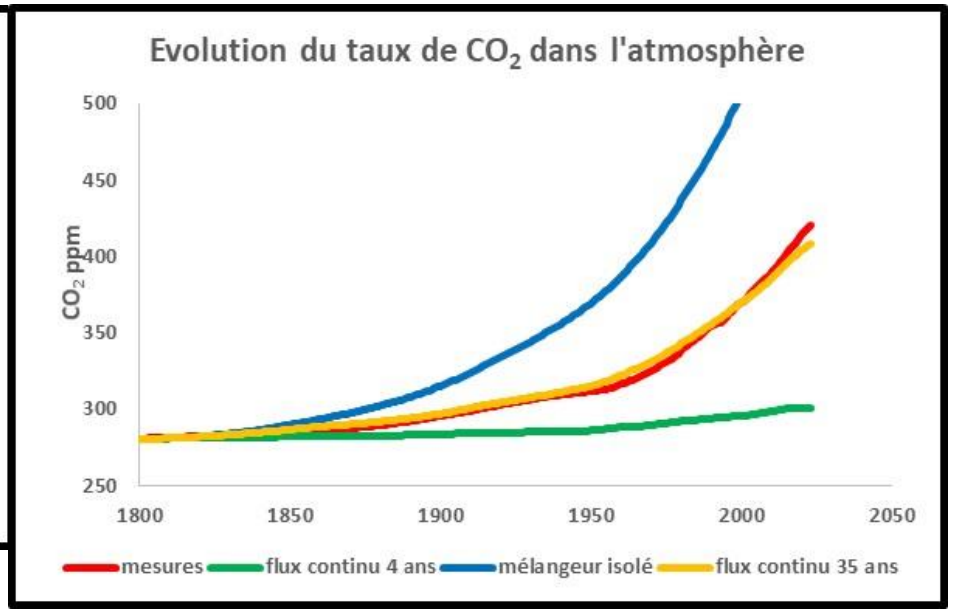


Mélangeur isolé ou en flux continu :

- ***Une réalité éloignée du mélangeur isolé : temps de séjour infini***
  → **Simple accumulation dans l'atmosphère ? NON**
- ***Une réalité éloignée du mélangeur en flux continu avec un temps de séjour de : 4 ans***
  → **Temps de séjour apparent = temps de séjour théorique ? NON**
- ***Une réalité s'approchant d'un mélangeur en flux continu :***

avec un temps de séjour apparent de 35 ans qui peut être engendré par un flux continu de 25 GtC par an vers des « puits » de CO_2





→ **Le flux apparent représente 12,5 % du flux de renouvellement**

Le concept des mélangeurs avec échanges :

- ***Trois mélangeurs # Trois compartiments principaux***

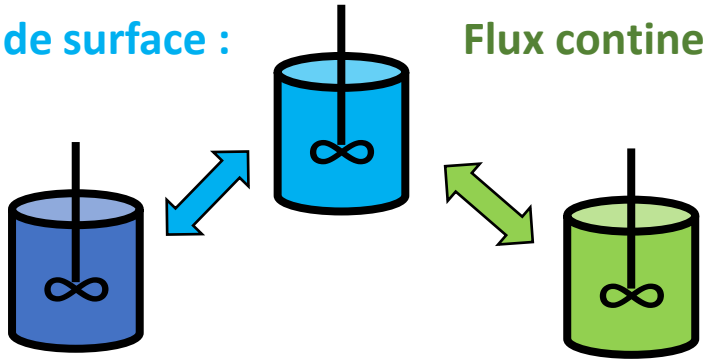
Carbone atmosphérique actuel : 870 GtC, τ_{atm} # 4,0 ans

Carbone végétal : 450 GtC, $\tau_{vég}$ # 3,2 ans

Carbone minéral océanique de surface : 900 GtC, $\tau_{océan\ surface}$ # 11,3 ans

- ***Connectés par des flux d'échange de matière***

Flux minéral océanique de surface :
80 Gt C / an
Dissolution
Dégazage



Flux continental avec les plantes:
140 Gt C / an
Photosynthèse
Respiration

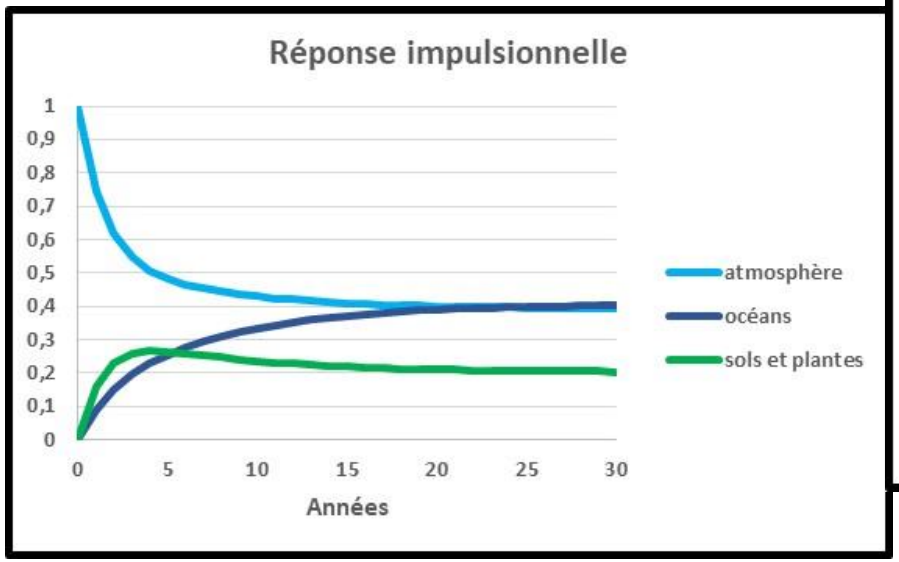
Stocks de C distribués et temps d'échange

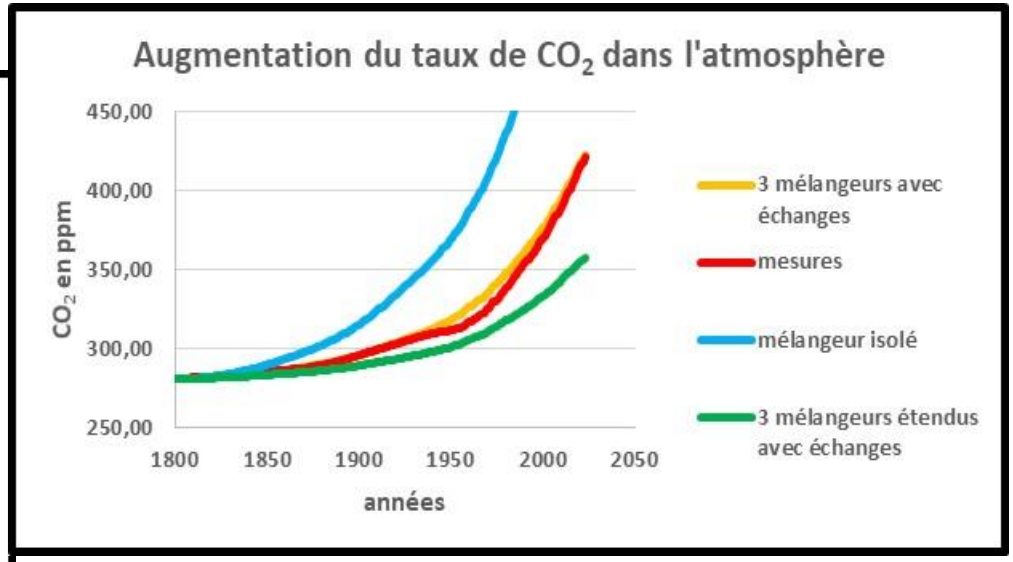
- ***Deux simulations avec trois mélangeurs en échange***

Stock étendu à la totalité de la surface des océans, des sols et des plantes :
870 + (900 + 700) + (450 + 1700) = 4650 Gt C

Stock étendu aux C minéral de la surface des océans et aux plantes :

870 + 900 + 450 = 2220 Gt C





Le concept des mélangeurs avec échanges :

- ***Six mélangeurs # Six compartiments principaux***

Carbone atmosphérique actuel : 870 GtC, τ_{atm} # 4,0 ans

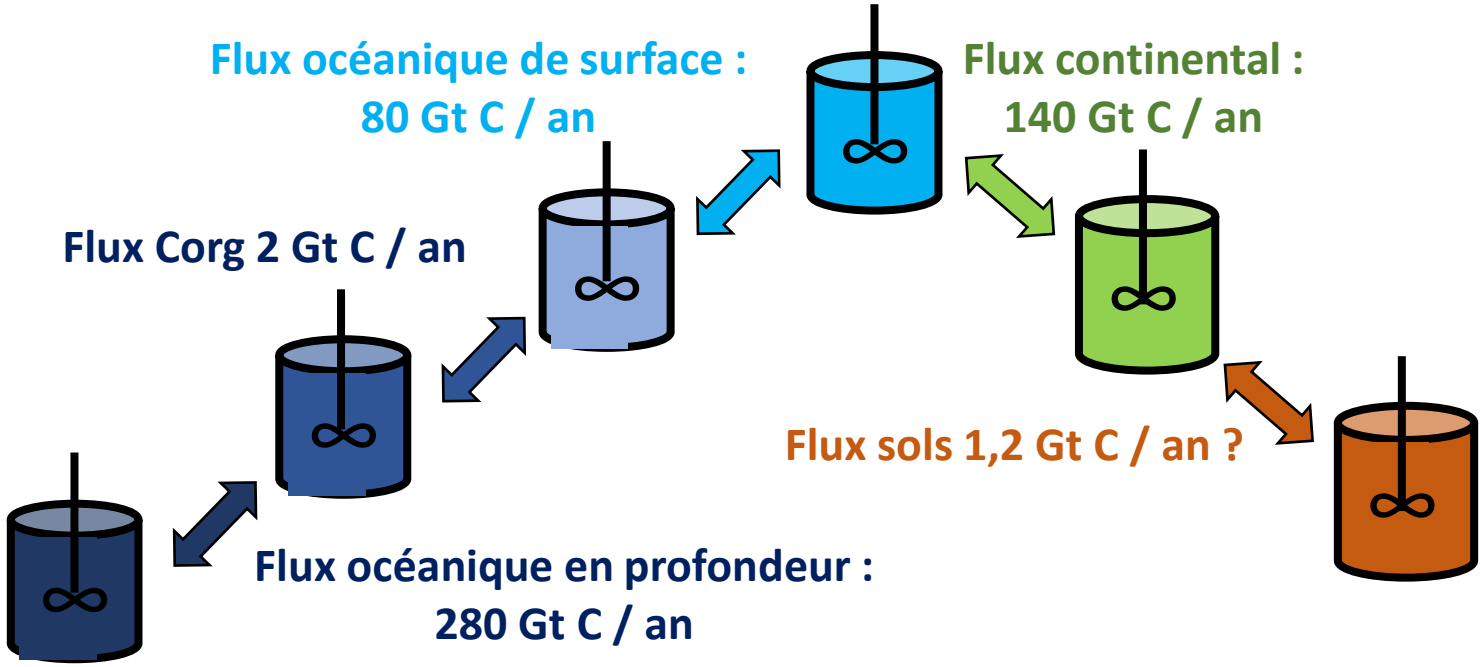
Carbone végétal : 450 GtC, $\tau_{vég}$ # 3,2 ans

Carbone minéral océanique en surface : 900 GtC, $\tau_{Cmin\ océans\ surface}$ # 11,3 ans

Carbone des sols : 1700 GtC, τ_{sols} # 1400 ans ?

Carbone organique océanique : 700 GtC, $\tau_{Corg\ océans}$ # 350 ans

Carbone océanique en profondeur : 37000 GtC, $\tau_{océan\ profondeur}$ # 130 ans

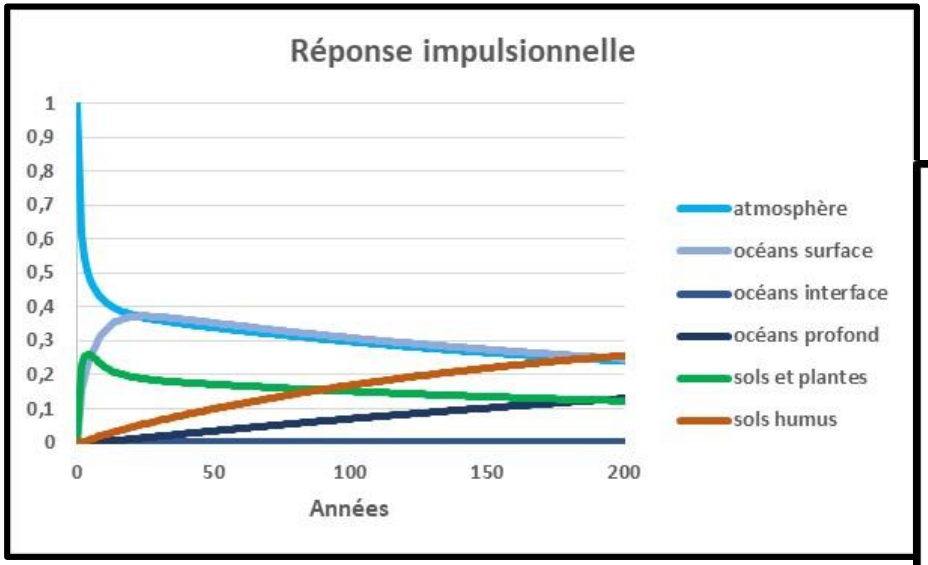


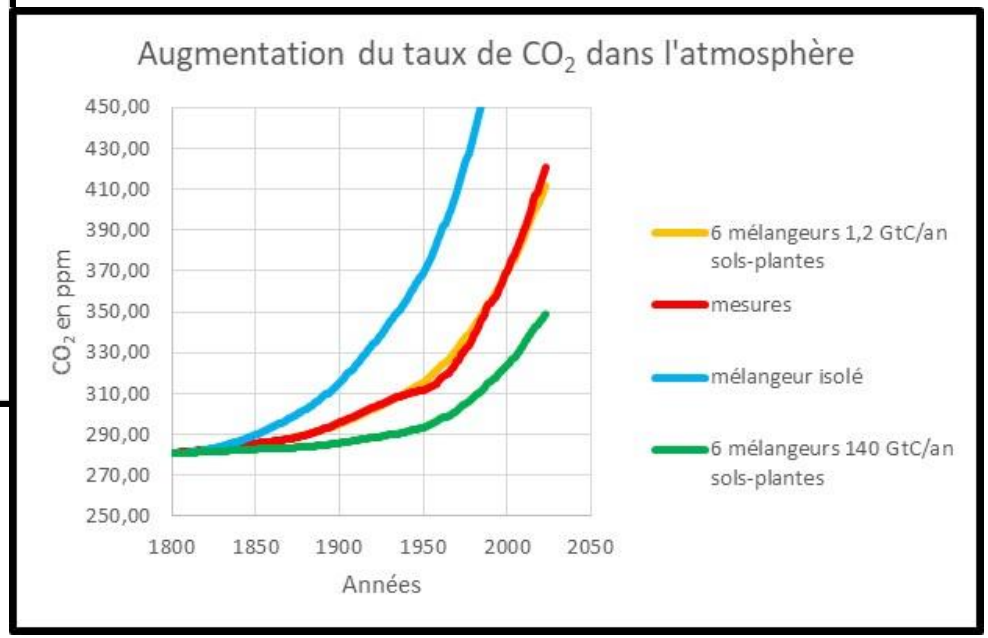
Stocks de C distribués et temps d'échange

- ***Deux simulations avec six mélangeurs en échange***

Flux rapide entre plantes et sols = flux entre plantes et atmosphère

Flux ajusté entre plantes et sols = 1,2 GtC par an soit des temps caractéristiques de transfert respectifs de 380 ans (humification des résidus végétaux) et 1400 ans (minéralisation des matières organiques des sols)





Persistance du CO_2 dans l'atmosphère ?

- ***Le temps de séjour moyen des molécules de CO_2 dans l'atmosphère est d'environ 4 ans seulement***
  - **Ceci veux dire que l'excès de *CO_2* injecté par l'homme dans l'atmosphère est amené à rejoindre rapidement d'autres compartiments, océans ou plantes avec lesquels les échanges sont rapides**
- ***Les temps de transfert par échange avec ces compartiments « intermédiaires » engendre un temps de séjour apparent dans l'atmosphère de 35 ans***
  - **Dans l'atmosphère, le *CO_2* qui rejoint les compartiments en contact revient pour partie et rapidement dans l'atmosphère, avec des temps de séjour moyen dans la surface des océans d'un peu plus de *11 ans* et dans les plantes d'un peu plus de *3 ans*.**
  - **Ces échanges peuvent s'effectuer en boucles parfois croisées, plusieurs fois, avant de pouvoir rejoindre la profondeur des océans ou les sols.**
- ***Des échanges plus lents se font avec la profondeur des océans ou les sols avec des temps caractéristiques d'environ 350 ans vers les océans et d'environ 375 ans vers les sols***
  - **Une fois dans ces compartiments puits, le *CO_2* peut être piégé pour des durées moyennes importantes d'environ *130 ans* dans la profondeur des océans et d'environ *1400 ans* dans les sols**

3 – RAPIDITÉ DES PROCESSUS AUX INTERFACES OCÉANIQUES ET CONTINENTAUX ?

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Que peuvent apporter les mesures d'un isotope stable du carbone : ^{13}C ?

- ***Le carbone 13, ^{13}C, est un traceur du carbone du CO_2***

dont l'atome principal est le carbone 12 : ^{12}C

- ***On mesure le rapport isotopique $^{13}C/^{12}C$ de manière relative***

à celui mesuré dans un fossile carbonaté d'origine marine qui sert de référence standard : c'est le $\delta^{13}C = (r/r_o-1).1000$

- ***Avantages et inconvénients :***

Les échanges de CO_2 air/océans et air/plantes engendrent des phénomènes de fractionnement isotopique

qui rendent le traceur ^{13}C imparfait vis-à-vis du ^{12}C, mais

utile pour marquer les différents compartiments suivant les processus d'échanges principaux et préciser la dynamique des transferts de carbone entre les différents compartiments environnementaux.

Quels sont les valeurs retrouvées pour le $\delta^{13}C$ en pour mille dans l'environnement

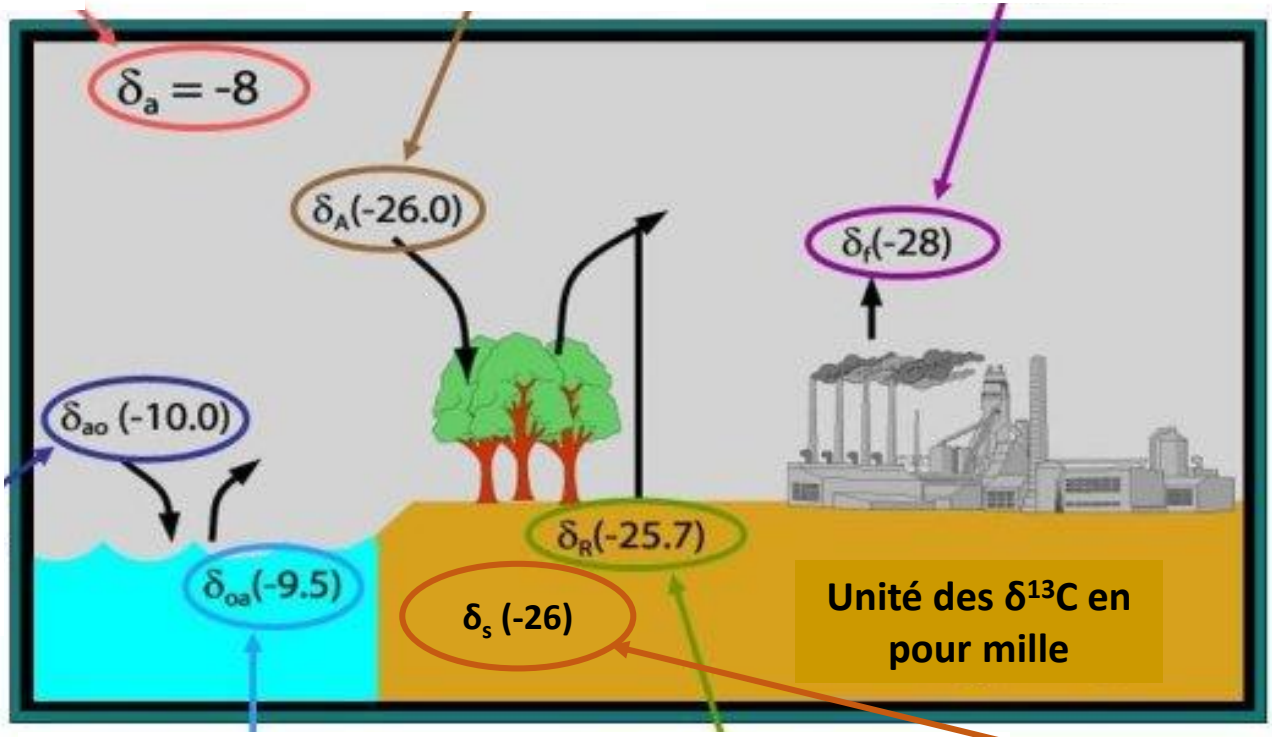
Des déséquilibres sont observés dans l'environnement entre les océans ($\delta^{13}C$ entre -1,5 et +0,5 pour mille) et les énergies fossiles appauvries en ^{13}C ($\delta^{13}C$ de -28 pour mille)

Valeur actuelle dans l'atmosphère

Flux d'assimilation lié à la photosynthèse

Valeur actuelle du flux lié aux énergies fossiles

© Schéma complété d'après NOAA Global Monitoring Laboratory: https://gml.noaa.gov/education/isotopes/c13tellsus.html



Flux de dissolution dans les océans

Valeur actuelle dans les océans

δ_o (+0,5/-1,5)

Flux de dégazage des océans vers l'atmosphère

Flux de libération par la respiration et la biodégradation

Valeur actuelle dans les sols

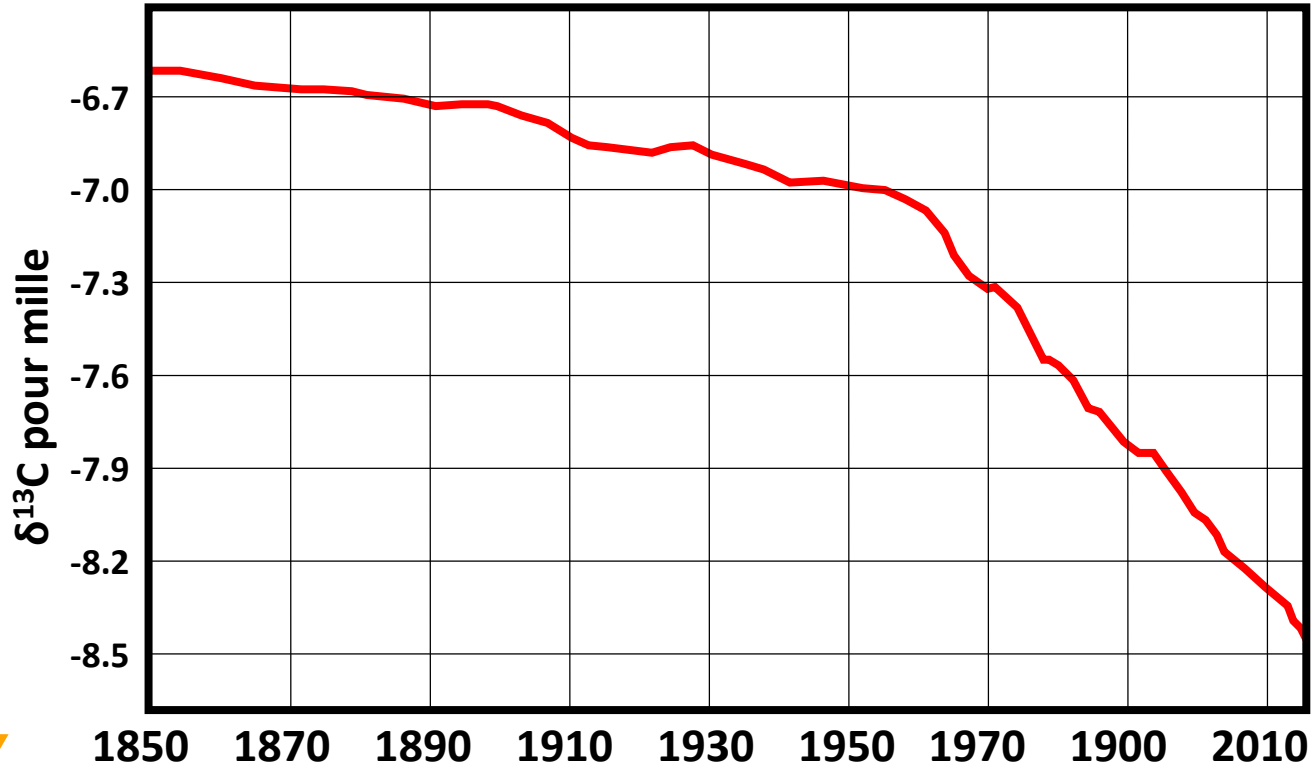
Données disponibles pour le $\delta^{13}C$

- ***Evolution du $\delta^{13}C$ dans l'atmosphère depuis 175 ans***

  Un indicateur isotopique qui décroit notamment depuis 1960

- ***Une évolution opposée à celle du taux de CO_2***

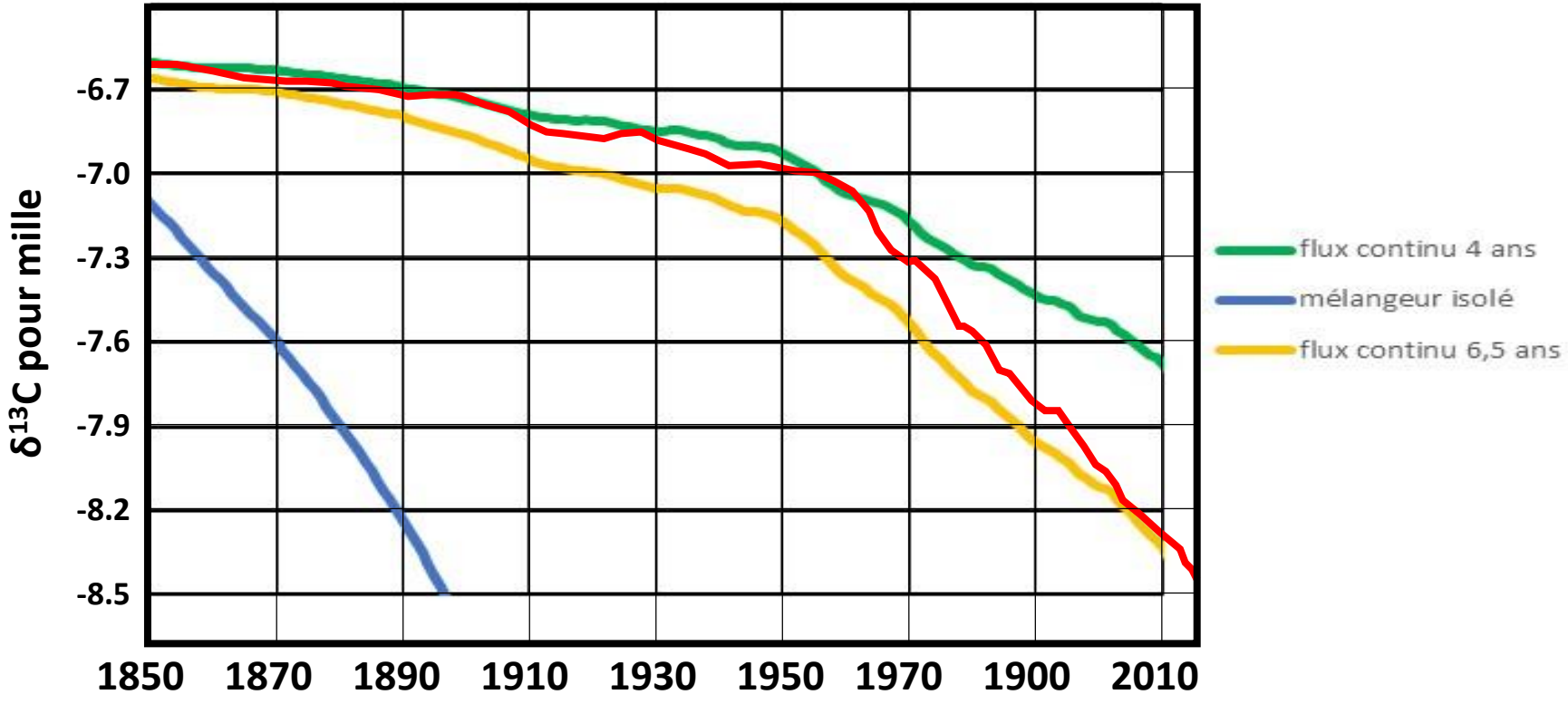
  D'une valeur -6,5 en 1850 à moins de -8,5 aujourd'hui



© data from : Graven, H., Allison, C. E., Etheridge, D. M., Hammer, S., Keeling, R. F., Levin, I., et al. (2017). Compiled records of carbon isotopes in atmospheric CO2 for historical simulations in CMIP6. Geoscientific Model Development, 10, 4405–4417. https://doi.org/10.5194/gmd-10- 4405-2017

Temps de séjour du signal isotopique $\delta^{13}C$

- ***Comme pour le CO_2 lui-même, l'hypothèse du mélangeur isolé n'est pas compatible avec les mesures.***
- ***Un temps de séjour entre 4 ans et 6,5 ans encadre le signal mesuré du $\delta^{13}C$ dans l'atmosphère :***



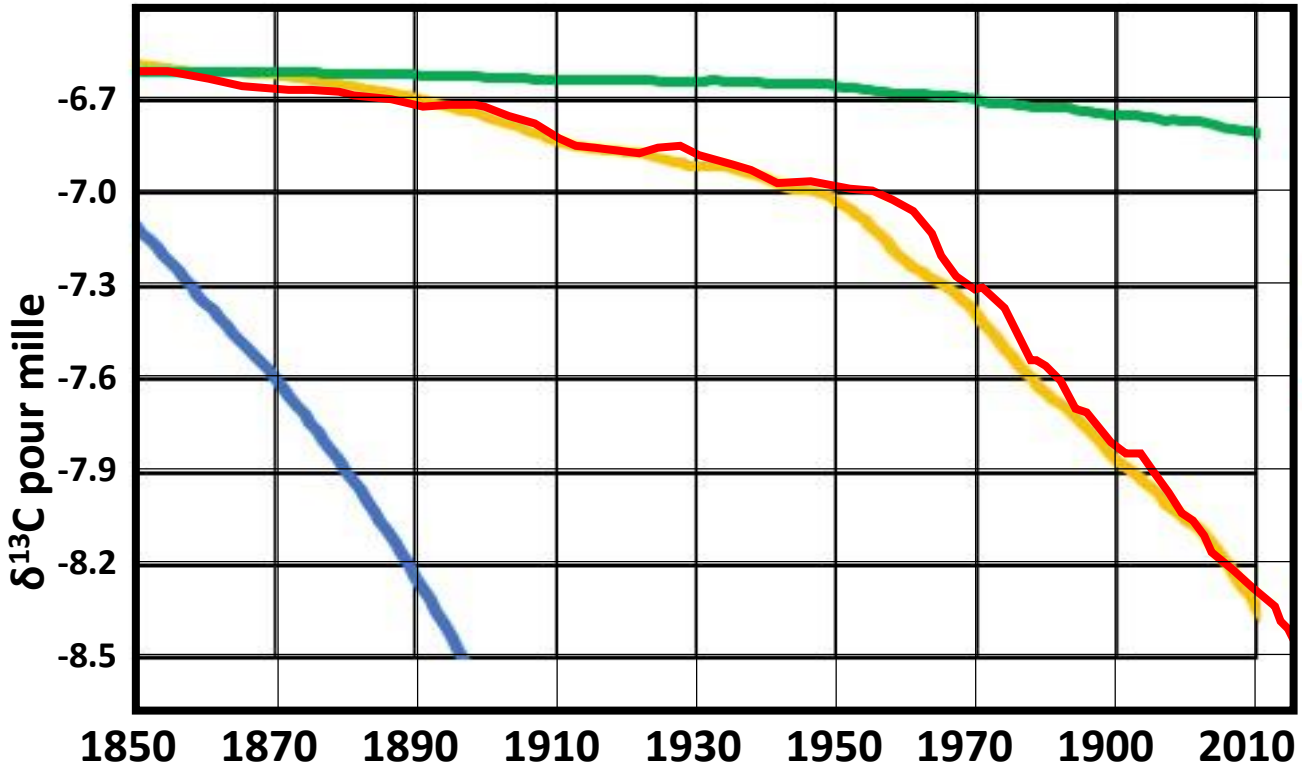
Le CO_2 quittant l'atmosphère est ici remplacé par du CO_2 à l'équilibre préindustriel ($\delta^{13}C$ = -6,5 pour mille)

Modèle du mélangeur étendu pour le $\delta^{13}C$

- ***Une extension réduite aux stocks de CO_2 des compartiments en échange permet de retracer l'évolution mesurée du $\delta^{13}C$***

6,7 % des 450 GtC des plantes

10 % des 900 GtC des carbonates de la surface des océans



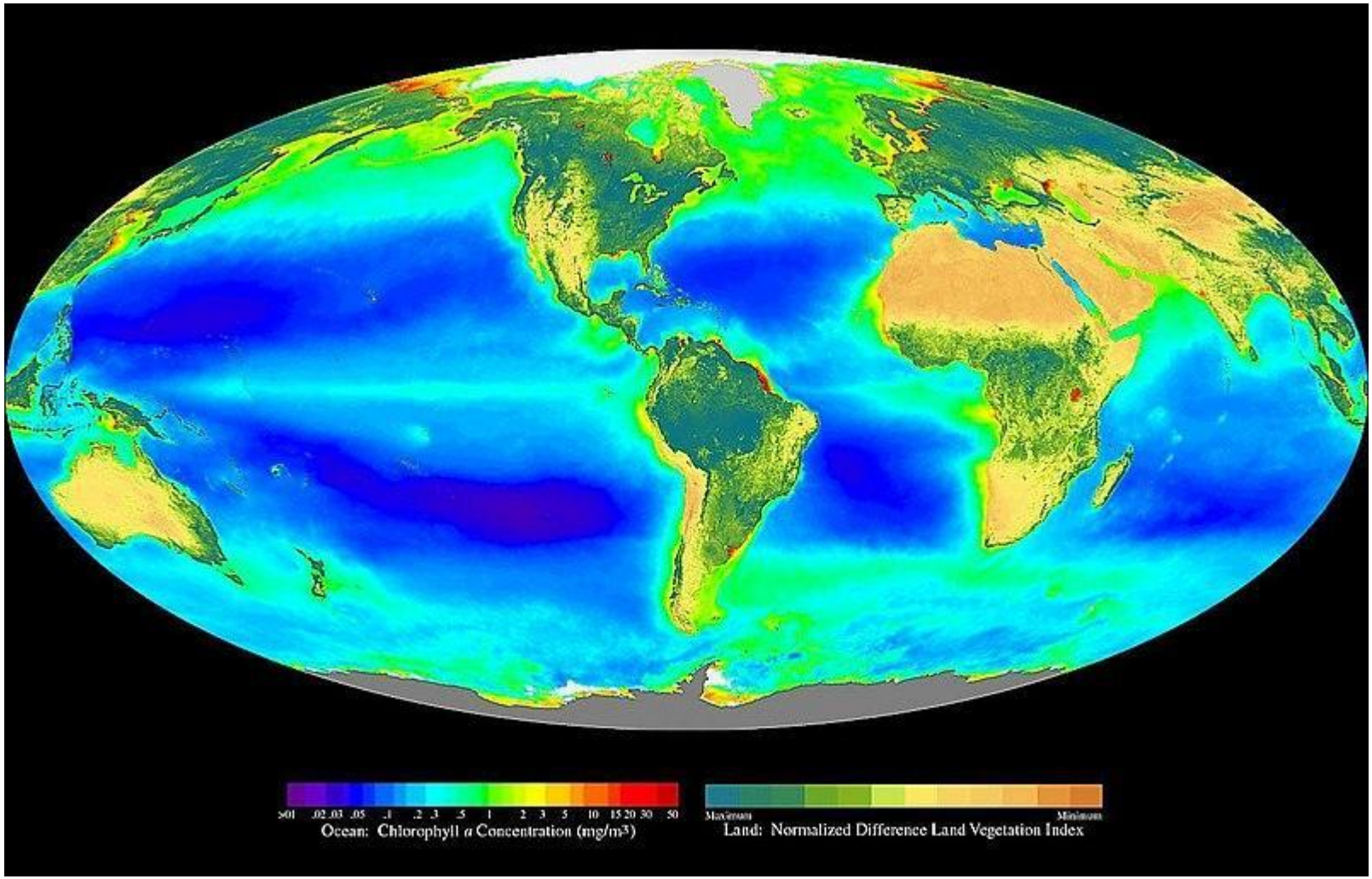
67 % des plantes
100 % des carbonates de la surface des océans

mélageur étendu
mélangeur isolé
mélageur étendu maximal

6,7 % des plantes
10 % des carbonates de la surface des océans

Le CO_2 de l'atmosphère est ici mélangé avec du CO_2 dont le $\delta^{13}C$ est de 0,0 pour les océans et -25,7 pour les plantes

Image de cet interface photosynthétique contrôlant le rapport isotopique $\delta^{13}C$



© Provided by the SeaWiFS Project, Goddard Space Flight Center and ORBIMAGE, source : http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/BACKGROUND/Gallery/index.html

Importance de l'activité du vivant aux interfaces océaniques et continentaux?

- ***Le temps de rémanence du signal isotopique lié aux activités humaines n'est que de 4 ans à 6,5 ans seulement***
  - **Tout se passe comme si le CO_2 échangé avec la surface des océans ou les plantes retrouvait immédiatement son « déséquilibre » pré-industriel grâce aux processus d'échange gazeux et de photosynthèse**
- ***Les échanges rapides avec les océans et la végétation contrôlent le rapport isotopique dans l'atmosphère***
  - **Tout se passe comme si le rapport isotopique atmosphérique était sous contrôle des processus d'échanges et de réactions dans la partie superficielle des eaux océaniques et dans les organes végétaux responsables de la photosynthèse : les 10 premiers mètres d'eau océanique, où l'activité du phytoplancton est majoritaire, et les organes photosynthétiques des végétaux.**
- ***Au-delà de ces interfaces, les rapports isotopiques peuvent être modifiés dans les couches plus profondes de l'océan et dans les matières organiques des sols.***
  - **L'étude de l'état et de l'évolution des profils de $\delta^{13}C$ dans les océans et dans les sols peut apporter des informations intéressantes sur la dynamique comparée du cycle du carbone dans ces compartiments.**

Pour aller plus loin sur ces sujets :

- ***Charles D. Keeling et al., 1989 :***
  - **A three-dimensionnal model of atmospheric CO_2 transport based on observed winds, Part 1 – Analysis of observational data, American Geophysical Union, Monograph 55, 165-236**

    « the box diffusion model of carbon cycle » is illustrated on Fig. 35.
- ***André Mariotti, 1991 :***
  - **Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements contientaux, Cah. Orstom, sér. Pédol., vol XXVI, n°4, 299-313**
- ***Jérôme Balesdent et Sylvie Recous, 1997 :***
  - **Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français, Can. J. Soil. Sci., 77, 187-193**
- ***Bo Liu, Katharina D. Six, and Tatiana Ilyina, 2021 :***
  - **Incorporating the stable carbon isotope ^{13}C in the ocean biogeochemical component of the Max Planck Institute Earth System Model, Biogeosciences, 18, 4389–4429**

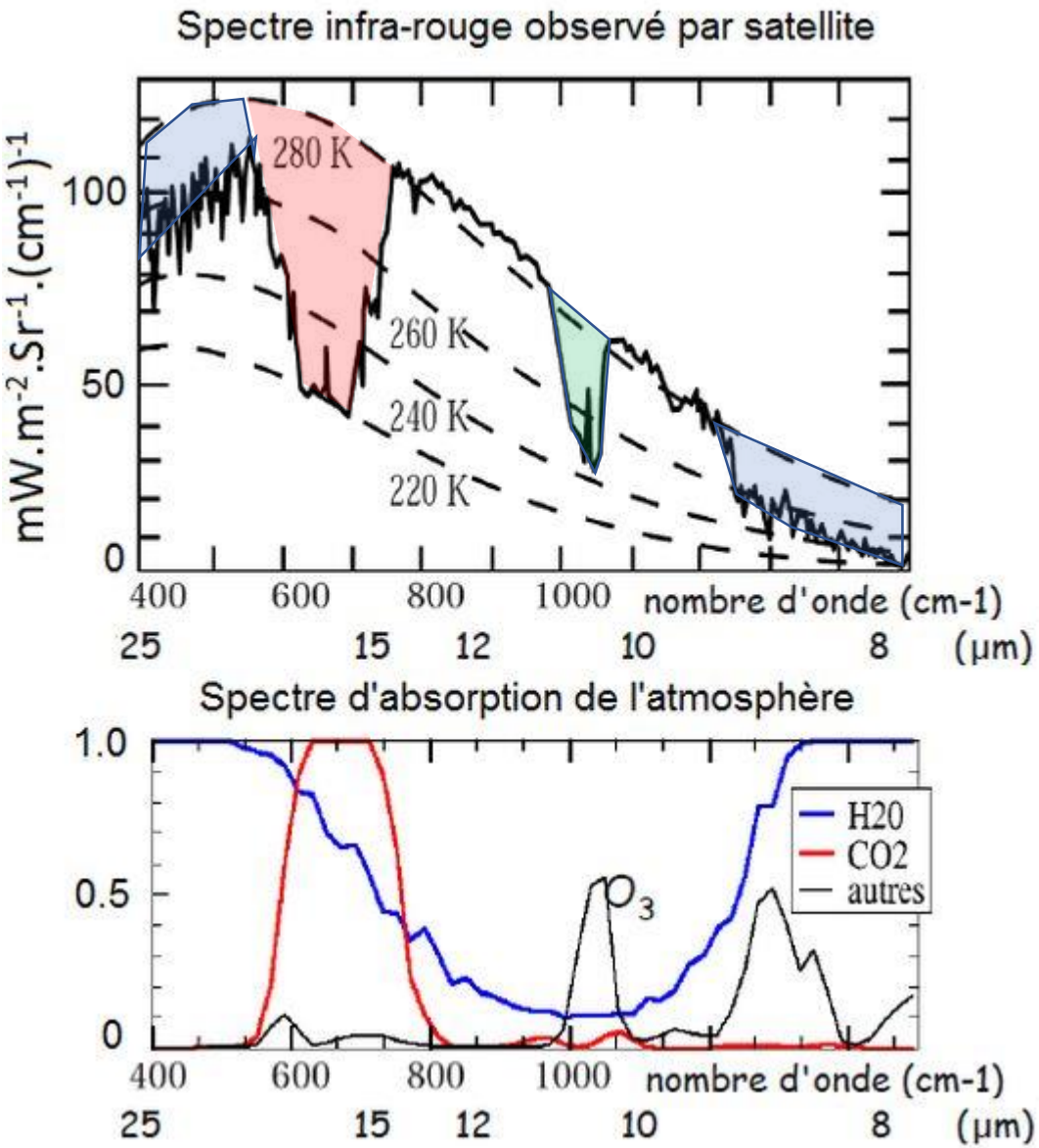
4 – CO_2 ET CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

–

Arts et Métiers Sciences et Technologies

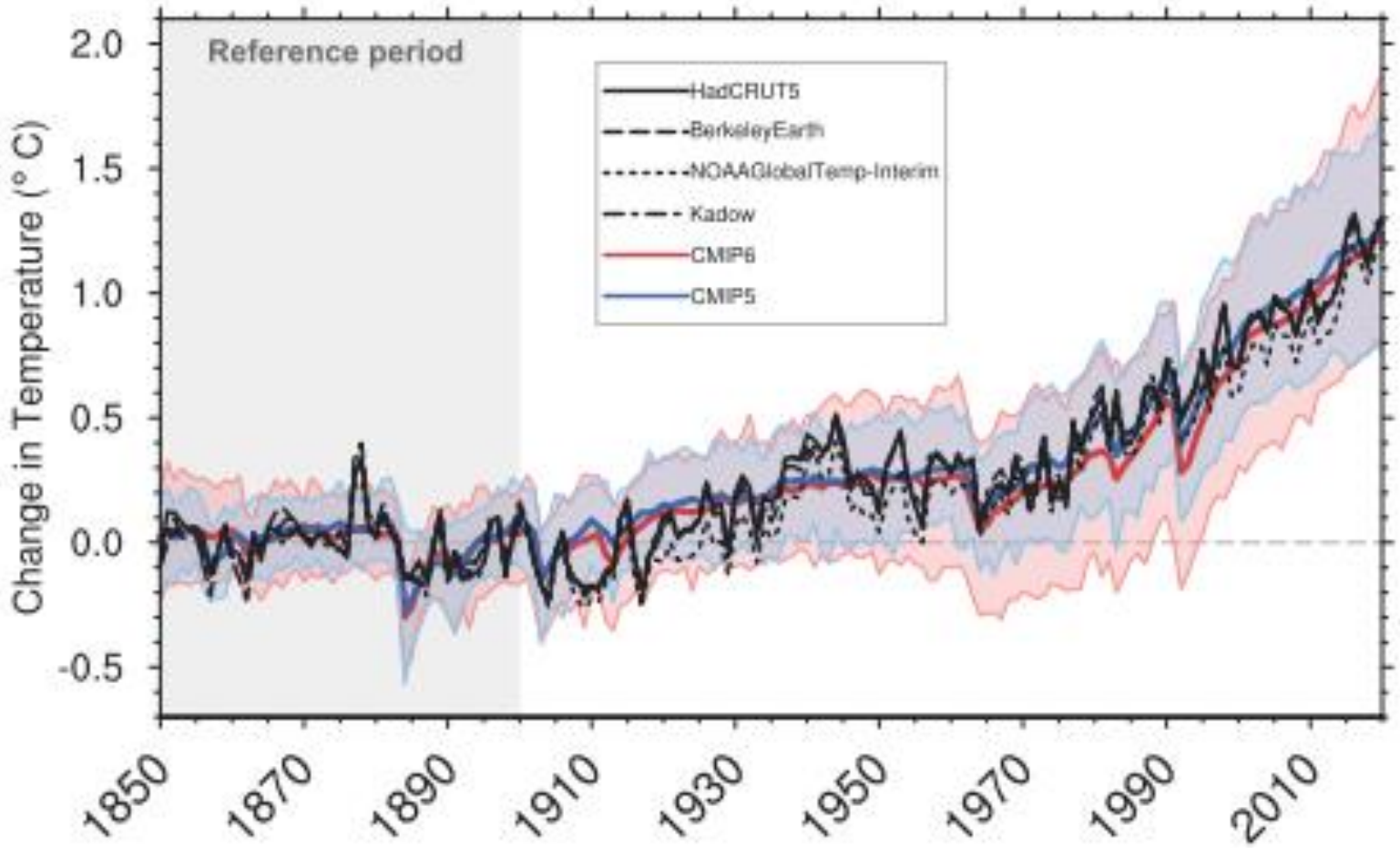
L'effet de serre lié au CO_2

- La vapeur d'eau contribue à l'effet de serre global à hauteur d'environ 60 %
- Le CO_2 contribue à hauteur de 80 % des 40% restant soit environ 30 %
- Les autres gaz contribuent à hauteur de 10 % de l'effet de serre global : O_3, CH_4, N_2O,…
- L'eau en gouttelettes dans les nuages a un effet complexe : elle participe à l'effet de serre par absorption et rediffusion dans l'infra-rouge mais augmente l'albedo et donc les pertes d'énergie par réflexion dans le visible vers l'espace



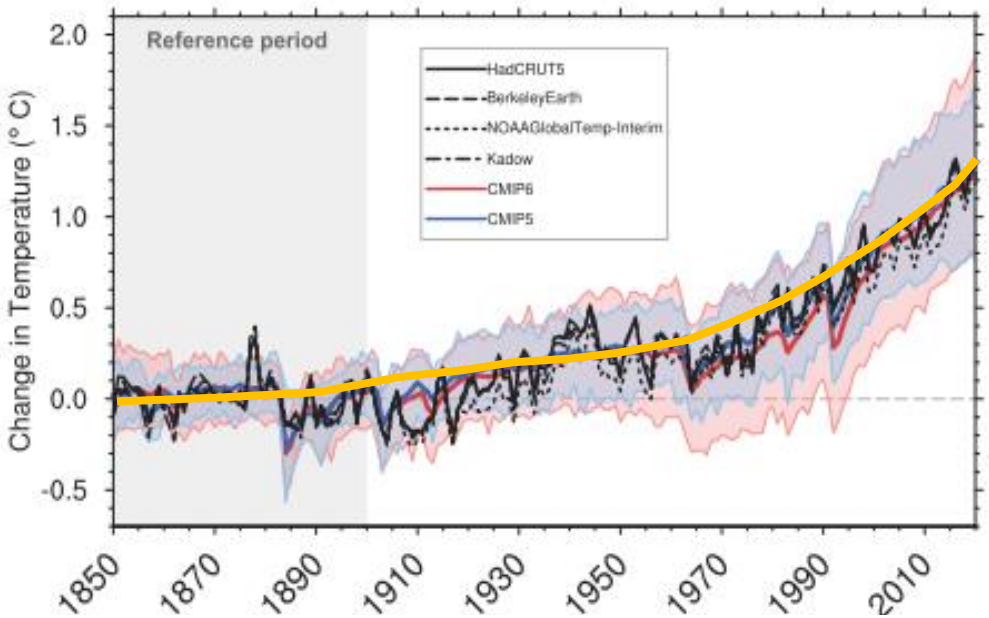
https://climatorealiste.com/wp-content/uploads/2015/03/effet_de_serre.jpg

Changement climatique : le réchauffement tel que retranscrit par le GIEC en 2021

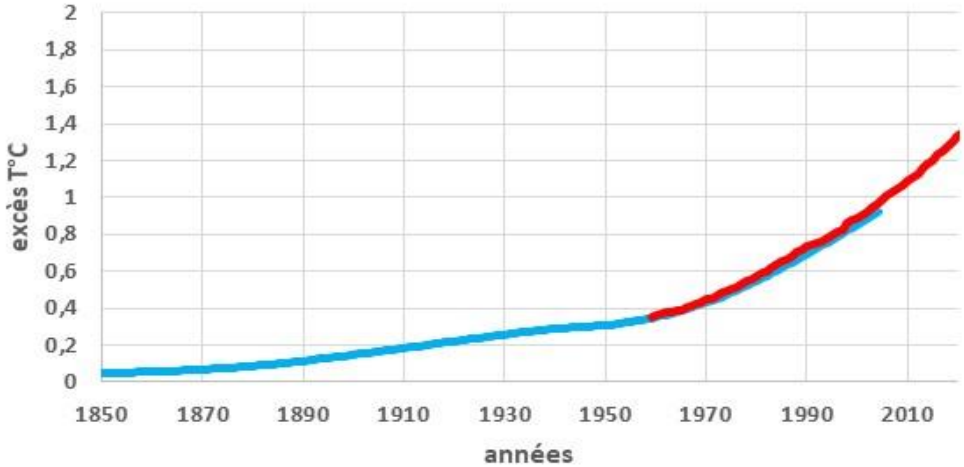


© IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Lien T°C et CO_2 depuis 1850 à nos jours ?

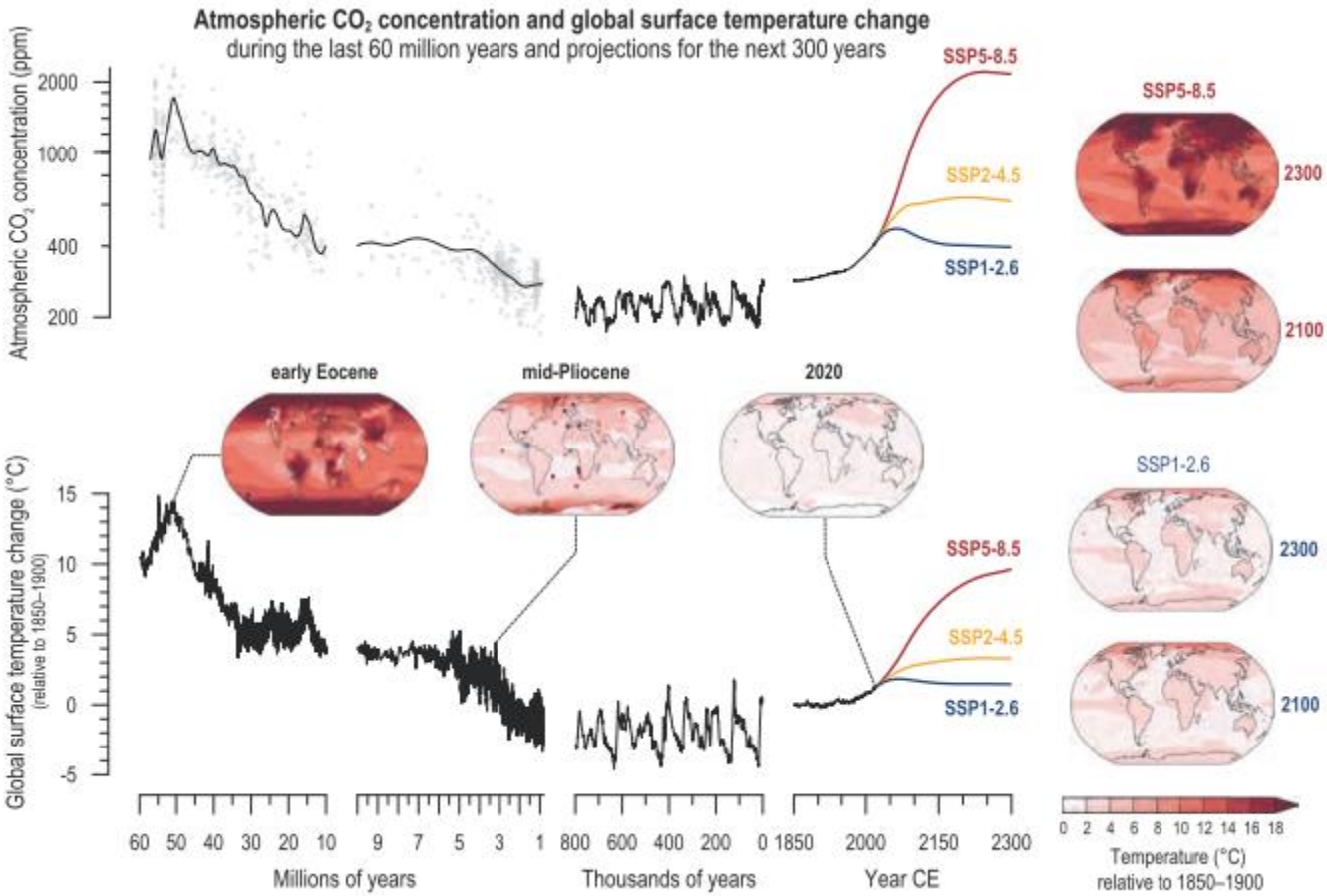


excès de T°C proportionnel à excès de CO_2 ?



?

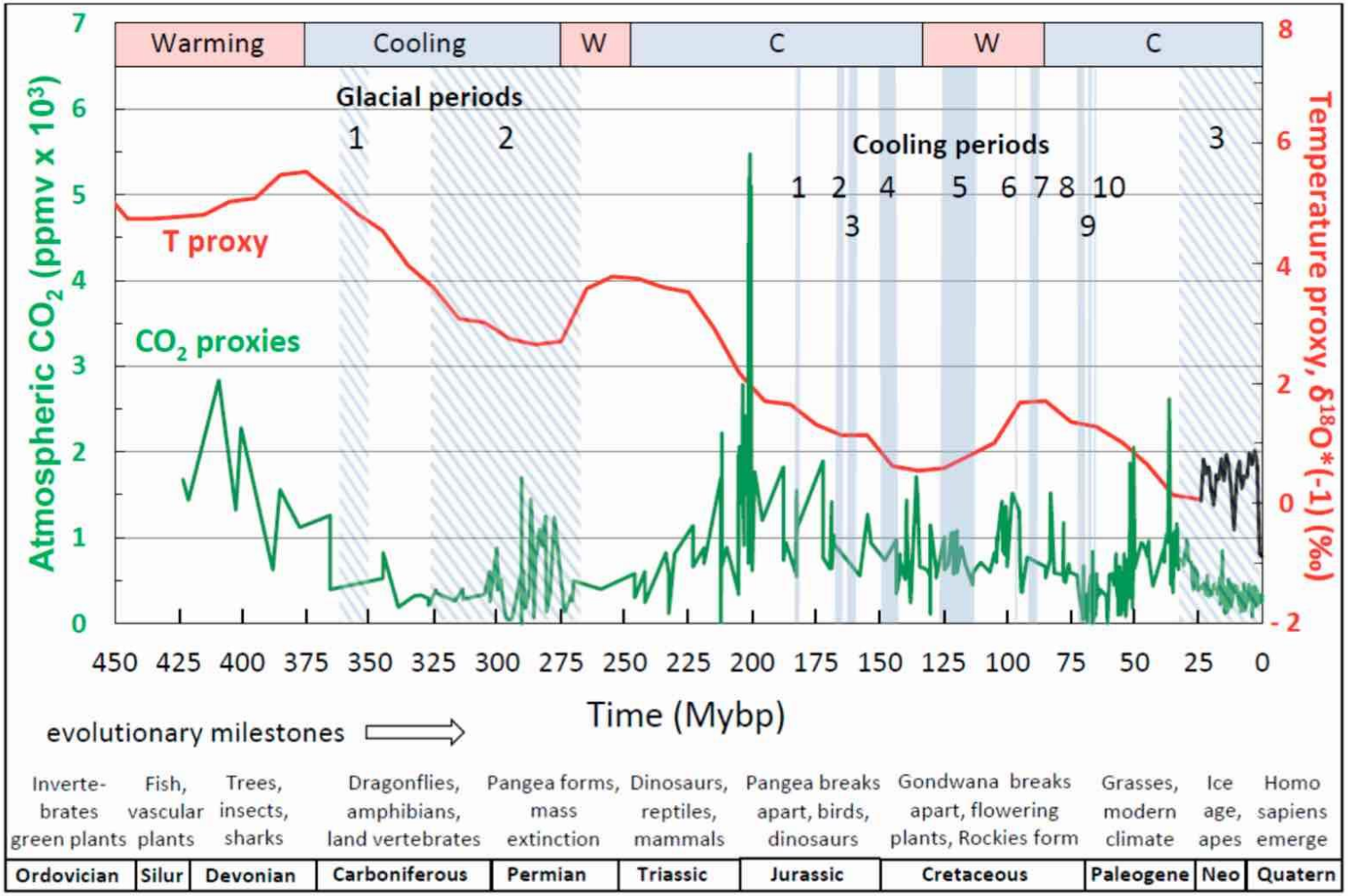
Lien T°C et CO_2 depuis 60 millions d'années ?



©

IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Lien T°C et CO_2 depuis 450 millions d'années ?

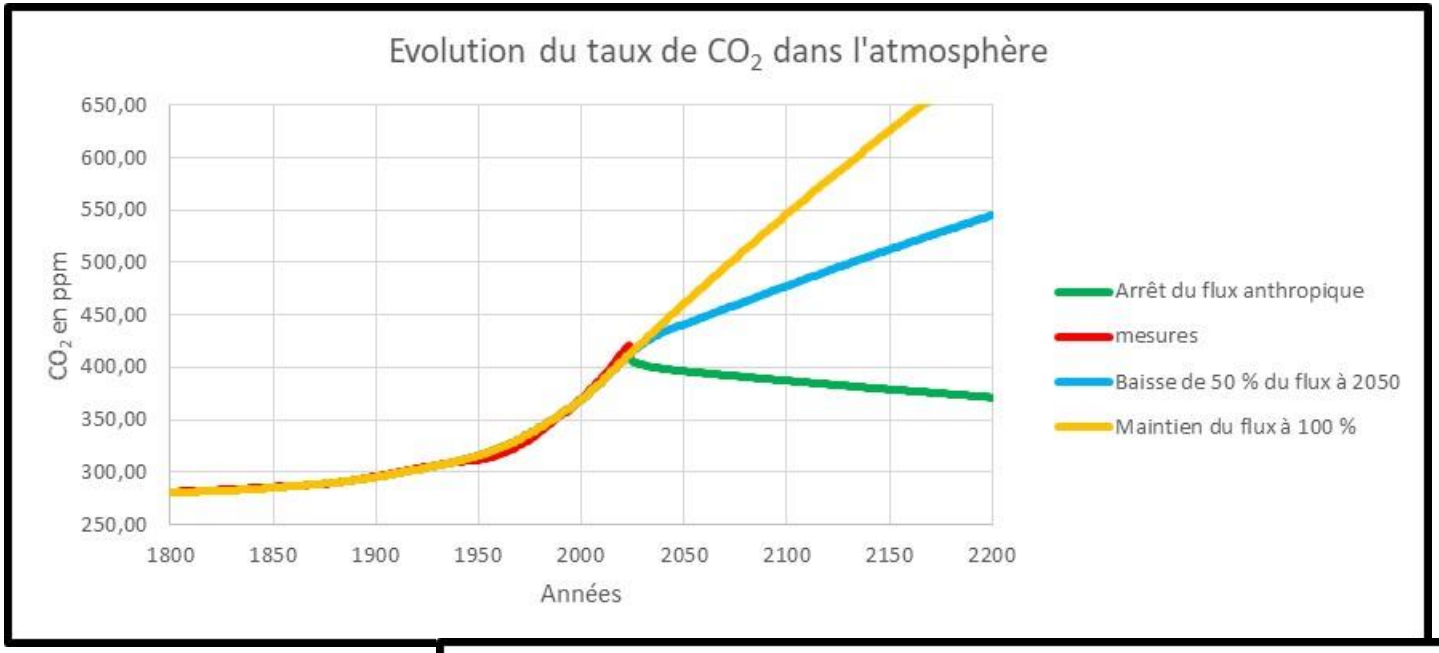


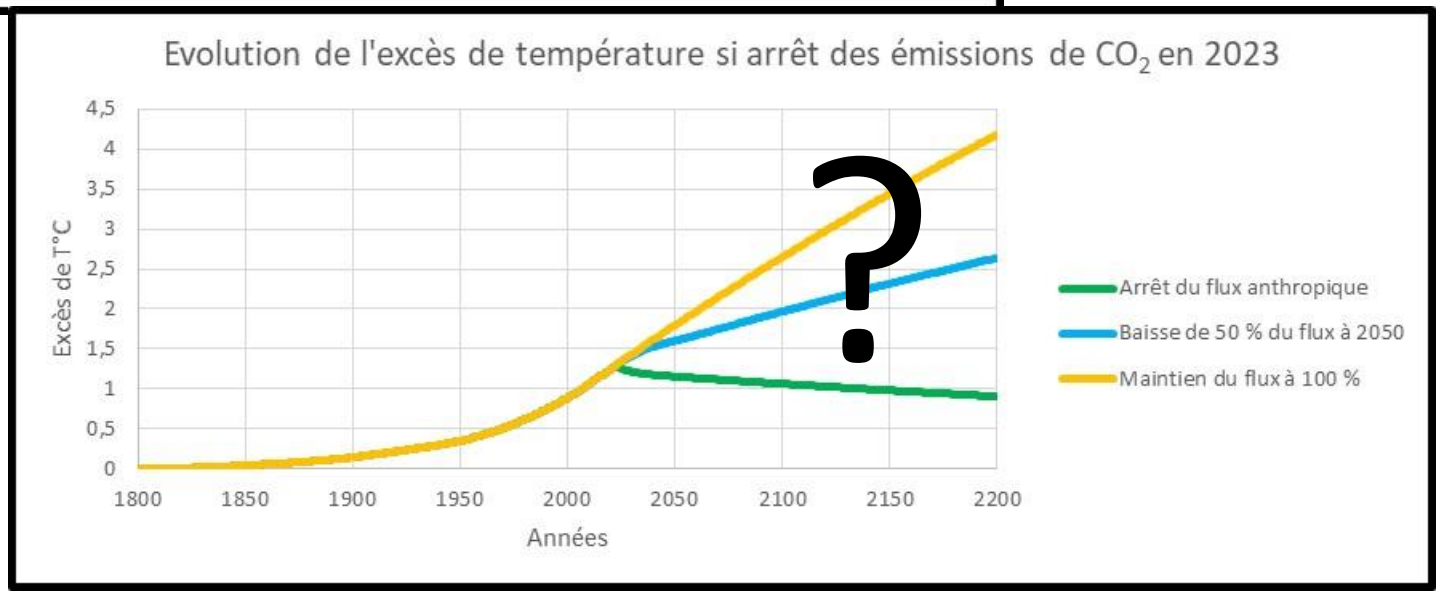
Davis, W.J. 2017. The relationship between atmospheric carbon dioxide concentration and global temperature for the last 425 million years. *Climate* **5**: 76

plus d'informations récentes sur les "paleo-CO2 proxies" : https://www.paleo-co2.org/

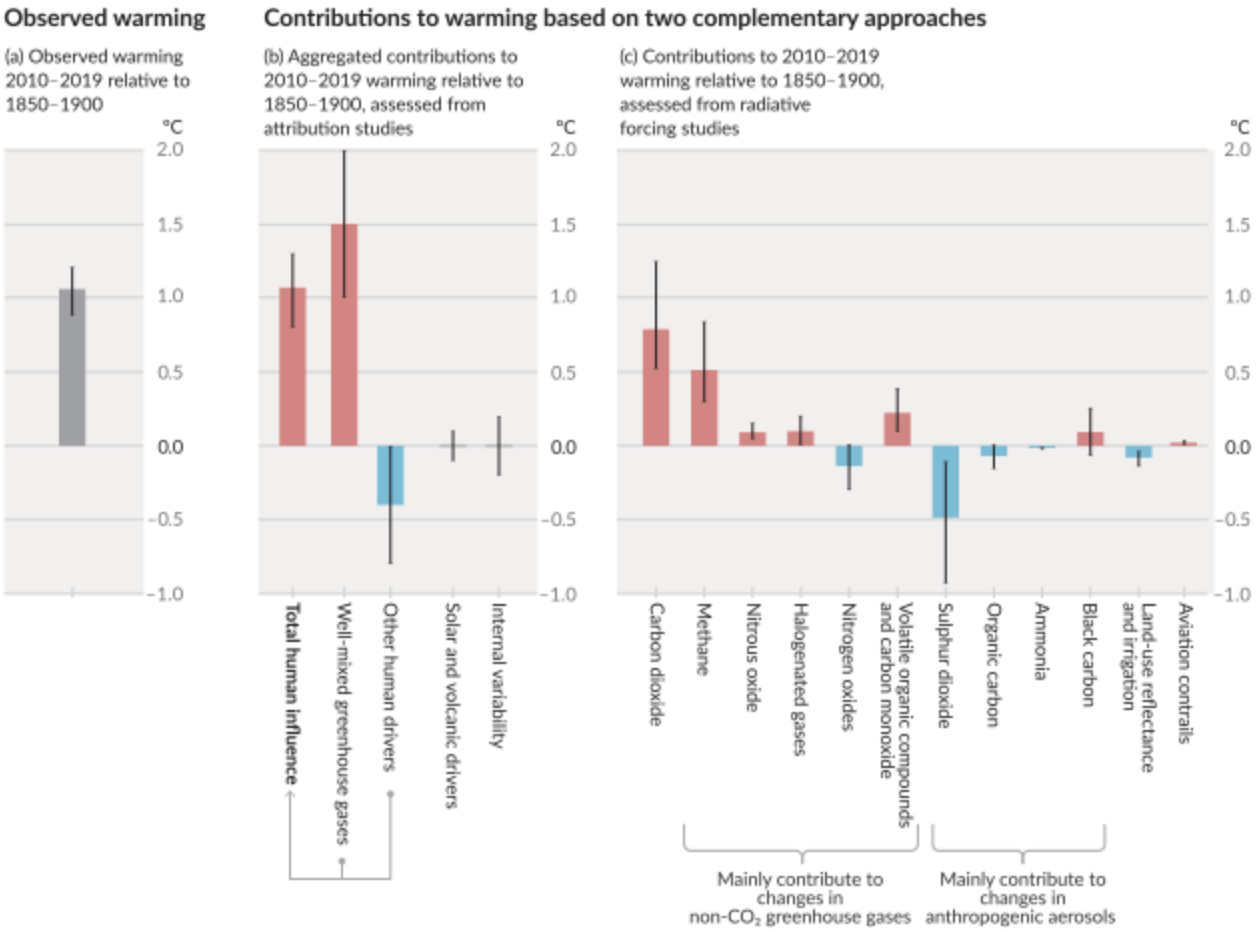
beaucoup sont basés sur des mesures isotopiques **$\delta^{18}O$ pour la température et $\delta^{13}C$ pour le CO_2 dans des fossiles**

Prévisions suivant l'évolution des émissions (modèle à 6 compartiments) ?





Sources de réchauffement identifiés :



IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Importance des activités humaines ?

- ***Le CO_2 est un gaz à effet de serre principal, directement influencé par les activités humaines :***
  - **L'excès de CO_2 dans l'atmosphère par rapport à la période pré-industrielle est lié aux émissions anthropiques et il est persistant au-delà d'une trentaine d'année**
  - **Cet excès influence le bilan radiatif de notre planète mais, de manière directe, il n'est que partiellement responsable du réchauffement observé (environ 0,3°C sur les 1,3°C observés)**
  - **D'autres phénomènes induits au niveau des échanges océaniques ou continentaux semblent amplifier le réchauffement comme par exemple, l'augmentation de la vaporisation de l'eau dans la troposphère : effets induits de H_2O via les échanges océaniques et l'évapotranspiration.**
- ***Les effets directs et indirects de cet excès de CO_2 sur le réchauffement se traduisent par une corrélation forte entre excès de CO_2 dans l'atmosphère et excès de température T°C***
  - **Tout se passe comme si l'augmentation de température depuis 1800 était proportionnelle à l'augmentation de la teneur en CO_2 mesurée dans l'atmosphère**

Limites de connaissance et incertitudes ?

- ***La corrélation entre CO_2 atmosphérique et T°C est stable depuis plus de 60 millions d'années***
  - **Cette stabilité est sans doute due à un fonctionnement autorégulé du système planétaire, sans modification majeure du fonctionnement de la biosphère océanique et continentale, ni évènements majeurs de modification du bilan énergétique global ou de l'activité volcanique.**
  - **Le lien de corrélation existe sans doute dans les deux sens en raison de boucles importantes de rétroaction entre ces deux paramètres thermodynamiques : plutôt CO_2 vers T°C aujourd'hui via les activités humaines, et plutôt T°C vers CO_2 avant via les échanges océaniques.**
  - **Le fonctionnement de la biosphère continentale et océanique couplé aux échanges en surface des océans avec l'atmosphère semblent cruciaux dans la régulation de l'ensemble (flux et processus complexes)**
- ***Cette corrélation semble beaucoup moins stable à l'échelle géologique, comme le montre l'étude des paléoenvironnements qui se précise avec les recherches***
  - **Les évènements marquants de l'histoire géologique et écologique de notre planète (extinctions massives par exemple) semblent engendrer des décorrélations entre réchauffement et taux élevé de CO_2, ou inversement entre refroidissement et taux faible de CO_2**

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ARTSETMETIERS.FR