

Doc 1 et 2 Quelques données chiffrées sur les réservoirs carbonés

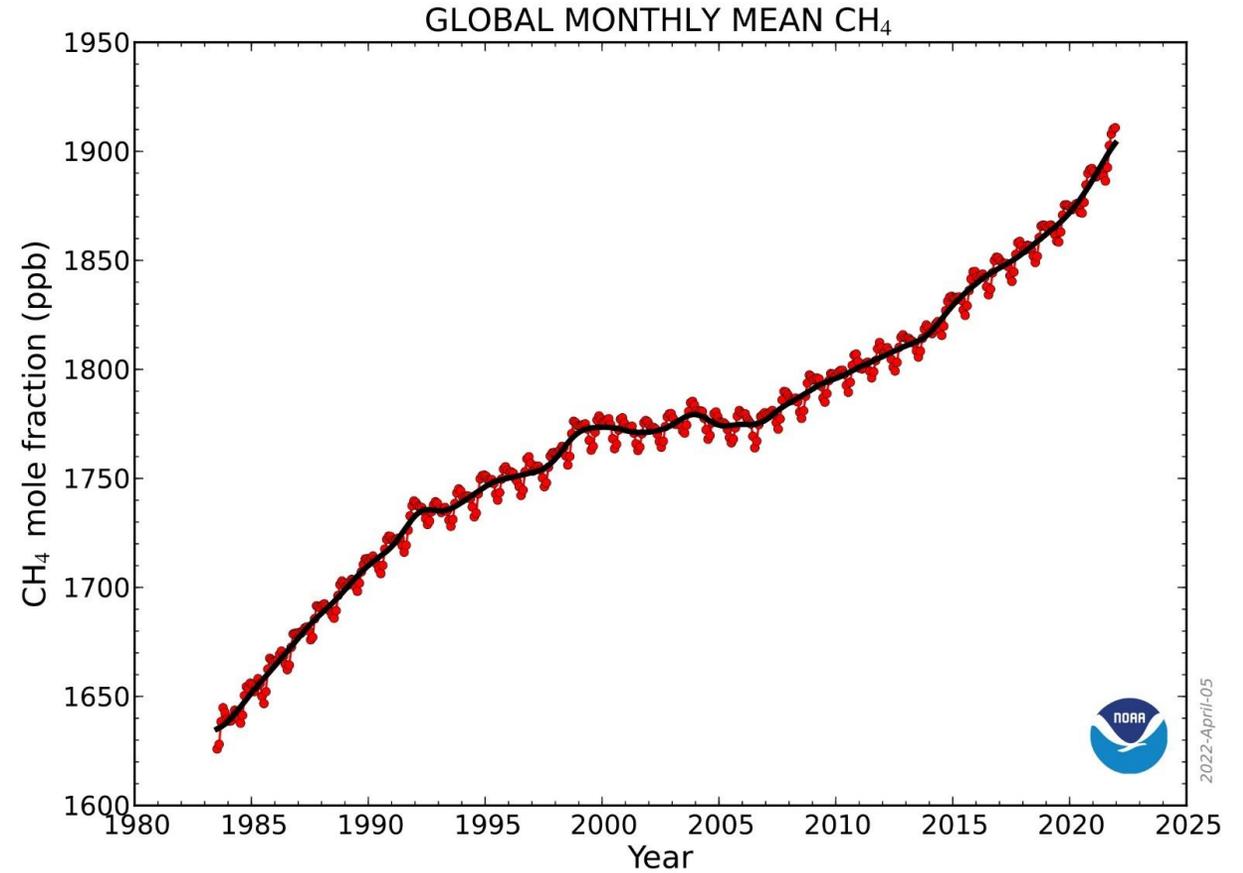
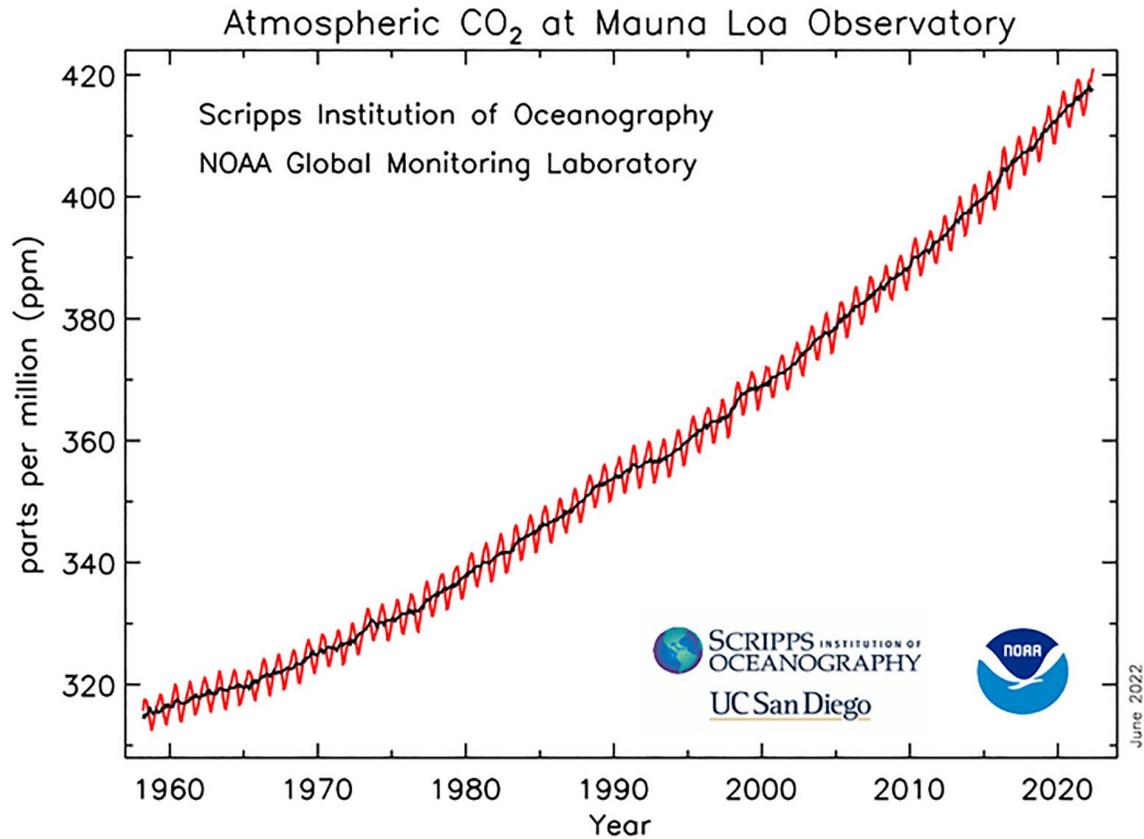
| Formes du carbone | Quantité de carbone (en gigatonnes) | Proportion par rapport à l'ensemble du carbone stocké |
|---|--|---|
| Calcaire et roche (CaCO ₃) | 78 000 000 | 99,9454 % |
| CO ₂ dans l'atmosphère ou dissout dans l'eau (non organique) | 99 870 (dont 750 pour l'atmosphère et 38 120 pour l'océan) | 0,0511 % |
| Sol, charbon, pétrole et débris marins | 2 200 | 0,0028 % |
| Animaux/végétaux vivants | 653 (dont 550 pour le terrestre et 3 pour l'océanique) | 0,0007 % |
| Total | 78 042 623 | 100 % |

FORMES ET TAILLES DES RÉSERVOIRS DU CARBONE.

Dans ce tableau, la valeur donnée pour la biomasse n'intègre pas celle des Procaryotes (sols, fonds océaniques). Au sein du manteau, le CO₂ n'étant pas soluble dans les olivines, pyroxènes, grenats et spinelle, il y forme sans doute une phase séparée (carbonates ?).

| Réservoir | État | Nature (formes du carbone) | Masse (en GtC) | Proportions (ordres de grandeurs) | |
|-----------------------------|---|---|--|-----------------------------------|-----|
| Biosphère | solide ou liquide | Biomolécules (glucides, lipides, protéides et acides nucléiques, lignines) | 600 | ε | |
| Atmosphère | gazeux | CO ₂ (380 ppmv) Traces de CH ₄ , CFC et CO | 750 | | |
| Hydrosphère (océan mondial) | dissous | Carbone inorganique dissous HCO ₃ ⁻ (# 93 %) CO ₃ ²⁻ (# 6 %) CO ₂ (# 1 %) | 39 000 | + | |
| | | Carbone organique dissous | | | |
| Croûte | solide : carbonates (carbone oxydé) | calcite, aragonite : CaCO ₃ marbres : CaCO ₃ dolomite : CaMg(CO ₃) ₂ | 80.10 ⁶ | 150.10 ⁶ | +++ |
| | solide ou liquide (carbone réduit) | Kérogènes, charbons, pétroles (matière organique fossile) | 15.10 ⁶ à 20.10 ⁶ | | ++ |
| | Nécromasse Clathrates (pergélisols, fonds marins) : 10 000 Autres roches : 50.10 ⁶ | | | | |
| Manteau | Solide | Diamant, carbonates ? | 10.10 ⁶ à 100.10 ⁶ | ++++ | |

Doc 3 et 4 Les courbes de référence du suivi des gaz atmosphériques



À noter pour CH₄ une forte hausse en 2020 (peu visible ici) car :

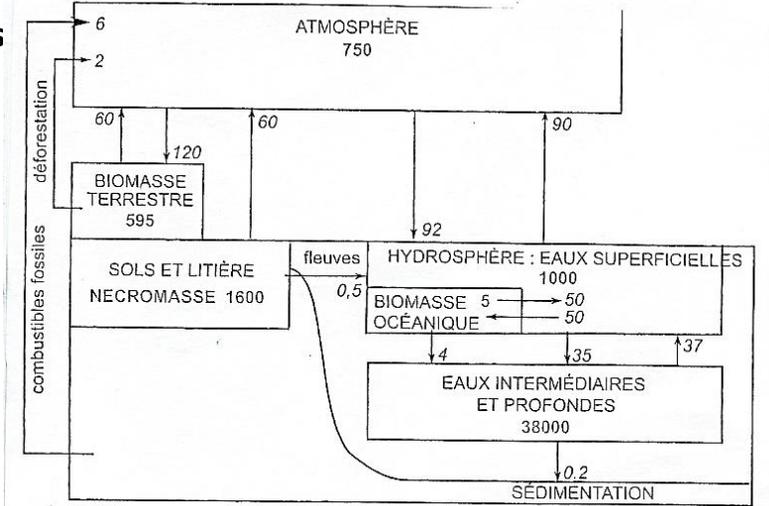
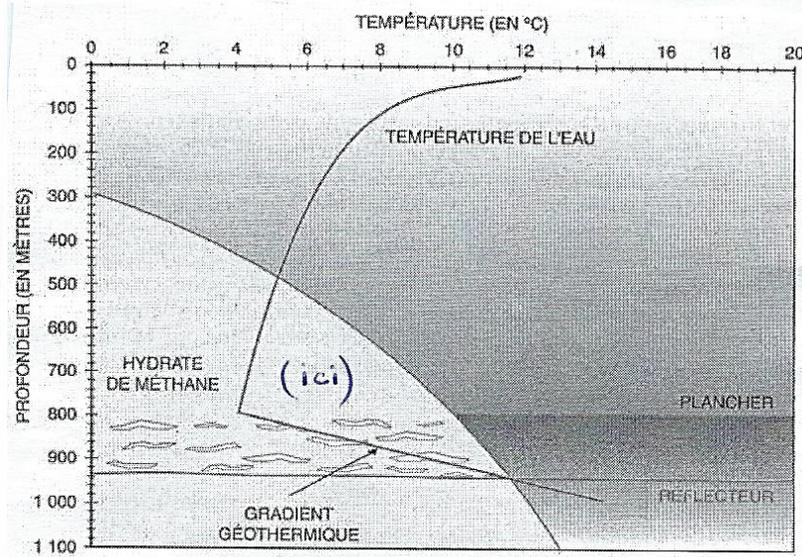
- le confinement mondial covid a limité les dégagements anthropiques de Nox, d'où moins de radicaux OH- destructeurs de méthane dans l'atmosphère
- le climat dans les zones humides productrices de méthane naturel a été plus humide et plus chaud, donc plus de production

Doc 5 Biomasse et carbone

| milieu terrestre | |
|-----------------------------------|-----------|
| végétaux | 600 à 800 |
| animaux | 1 à 2 |
| hommes | 0,03 |
| bactéries | 2 |
| champignons | 1 |
| litière | 60 |
| humus | 160 |
| Carbone organique du sol (autres) | |
| 1500 | |
| milieu océanique | |
| Phytoplancton | 3 |
| Phytobenthos | 0,3 |
| Zooplancton | 1,7 |
| Zoobenthos | 1,7 |

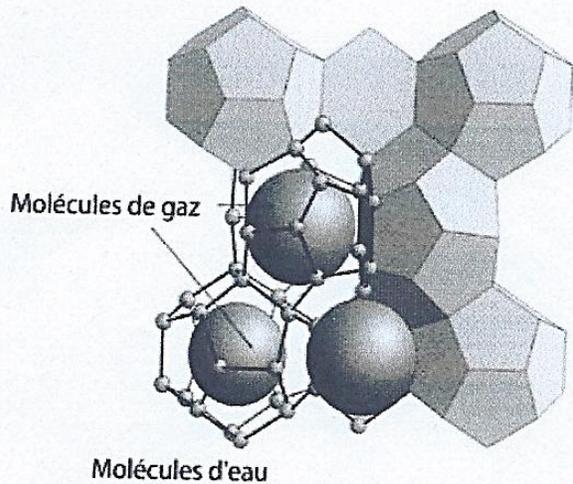
Tableau. 5 : tableau récapitulatif des différents biomasses en milieu terrestre et marin. Les masses sont exprimées en Gtc (source : le cycle du carbone, Henri Jupin, hachette, 1996).

Doc 8 Hydrates de méthane dans les sédiments des marges



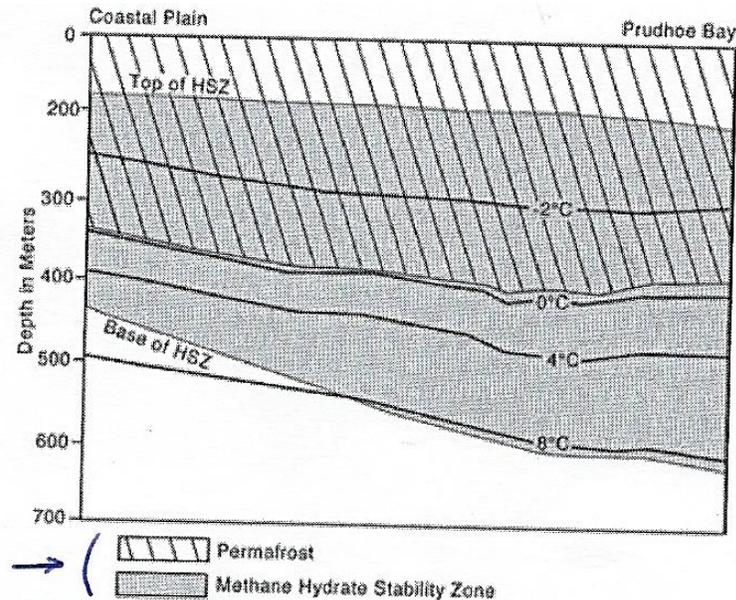
Quelques réservoirs et flux de carbone. Les flux anthropiques (utilisation des combustibles fossiles, déforestation) apparaissent sur la gauche. En noir les flux de carbone entre les réservoirs, en bleu la masse de carbone dans les réservoirs. Les chiffres sont donnés en Gigatonnes de carbone.

Doc 6 Les hydrates de méthane

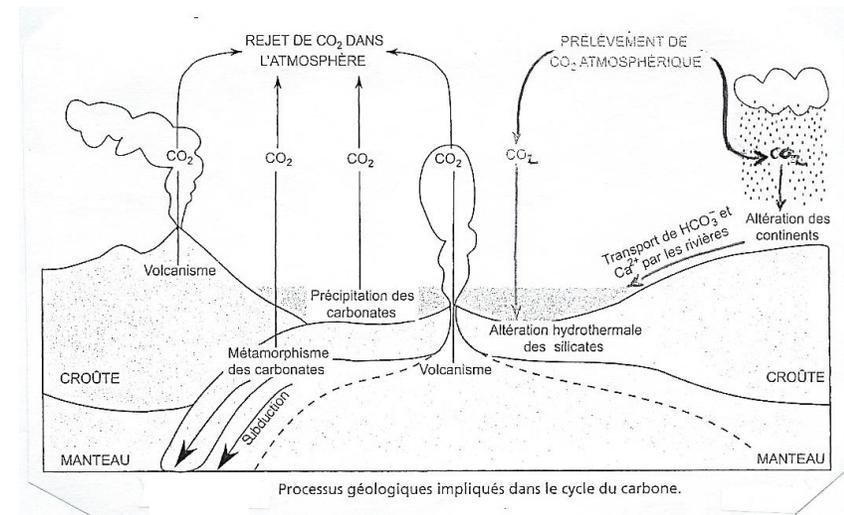


Structure d'hydrate de gaz de type I (d'après Suess, 2002)

Doc 7 Méthane et permafrost



Doc 9 et 10 Quelques valeurs de flux



Processus géologiques impliqués dans le cycle du carbone.

Docs 11 temps de résidence, temps d'élimination, quelques données chiffrées

▼ **TABLEAU I. Temps de résidence de quelques réservoirs.**

D'après EMMANUEL *et al.* (2007).

| | Lithosphère | Hydrosphère | Biosphère | Atmosphère |
|--|----------------------------------|---|---|------------|
| Temps de résidence = Taille du réservoir /Flux d'échange | > à 1 Ma et jusqu'à 200 Ma | Environ 380 ans dans les eaux superficielles à plus de 100 Ka pour l'océan profond | Entre 5 et 50 ans pour la biosphère continentale et seulement 1 mois à 1 an pour la biosphère marine | 3 à 5 ans |

▼ **TABLEAU I. Les réservoirs de carbone : une vue d'ensemble.**

Inspiré de PEYCRU *et al.* (2008, 2015)

| Réservoir | État | Forme du carbone | Masse de C | Temps de résidence |
|--------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|---|
| Atmosphère | Gazeux | CO ₂ (99 %) + CH ₄ , CO... | 750 GtC | 3 à 5 ans |
| Biomasse | Liquide ou solide | Biomolécules | 600 GtC | Biosphère 5-50 ans (continents) 1 mois – 1 an (océans) |
| Nécomasse des sols | Solide / liquide / dissous | Biomolécules + Molécules humiques | 1600 GtC | |
| Hydrosphère | Dissous | Carbone organique dissous (1 %) | 39 000 GtC | - En surface : 380 ans - En profondeur : variable |
| | | Carbone inorganique dissous : - 93 % HCO ₃ ⁻ - 6 % CO ₃ ²⁻ - 1 % CO ₂ | | |
| [Pergélisols] | Solide | Clathrates | 10 000 GtC ? | ? |
| Croûte terrestre | Solide (liquide pour pétroles) | Roches carbonatées → calcite, aragonite, dolomite | 80 • 10 ⁶ GtC | De l'ordre du Ma à la centaine de Ma |
| | | MO fossile (dont roches carbonées) : charbons, pétroles, kérogènes... | 15 à 20 • 10 ⁶ GtC | |
| | | Roches silicatées | 50 • 10 ⁶ GtC | |
| [Manteau et noyau] | Solide | C dispersé dans les réseaux cristallins (200 ppm) | 10 à 100 • 10 ⁶ GtC | |

A gauche : documents avec les « vrais » temps de résidence,

Ci-dessous : des temps dits de résidence qui sont en fait des temps d'élimination (pour les PRG voir climatologie)

| Gaz à effet de serre | Durée de vie (temps de résidence atm) | PRG-20 | PRG-100 | PRG-500 |
|------------------------|---|--------|---------|---------|
| Dioxyde de carbone | <70 % en 20 ans (dissolution océans) 15 à 20 % sur +1000 ans | 1 | 1 | 1 |
| Méthane | 14,5 ans | 62 | 24,5 | 7,5 |
| Protoxyde d'azote | 120 ans | 290 | 320 | 180 |
| CFC-11 | 50 ans | 5000 | 4000 | 1400 |
| HCFC-22 | 13,3 ans | 4300 | 1700 | 520 |
| HFC-32 | 6 ans | 1800 | 580 | 180 |
| Hexafluorure de soufre | 3200 ans | 16500 | 24900 | 36500 |
| Dichlorure de méthyle | 0,4 an | 28 | 9 | 3 |

Tableau : comparaison entre les différents temps de résidence et les influences respectives en terme de forçage radiatif selon les PRG calculés de différents gaz à effet de serre. D'après IPCC, 1994.

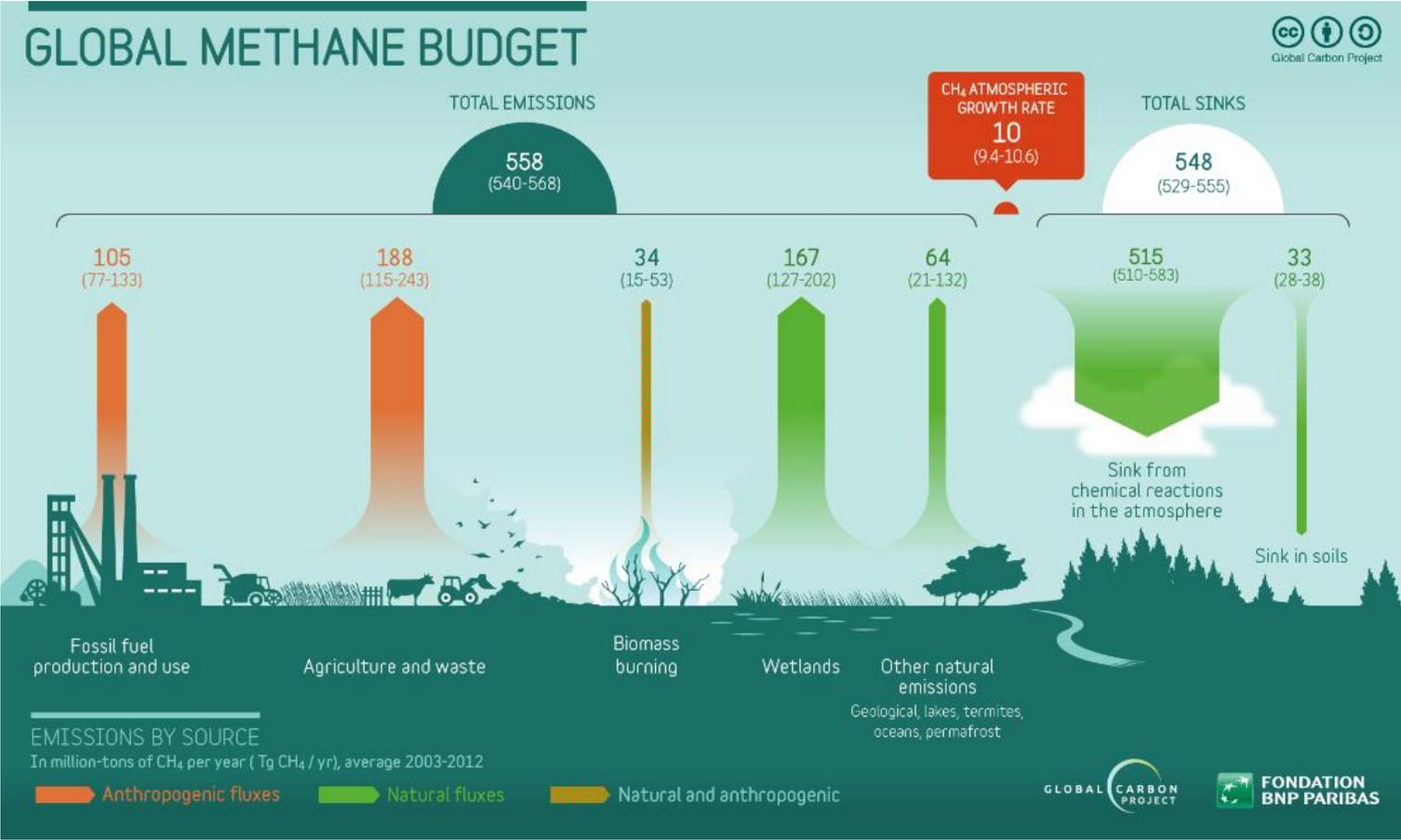
Box 6.1, Table 1 | The main natural processes that remove CO₂ consecutive to a large emission pulse to the atmosphere, their atmospheric CO₂ adjustment time scales, and main (bio)chemical reactions involved.

| Processes | Time scale (years) | Reactions |
|---|----------------------------------|---|
| Land uptake: Photosynthesis-respiration | 1-10 ² | 6CO ₂ + 6H ₂ O + photons → C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6O ₂ → 6CO ₂ + 6H ₂ O + heat |
| Ocean invasion: Seawater buffer | 10-10 ³ | CO ₂ + CO ₃ ²⁻ + H ₂ O ⇌ 2HCO ₃ ⁻ |
| Reaction with calcium carbonate | 10 ³ -10 ⁴ | CO ₂ + CaCO ₃ + H ₂ O → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ |
| Silicate weathering | 10 ⁴ -10 ⁶ | CO ₂ + CaSiO ₃ → CaCO ₃ + SiO ₂ |

Sources : IPCC, 2021.

Tableau 1 : Estimation de la production annuelle de méthane par différentes espèces animales.

Doc 12 Le cycle du méthane et les flux annuels



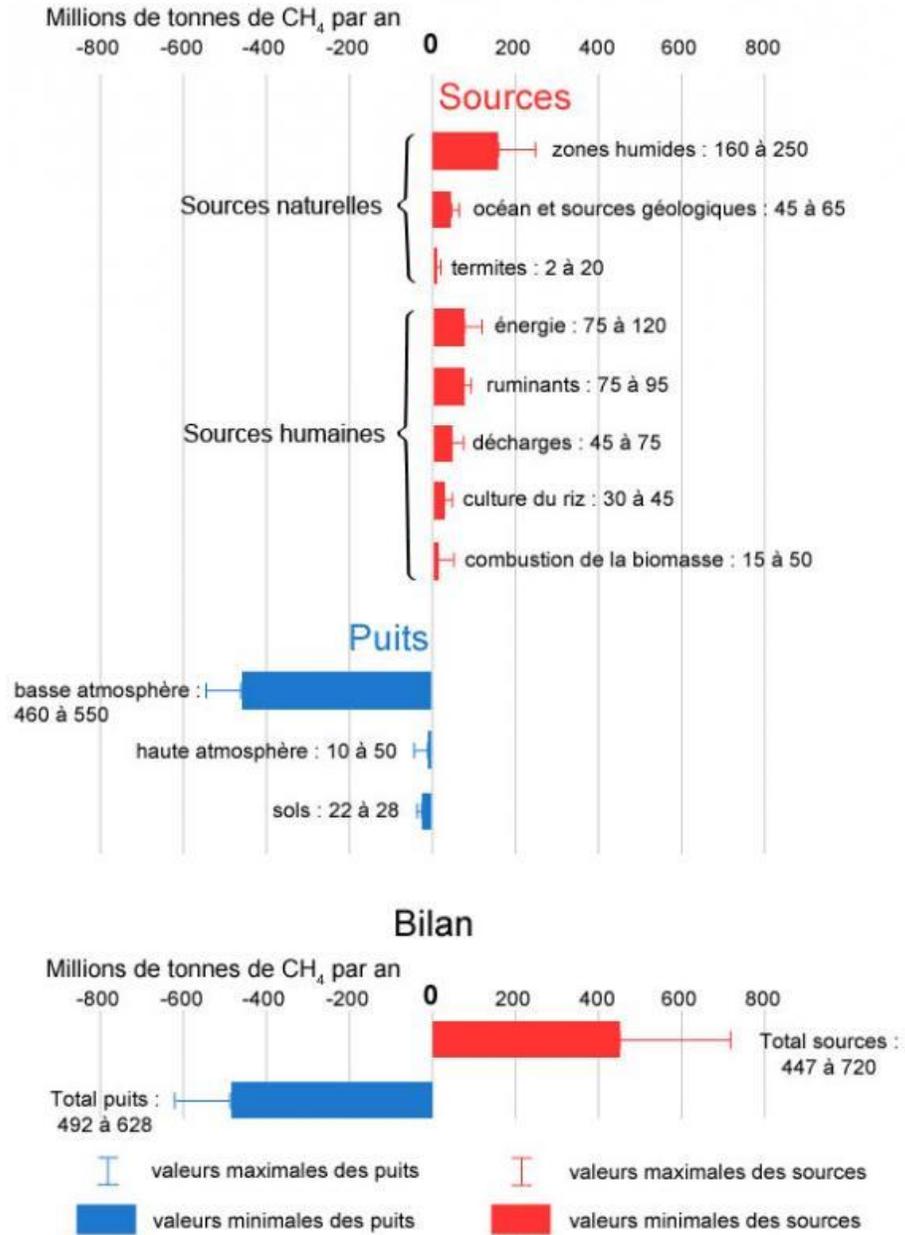
| Espèce | Production de méthane (kg/an) |
|---------------------|-------------------------------|
| Ruminant | |
| Vache laitière | 90 |
| Bovin en croissance | 65 |
| Mouton et chèvre | 8 |
| Non ruminant | |
| Cheval | 18 |
| Porc | 1 |
| Volaille | < 0,1 |

Source : Sauvant (1993).

| Sources naturelles | |
|---|-----------------|
| - Océans, lacs et terres humides | 255 Tg |
| - Termites | 10 Tg |
| Total des sources naturelles | 265 Tg |
| Sources anthropogéniques | |
| - Energie (pétrole, gaz, charbon) | 130 Tg |
| - Riziculture | 110 Tg |
| - Fermentation entérique | 80 Tg |
| - Combustion de biomasse | 40 Tg |
| - Décharges | 40 Tg |
| - lisiers des animaux | 25 Tg |
| Total des sources anthropogéniques | 425 Tg |
| Total des émissions | 690 Tg |
| Puits de méthane | |
| - Sols | - 40 Tg |
| - Troposphère (oxydation du radical OH) | - 510 Tg |
| - Réactions dans la stratosphère | - 50 Tg |
| Total des puits | - 600 Tg |
| Bilan estimé | + 90 Tg |

Doc 13 et 14 (à droite) Les productions animales de méthane et les sources et puits au niveau mondial

Doc 15 D'autres valeurs des flux de méthane (NB : flux anthropiques = 2/3 du total)



une expérience autour de la dissolution du CO₂

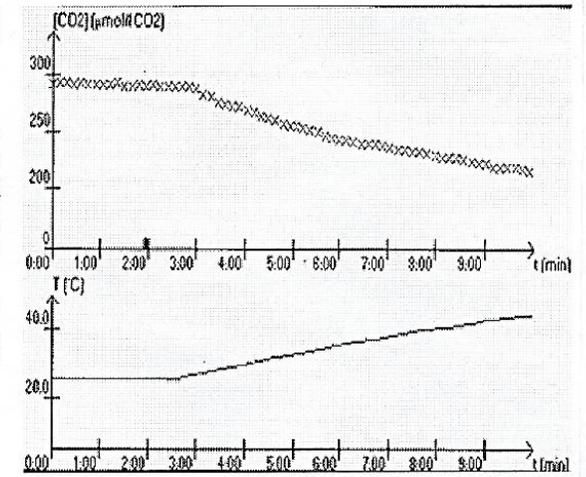
(source : d'après BORDAS spécialité TS)

Une expérience permet de mettre en évidence l'impact d'une augmentation de la température sur l'équilibre qui s'établit dans les échanges de CO₂ entre l'air et l'eau.

■ PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.

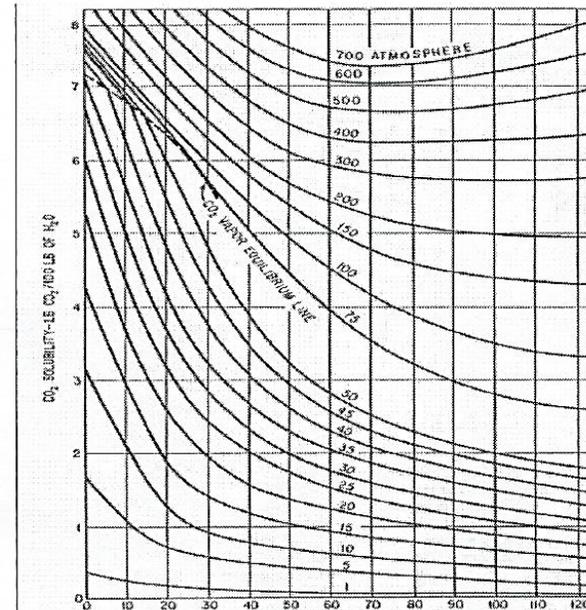
- Un cristalliseur rempli à moitié d'une eau bouillie (elle ne contient donc plus aucun gaz dissous) est fermé hermétiquement puis placé sur une plaque chauffante. Deux capteurs reliés à un dispositif d'ExAO sont placés dans l'eau : un thermomètre et une sonde électronique permettent de suivre l'évolution de la concentration en CO₂.
- Avant de lancer la manipulation, on enrichit l'eau du cristalliseur en CO₂ en y expirant plusieurs fois. Après 2 minutes d'enregistrement des données, la plaque chauffante est allumée.

■ RÉSULTATS



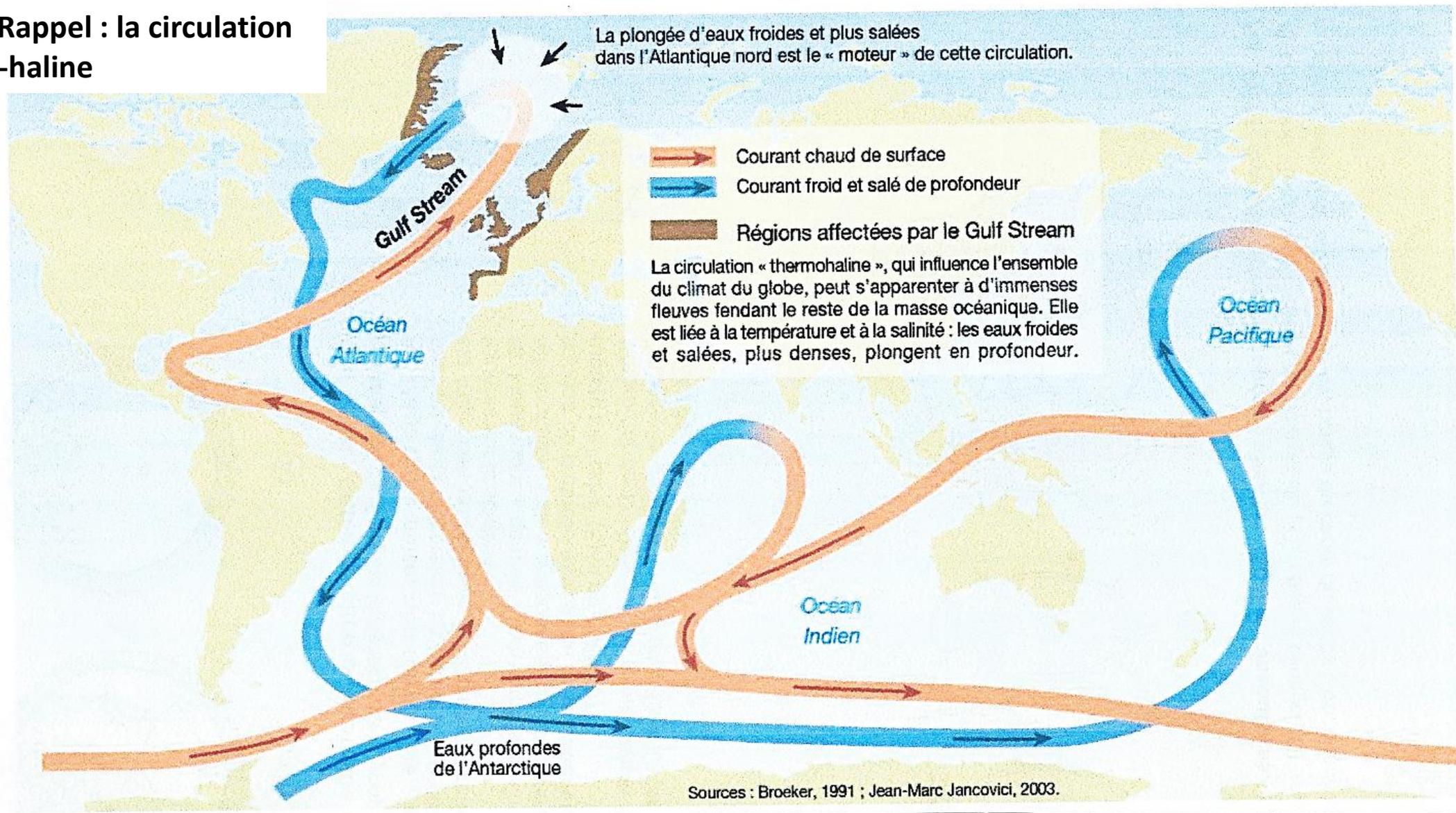
Docs 16 Autour de la solubilité du CO₂

Solubilité du CO₂ dans l'eau en fonction de la température en °C (Khol et Nielsen, 1997)



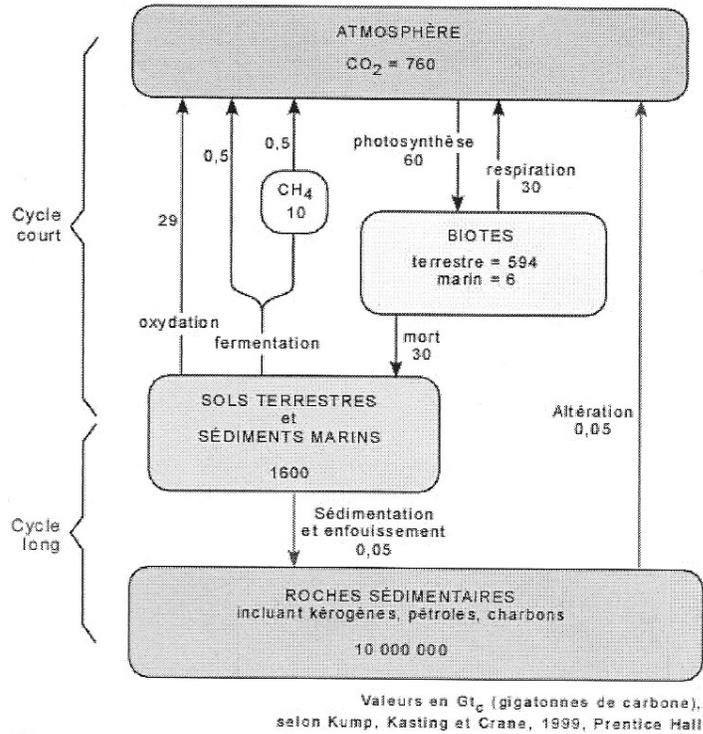
(les courants de surface ont été simplifiés pour ne garder que les lents déplacements globaux en rapport avec la circulation thermohaline)

Doc 17 Rappel : la circulation thermo-haline

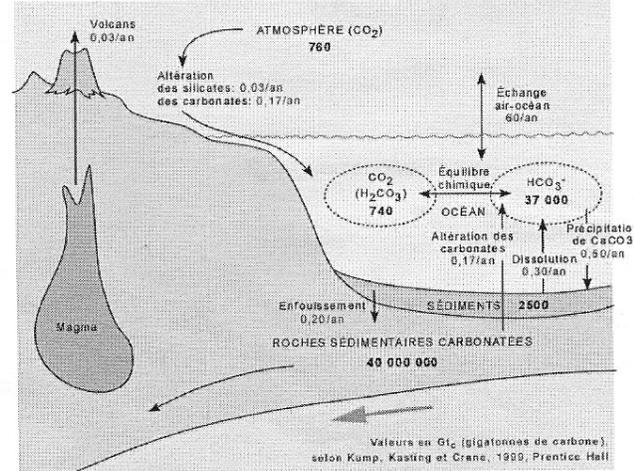


Docs 18 et 19 Cycle court biologique et cycle long géologique

CYCLE DU CARBONE ORGANIQUE

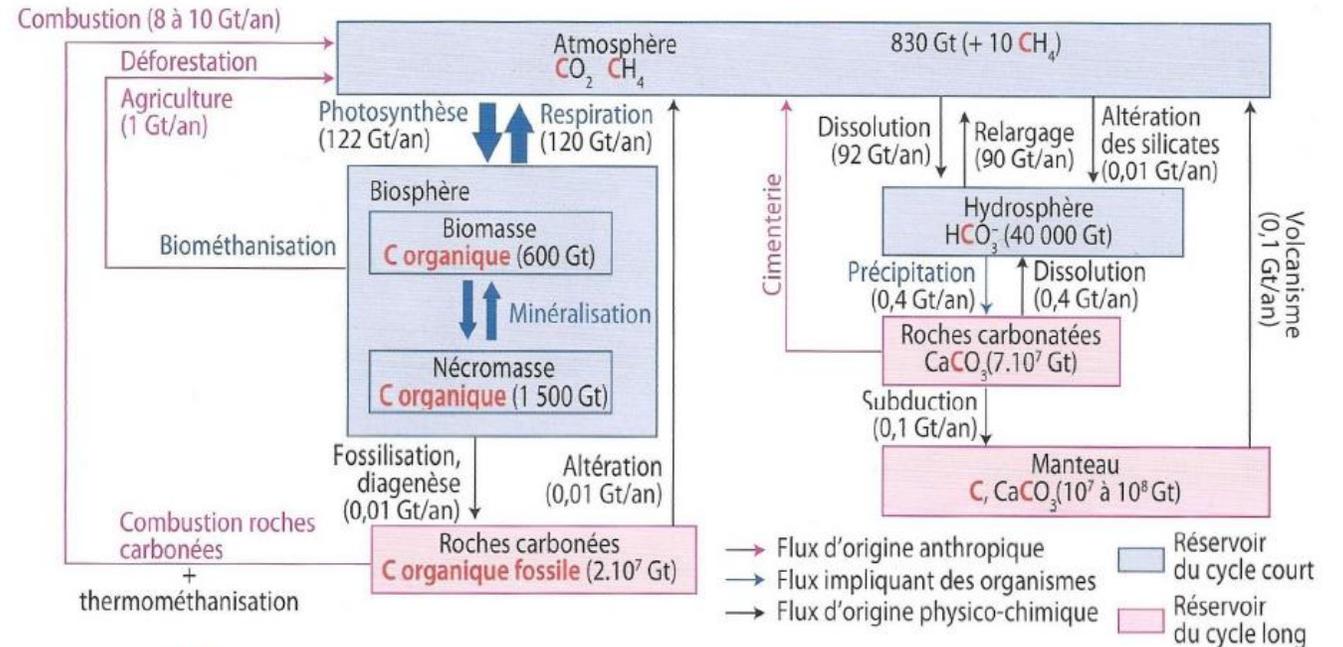


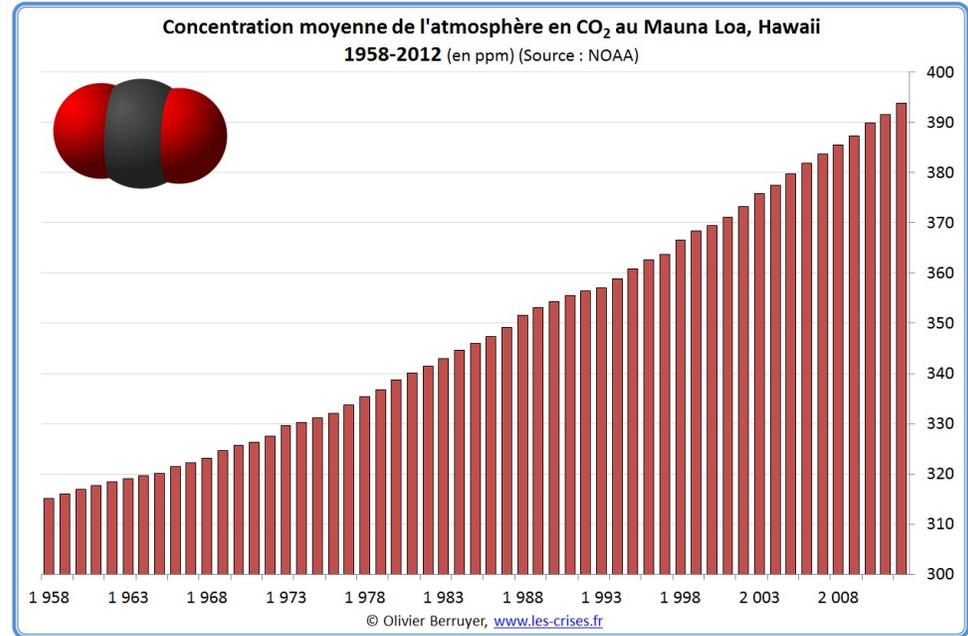
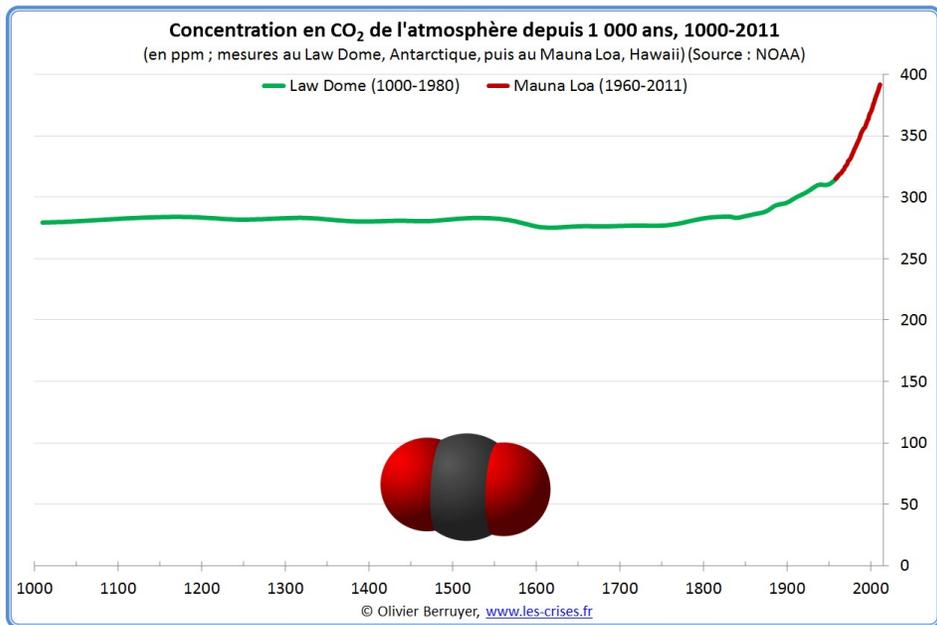
CYCLE DU CARBONE INORGANIQUE



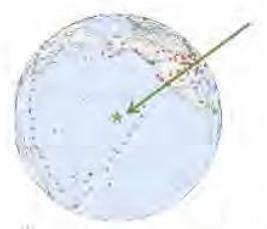
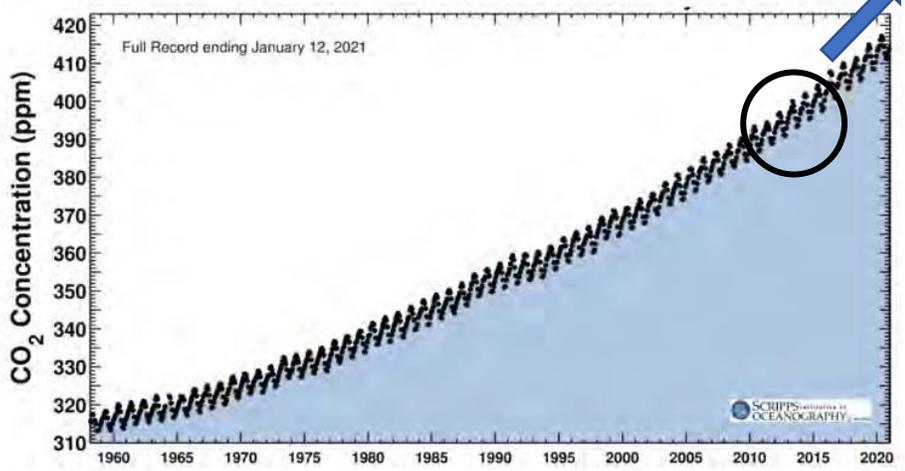
Docs 20 Un schéma de cycle (parmi d'autres)

UN CYCLE BIOGÉOCHIMIQUE À L'ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES, MODIFIÉ PAR LES ACTIVITÉS HUMAINES



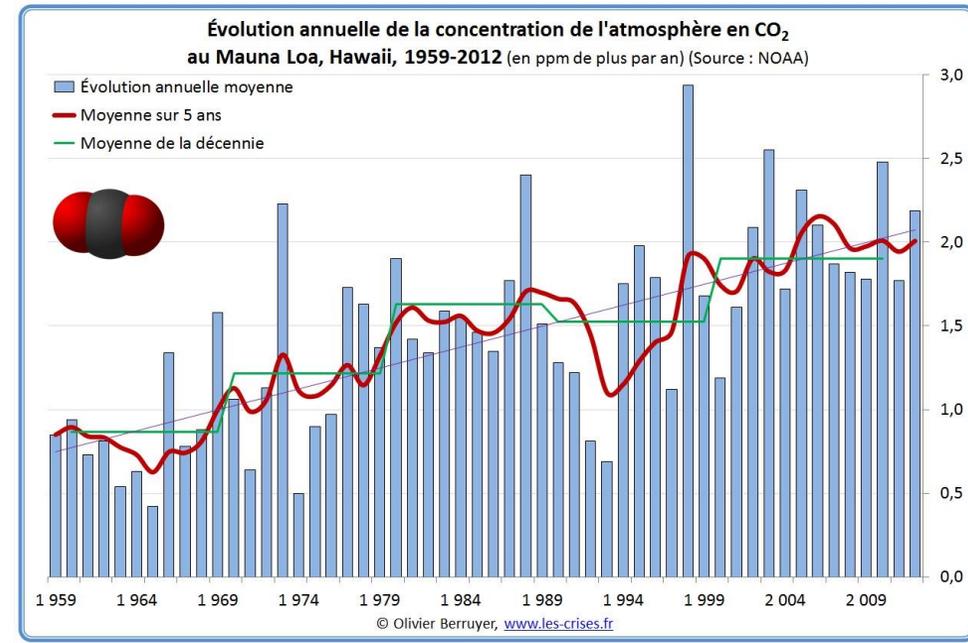


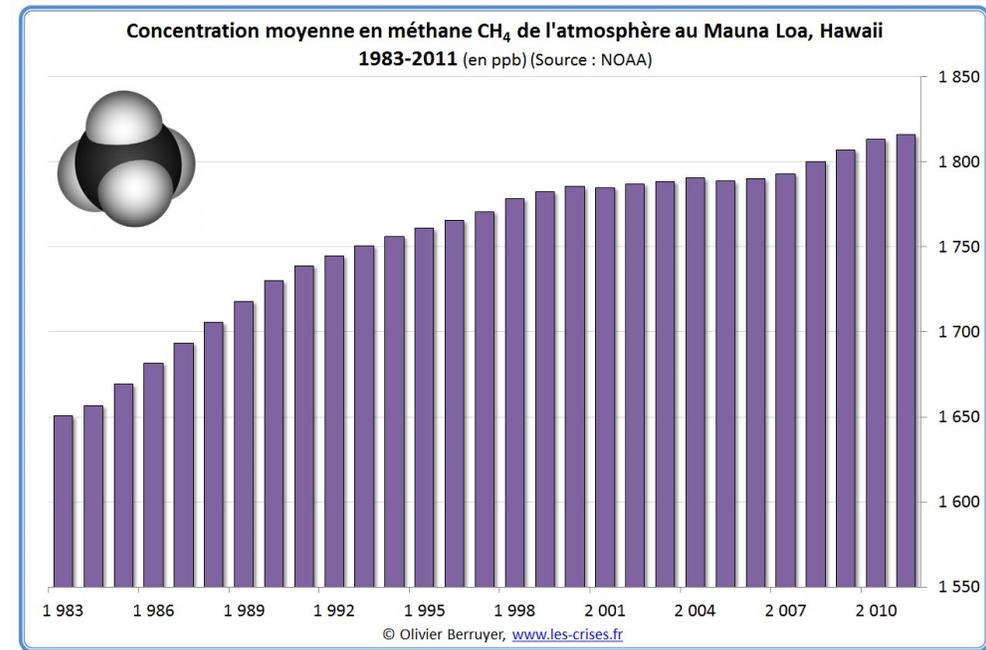
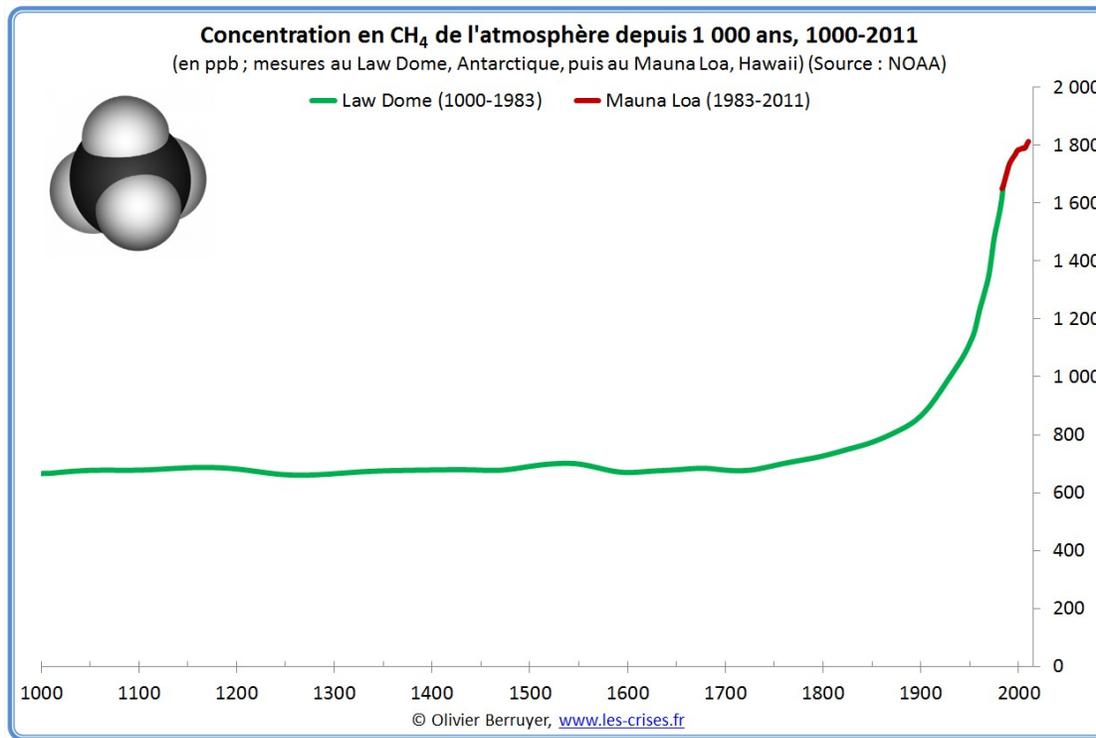
Doc 22 Le CO₂ : période historique et contemporaine



Localisation de Mauna Loa

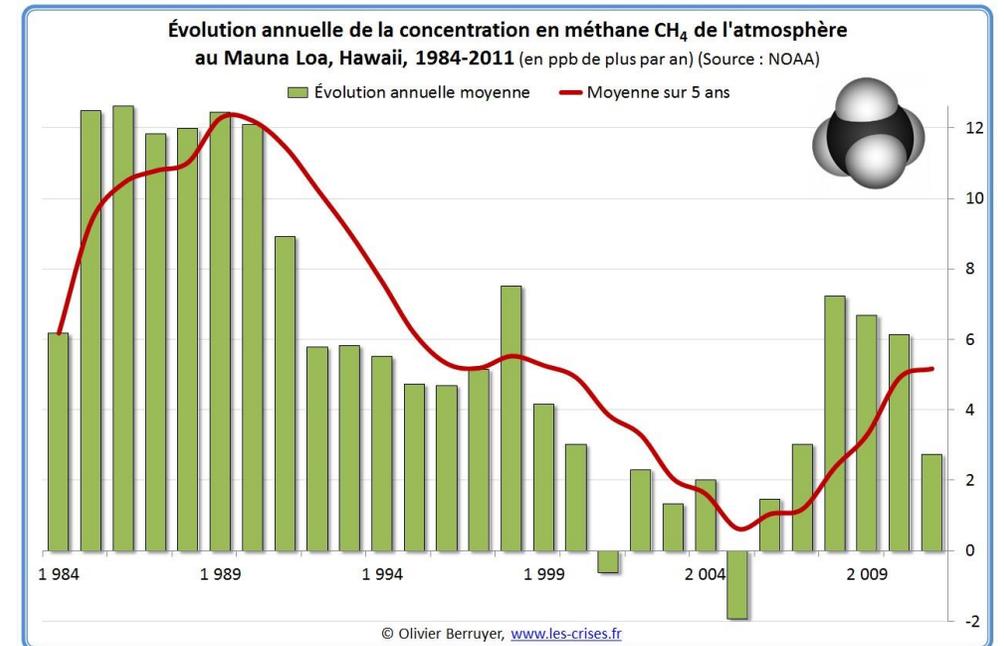
Taux de CO₂ dans l'atmosphère en date du 12/01/2021 mesuré à partir de 1958. Mesuré à Mauna Loa (Hawaï) - Scripps Institution of Oceanography



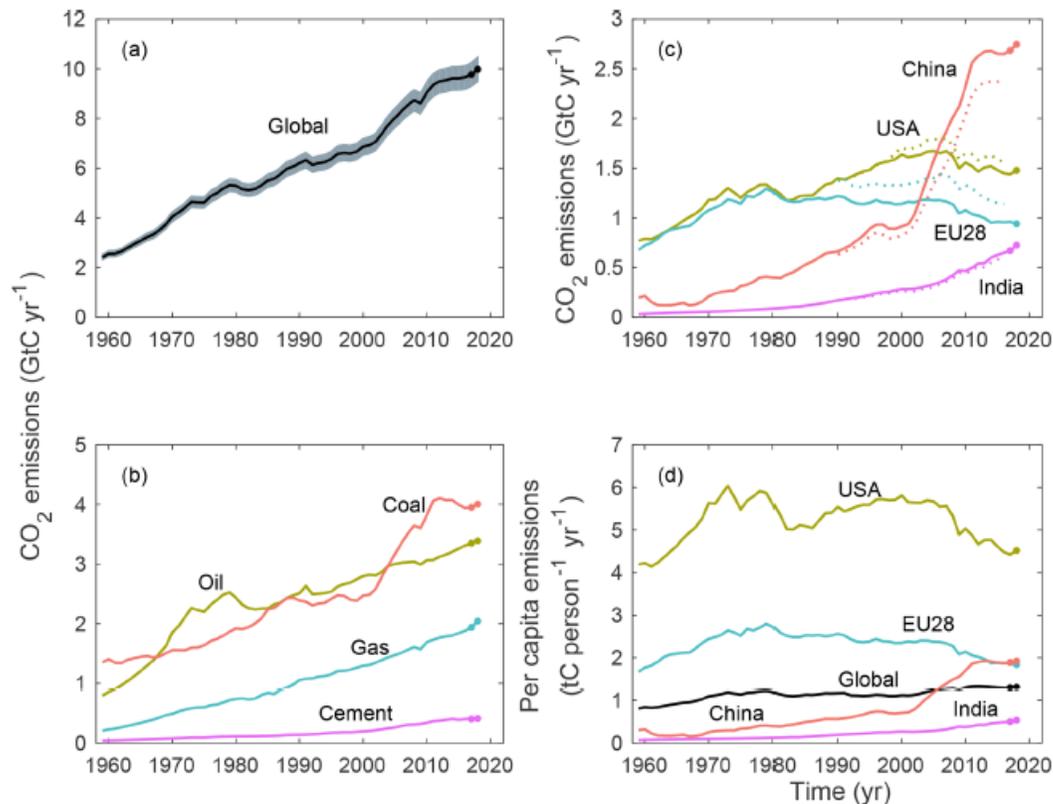


Doc 23 Le méthane : période historique et contemporaine

On constate ici que l'augmentation du méthane a connu une très nette baisse entre 1990 et 2005, mais que la tendance est désormais repartie à la hausse. Sachant qu'une bonne part des émissions de méthane est issue du bétail, des rizières et des décharges, la baisse a principalement à l'amélioration des méthodes de cultures des rizières et de gestion des déchets.



Quelques données chiffrées sur les émissions anthropiques



Les émissions anthropiques de CO₂ (mesurées en tonnes de carbone sur ces graphiques) dues aux énergies fossiles atteignent 36,8 milliards de tonnes de CO₂ en 2019. Le graphique en bas à gauche montre la prépondérance du charbon dans les émissions. Celui en haut à gauche comprend en lignes pleines les émissions territoriales et en pointillé les empreintes carbone (émissions dues aux exportations d'objets et matières premières déduites, émissions dues aux importations ajoutées). En bas à droite les émissions territoriales calculées par personne (en tonnes de carbone), montrant l'écart encore énorme entre celles d'un habitant des Etats-Unis d'Amérique, un Chinois ou un Indien.

Doc 25

The global carbon cycle

Doc 26

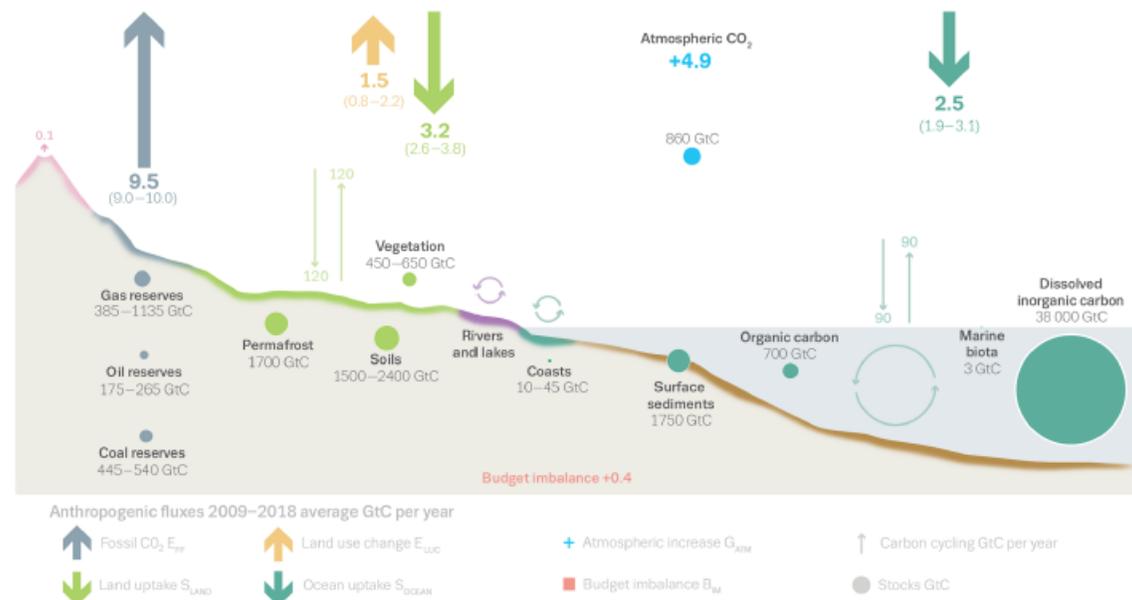
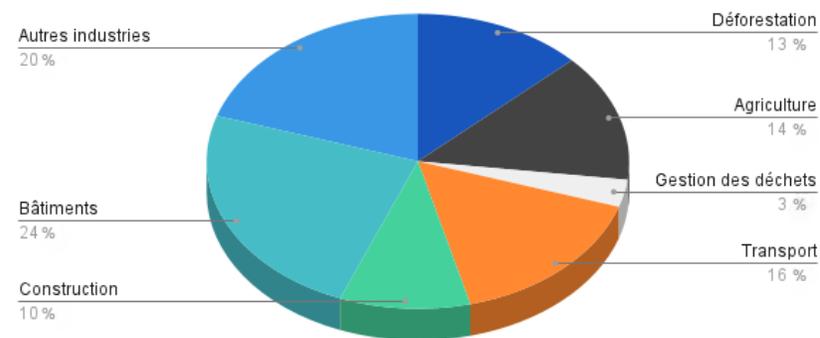


Figure 2. Schematic representation of the overall perturbation of the global carbon cycle caused by anthropogenic activities, averaged globally for the decade 2009–2018. See legends for the corresponding arrows and units. The uncertainty in the atmospheric CO₂ growth rate is very small (± 0.02 GtC yr⁻¹) and is neglected for the figure. The anthropogenic perturbation occurs on top of an active carbon cycle, with fluxes and stocks represented in the background and taken from Ciais et al. (2013) for all numbers, with the ocean gross fluxes updated to 90 GtC yr⁻¹ to account for the increase in atmospheric CO₂ since publication, and except for the carbon stocks in coasts, which are from a literature review of coastal marine sediments (Price and Warren, 2016).

Doc 24 Émissions GES en fonction du secteur industriel



Quelques données chiffrées sur les émissions anthropiques, suite :

les bilans sources / puits pour les deux principaux gaz à effet de serre

REPARTITION DES EMISSIONS ANTHROPIQUES EN CO₂

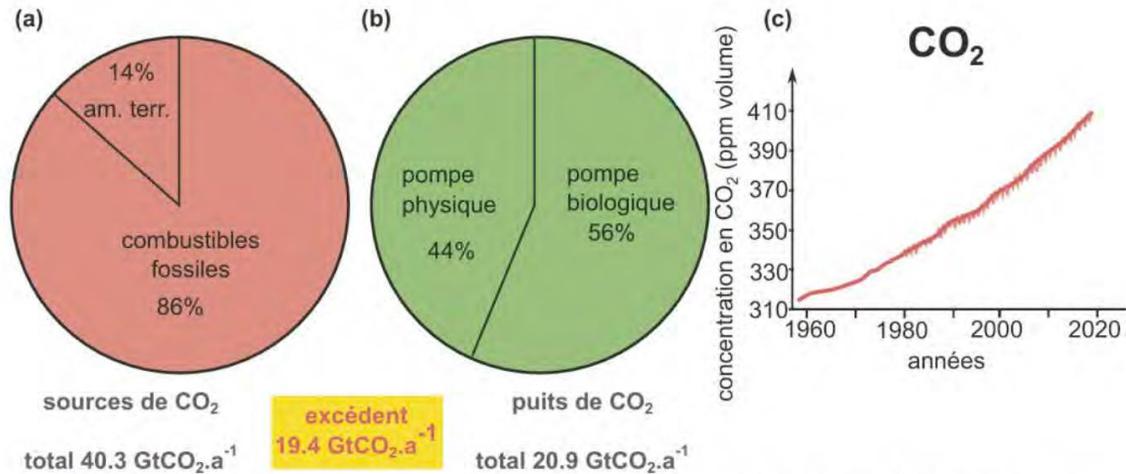


Figure 24.4 Données relatives aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO₂).

- (a) Proportions des sources de CO₂ anthropique (décennie 2009-2018). am. terr. : production de CO₂ liée à l'aménagement du territoire.
 (b) Proportions moyennes des puits de CO₂ (décennie 2009-2018).
 (c) Courbe d'évolution de la concentration du CO₂ atmosphérique en parties pour million en volume de 1960 à 2020.
 (D'après Friedlingstein P. et al, 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269-3340, 2020).

Attention ne pas confondre les valeurs de flux de carbone C et les valeurs de flux en GtCO₂/an (multiplier par 3,6 les valeurs en GtC/an alors comme ici)

REPARTITION DES EMISSIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES DE METHANE CH₄

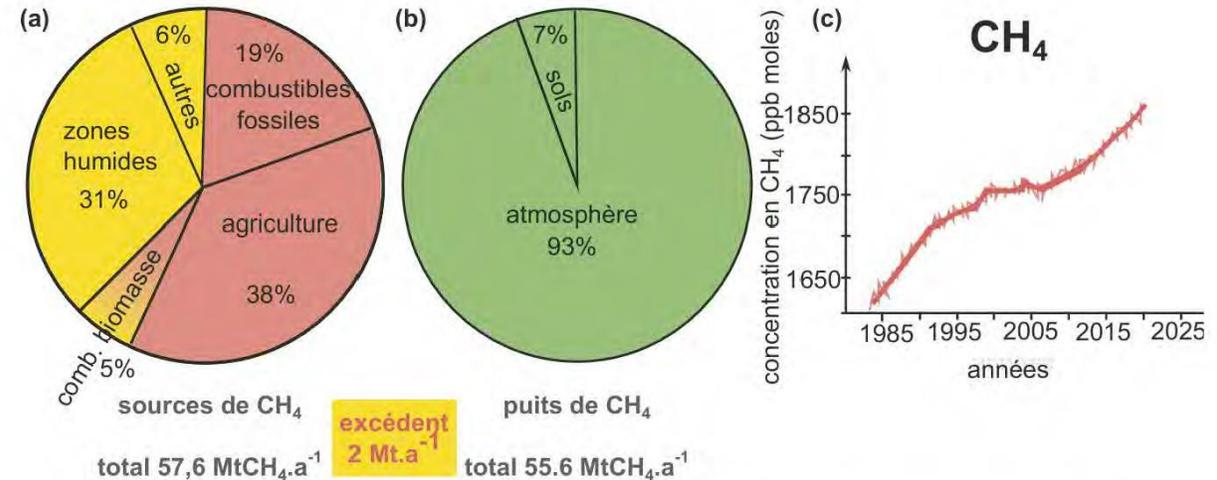


Figure 24.3 Données relatives aux émissions naturelles et anthropiques de méthane (CH₄).

- (a) et (b) Proportions moyennes (sur la décennie 2008-2017) des sources de méthane naturelles (en jaune) et anthropiques (en rose), et des puits de méthane (tous naturels). (D'après Saunois M. et al, 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 1561-1623).
 (c) Courbe d'évolution des concentrations du méthane atmosphérique (en parties par milliard molaires) entre 1985 et 2018. (D'après climatenexus.org).