

## Doc 1 et 2 Quelques données chiffrées sur les réservoirs carbonés

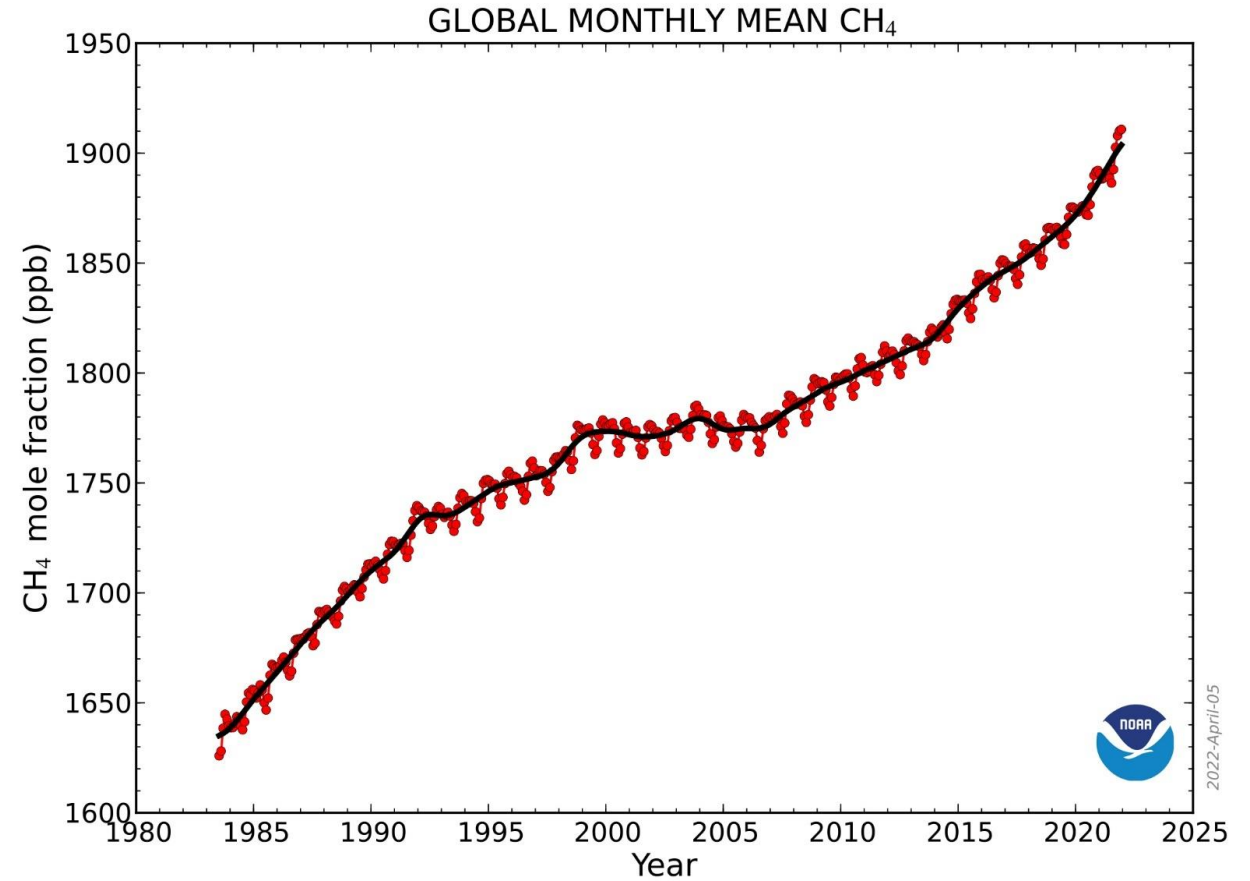
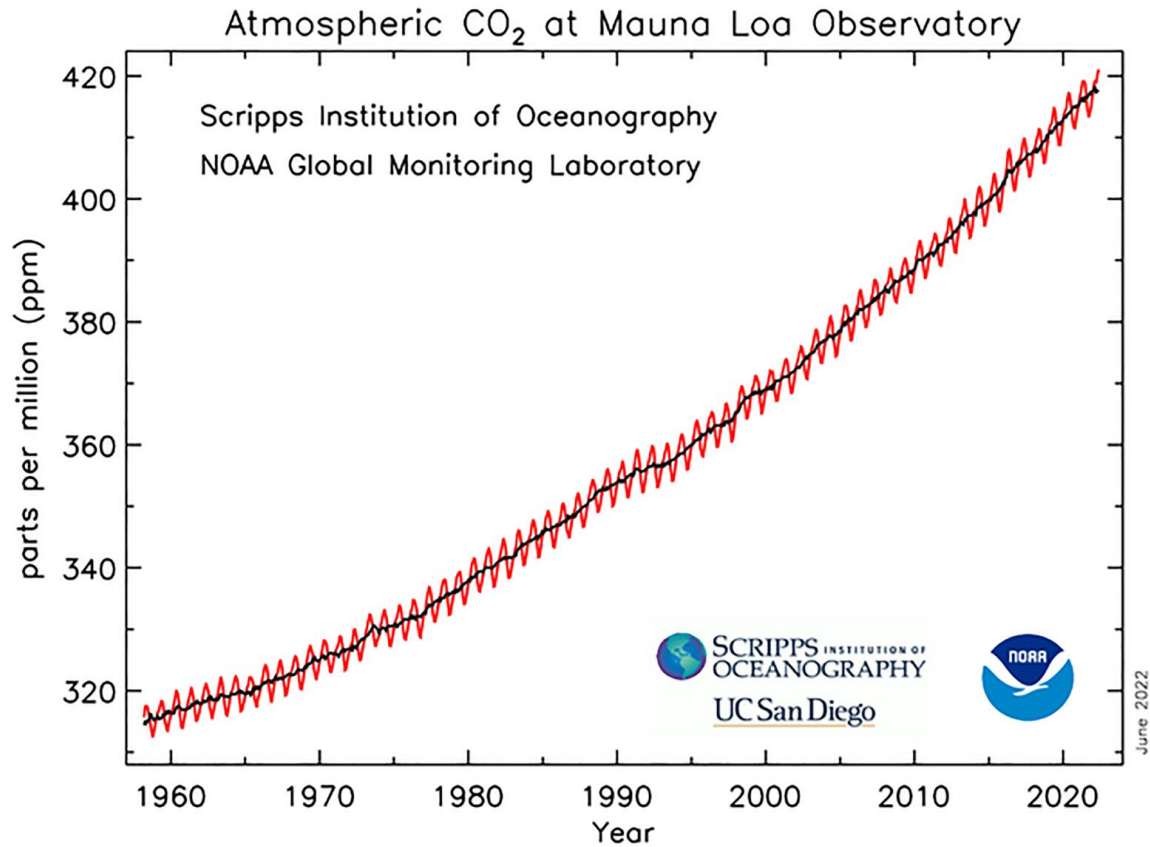
Formes du carbone	Quantité de carbone (en gigatonnes)	Proportion par rapport à l'ensemble du carbone stocké
Calcaire et roche (CaCO <sub>3</sub> )	78 000 000	99,9454 %
CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère ou dissout dans l'eau (non organique)	99 870 (dont 750 pour l'atmosphère et 38 120 pour l'océan)	0,0511 %
Sol, charbon, pétrole et débris marins	2 200	0,0028 %
Animaux/végétaux vivants	553 (dont 550 pour le terrestre et 3 pour l'océanique)	0,0007 %
<b>Total</b>	<b>78 042 623</b>	<b>100 %</b>

### 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 CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> (380 ppmv) Traces de CH <sub>4</sub> , CFC et CO	750		
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	Carbone inorganique dissous HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (# 93 %) CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (# 6 %) CO <sub>2</sub> (# 1 %)	39 000	+	
		Carbone organique dissous			
Croûte	solide : carbonates (carbone oxydé)	calcite, aragonite : CaCO <sub>3</sub> marbres : CaCO <sub>3</sub> dolomite : CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	80.10 <sup>6</sup>	150.10 <sup>6</sup>	+++
	solide ou liquide (carbone réduit)	Kérogènes, charbons, pétroles (matière organique fossile)	15.10 <sup>6</sup> à 20.10 <sup>6</sup>		++
	Nécromasse Clathrates (pergélisols, fonds marins) : 10 000 Autres roches : 50.10 <sup>6</sup>				
Manteau	Solide	Diamant, carbonates ?	10.10 <sup>6</sup> à 100.10 <sup>6</sup>	++++	

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



À noter pour CH<sub>4</sub> une forte hausse en 2020 (peu visible ici) car :

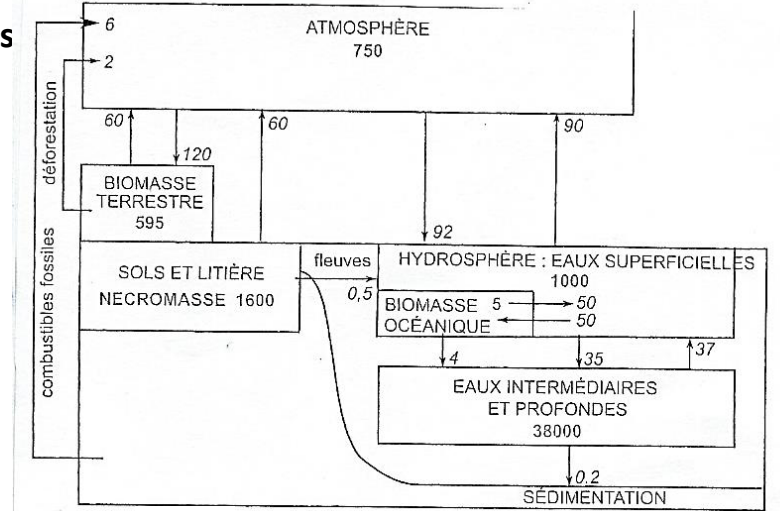
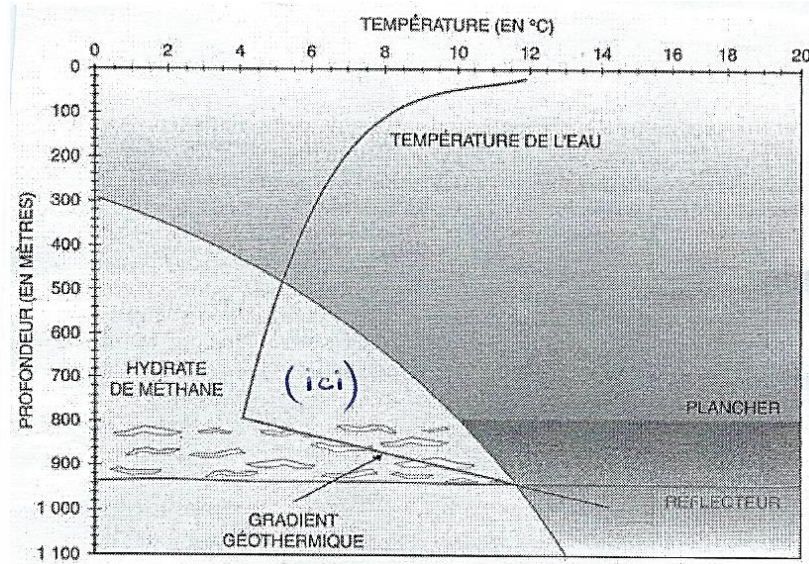
- le confinement mondial covid a limité les dégagements anthropiques de Nox, d'où moins de radicaux OH- destructeurs de méthane dans l'atmosphère
- le climat dans les zones humides productrices de méthane naturel a été plus humide et plus chaud, donc plus de production

## 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

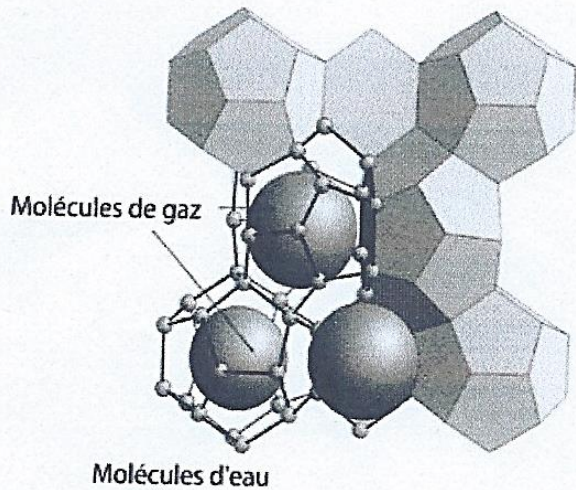
Tableau. 5 : tableau récapitulatif des différents biomasses en milieu terrestre et marin  
Les masses sont exprimées en Gtc  
(source : le cycle du carbone, Henri Jupin, hachette, 1996).

## Doc 8 Hydrates de méthane dans les sédiments des marges



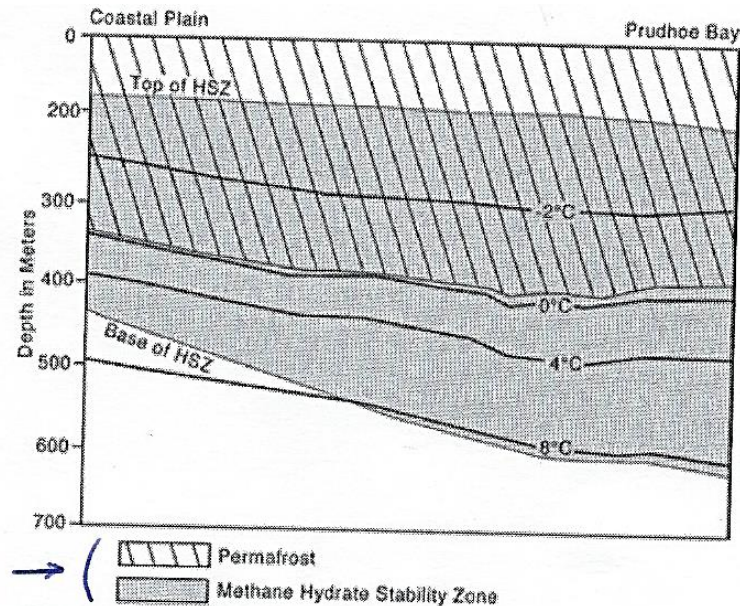
Quelques réservoirs et flux de carbone.  
Les flux anthropiques (utilisation des combustibles fossiles, déforestation) apparaissent sur la gauche. En noir les flux de carbone entre les réservoirs, en bleu la masse de carbone dans les réservoirs. Les chiffres sont donnés en Gigatonnes de carbone.

## Doc 6 Les hydrates de méthane

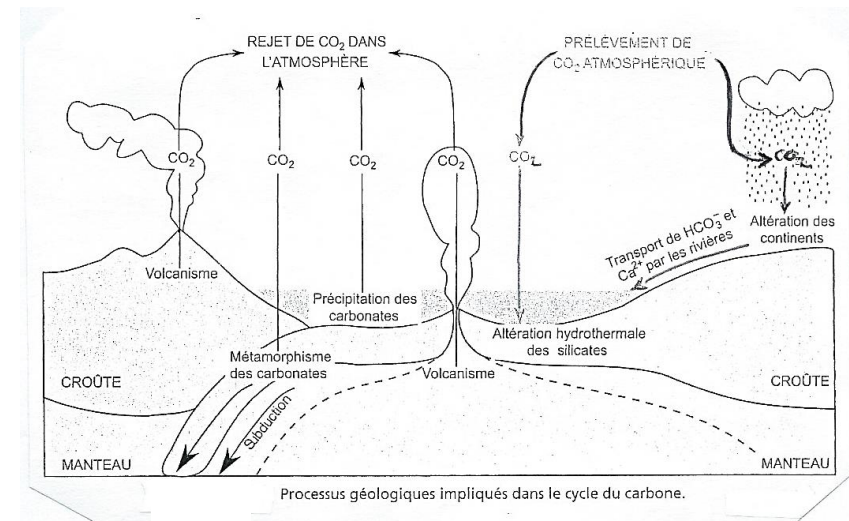


Structure d'hydrate de gaz de type I (d'après Suess, 2002)

## Doc 7 Méthane et permafrost



## Doc 9 et 10 Quelques valeurs de flux



# 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 <sub>2</sub> (99 %) + CH <sub>4</sub> , 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 <sub>3</sub> <sup>-</sup> - 6 % CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> - 1 % CO <sub>2</sub>		
[Pergélisols]	Solide	Clathrates	10 000 GtC ?	?
Croûte terrestre	Solide (liquide pour pétroles)	Roches carbonatées → calcite, aragonite, dolomite	80 • 10 <sup>6</sup> GtC	De l'ordre du Ma à la centaine de Ma
		MO fossile (dont roches carbonées) : charbons, pétroles, kérogènes...	15 à 20 • 10 <sup>6</sup> GtC	
		Roches silicatées	50 • 10 <sup>6</sup> GtC	
[Manteau et noyau]	Solide	C dispersé dans les réseaux cristallins (200 ppm)	10 à 100 • 10 <sup>6</sup> 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.

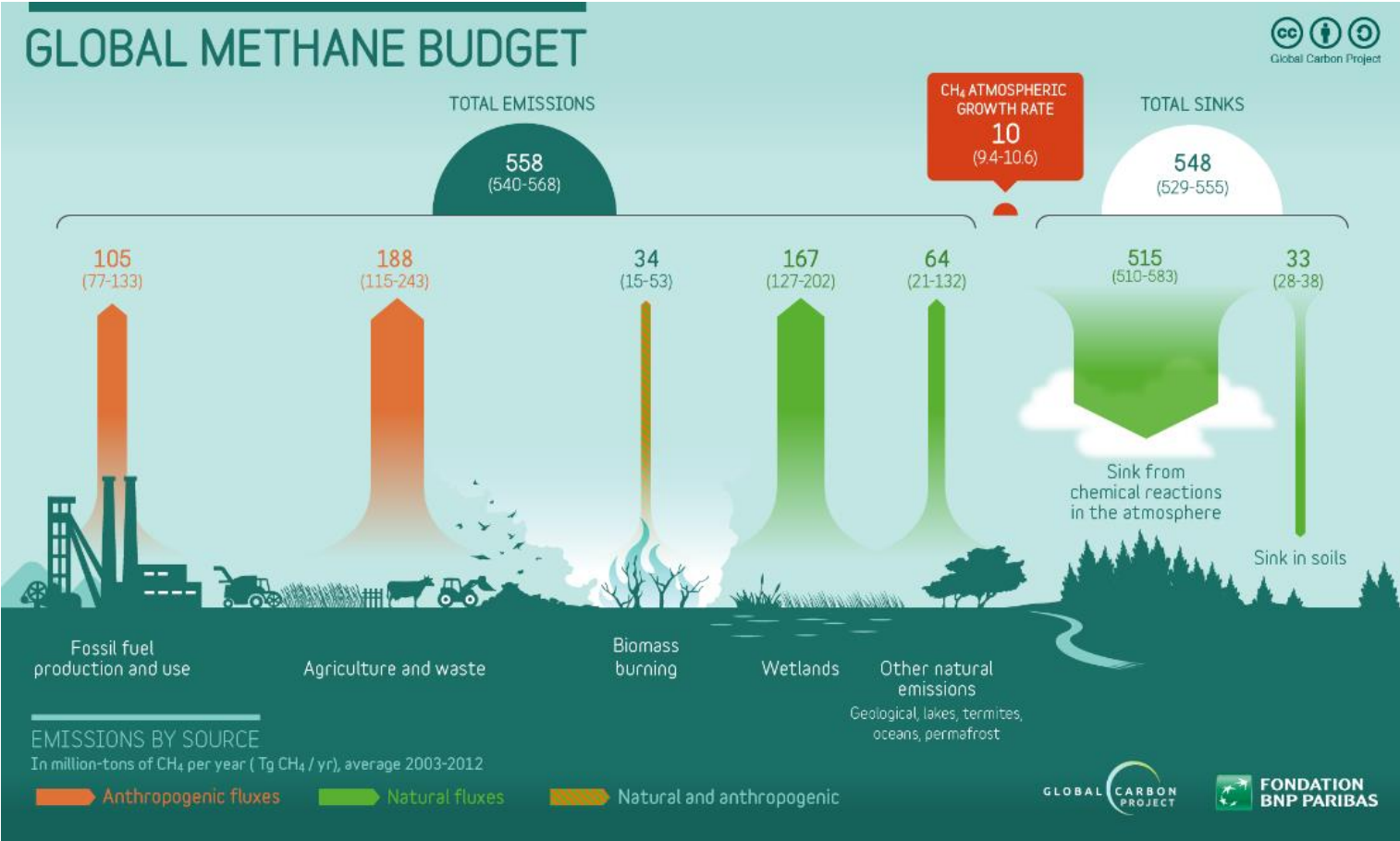
**Box 6.1, Table 1 |** The main natural processes that remove CO<sub>2</sub> consecutive to a large emission pulse to the atmosphere, their atmospheric CO<sub>2</sub> adjustment time scales, and main (bio)chemical reactions involved.

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

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



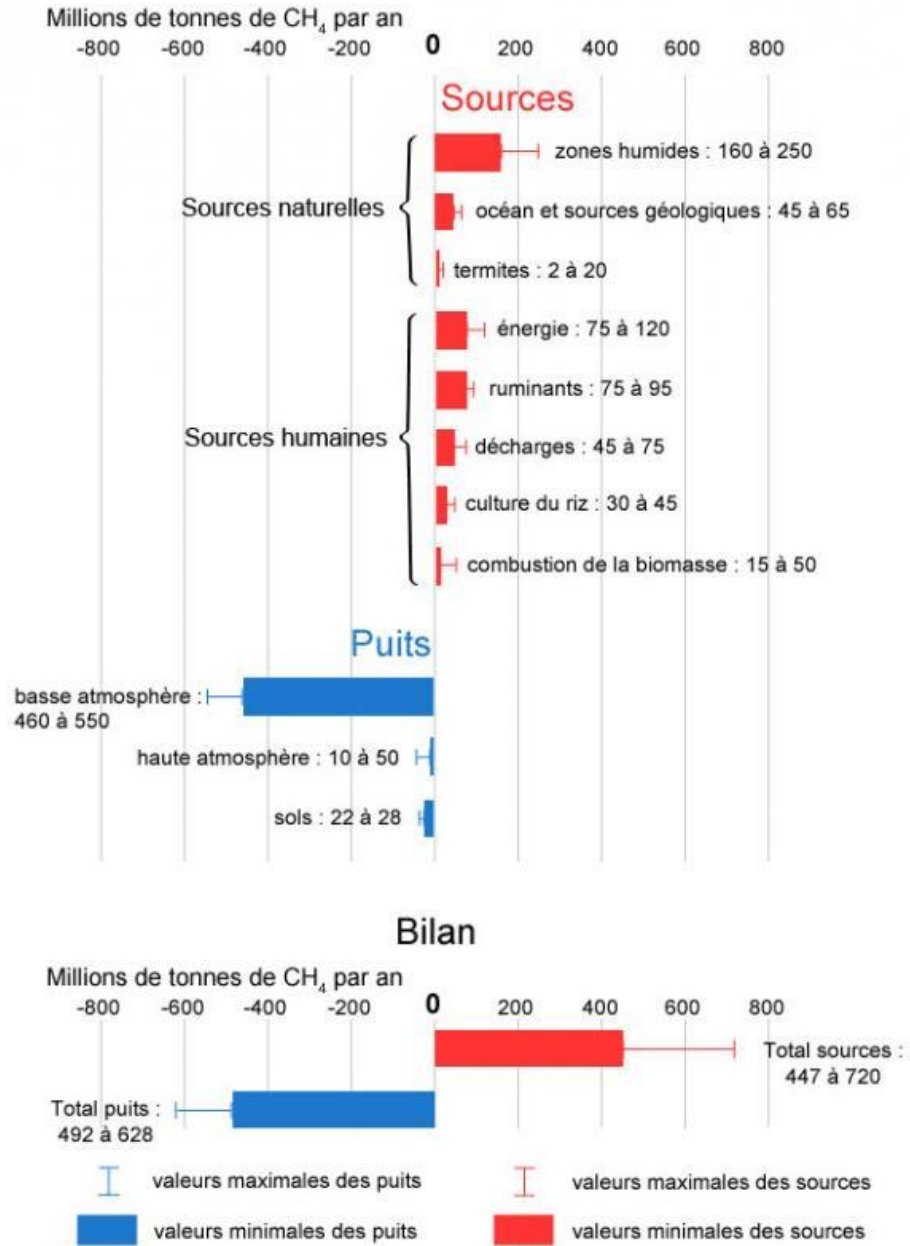
Espèce	Production de méthane (kg/an)
<b>Ruminant</b>	
Vache laitière	90
Bovin en croissance	65
Mouton et chèvre	8
<b>Non ruminant</b>	
Cheval	18
Porc	1
Volaille	< 0,1

Source : Sauvart (1993).

<b>Sources naturelles</b>	
- Océans, lacs et terres humides	255 Tg
- Termites	10 Tg
<b>Total des sources naturelles</b>	<b>265 Tg</b>
<b>Sources anthropogéniques</b>	
- 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
<b>Total des sources anthropogéniques</b>	<b>425 Tg</b>
<b>Total des émissions</b>	<b>690 Tg</b>
<b>Puits de méthane</b>	
- Sols	- 40 Tg
- Troposphère (oxydation du radical OH)	- 510 Tg
- Réactions dans la stratosphère	- 50 Tg
<b>Total des puits</b>	<b>- 600 Tg</b>
<b>Bilan estimé</b>	<b>+ 90 Tg</b>

### 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 CO<sub>2</sub>

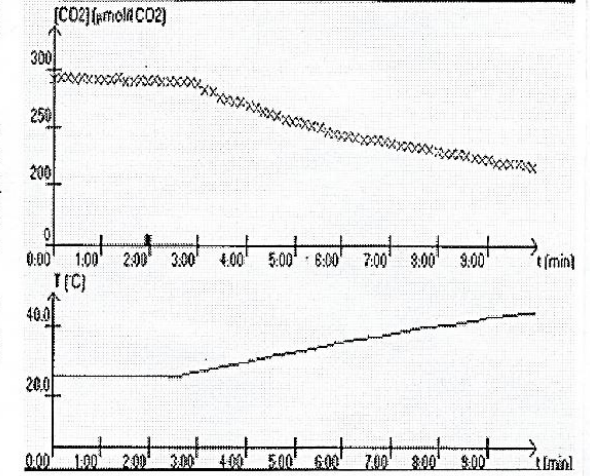
(source : d'après BORDAS spécialité TS)

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 CO<sub>2</sub> entre l'air et l'eau.

### ■ PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.

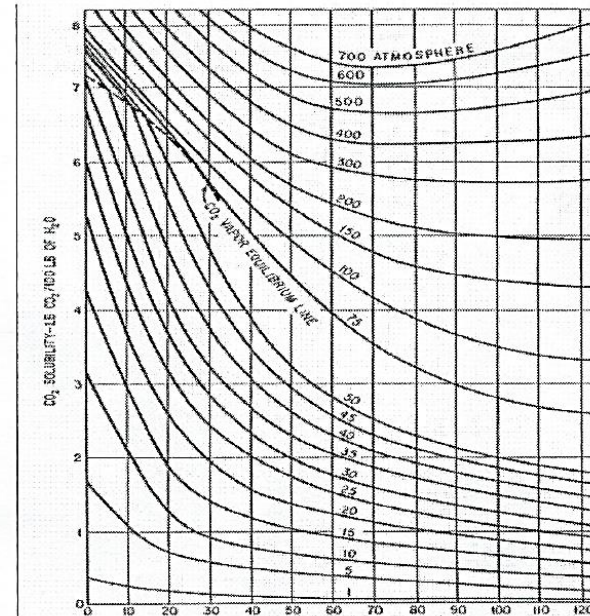
- Un cristalliseur rempli à moitié d'une eau bouillie (elle ne contient donc plus aucun gaz dissous) est fermé hermétiquement puis placé sur une plaque chauffante. Deux capteurs reliés à un dispositif d'ExAO sont placés dans l'eau : un thermomètre et une sonde électronique permettent de suivre l'évolution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

### ■ RÉSULTATS



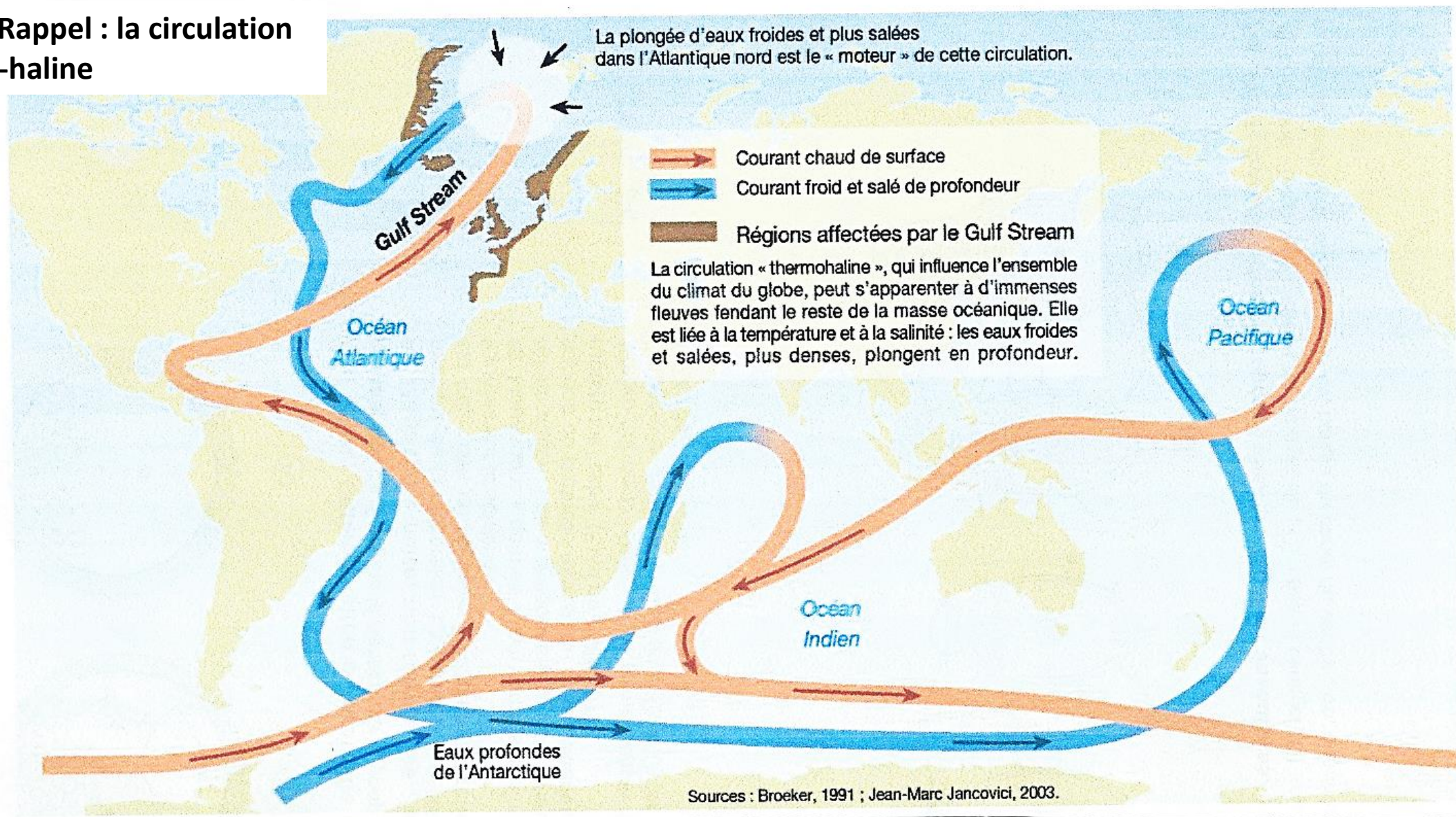
## Docs 16 Autour de la solubilité du CO<sub>2</sub>

Solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau en fonction de la température en °C (Khol et Nielsen, 1997)



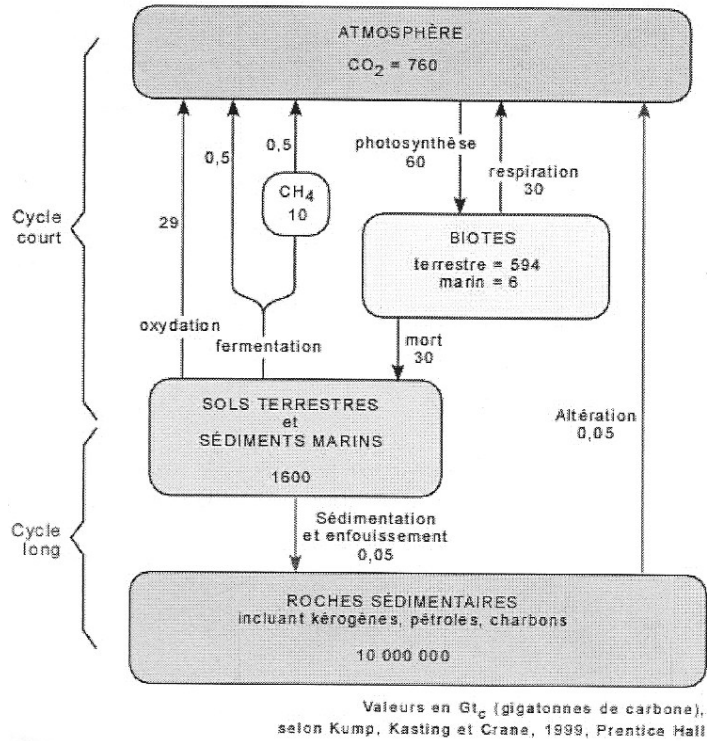
(les courants de surface ont été simplifiés pour ne garder que les lents déplacements globaux en rapport avec la circulation thermohaline)

## Doc 17 Rappel : la circulation thermo-haline

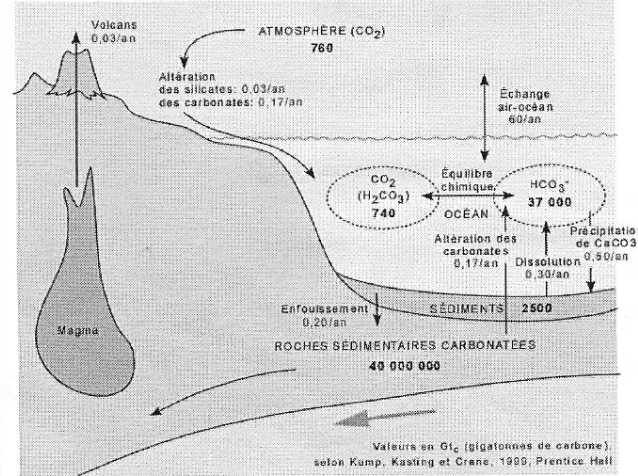


# Docs 18 et 19 Cycle court biologique et cycle long géologique

## CYCLE DU CARBONE ORGANIQUE

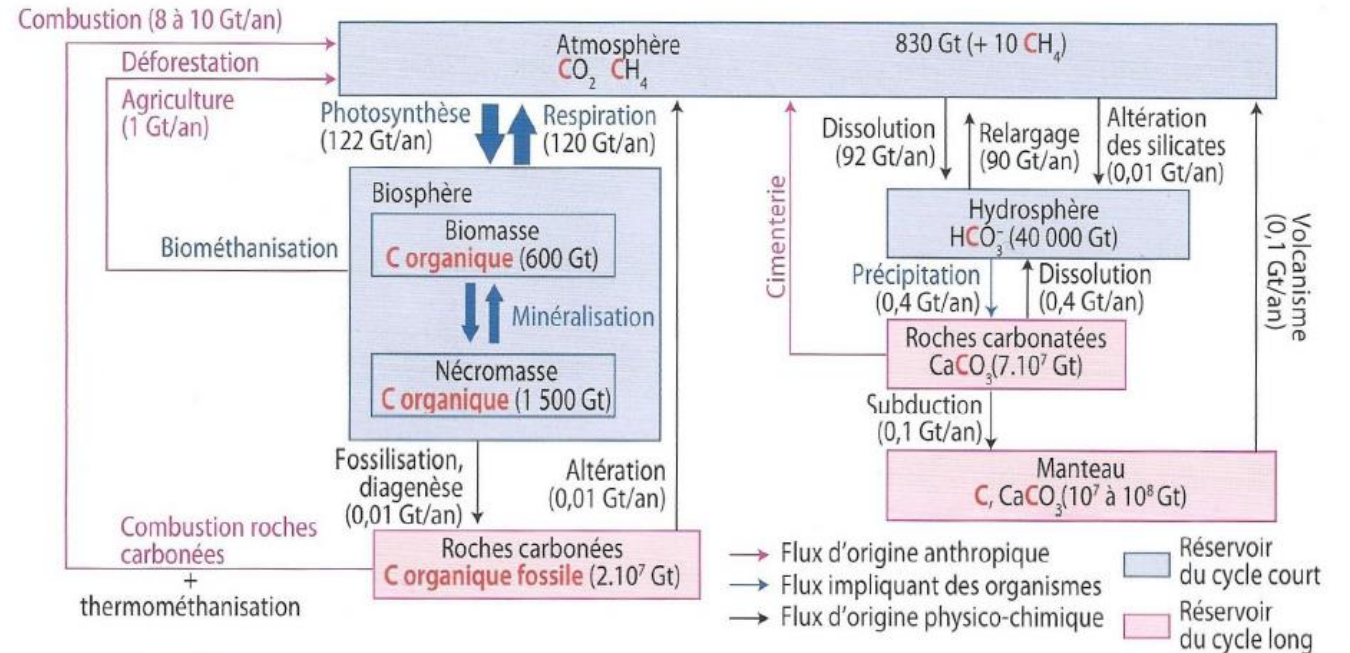


## CYCLE DU CARBONE INORGANIQUE



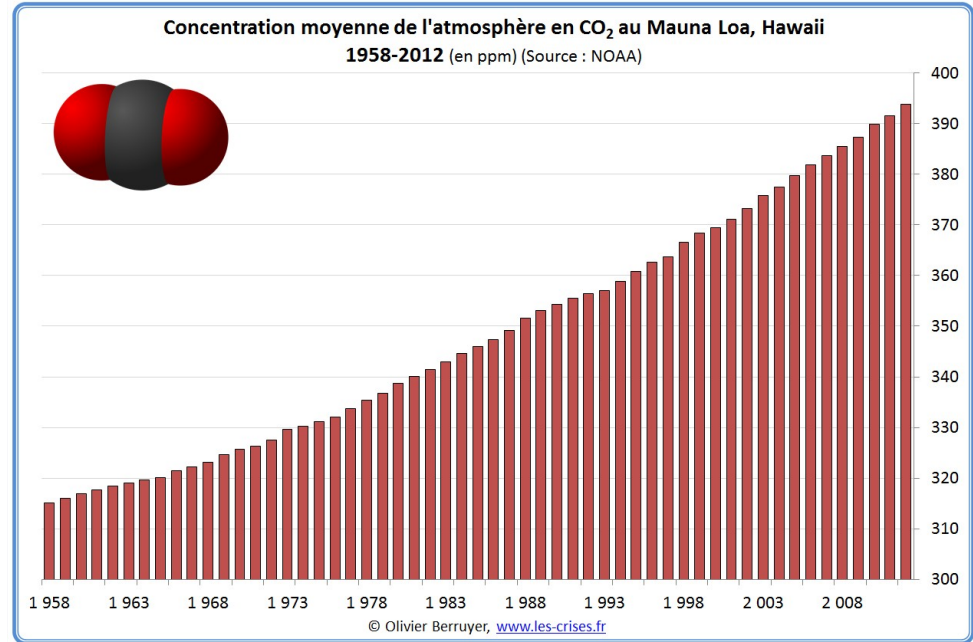
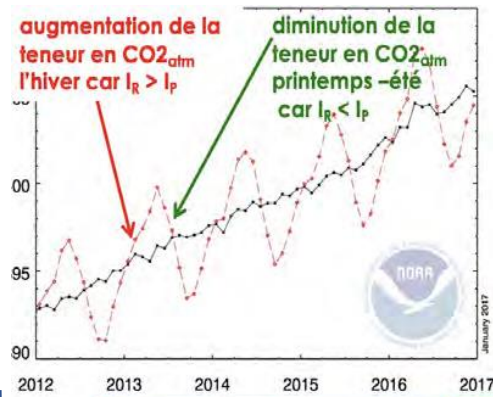
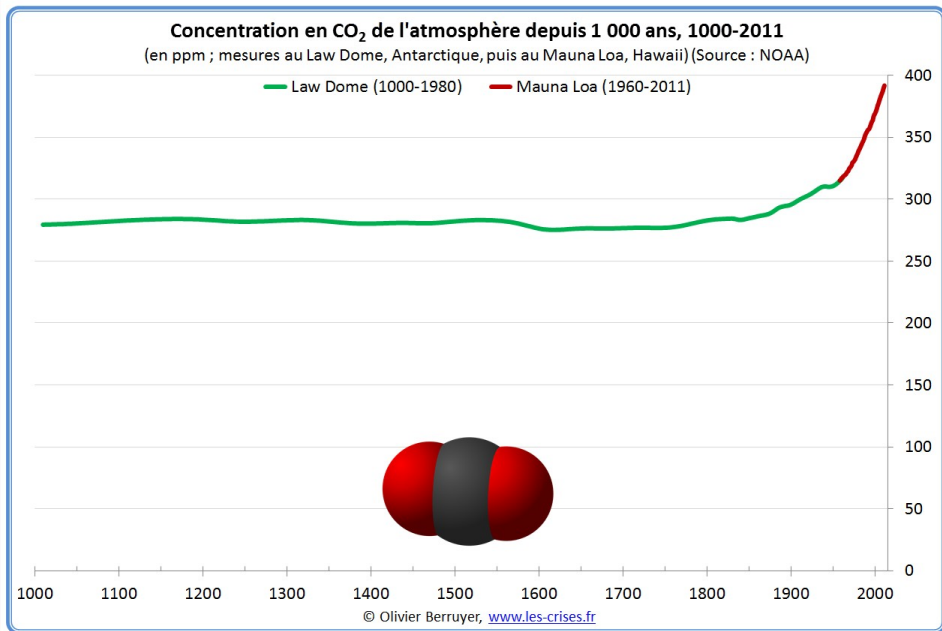
## Docs 20 Un schéma de cycle (parmi d'autres)

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

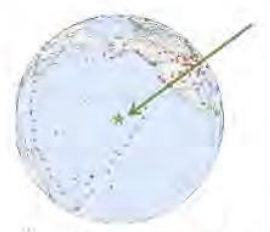
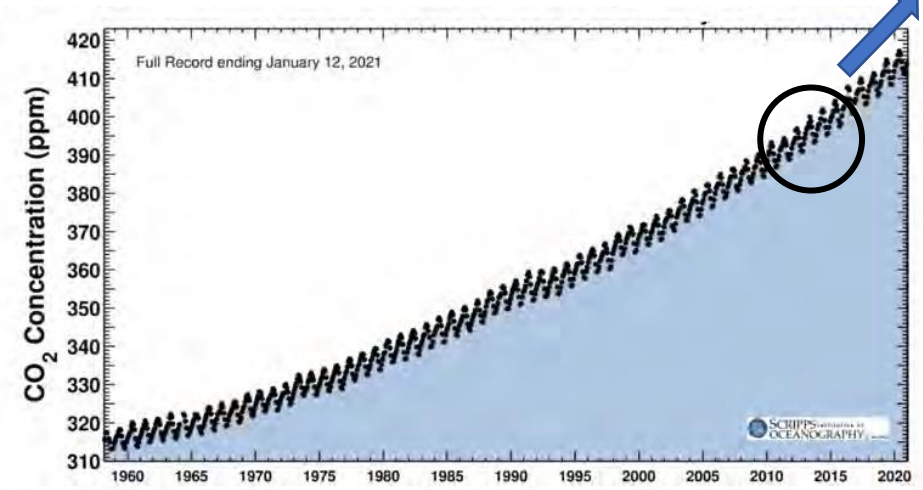






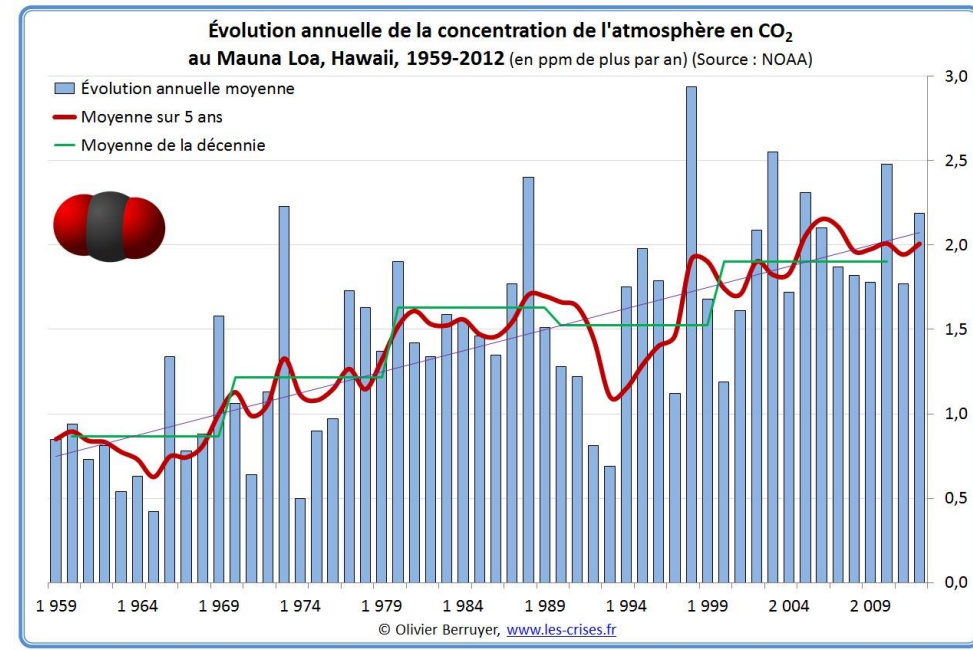


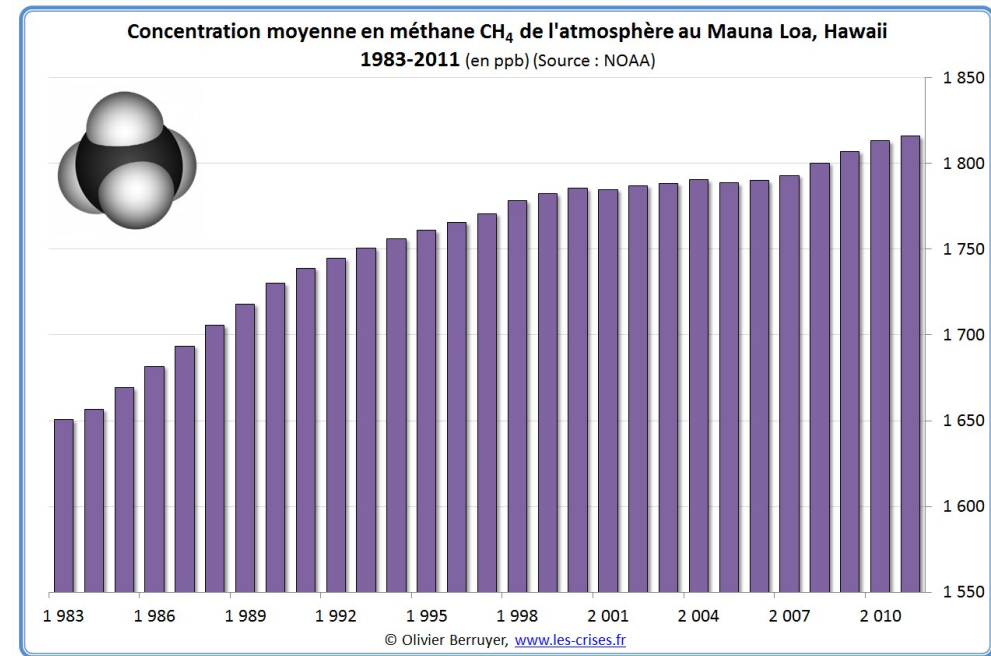
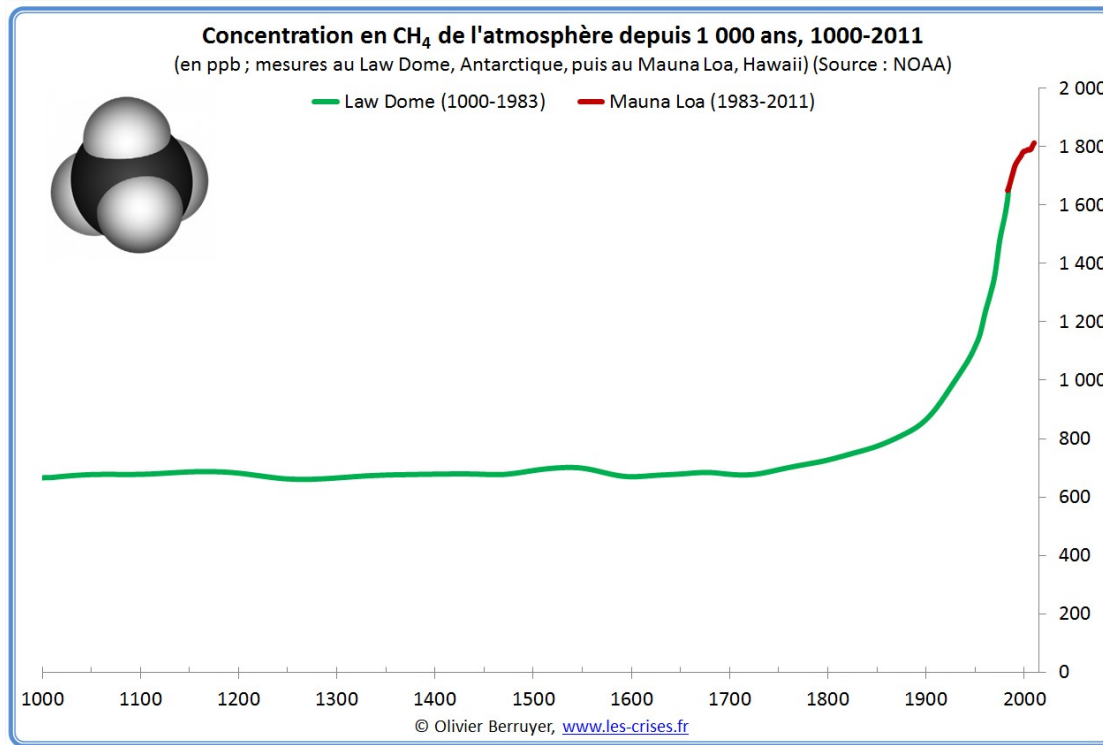
## Doc 22 Le CO<sub>2</sub> : période historique et contemporaine



**Localisation de Mauna Loa**

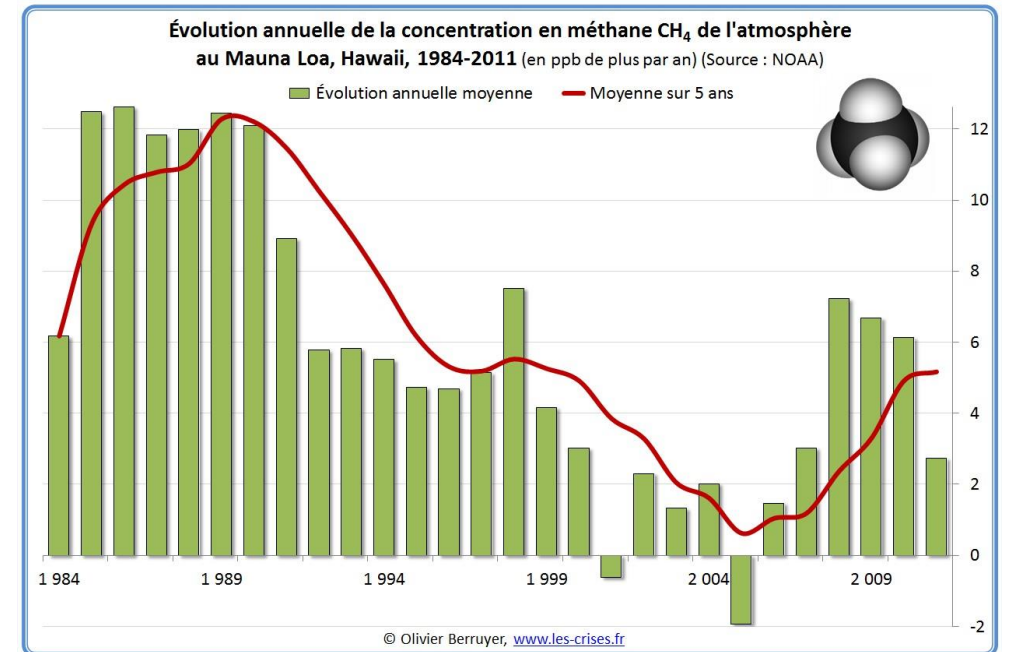
**Taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en date du 12/01/2021 mesuré à partir de 1958. Mesuré à Mauna Loa (Hawaï) - Scripps Institution of Oceanography**



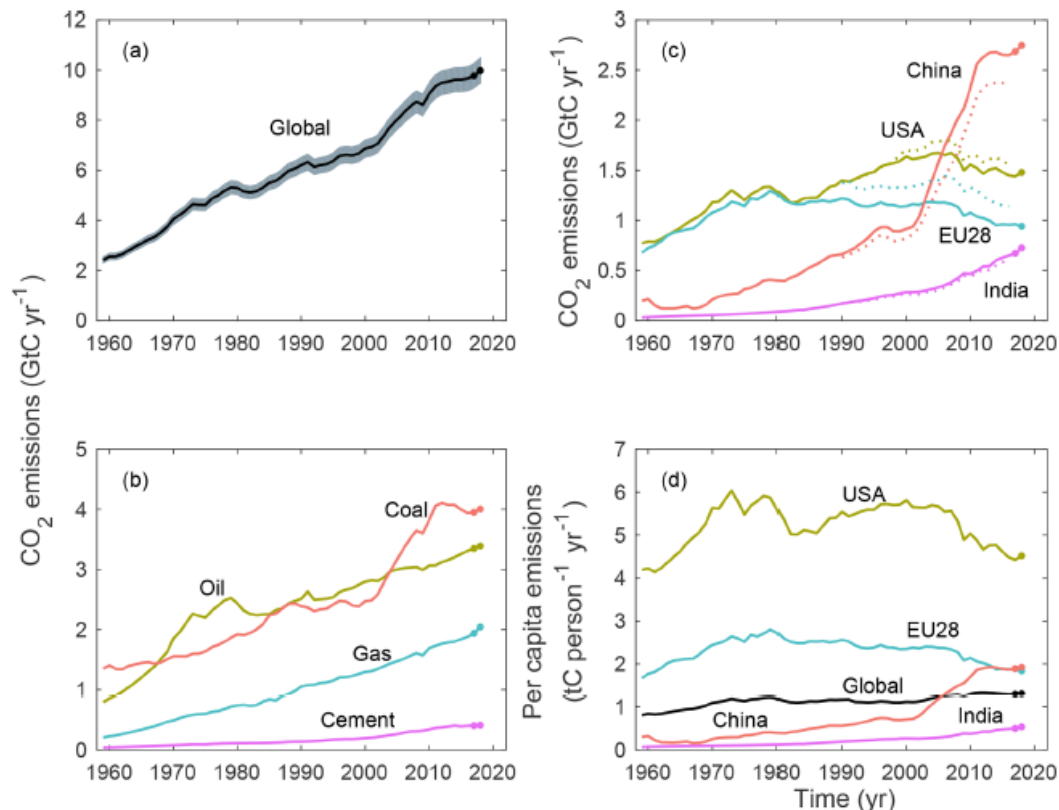


## Doc 23 Le méthane : période historique et contemporaine

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

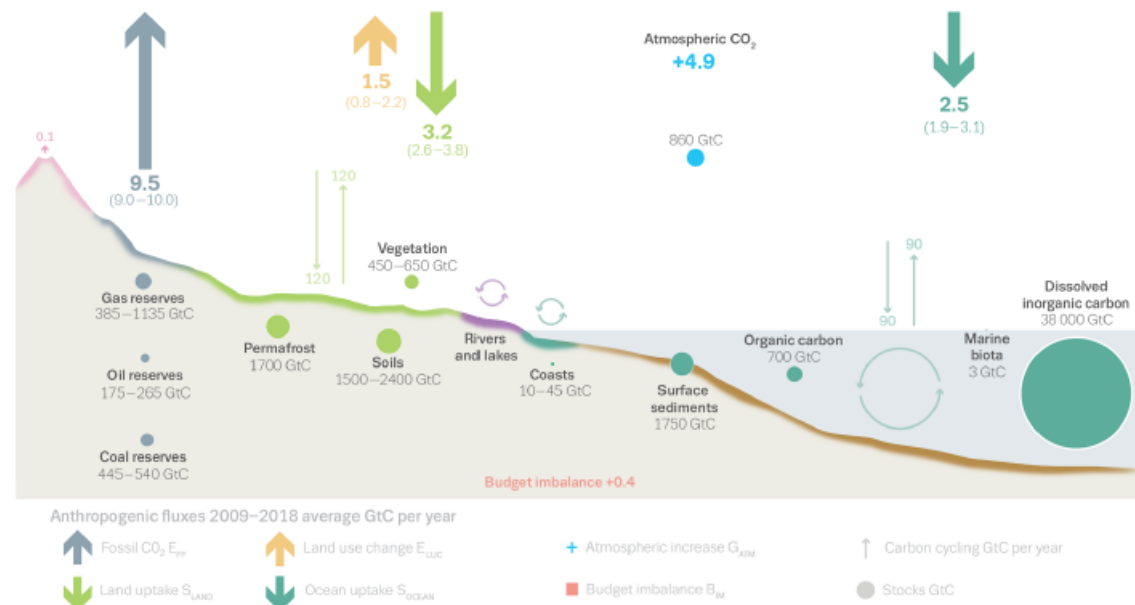


Les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> (mesurées en tonnes de carbone sur ces graphiques) dues aux énergies fossiles atteignent 36,8 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2019. Le graphique en bas à gauche montre la prépondérance du charbon dans les émissions. Celui en haut à gauche comprend 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

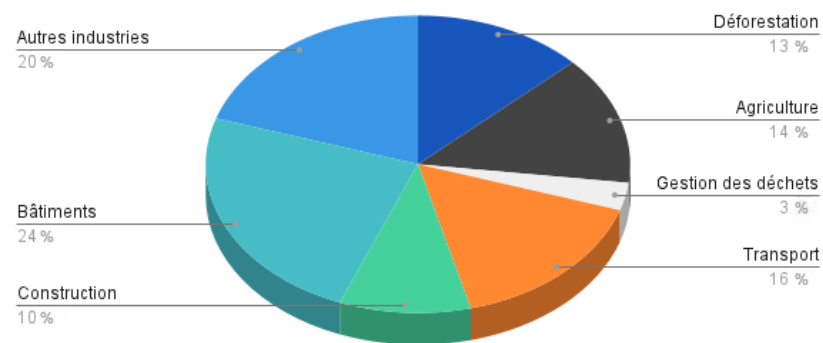
### Doc 26



**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 CO<sub>2</sub> growth rate is very small ( $\pm 0.02$  GtC yr<sup>-1</sup>) 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<sup>-1</sup> to account for the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> 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

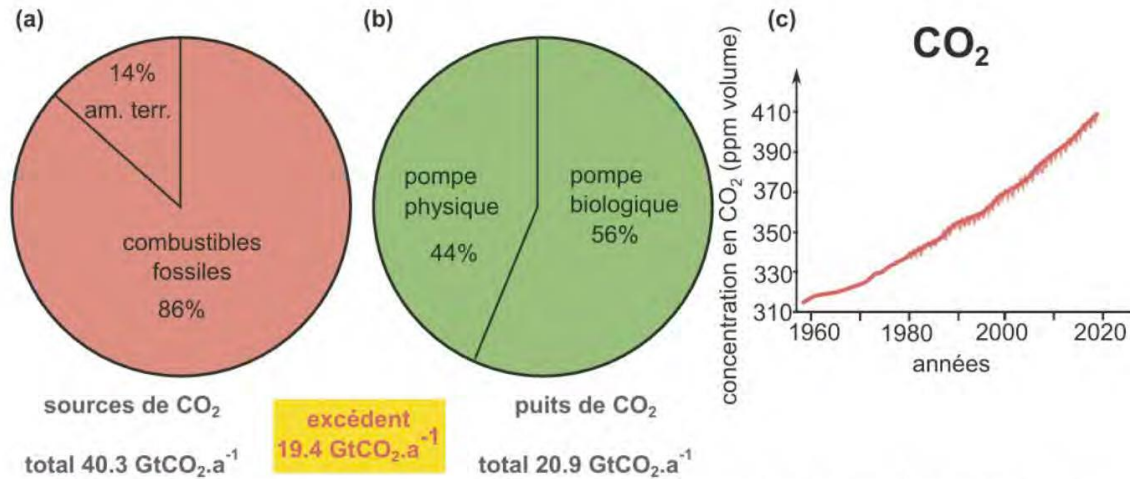
## Émissions GES en fonction du secteur industriel



## 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 CO<sub>2</sub>



**Figure 24.4** Données relatives aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

**(a)** Proportions des sources de CO<sub>2</sub> anthropique (décennie 2009-2018). am. terr. : production de CO<sub>2</sub> liée à l'aménagement du territoire.

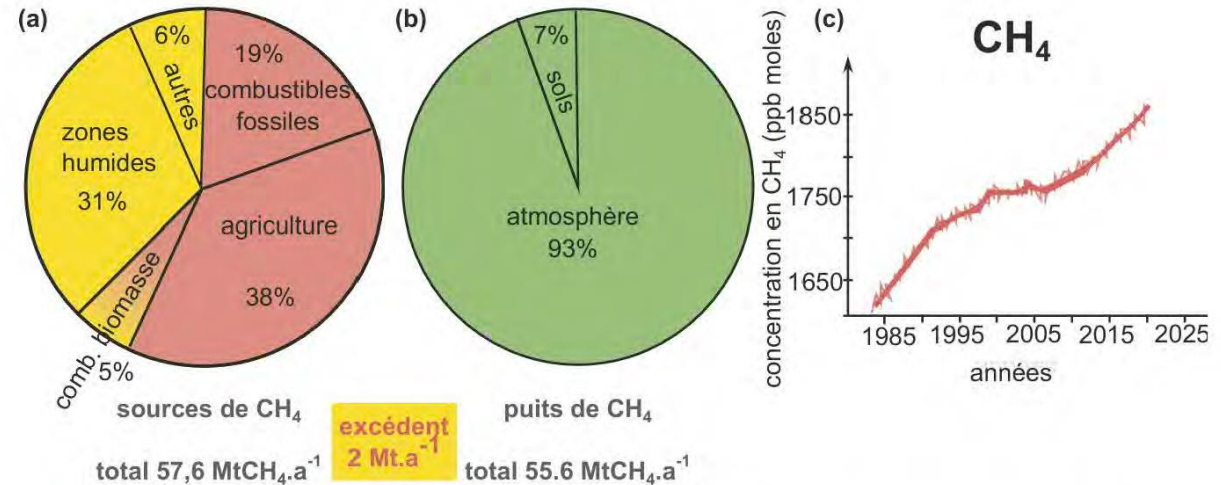
**(b)** Proportions moyennes des puits de CO<sub>2</sub> (décennie 2009-2018).

**(c)** Courbe d'évolution de la concentration du CO<sub>2</sub> 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 GtCO<sub>2</sub>/an (multiplier par 3,6 les valeurs en GtC/an alors comme ici)*

#### REPARTITION DES EMISSIONS NATURELLES ET ANTHROPIQUES DE METHANE CH<sub>4</sub>



**Figure 24.3** Données relatives aux émissions naturelles et anthropiques de méthane (CH<sub>4</sub>).

**(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).