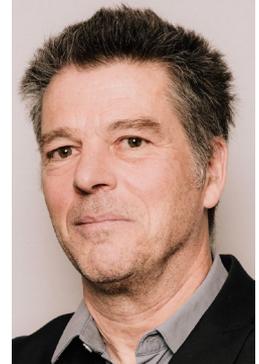
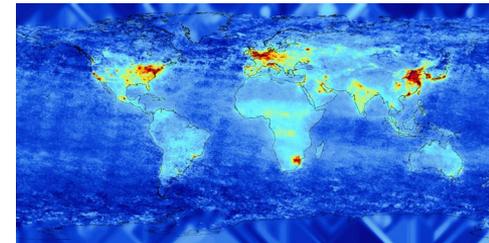
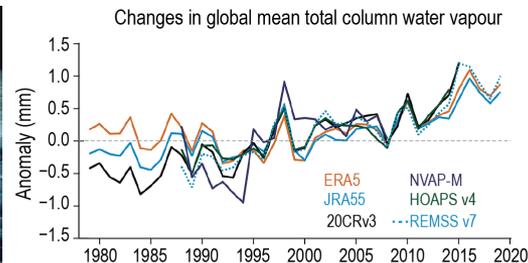
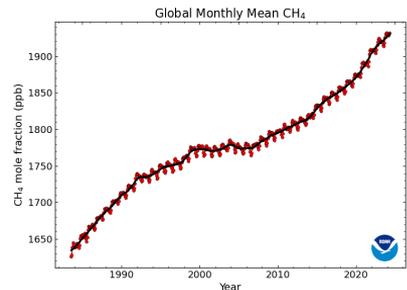


## Chaire *Avenir Commun Durable*

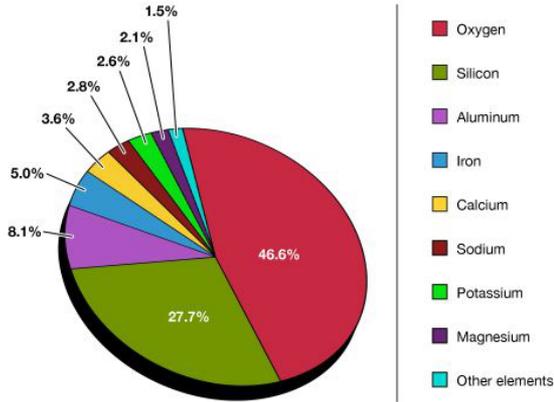
# Le cycle perturbé du Carbone



François-Marie  
Bréon



Composition of Earth's Crust



Source: United States Geological Survey

© Encyclopædia Britannica, Inc.

Largement minoritaire dans la  
croûte terrestre

Dominant dans le vivant

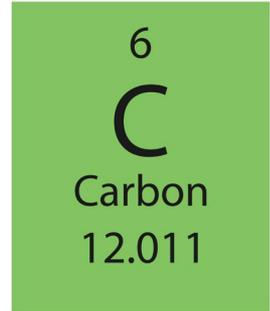
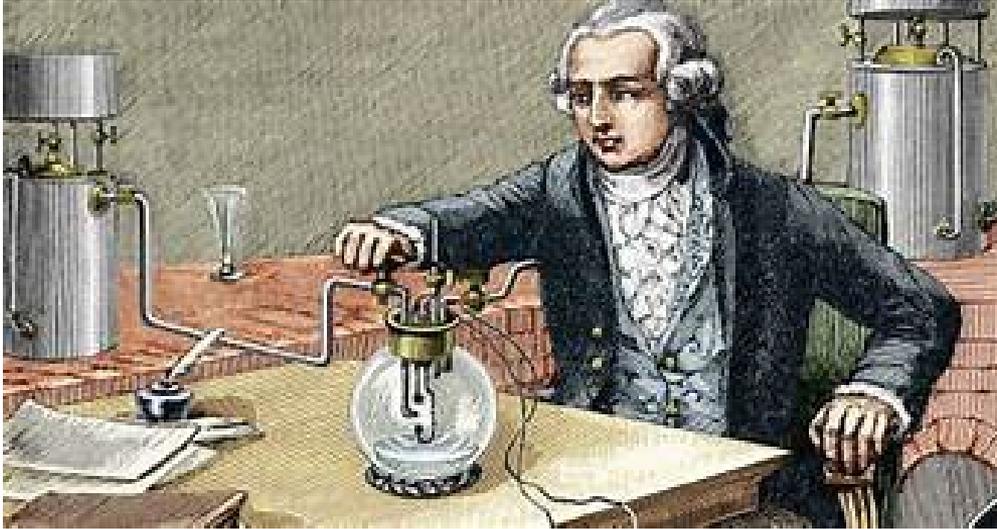


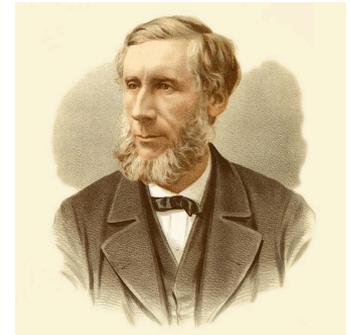
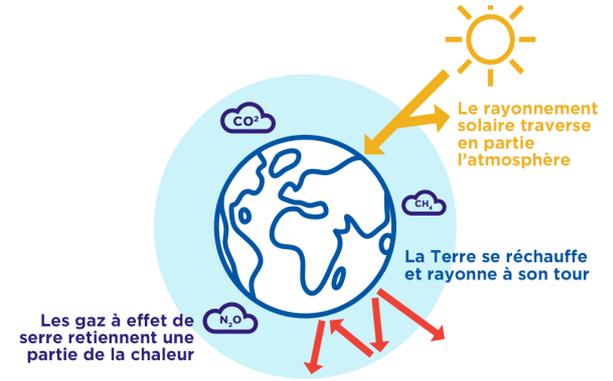
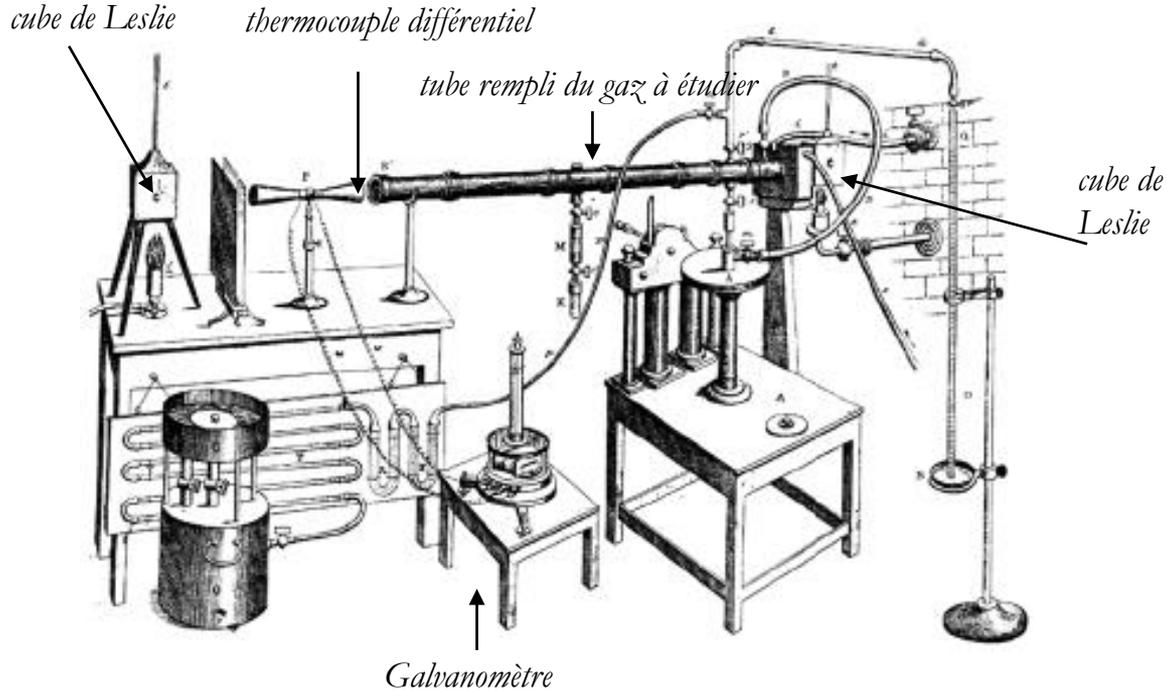
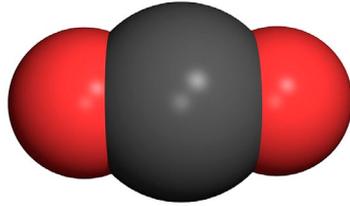
TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

1 H Hydrogène																	2 He Hélium														
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Neon														
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon														
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton														
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon														
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europée	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessé	118 Og Oganesson														

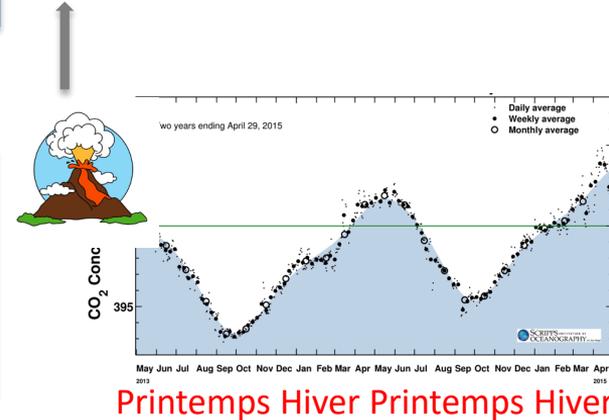
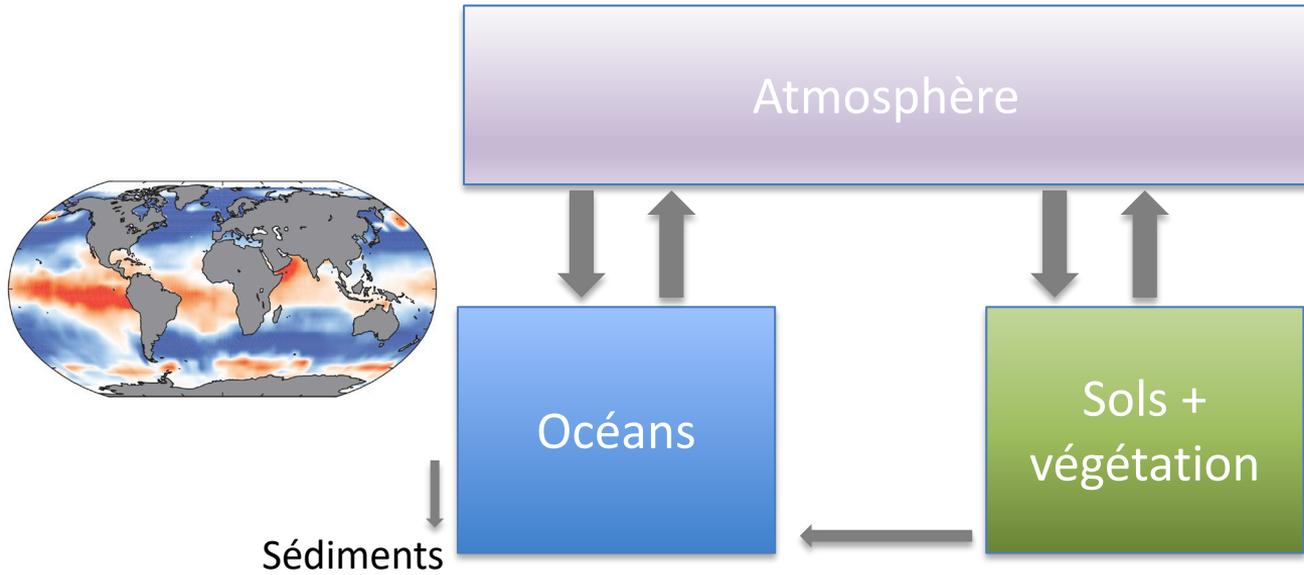
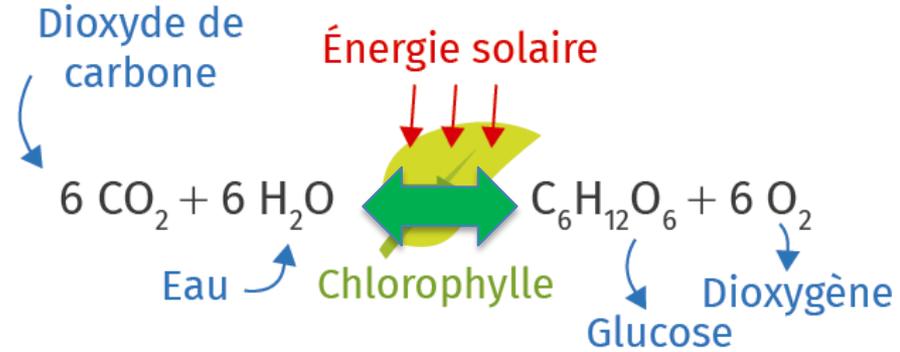
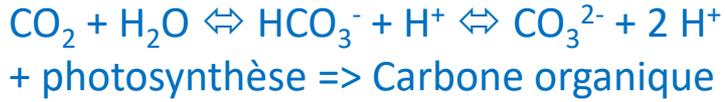


1743-1794



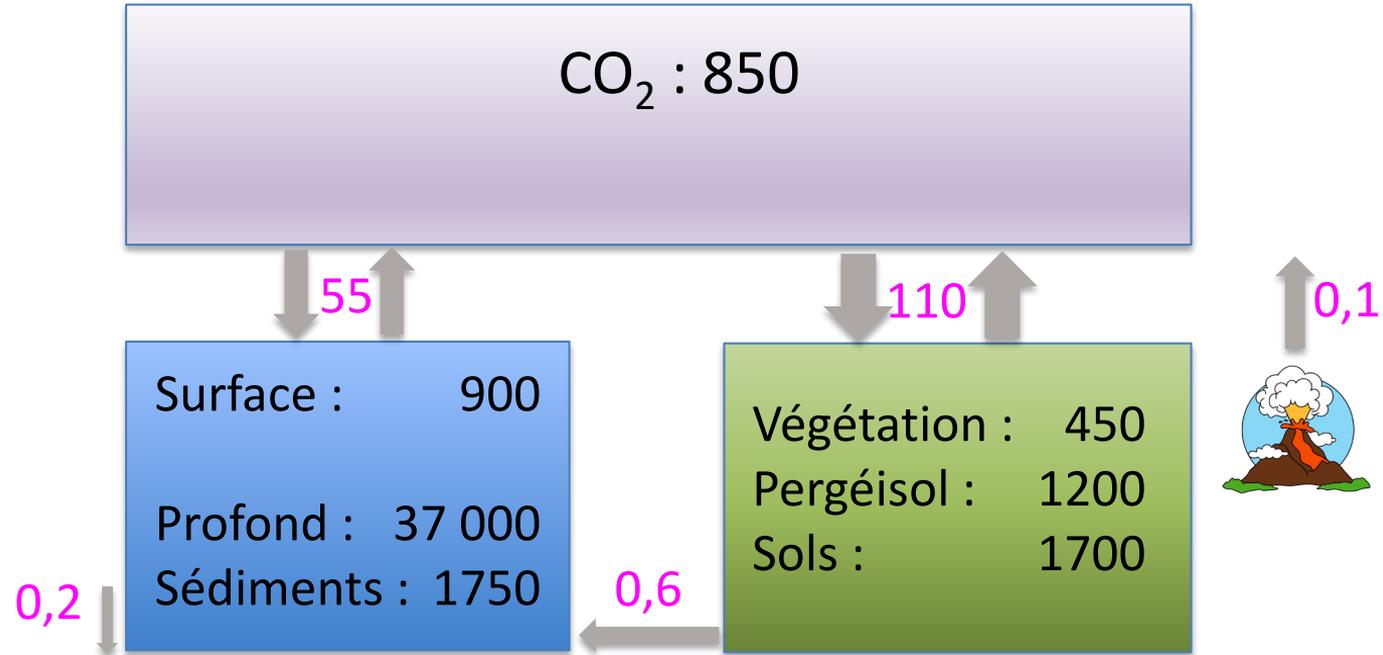


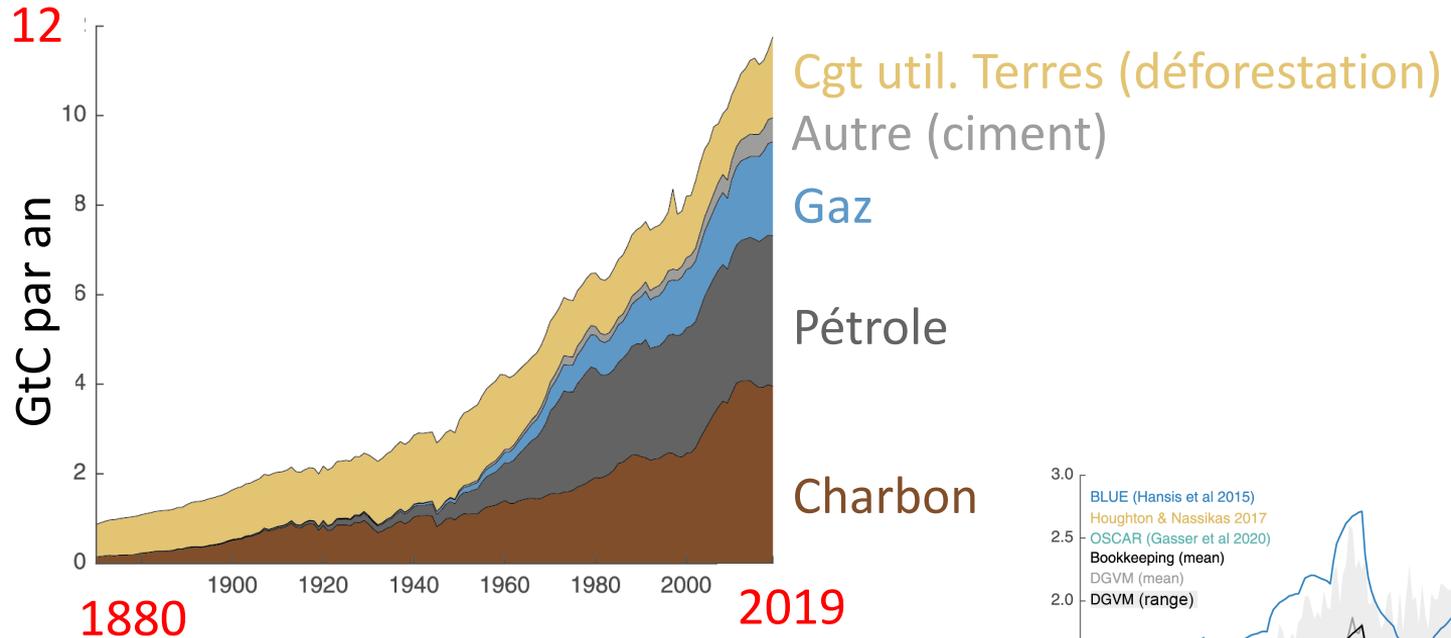
John Tyndall  
1820-1893



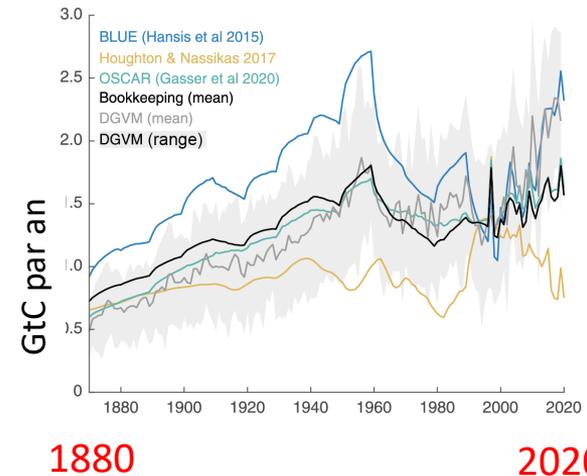
Stocks en GtC. 1 GtC = 1 milliard de tonnes de Carbone (Masse d'1 km<sup>3</sup> d'eau)

Flux en GtC/an.



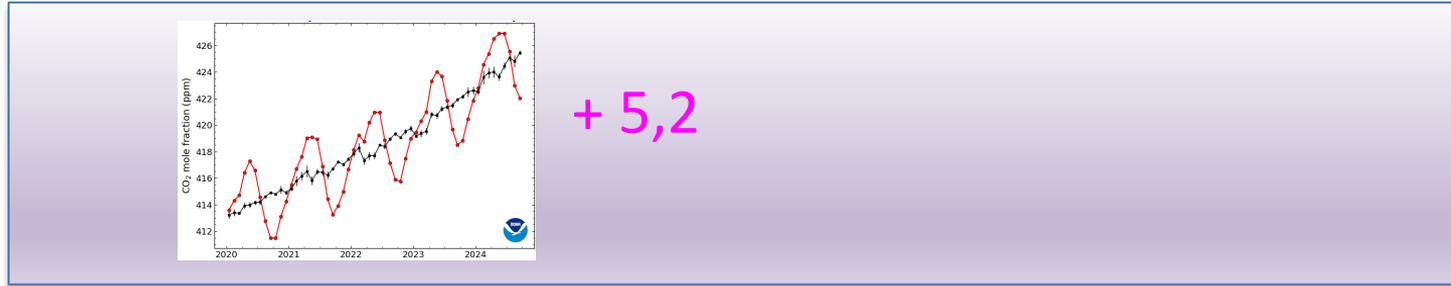


Les incertitudes sur les émissions liées au changement d'utilisation des terres sont importantes



Flux ou variation de stock en GtC par an

(2012-2022)



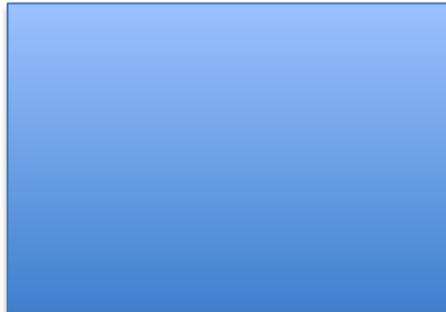
9,6



1,3



2,8



Déséquilibre des pression  
partielles de CO<sub>2</sub>



5,7

?



3,4

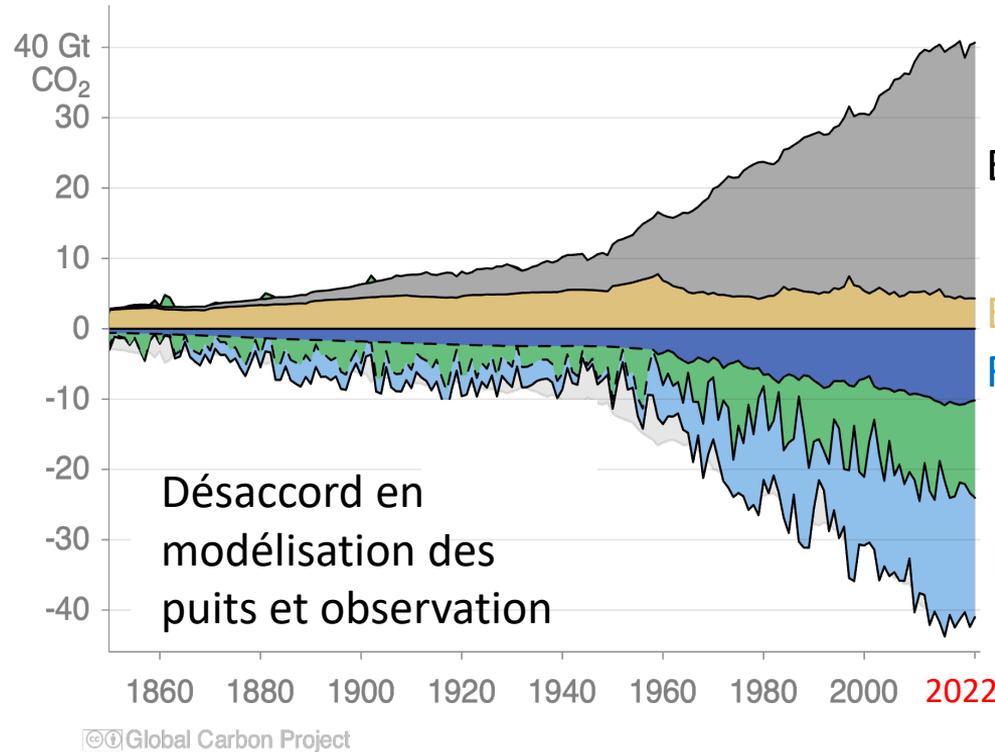


La végétation apprécie  
l'augmentation du [CO<sub>2</sub>]

	5,2
9,6	+2,8
+1,3	+3,4
<u>=10,9</u>	<u>=11,4</u>

0,5 ? Ecart entre sources  
et estimations des puits





Emissions Fossiles

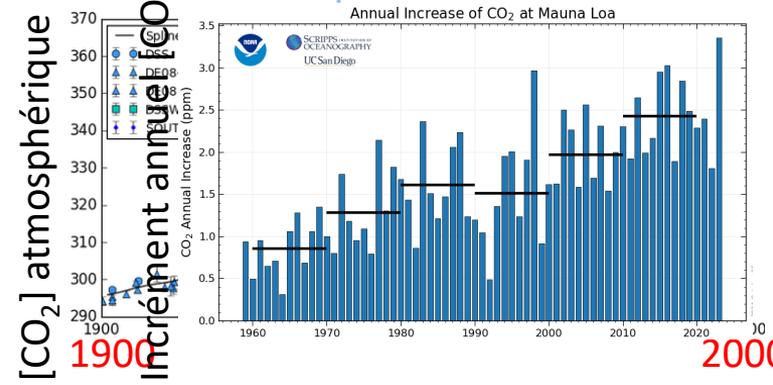
Emissions Cgt util. terres

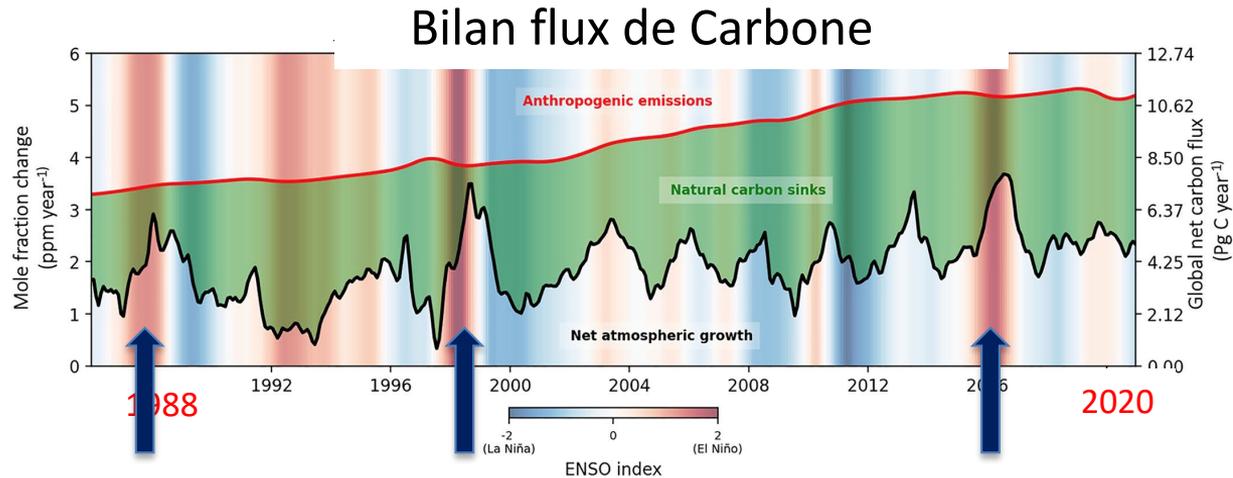
Flux vers l'océan

Flux vers les terres/veget

Reste dans l'atmosphère

Croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique faible dans les années 40-50, pour des raisons aujourd'hui inexplicables



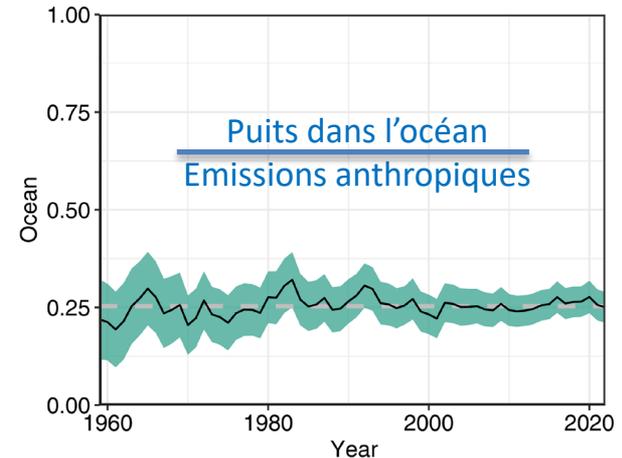


**Emissions**  
**Puits (océans+ terres)**  
**Croissance dans l'atmosphère**

Le reste dans l'atmosphère est particulièrement important pendant les périodes de fort El Niño

Les flux terrestres sont variables d'une année sur l'autre.  
Le flux net vers l'océan est plus stable.

Le flux net vers l'océan reste à  $\approx 25\%$  des émissions sur 60 ans alors que les émissions ont plus que doublé !

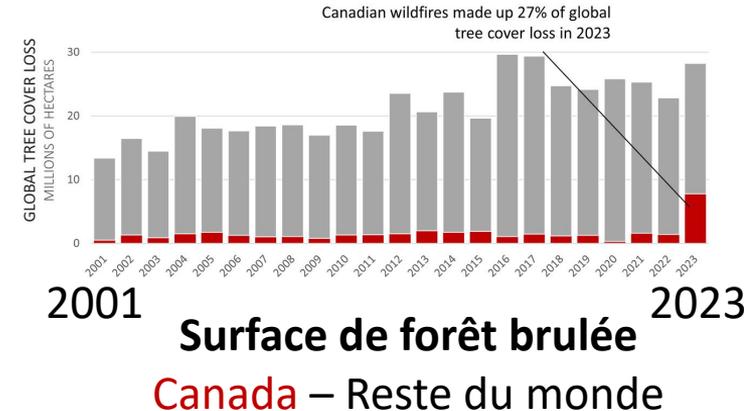
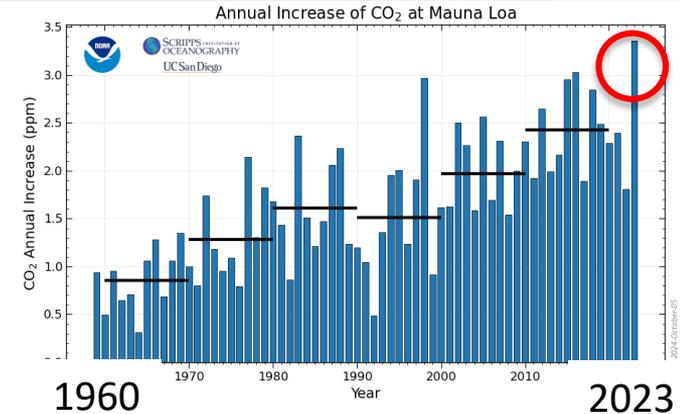
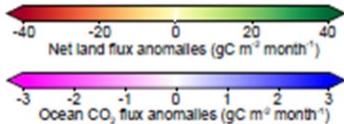
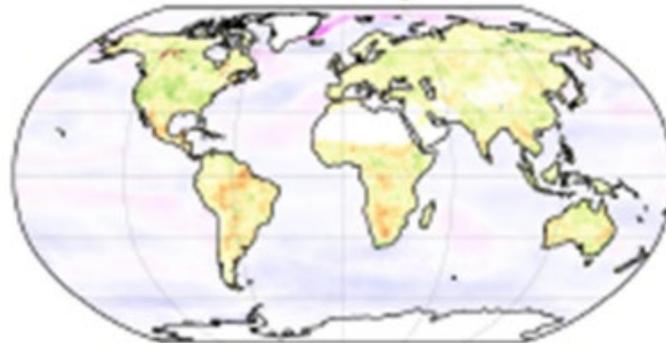


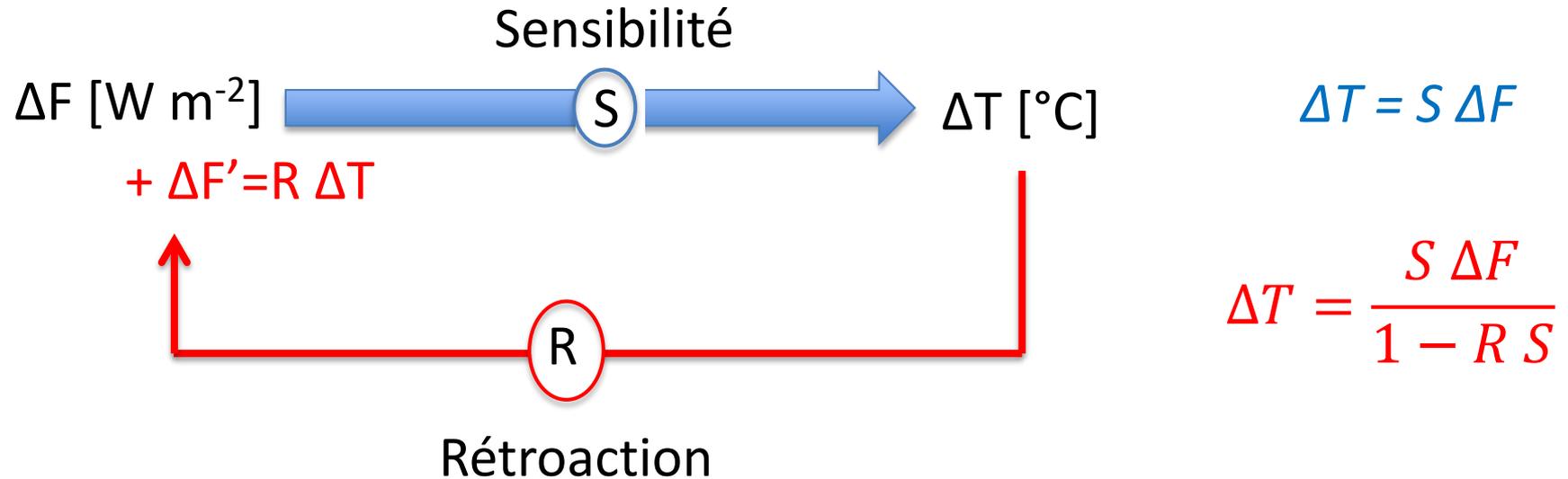
2023, année El Niño

Taux de croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique  
exceptionnellement élevé

Causes identifiées :

- Perte de Carbone en Amazonie
- Incendies au Canada
- Réduction du puits de Carbone du fait des températures élevées





La rétroaction peut être positive ou négative. Elle va amplifier, ou limiter l'effet initial

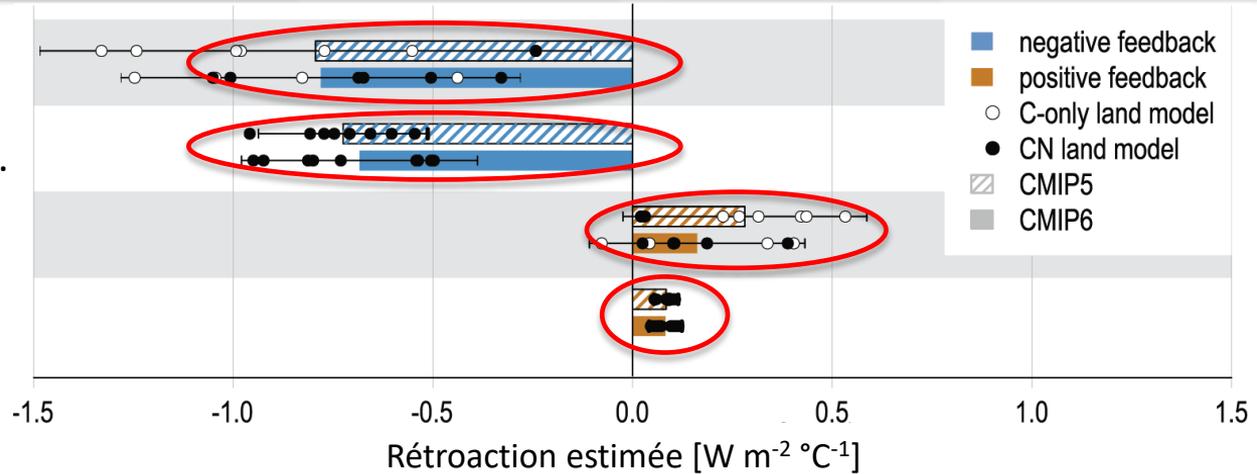
Exemple : Rétroaction Climat-neige, vapeur d'eau, nuages

Rétro. Terre-CO<sub>2</sub> atmosph.

Rétro. Océan- CO<sub>2</sub> atmosph.

Rétro. Terre - Climat

Rétro. Océan - Climat



L'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique conduit à un puits de CO<sub>2</sub> dans l'océan.

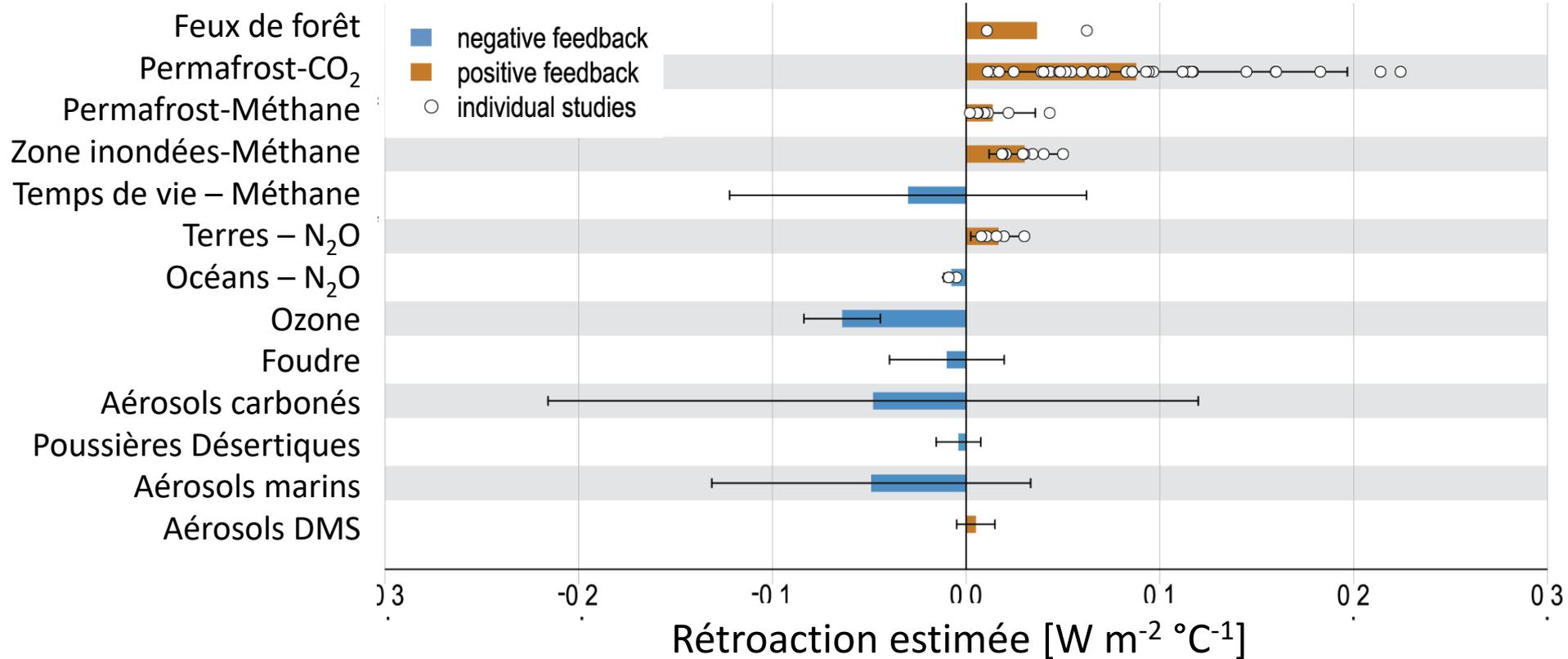
Dispersion modérée entre les différentes estimations

L'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique conduit à un puits de CO<sub>2</sub> sur les terres.

Grosse dispersion entre les différentes estimations

Le changement climatique diminue la capacité de l'océan à absorber le CO<sub>2</sub>. Effet faible et relativement bien contraint

Le changement climatique diminue la capacité des terres à absorber le CO<sub>2</sub>. Effet significatif et très mal contraint



Nombreuses études aux résultats rarement convergents...

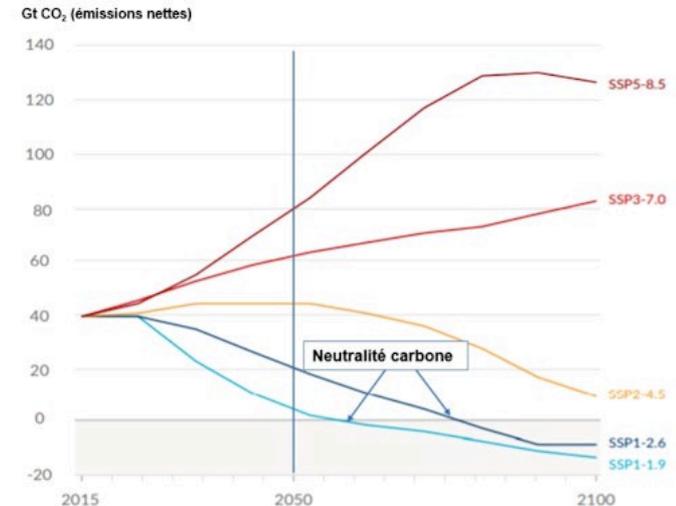
Le cycle du carbone est une des incertitudes principales sur l'ampleur du changement climatique à venir

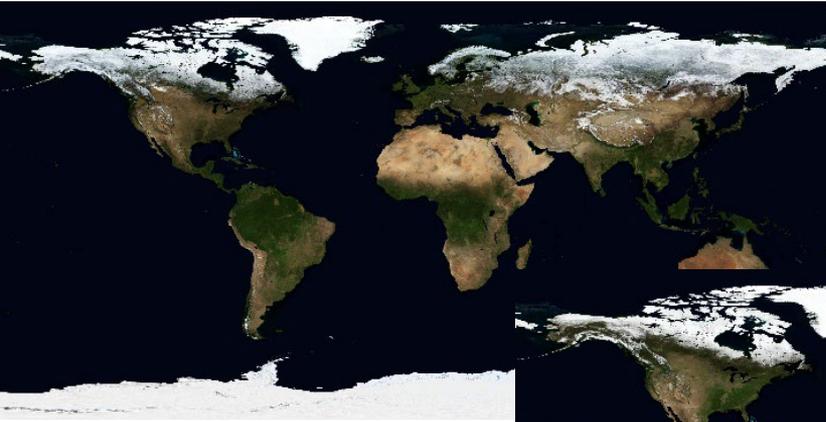
- Quelles seront les trajectoires des émissions de GES ?
- Quelles seront les rétroactions climat-carbone ?

Besoin de mieux comprendre ces rétroactions

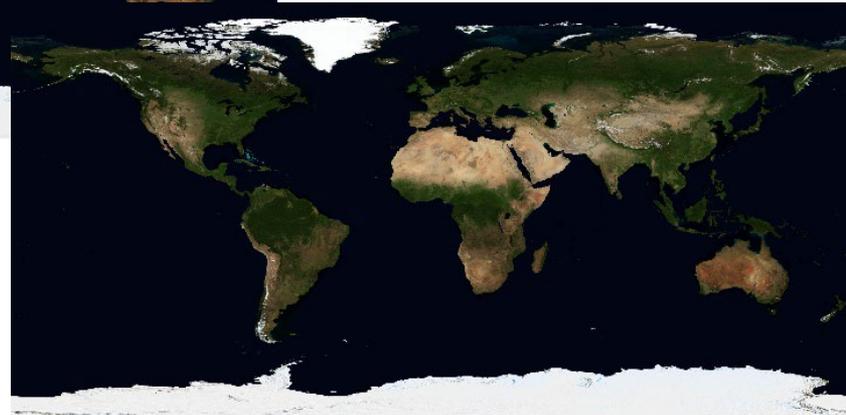
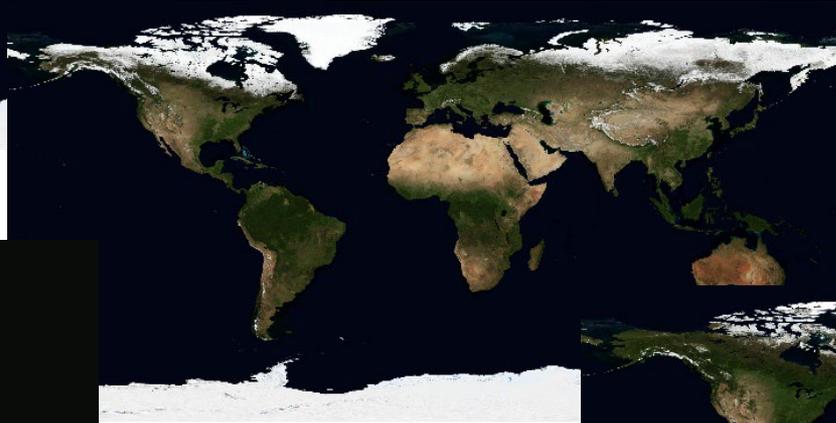
Besoin de surveiller les trajectoires d'émission

Les trajectoires d'émission de CO<sub>2</sub> des scénarios du GIEC





Images composites de la Terre à 3 saisons  
Après suppression des observations nuageuses

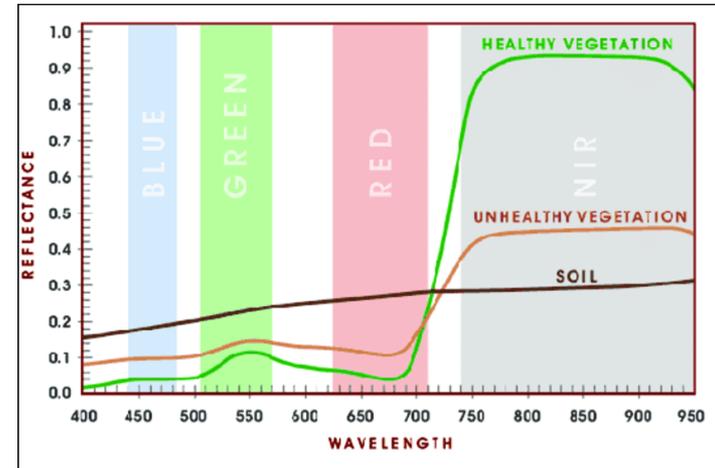
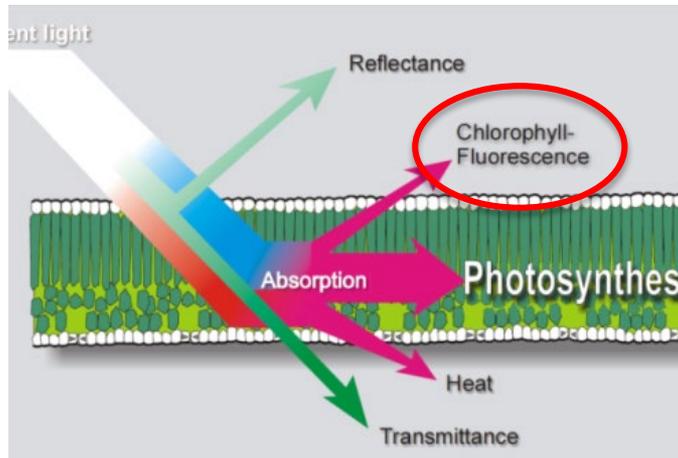


La chlorophylle absorbe la lumière visible (un peu moins le vert)

Elle n'absorbe pas/peu la lumière du proche infra-rouge

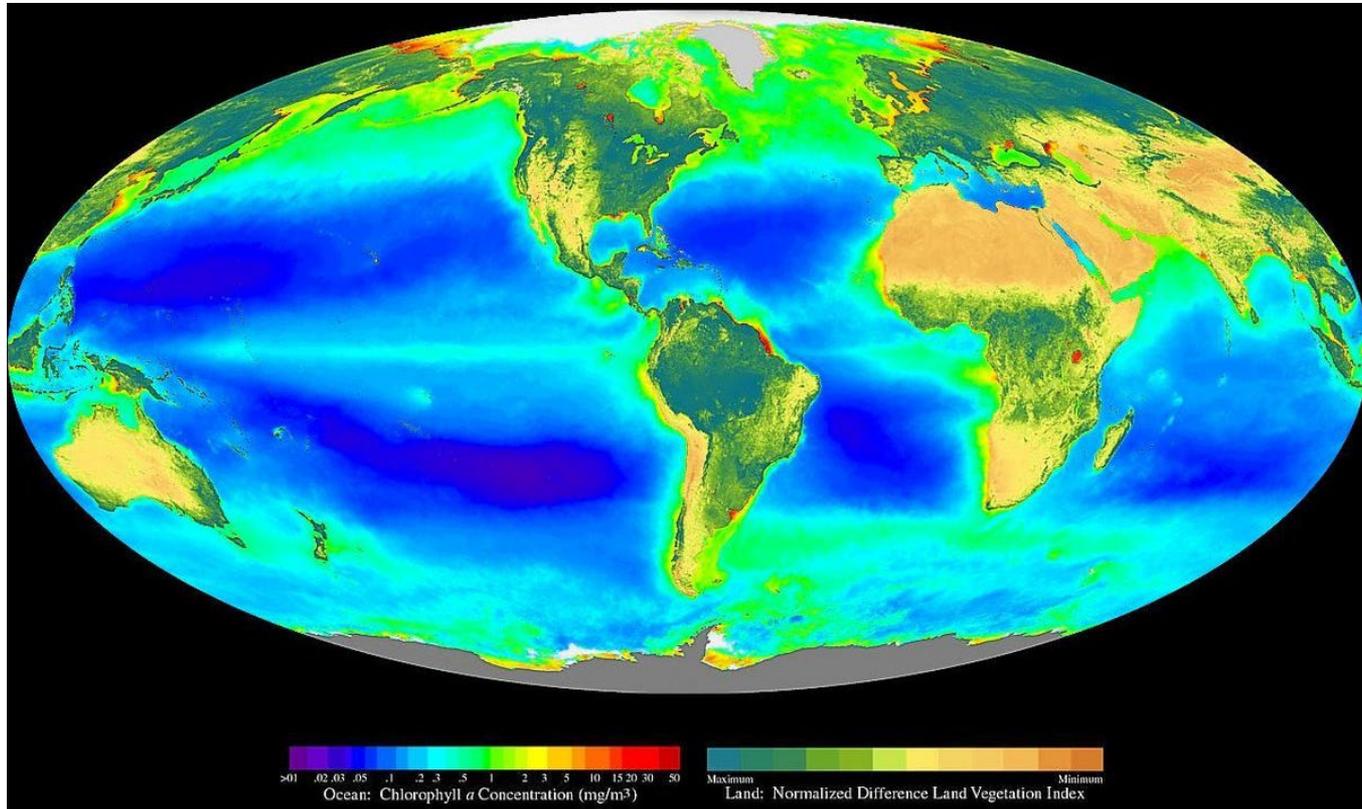
La mesure de la lumière solaire réfléchie permet de détecter, et de quantifier, l'activité photosynthétique

Une autre technique en développement observe la fluorescence de la végétation dans des bandes spectrales très fines

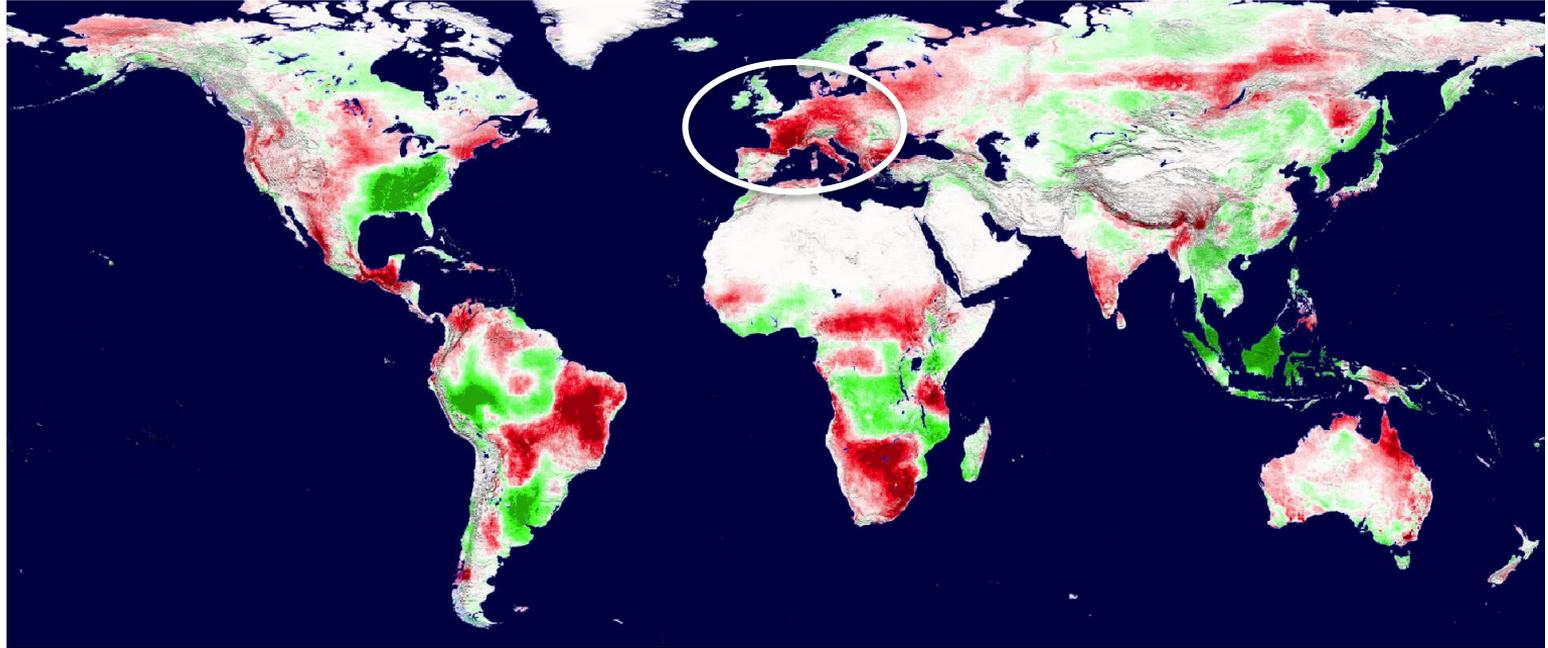


<= Visible => <=IR Proche =>

L’observation spatiale permet de quantifier la quantité de carbone fixée par le processus de photosynthèse

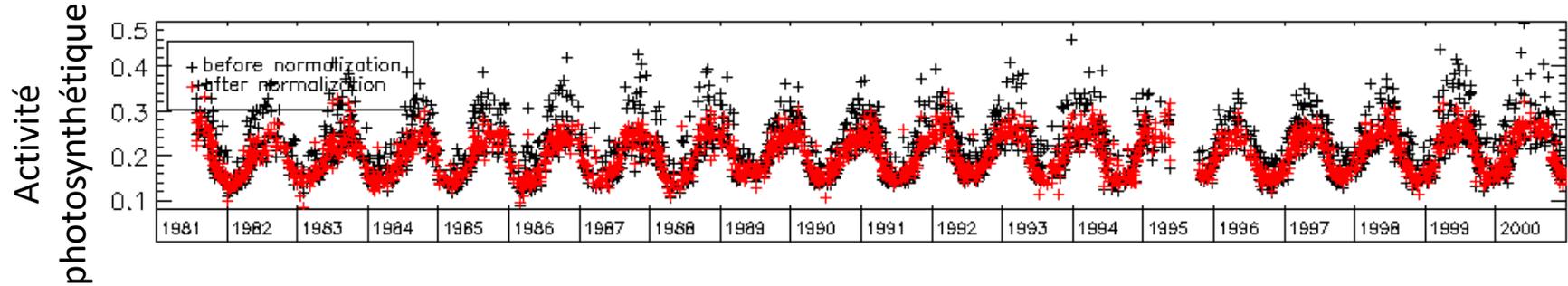


Les mesures spatiales permettent d'observer les anomalies de croissance de la végétation en lien avec des perturbations climatiques



Forte anomalie de croissance en Europe de l'Ouest en lien avec la canicule/sécheresse de 2003

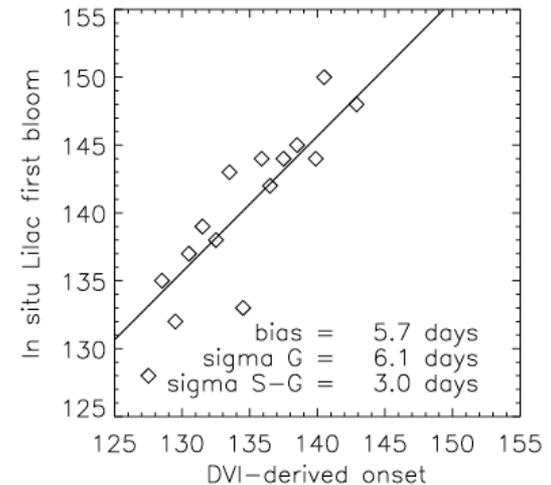
On utilise ces mêmes données spatiales pour suivre le cycle annuel de la végétation



Ces observations peuvent être utilisées pour détecter les dates de débourrage et de senescence de la végétation

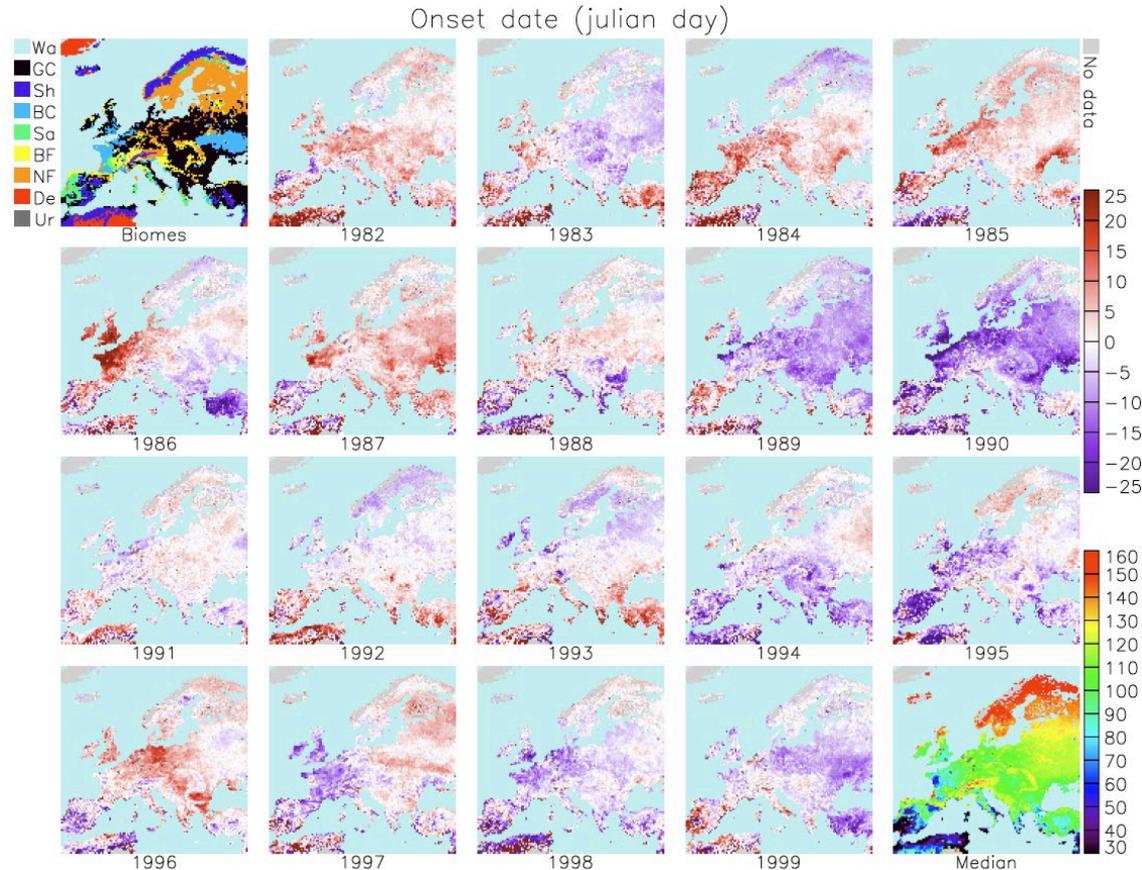
Bon accord avec les observations in-situ sur un site d'étude

Permet de calibrer les modèles qui décrivent le fonctionnement de la végétation

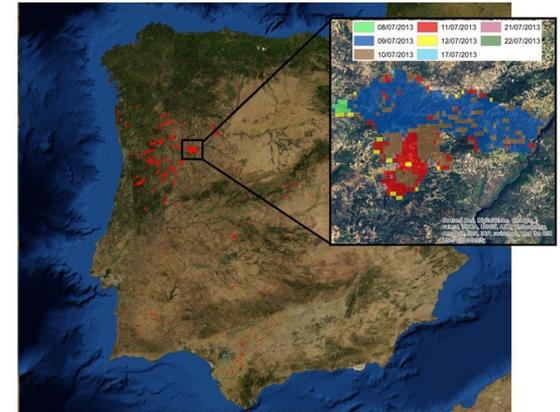


D'une année à l'autre, la végétation démarre plus ou moins tôt en fonction des températures de la fin d'hiver et début du printemps

Tendance en lien avec le changement climatique + variabilité inter-annuelle



Détection et quantification des surfaces brûlées

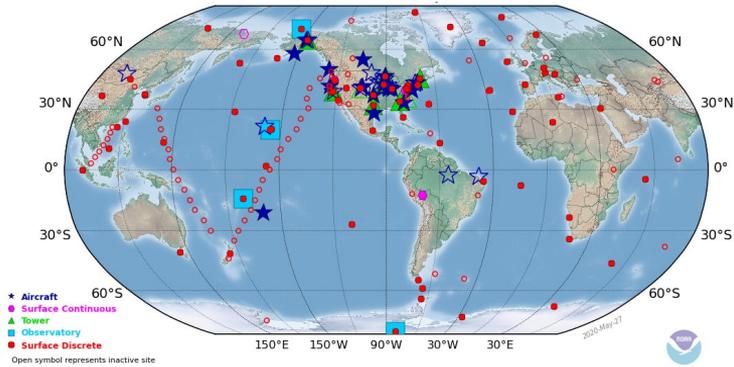


Impact des sécheresses et canicules sur l'activité photosynthétique

Déforestation

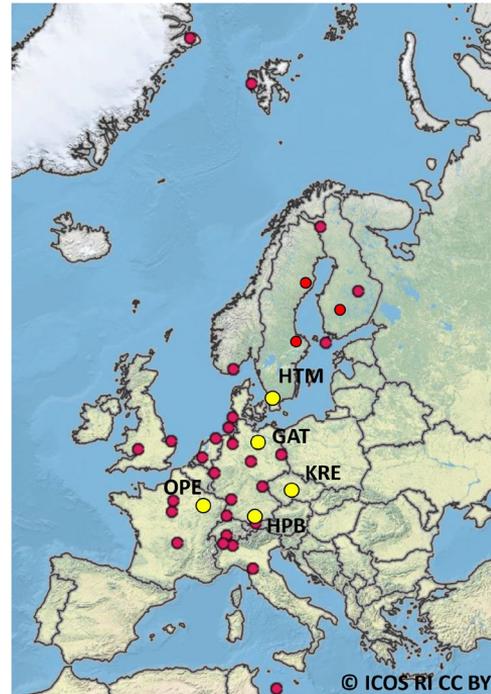
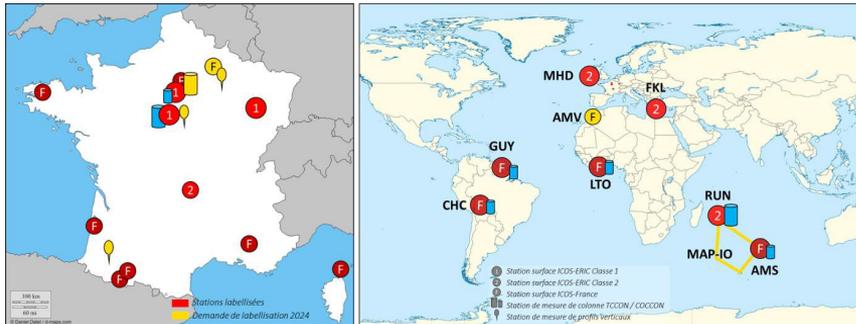






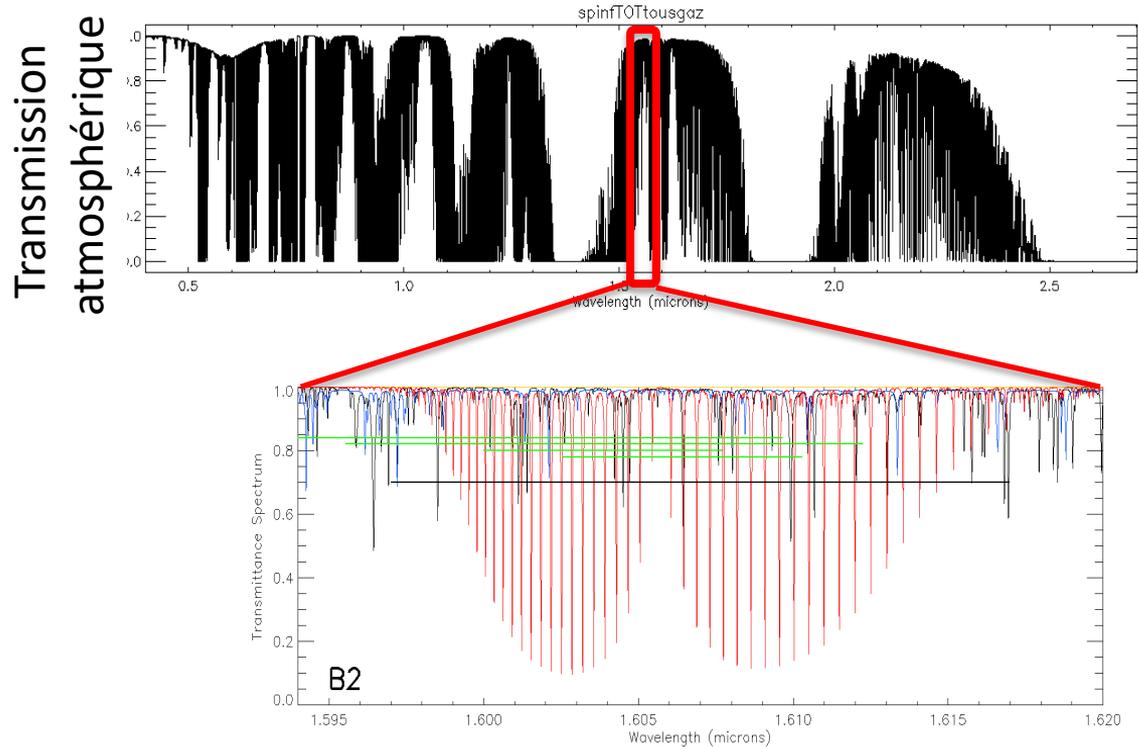
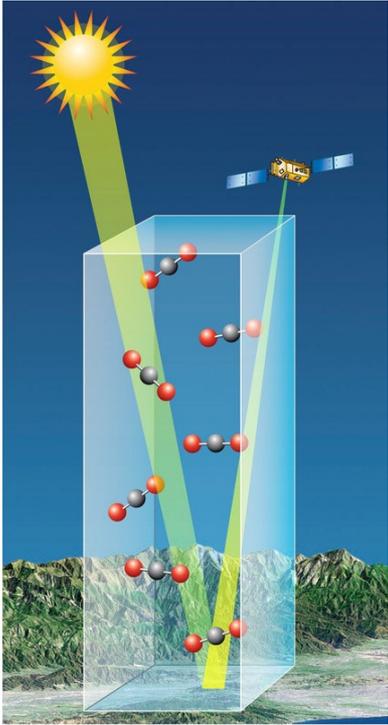
NOAA (USA)

Service National d'Observation : LSCE



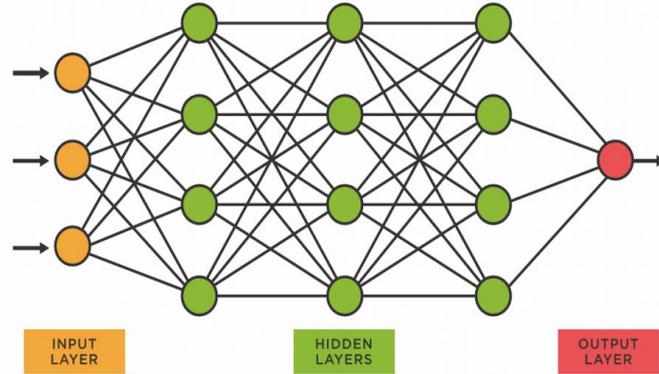
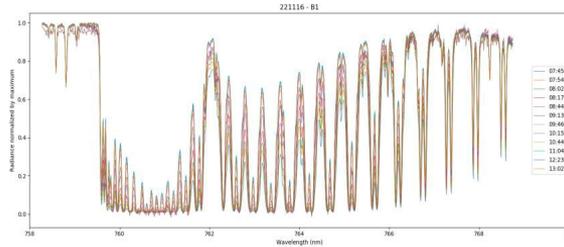
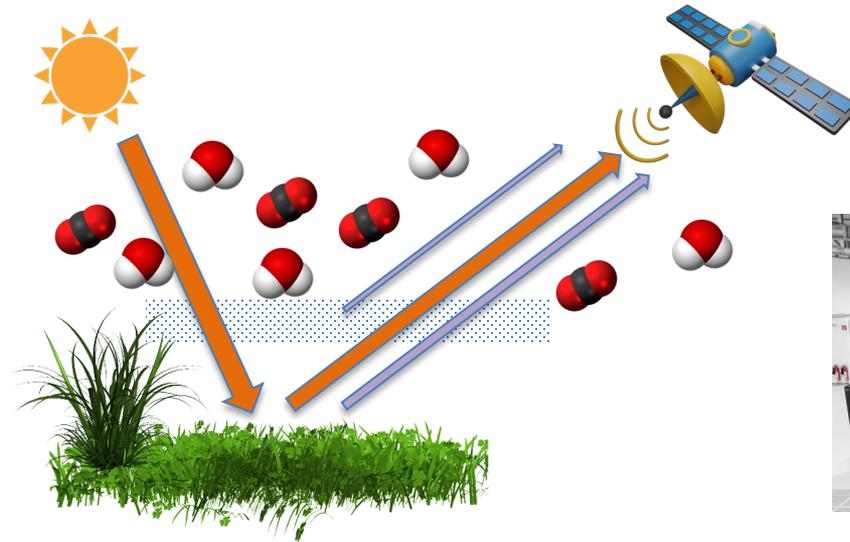
ICOS (Europe)





A très haute résolution spectrale, on peut mesurer les raies d'absorption des différents gaz

La “profondeur” peut être reliée à la quantité de  $\text{CO}_2$  (ou autre)



[CO<sub>2</sub>]

**Objectif:** Mesurer depuis l'espace les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> avec une précision nécessaire pour en déduire les sources et puits naturels

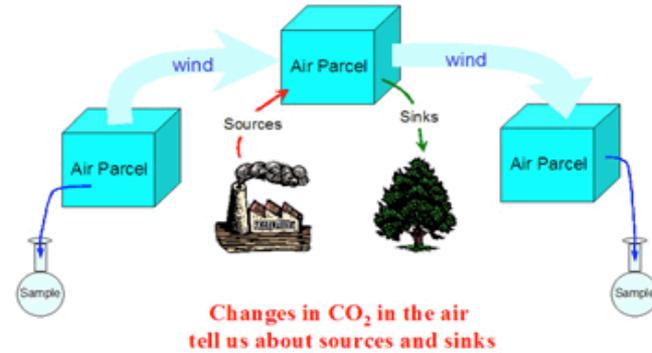
Mission portée par le CNES, avec le soutien des laboratoires scientifiques.  
Lancement prévu en Juin 2025.



**Une priorité Nationale [Grand Emprunt; COP-21]:** « L'amélioration technologique des satellites est un autre enjeu fondamental. Par exemple, l'observation directe par satellite des émissions de gaz à effet de serre des divers pays est indispensable pour garantir le sérieux et le respect des engagements qui seront pris à Copenhague. **La France va s'engager dans l'élaboration et le lancement d'un satellite prévu à cet effet, qui sera une pièce essentielle de la nouvelle gouvernance environnementale internationale.** »

Le besoin n'est pas tant une mesure des concentrations mais une estimation des flux.  
Comment passer de l'un à l'autre ?

Les débutants  
regardent ceci



Les experts  
lisent cela



$$y = Hx + \varepsilon \quad \text{avec} \quad R = E(\varepsilon \varepsilon^t)$$

$$x = x_b + \varepsilon_b \quad \text{avec} \quad P = E(\varepsilon_b \varepsilon_b^t)$$

On minimise alors la fonction de coût Bayésienne  $J(x)$  :

$$J(x) = 1/2 [ (y_o - Hx)^t R^{-1} (y_o - Hx) + (x - x_b)^t P^{-1} (x - x_b) ]$$

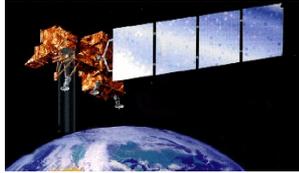
L'estimation  $x_o$  minimisant  $J(x)$  s'écrit :

$$x_a = x_b + (H^t R^{-1} H + P^{-1})^{-1} H^t R^{-1} (y_o - H x_b)$$

La matrice de variance/covariance de  $x_o$  est alors :

$$P_a = (H^t R^{-1} H + P^{-1})^{-1}$$

Informations  
Biomasse - photosynthèse

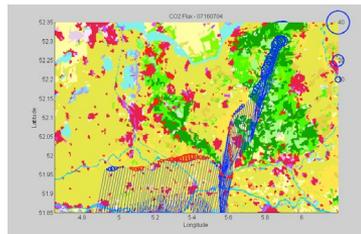
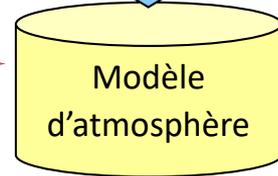
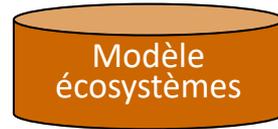


Téledétection



[CO<sub>2</sub>] MicroCARB

Profils de T et vents



Infos écosystèmes



Flux donnés par réseaux in situ



Mesures in-situ atmosphère

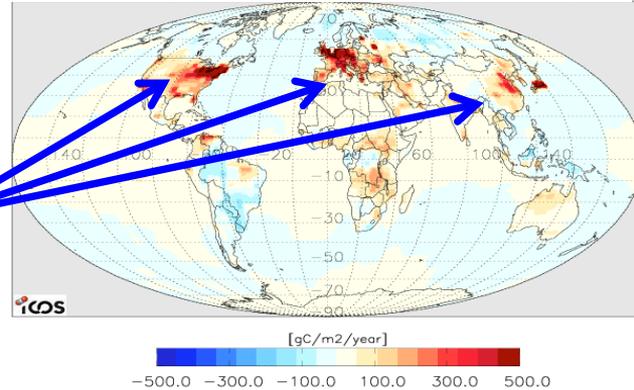


Inventaires émissions



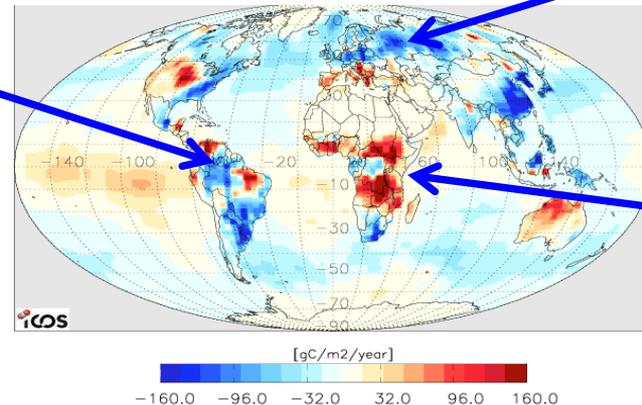
Cartes de flux écosystèmes et émissions anthropiques

## Flux Fossile + naturels



Les émissions de CO<sub>2</sub>  
fossile sur les régions  
industrialisées

## Flux naturels



Puits de carbone dans  
les forets tropicales

Repousse des  
forêts

Pertes de carbone dans  
les régions affectées par  
des sécheresses

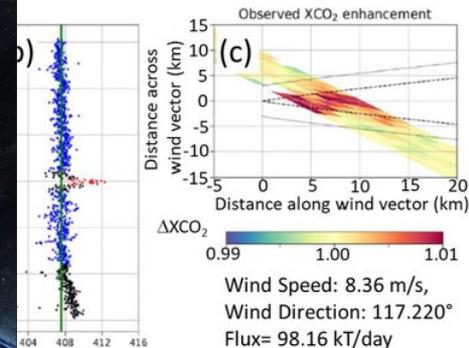
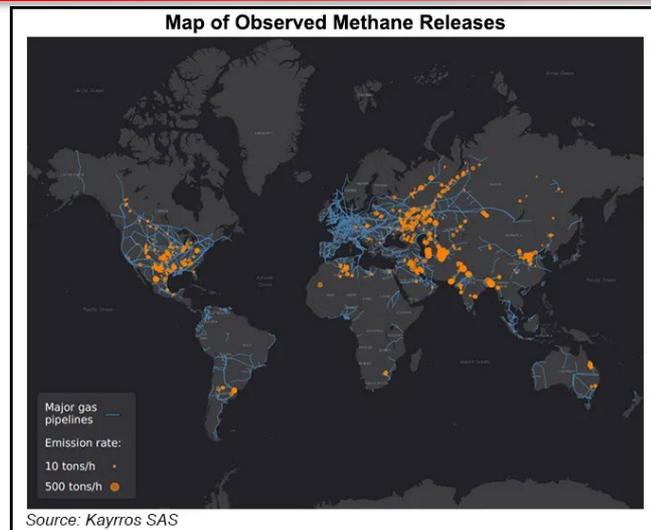
On peut voir des panaches de méthane depuis l'espace

Intensité des panaches peut être relié à l'émission  
+ détection des fuites

Nombreuses tentatives (et intérêt fort) pour le CO<sub>2</sub> mais plus difficile

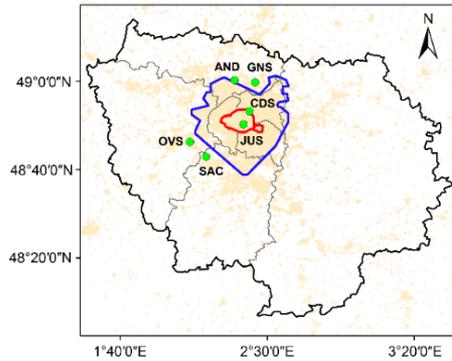
- Signal relatif plus faible
- Contribution des flux naturels
- Connaissance a-priori bien meilleure
- Seules les plus grosses sources sont potentiellement accessibles

Mission Européenne CO<sub>2</sub>-M en 2027

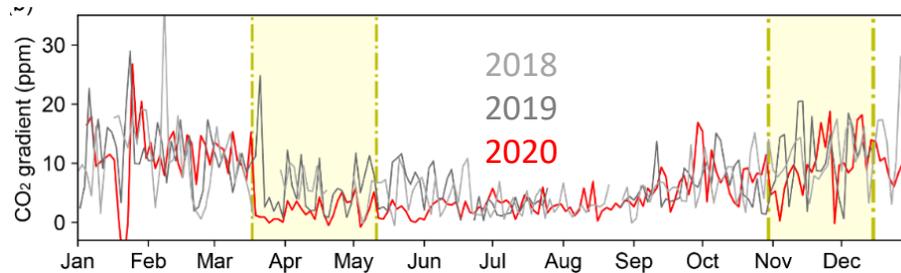


Le LSCE développe un réseau de mesure de  $[CO_2]$  et  $[CH_4]$  dans et autour de Paris.

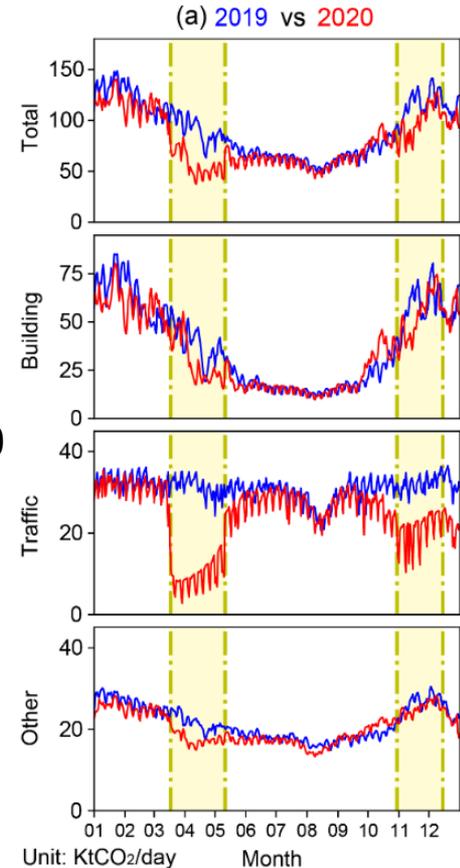
On utilise les mesures de ce réseau pour essayer d'en déduire les émissions



L'« expérience » des confinements de 2020



Concentrations



Emissions

Chaque année, plus de **cent milliards de tonnes** de Carbone sont **échangés** entre l'atmosphère, les océans et la végétation

Les **émissions** humaines ne sont "que" de **≈10 milliards de tonnes** par an, mais dans un seul sens

Les **puits** naturels (forcés par le déséquilibre induit par les émissions humaines) ont un ordre de grandeur équivalent à la **moitié des émissions**

Incertitudes sur le devenir de ces puits (**divergences entre modèles**)

Une **meilleure compréhension** du cycle du carbone, et en particulier le fonctionnement de la végétation, est un thème de **recherche actif**

Les **satellites** apportent une information indispensable pour suivre le fonctionnement de la biosphère à grande échelle et identifier les anomalies en lien avec les **pressions anthropiques** ou les **anomalies météorologiques**

**14/11** - Les gaz de l'atmosphère. Evolution naturelle et influence humaine

**21/11** - Aérosols naturels et anthropiques

**28/11** - L'effet de serre, son augmentation et les autres perturbations du bilan énergétique de la Terre

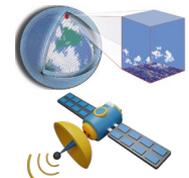
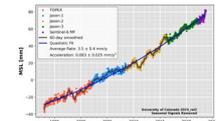
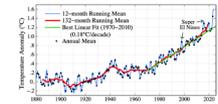
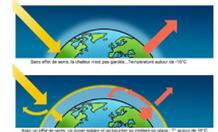
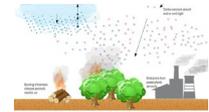
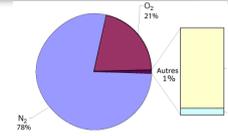
**05/12** - La hausse des températures sur les derniers 200 ans

**12/12** - Les nuages; régulateurs ou amplificateurs du changement climatique ?

**19/12** - Le niveau des mers : Passé, présent, futur

**09/01** - Les modèles de climat sont-ils fiables ?

**16/01** - Les satellites, outils indispensables pour connaître le climat



- 14/11 - [Sophie Godin-Beekmann](#) : « Comment l'humanité a sauvé la couche d'ozone et contribué à protéger le climat »
- 21/11 - [Cathy Clerbaux](#) : « La pollution : tout ce qu'on peut voir, comprendre et surveiller depuis l'espace »
- 28/11 - [Hélène Brogniez](#) : « La vapeur d'eau, l'autre gaz à effet de serre »
- 05/12 - [Masa Kageyama](#) : « Des modèles de climat pour la recherche et pour la société »
- 12/12 - [Jérôme Riedi](#) : Observation satellitaire des nuages : une vue plongeante à toutes les échelles de temps et d'espace
- 19/12 - [Gerhard Krinner](#) : « Neige et glaces : Leur rôle dans le système climatique »
- 09/01 - [Gilles Ramstein](#) « Que nous apprend la modélisation des paléoclimats concernant l'anthropocène ? »
- 16/01 - [Simon Gascoin](#) : « Apport des observations spatiales pour le suivi du manteau neigeux et ses impacts »