



## *Stages Secondes : Le Climat*

Philippe Dubuisson

Professeur - Université de Lille

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

LOA UMR 8518

[philippe.dubuisson@univ-lille.fr](mailto:philippe.dubuisson@univ-lille.fr)

***Les bases physiques du changement climatique :  
une histoire de rayonnement***

# Introduction

## Réchauffement climatique, un peu d'histoire:

Dès la fin du 18<sup>e</sup> siècle, **Joseph Fourier** pose les bases physiques de l'effet de serre pour expliquer la température de l'atmosphère terrestre.

Il stipule que c'est le bilan d'énergie qui contrôle la température à la surface de la Terre

*Voir: Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre,  
Jean-Louis Dufresne , La Météorologie - n° 53 - mai 2006.*

En 1896, **Svante Arrhenius**: « un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub> augmenterait la température moyenne à la surface de la Terre d'environ 4 K ».

Cette théorie relie l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique à celle des températures terrestres en raison d'un effet de serre.

Années soixante: rapport de l'administration américaine (CIA, USAF)

1988: création du **GIEC (IPCC)** et premier rapport en 1990.

1992: premier « sommet de la Terre » organisé à Rio de Janeiro au Brésil, pour le développement durable.

2015: **COP21**, accord de Paris (COP1 en 1995 à Berlin).

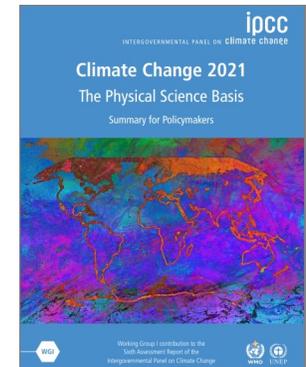
2021-2022: sixième rapport du GIEC.



« Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires », publié en 1824



S. Arrhenius (1886), Prix Nobel de chimie de 1903.



# Bilan d'énergie et température globale

**Energie solaire:** Principale source d'énergie du système climatique (99,98 % de l'énergie entrante)

**Système climatique** constitué par cinq grands compartiments : atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère et surfaces continentales.



**Equilibre énergétique** global de ce système : fonction des quantités d'énergie entrante et sortante.

La quasi-totalité des échanges d'énergie de ce système avec son environnement spatial: **énergie radiative** (les autres sources d'énergie pouvant être négligées, telle que celle provenant de l'intérieur de la Terre, géothermie).

**À l'équilibre**, le bilan énergétique du système, donc son bilan radiatif, est nul, la part de rayonnement gagnée par le système compensant exactement celle perdue par rayonnement vers l'espace.

Dans ce cas, la **température moyenne du système climatique reste stable**.

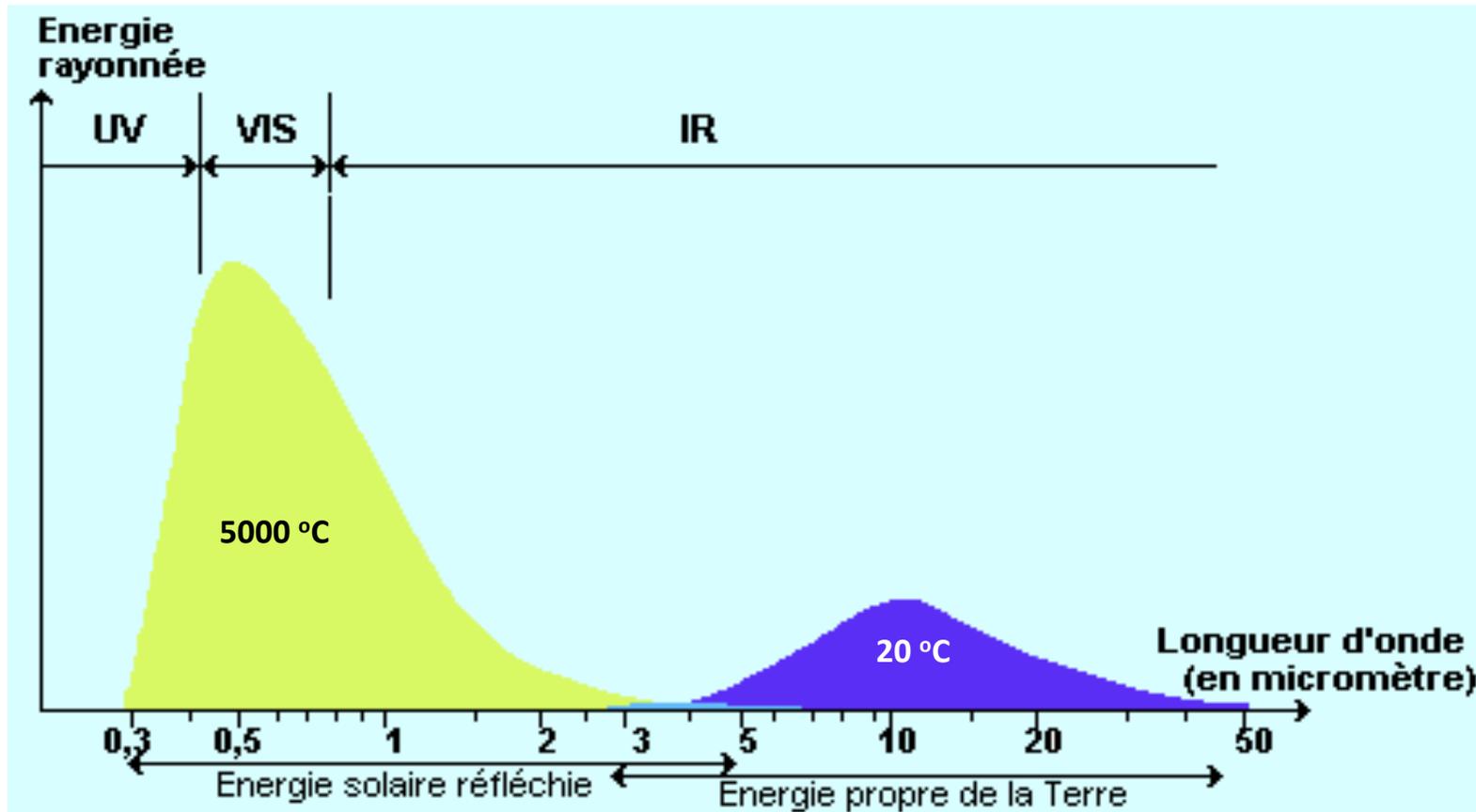
# Bilan d'énergie et température globale

Energie solaire: **rayonnement électromagnétique** – émission d'un rayonnement selon la **loi du corps noir (Planck)**

Rayonnement électromagnétique – émission d'un rayonnement selon la loi du corps noir (Planck):

Source chaude (5000 °C) : émission rayonnement visible (vers 0,5  $\mu\text{m}$ )

Source plus froide (20 °C) : émission rayonnement infrarouge (vers 10  $\mu\text{m}$ )



# Bilan d'énergie et température globale



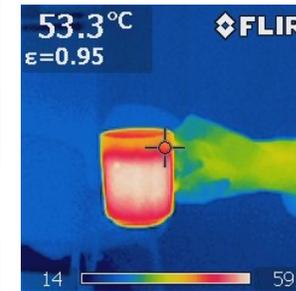
image enregistrée dans le  
domaine visible:

*Rayonnement solaire réfléchi*

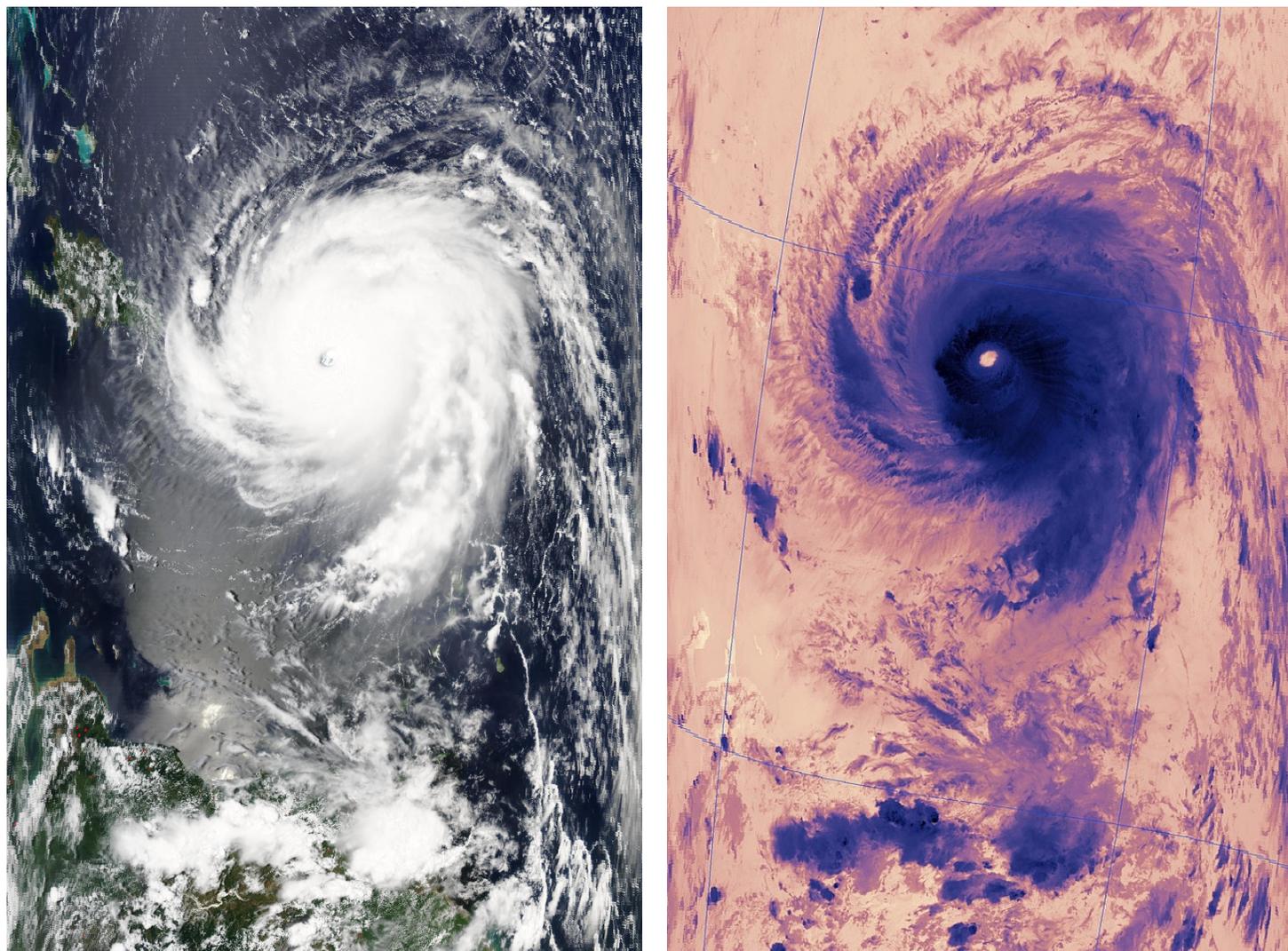


image enregistrée dans le  
domaine infrarouge thermique:

*Rayonnement infrarouge émis*



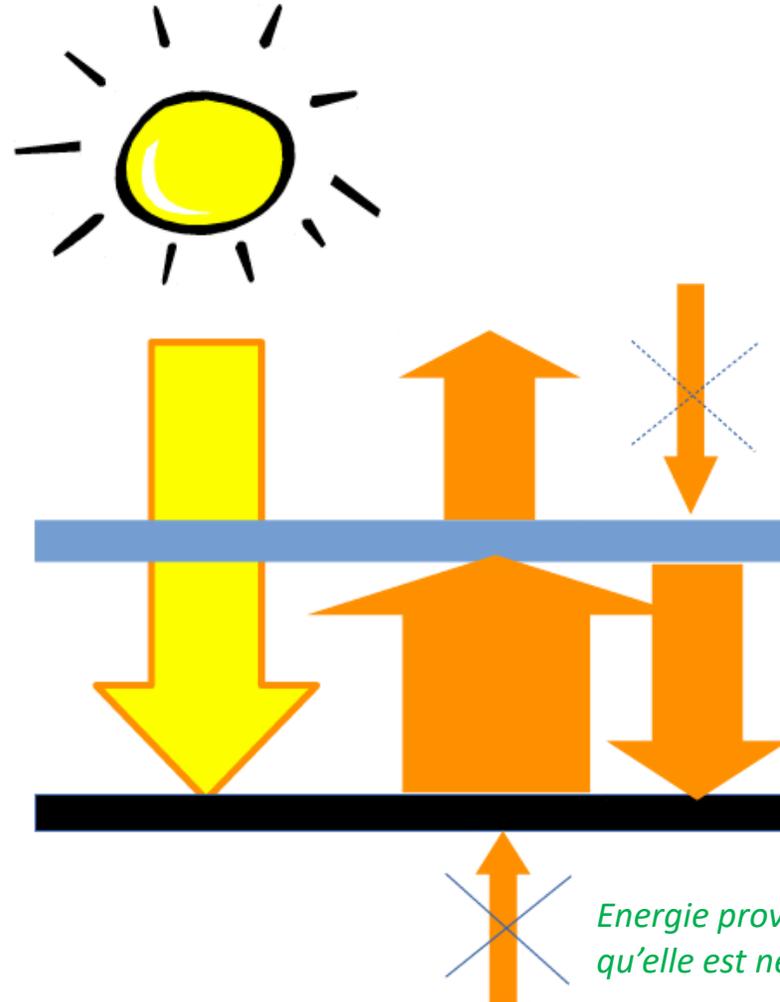
# Bilan radiatif



# Bilan d'énergie et température globale

## Bilan de J. Fourier: énergie gagnée / énergie perdue

*Rayonnement solaire incident*



*Energie provenant de l'espace: il la surestime, estimant la température de l'espace à celle des pôles.*

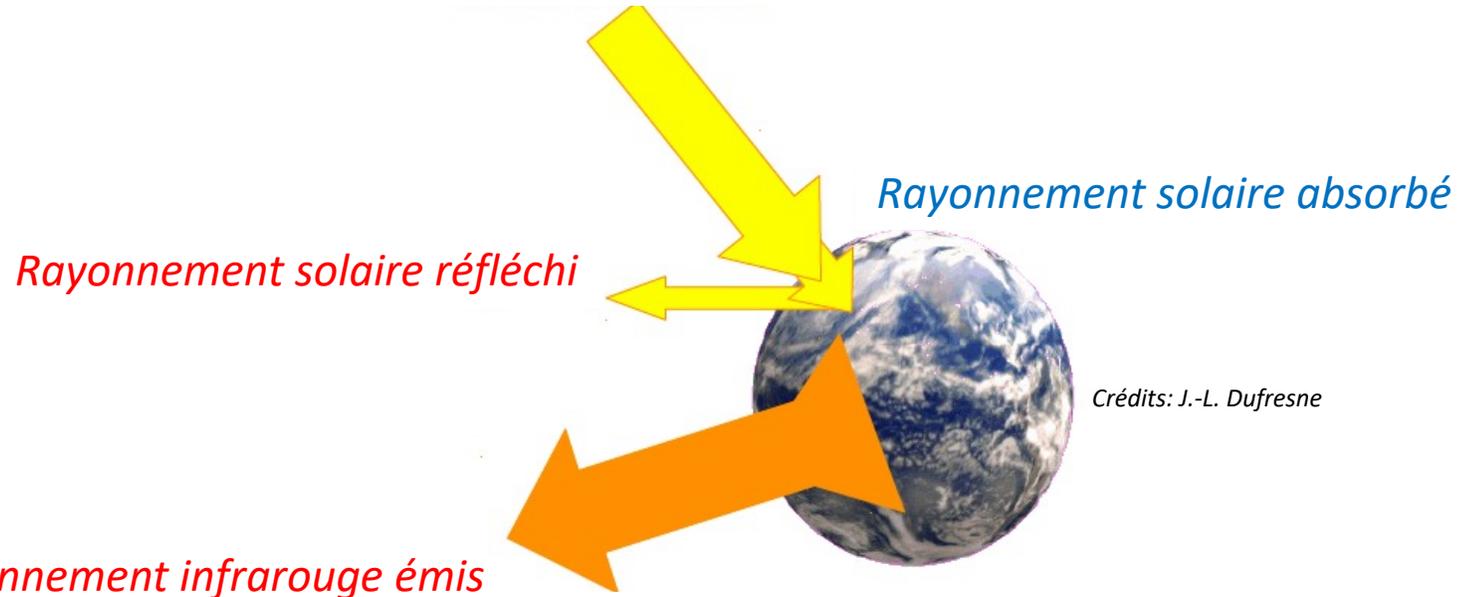
*Il introduit le rôle de l'océan et des vents, esquisse un effet de serre (retient plus la chaleur sortant du système que celle entrante) et le rôle des activités humaines.*

*Energie provenant de l'intérieur de la Terre: il montre qu'elle est négligeable (0,02%)*

# Bilan d'énergie et température globale



Rayonnement solaire incident



Crédits: J.-L. Dufresne

La température moyenne à la surface est le résultat du bilan d'énergie global:  
Energie gagnée = énergie perdue

# Bilan d'énergie et température globale



Rayonnement solaire incident



Rayonnement solaire réfléchi  
Entre 0,2 et 4  $\mu\text{m}$

Rayonnement solaire absorbé



Rayonnement infrarouge émis  
entre 4 et 100  $\mu\text{m}$

La température moyenne à la surface est le  
résultat du bilan d'énergie global:  
Energie gagnée = énergie perdue



# Bilan d'énergie et température globale



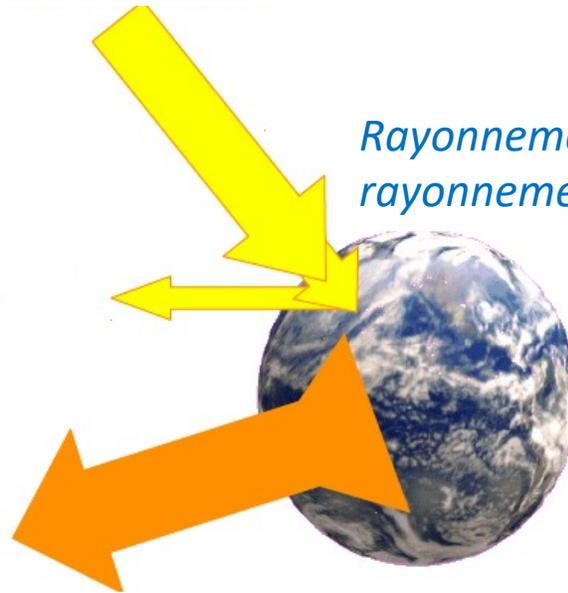
Rayonnement solaire incident sur un plan  $F_0 = 1361 \text{ W/m}^2$

Rayonnement solaire moyen sur la sphère =  $F_0 / 4 = 340 \text{ W/m}^2$

Rayonnement solaire réfléchi:  
1/3 du rayonnement incident

Albédo planétaire = 0,32

Rayonnement solaire absorbé: 2/3 du  
rayonnement incident =  $227 \text{ W/m}^2$



Rayonnement infrarouge émis

La température moyenne à la surface est le  
résultat du bilan d'énergie global:

Température à la surface =  $255 \text{ K} = -18 \text{ °C}$  ! ←

Energie gagnée = énergie perdue

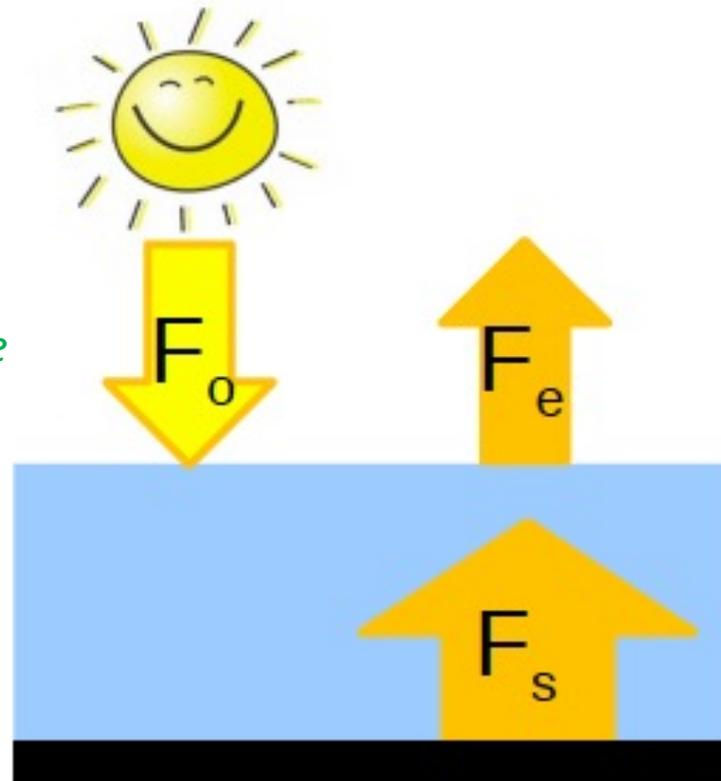
# Bilan d'énergie et température globale

En réalité: température à la surface = 288 K = 15 °C

C'est le **résultat de l'effet de serre.**

Sans effet de serre : T serait donc proche de -18 °C !

*Au sommet de l'atmosphère:  
énergie incidente (gagnée) = énergie perdue  
Système climatique équilibré*

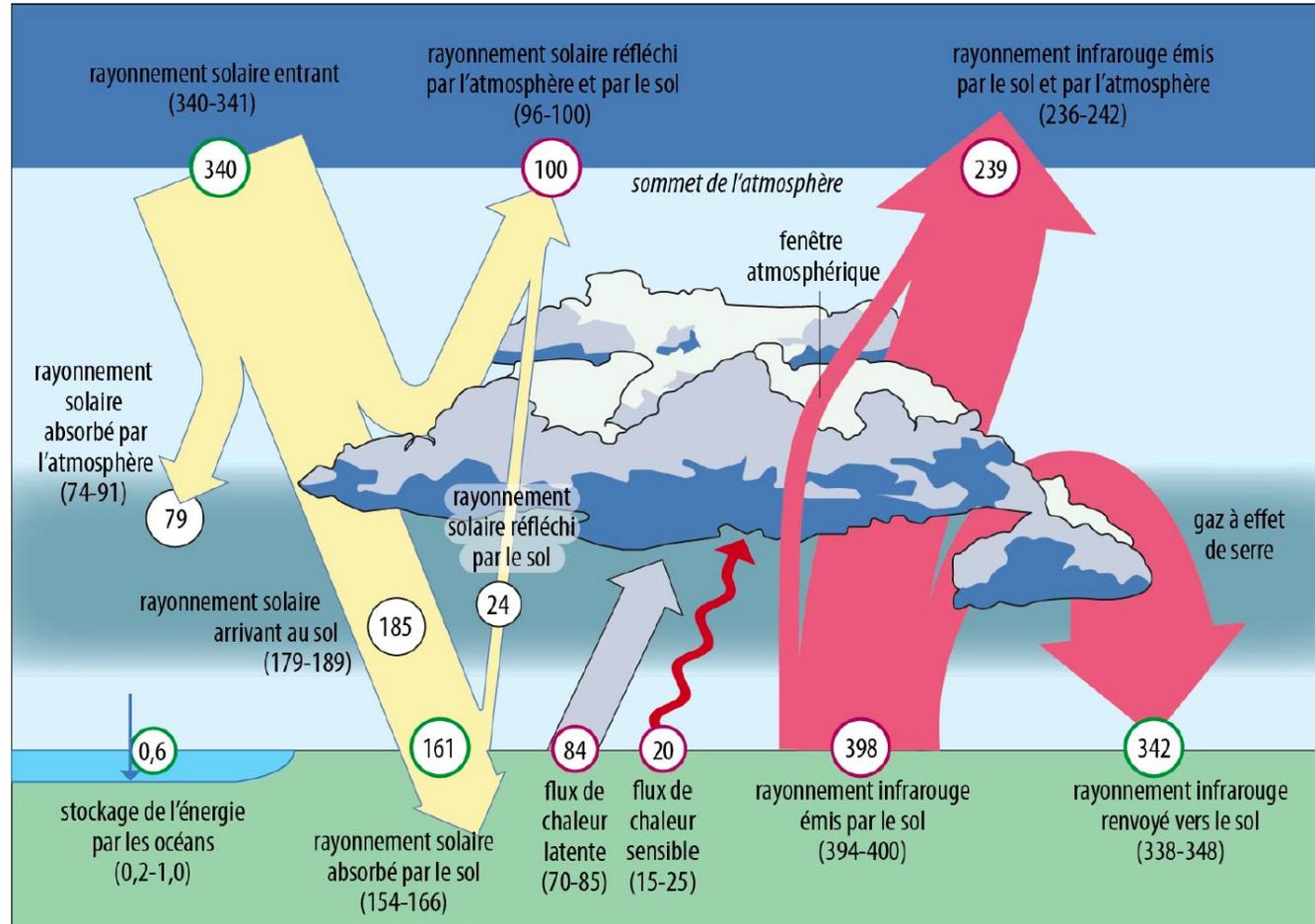


*Effet de serre :  $F_s - F_e$*

*Effet de serre = rayonnement  
infrarouge absorbé par l'atmosphère*

# Bilan d'énergie et équilibre

Au TOA, bilan d'énergie radiative légèrement déséquilibré



Source: Encyclopædia Universalis France

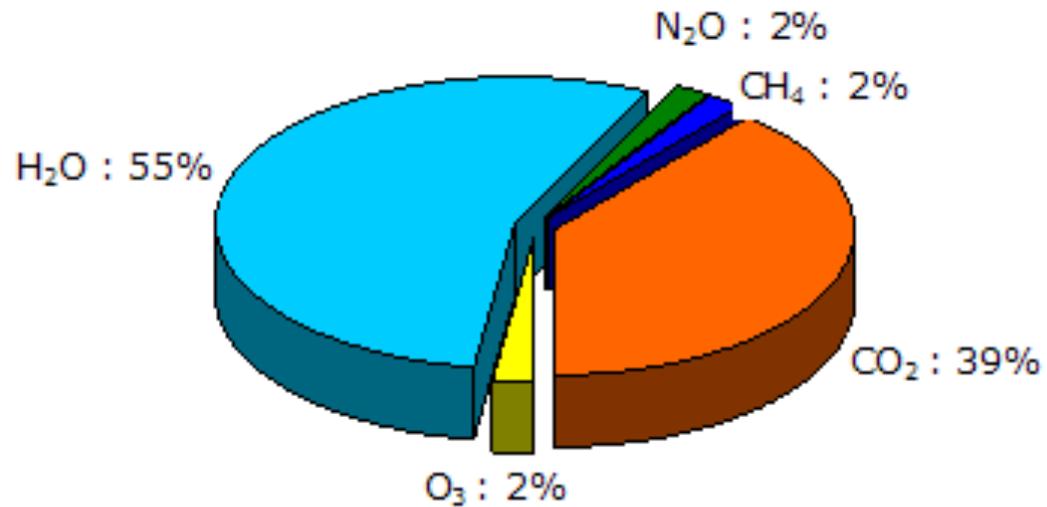
Deux effets antagonistes:  
**L'EFFET PARASOL** et  
**L'EFFET DE SERRE**

Au sol, bilan d'énergie équilibré en prenant en compte d'autres mécanismes : les flux de chaleur sensible (principalement associés à la convection, phénomène par lequel l'air chaud monte et l'air moins chaud descend) et les flux de chaleur latente (associés à l'évaporation de l'eau à la surface de la Terre et à la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère pour former des nuages). Déséquilibre de  $0,6 \text{ W.m}^{-2}$  : stockage global d'énergie dans l'océan.

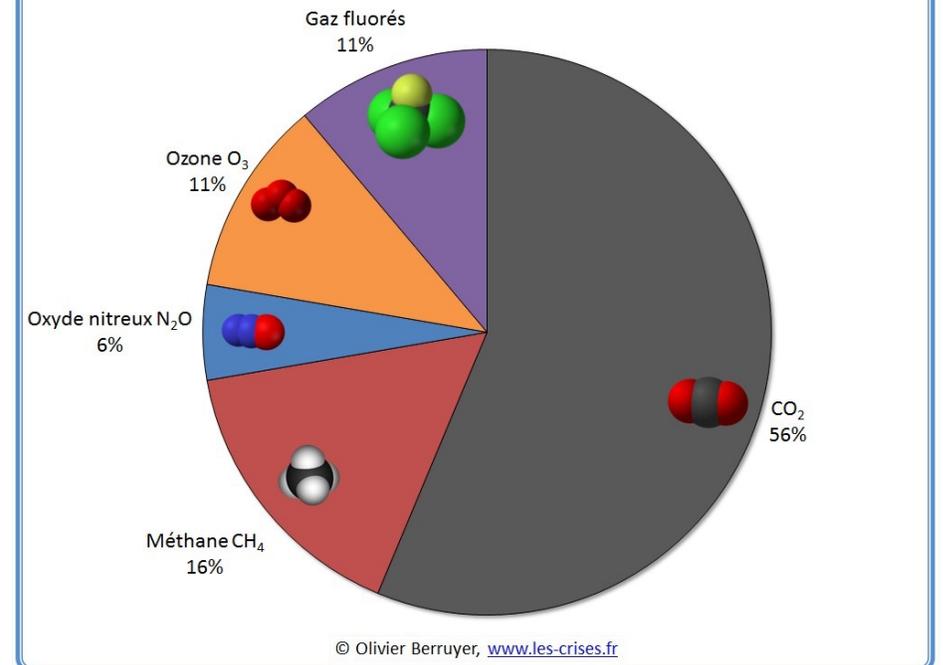
# Effet de serre atmosphérique

Principal gaz à effet de serre ?

Contribution à l'effet de serre naturel des différents gaz présents dans l'atmosphère

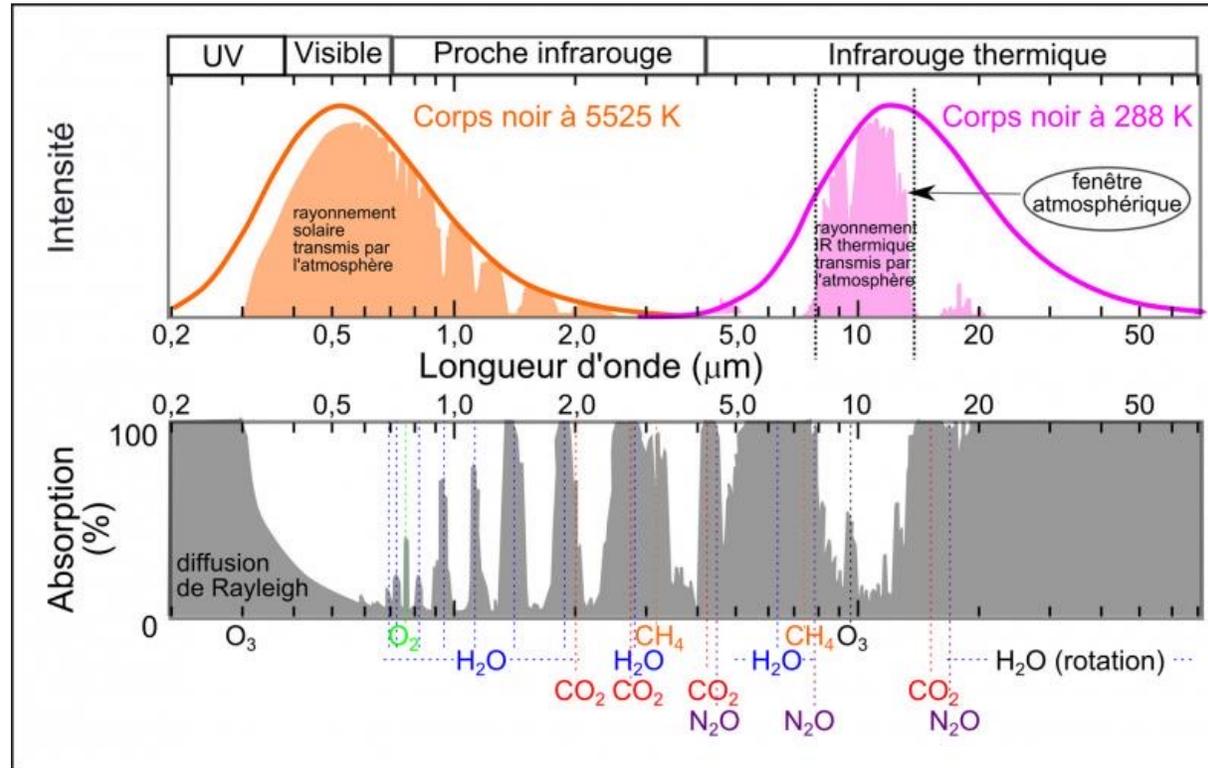


Contributions de différents gaz à effet de serre au réchauffement global d'origine humaine en 2010 (en %) (Source : CDIAC)



# Effet de serre atmosphérique

Effet de serre: énergie – rayonnement infrarouge absorbé par l'atmosphère



Crédits: le climat en question

La théorie nous montre que:

- Les molécules triatomiques ou non symétriques ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ , etc.) sont très absorbantes pour le rayonnement infrarouge.
- Les molécules bi-atomiques et symétriques ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , etc.), pourtant très abondantes dans notre atmosphère, sont peu absorbantes dans l'infrarouge et solaire.

# Effet d'albédo

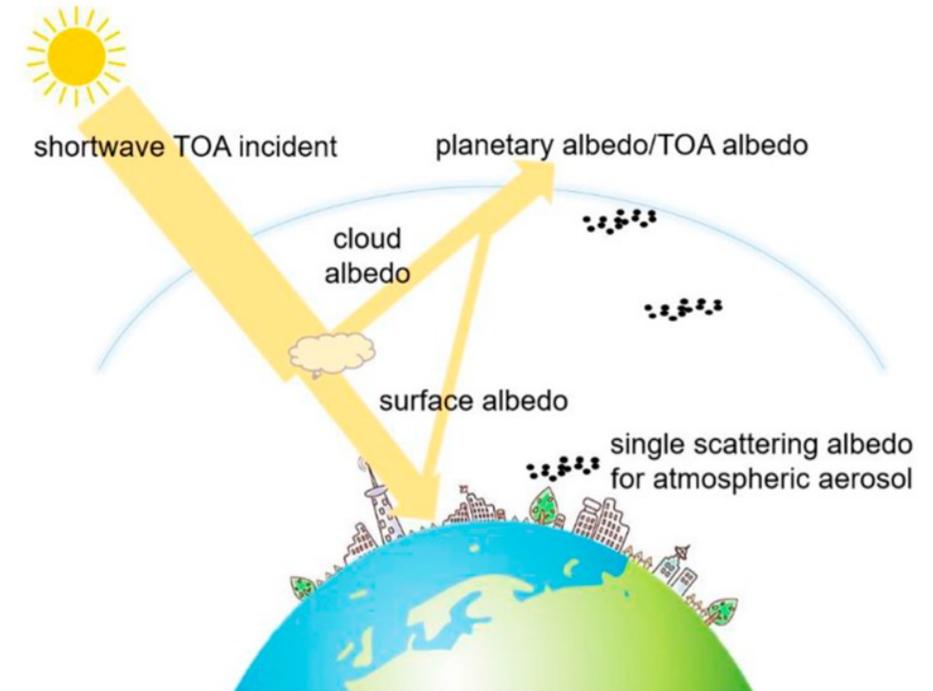
## Exemple de l'albédo

L'albédo d'un corps définit la fraction de rayonnement qu'il renvoie, donc le rapport entre le flux d'énergie radiative réfléchi sur celui qu'il reçoit.

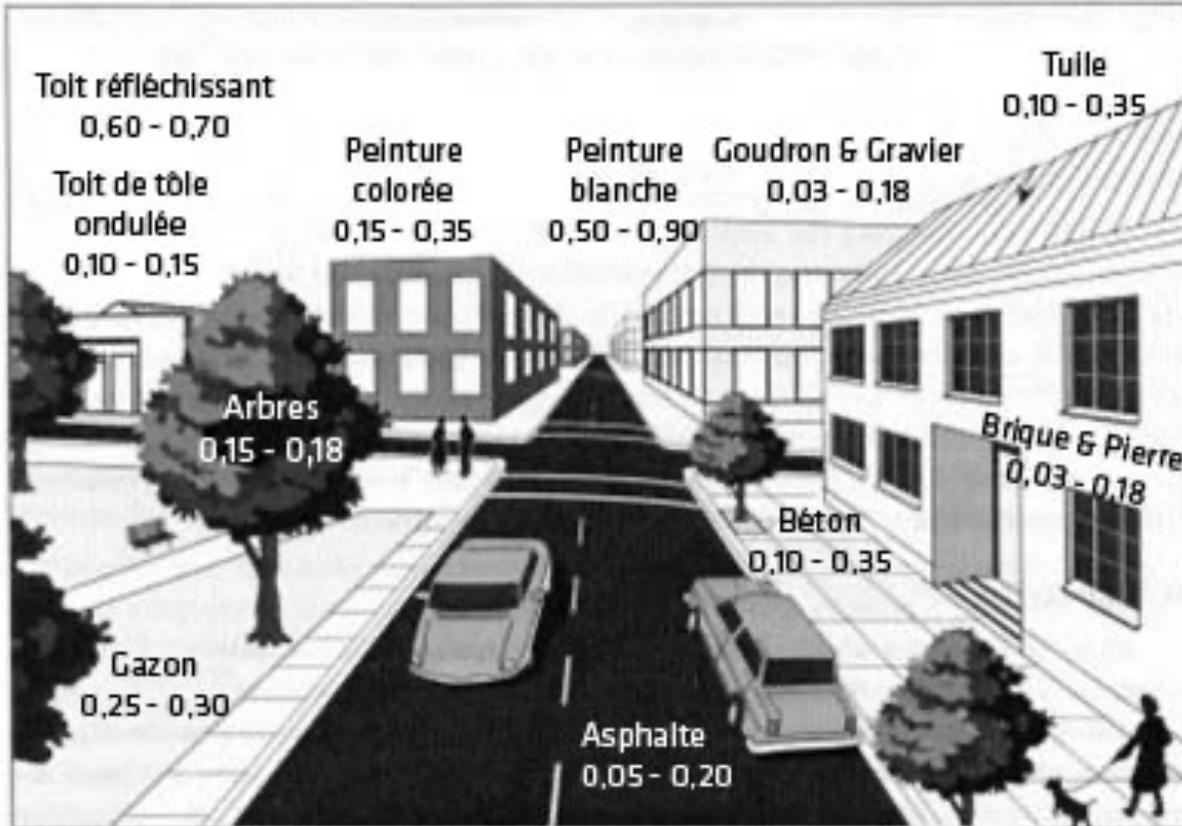
- ✓ Pour un **albédo élevé** : la majeure partie du rayonnement incident est réfléchi et donc perdue pour ce corps. Cela **contribue à le refroidir**.
- ✓ Au contraire, pour un **albédo faible** : une part importante de l'énergie incidente est **absorbée par ce corps et contribue à le réchauffer**.

Pour la Terre, en moyenne, l'albédo planétaire avoisine actuellement 0.3 (parfois aussi exprimé en pourcentage, ici 30 %), signifiant ainsi que 70% de l'énergie radiative reçue du Soleil sont absorbés, en majorité par la surface. Les 30% autres pourcents sont réfléchis vers l'espace et donc perdus pour le système climatique. Une augmentation de l'albédo contribue ainsi à refroidir le système.

Cet effet d'albédo, aussi appelé **effet parasol**, est ainsi un paramètre clé pour le bilan d'énergie du système climatique terrestre et pour mieux comprendre et prévoir le climat.



# Effet d'albédo



## Albédo des zones urbaines

L'albédo des villes dépend en grande partie des matériaux utilisés pour les différents revêtements. Des exemples d'albédo caractéristiques des villes sont présentés sur cette figure. Les surfaces sombres, d'albédo faible, absorbent efficacement le rayonnement solaire et contribuent au réchauffement de l'air ambiant. L'augmentation de ce type de surfaces (routes, parkings, toits goudronnés, etc.) représente l'une des causes principales des îlots de chaleur urbains. L'albédo du couvert végétal est par contre plus élevé et participe à rafraîchir les villes. (Origine de cette image © NASA)

### Rappels :

L'énergie solaire incidente peut être absorbée ou réfléchi.

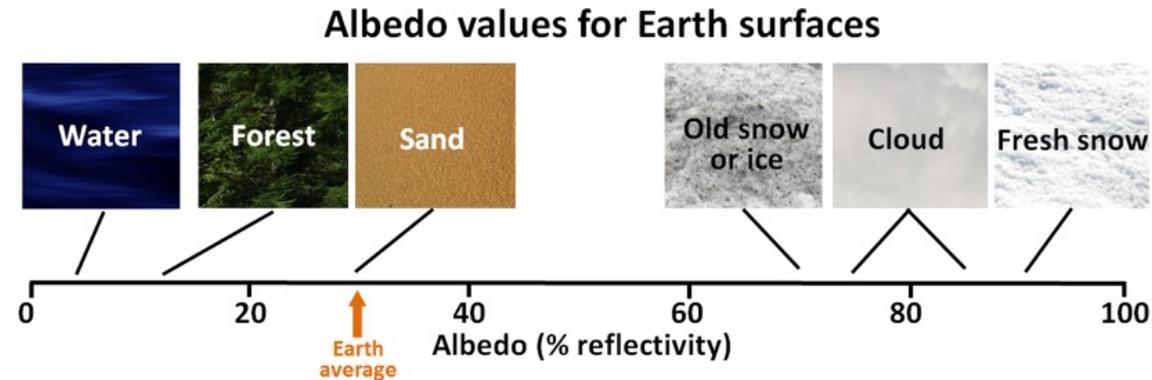
Énergie absorbée = réchauffement

Énergie réfléchi = pas absorbée, donc refroidissement

Albédo = énergie réfléchi / énergie incidente

Albédo faible = majeure partie de l'énergie incidente absorbée

# L'effet d'albédo



## Albédo de différents milieux

La neige et la glace, perçues comme des éléments brillants à fort pouvoir réflecteur, ont un albédo  $A$  variable, mais élevé ( $A$  entre 0.6 et 0.9).

L'eau liquide a par contre un albédo très faible ( $A$  proche de 0.05), car elle absorbe le rayonnement sur tout le spectre, excepté entre 400 et 500 nm (ce qui explique la couleur bleue de la mer). L'albédo des lacs et de la mer, en particulier près des côtes, reste faible ( $A$  entre 0.05 et 0.15) mais dépend de sa composition en matière végétale et minérale en suspension dans le milieu.

D'autres surfaces, telle que la végétation ou les sols nus ont également un albédo faible. Le couvert végétal a un albédo compris entre 0.05 et 0.15 pour une forêt et entre 0.2 et 0.3 pour les cultures et prairies.

Les sols nus ont un albédo faible, qui varie de 0.05 à 0.15. Les matériaux d'origine volcanique, telle la lave ou le basalte, ou l'asphalte ont un albédo proche de 0.05. Les milieux plus complexes, constitués de mélange de matière, ont un albédo très variable, comme le sable, constitué de matière minérale et organique ( $A$  entre 0.2 et 0.5) ou les nuages constitués d'eau liquide ou glacée ( $A$  entre 0.1 et 0.9).

L'albédo moyen de la Terre, calculé après avoir tenu compte de l'ensemble des surfaces et des composants atmosphériques, avoisine 30%.

## L'effet d'albédo sur la neige



*Episode de nuage de sable en provenance du Sahara dans les Pyrénées en 2022.  
Borja Delgado/Dersu.uz/Cover Images*

### **Effet d'albédo sur la neige**

Lors de fortes tempêtes, de grandes quantités de poussière du Sahara peuvent être transportées vers l'Europe. Le dépôt de ces poussières sahariennes sur la neige a été observé en particulier dans les Alpes et les Pyrénées en février 2021 et mars 2022.

L'albédo du sable (environ 0.3/0.4) étant moins élevé que celui de la neige (supérieur à 0.6), l'énergie solaire absorbée sera plus importante entraînant une fonte plus rapide du manteau neigeux ou des glaciers.

On observe le même effet lors du dépôt sur ces surfaces de poussières volcaniques ou industrielles (carbone suie) provoquant un noircissement de la neige à fort effet d'absorption.

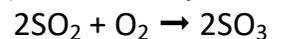
# L'effet des volcans

## Rôle des volcans sur l'albédo planétaire

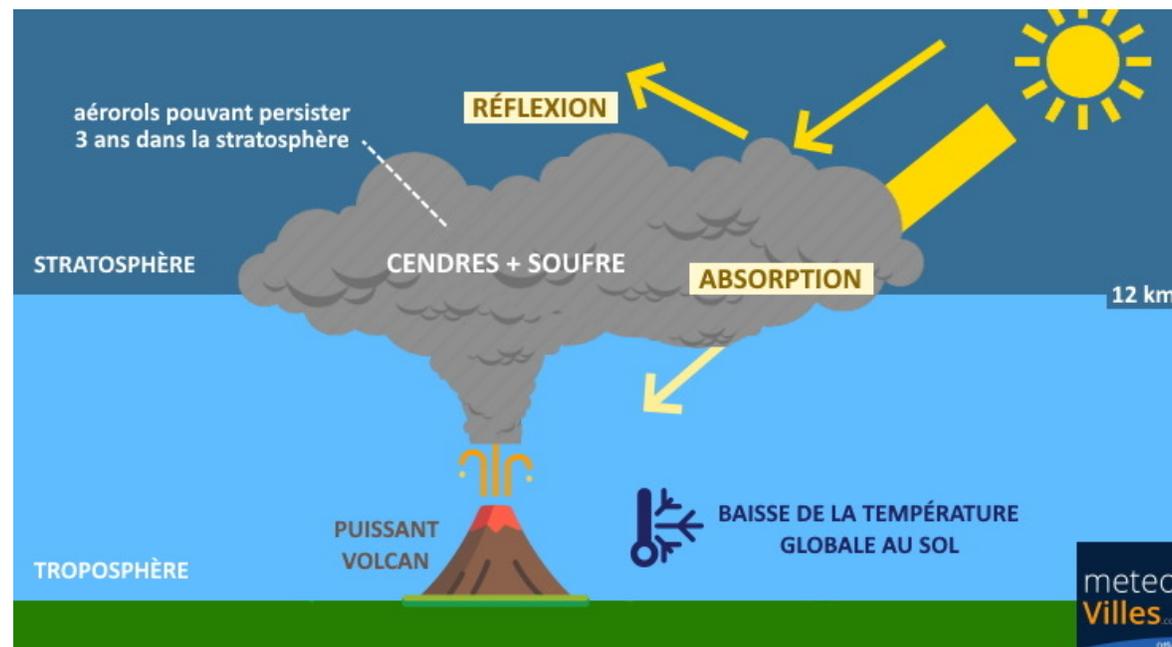
Un cas intéressant et spectaculaire d'effet d'albédo est celui des volcans. Une forte éruption volcanique peut injecter une très grande quantité de gaz et poussière dans la troposphère (en moyenne pour des altitudes inférieures à 12 km), qui sont lessivées par les pluies et le vent dans les jours et semaines suivantes.

Mais dans le cas d'éruptions majeures, de fines particules peuvent se créer plus haut, dans la stratosphère (couche atmosphérique d'altitude comprise entre environ 12 et 50 km), et y perdurer durant des mois avec un fort effet d'albédo. En effet, ces panaches volcaniques sont composés de gaz (vapeur d'eau H<sub>2</sub>O, dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>, dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>, etc.) et de cendres. Si la plupart de ces composés vont rapidement retomber à la surface, certaines espèces soufrées, sous forme de SO<sub>2</sub>, vont réagir avec la vapeur d'eau pour former de l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> qui va lui-même se condenser en fines particules qui vont séjourner dans la stratosphère pendant des mois, voire plusieurs années. Ces aérosols possèdent un fort effet d'albédo et réfléchissent une fraction du rayonnement solaire incident. Elles peuvent ainsi occasionner une réduction de la température de surface de quelques dixièmes de degrés sur l'ensemble de la planète et sur une période pouvant aller jusqu'à plusieurs années.

Réaction chimique du dioxyde de soufre pour former de l'acide sulfurique (avec le trioxyde de soufre):



N.B.: Ces panaches vont également créer un effet de serre, mais qui sera bien moins important que celui d'albédo.



## ***Bilan et forçage radiatif***

# Bilan d'énergie et équilibre

## *Forçage radiatif ( $W.m^{-2}$ )*

**Déséquilibre radiatif** : induit par un forçage radiatif ( $W.m^{-2}$ ) défini comme la variation du bilan radiatif due à un facteur externe au système climatique.

**Forçage radiatif** positif = réchauffement du système (l'énergie absorbée est supérieure à celle émise); un forçage négatif = refroidissement.

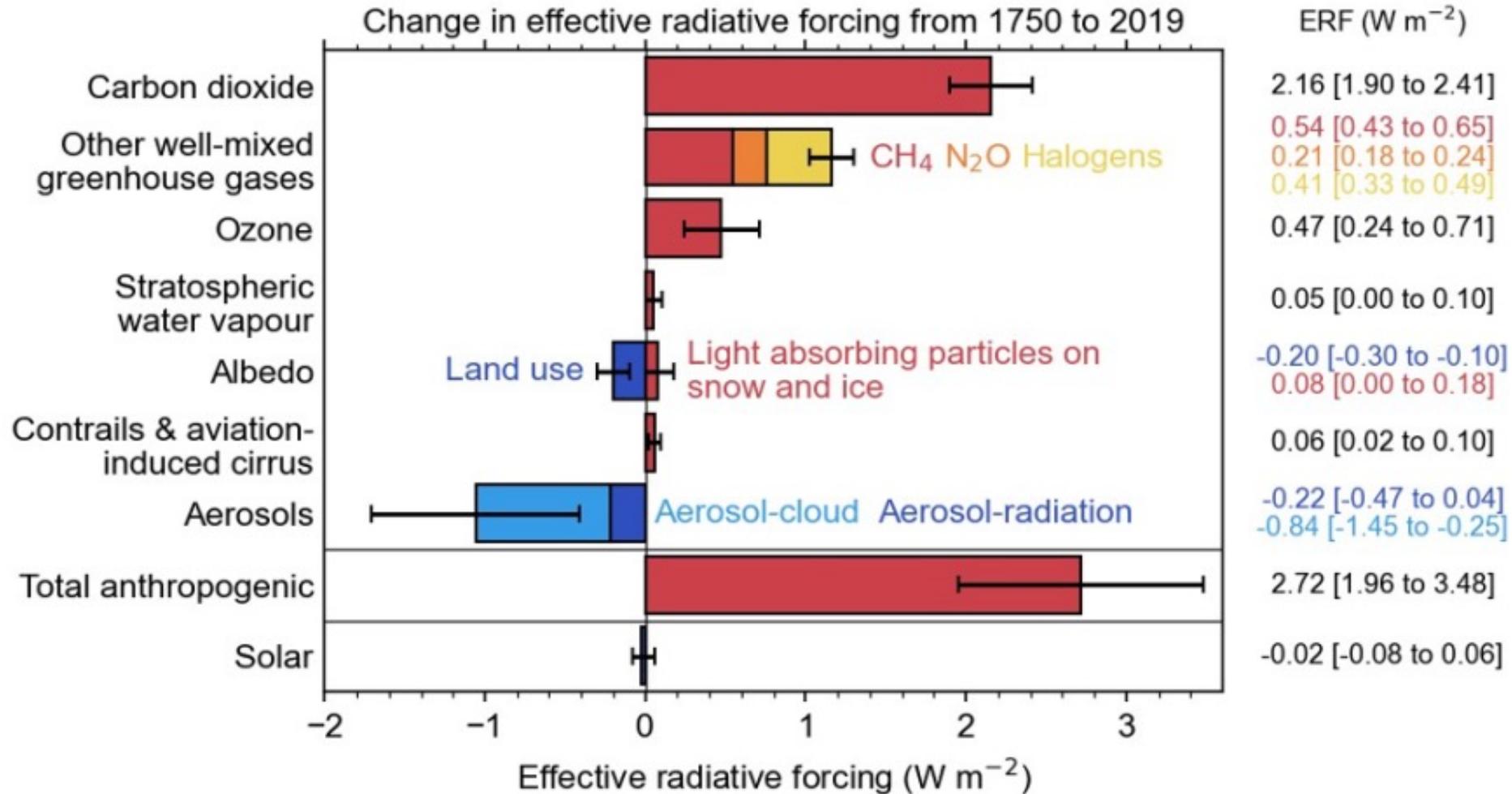
Modification de la quantité ou des propriétés des composants atmosphériques : effet sur ce bilan radiatif et le forçage radiatif du système.

Exemple, les gaz à effet de serre absorbent efficacement le rayonnement infrarouge, donc réchauffent l'atmosphère = forçage radiatif positif sur le système: effet de serre

Certains nuages et aérosols, peuvent produire un forçage radiatif négatif : c'est l'effet d'albédo.

Rapport du GIEC de 2021 : augmentation du forçage radiatif anthropique entre 1750 et 2019 = **+2,72  $W/m^2$** .

# Bilan d'énergie et équilibre



# Mesure du bilan radiatif

## Histoire:

**Premières mesures** : Explorer 7 (1959), puis Tiros-1 (premier satellite de météorologie lancé en avril 1960) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

**Entre 1978 et 1990**, instruments de la NASA ERB (Earth Radiation Budget, embarqués sur les satellites polaires Nimbus) puis ERBE (Earth Radiation Budget Experiment, embarqués sur les satellites ERBS, NOAA-9 et NOAA-10).

**Après ERBE**, radiomètres SCARAB (Scanner for Radiation Budget) entre 1994 et 1999 et embarqués sur des satellites russes de la série Meteor-3. Une version plus récente, SCARAB-3, est actuellement utilisée sur le satellite franco-indien Megha-Tropiques.

**À partir de 1997**, programme spatial de la NASA CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System,) instruments embarqués sur les satellites TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), première mission conjointe entre les agences spatiales américaine et japonaise.

**Autres instruments CERES** lancés ensuite sur les satellites Terra (lancé en 1999) et Aqua (lancé en 2002) de la NASA.

**Depuis les années 2000**, instruments géostationnaires GERB (Geostationary Earth Radiation Budget) à bord des satellites Meteosat de seconde génération (MSG) de l'agence européenne EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites).

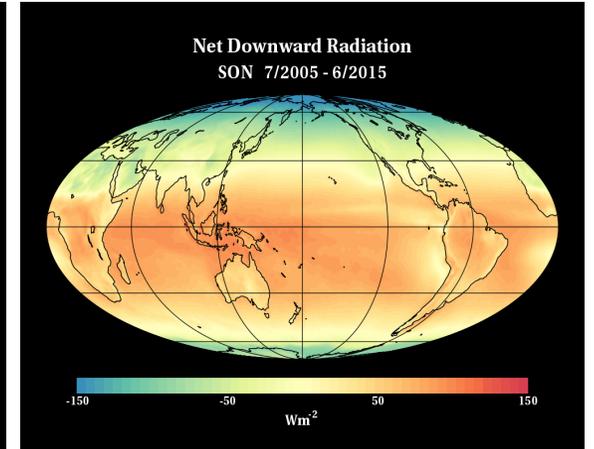
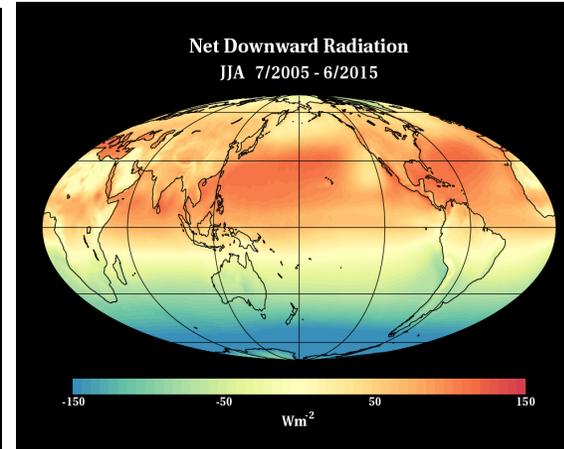
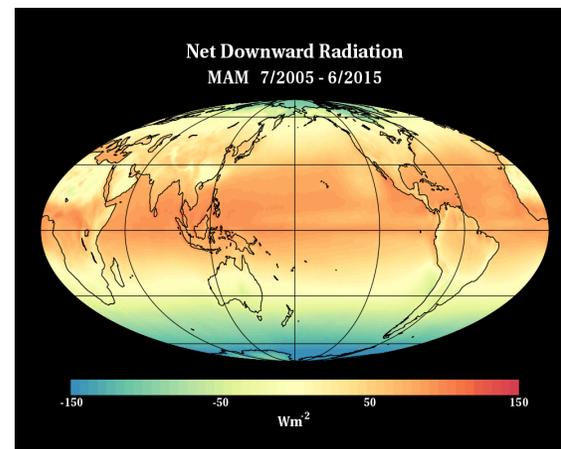
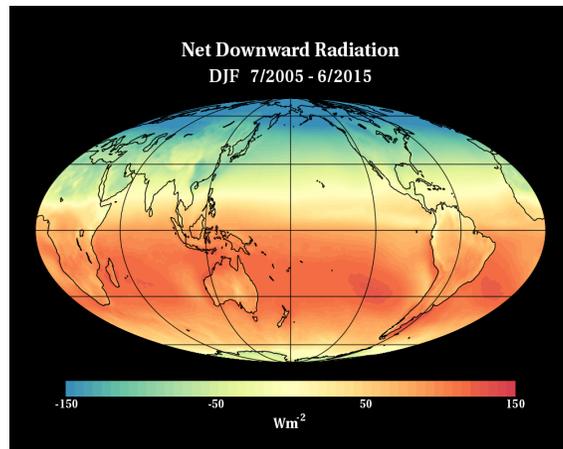
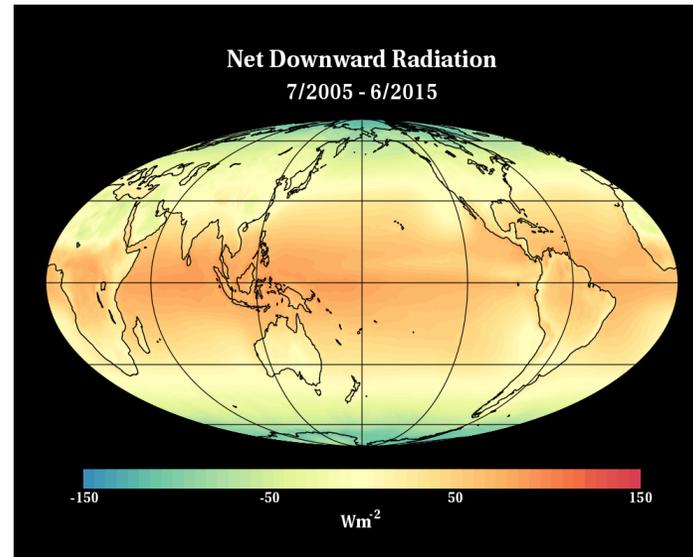
Missions spatiales successives: mesure globale du bilan radiatif terrestre depuis plusieurs dizaines d'années.

**Séries temporelles** : indispensables pour surveiller l'évolution du bilan radiatif et mieux évaluer l'impact des activités humaines le climat.

De plus, météo  $\neq$  climat : série de 30 ans.

# Mesure du bilan radiatif: effet de la latitude

**Exemple:** bilan radiatif global net (en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) au sommet de l'atmosphère à partir des mesures de CERES (NASA) entre 2005 et 2015.



# Bilan d'énergie et équilibre

## Température d'équilibre radiatif des planètes du système solaire

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars
Paramètres				
T mesurée en K (°C)	440 (+166,85)	737 (+463,85)	288 (+14,85)	210 (-63,15)
Pression moyenne à la surface (en hPa)	proche de 0	90 000	1000	6
Albédo A	0,06	0,7	0,3	0,15
Irradiance solaire $C_s$ (en $W.m^{-2}$ )	9083	2601	1360,8	586
Distance moyenne au Soleil (en ua)	0,38	0,72	1	1,52

"Dis moi, et j'oublierai. Montre moi et je me souviendrai. Implique moi et je comprendrai." Confucius

S'impliquer ...

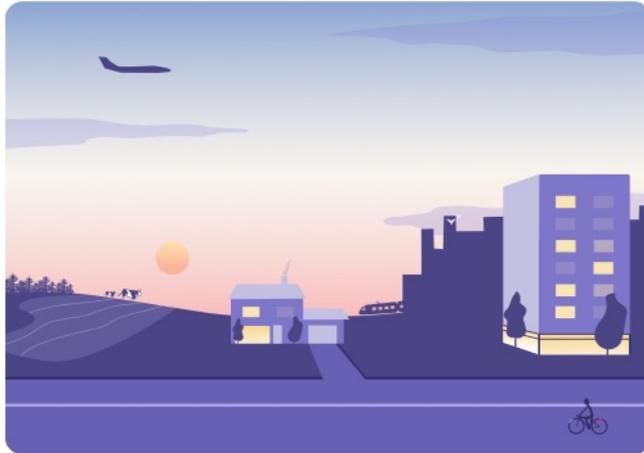


# ***Notions de bilan carbone***

# Bilan Carbone

nos  
**GESTES**  
climat

Connaissez-vous votre empreinte sur le climat ?



FAIRE LE TEST

 FAIRE LE TEST À PLUSIEURS

Site pour réaliser un bilan carbone en ligne:  
<https://nosgestesclimat.fr>

  
RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**ADEME**  
  
AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

 **ABC**  
ASSOCIATION BILAN CARBONE

# Le bilan carbone

## Le Bilan Carbone

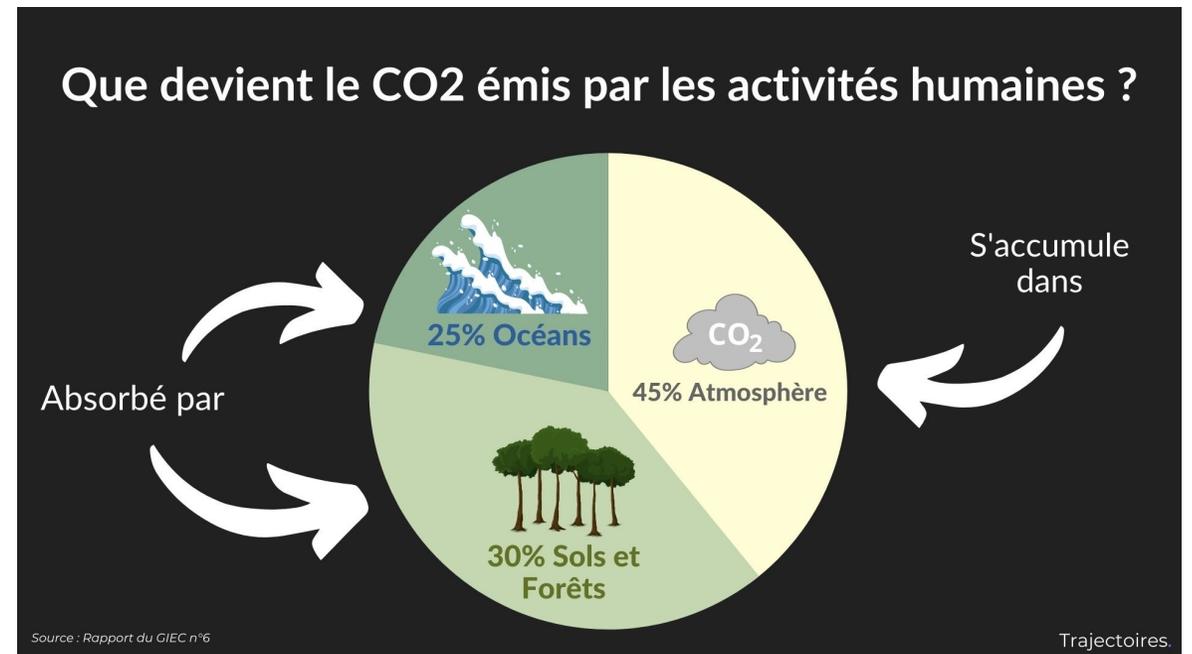
Méthode pour comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'une entreprise, d'un produit ou d'un individu.

Il est mesurée équivalent CO<sub>2</sub>, qui est la quantité émise de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui provoquerait le même effet radiatif intégré, pour un horizon temporel donné, qu'une quantité émise d'un seul ou de plusieurs gaz à effet de serre.»

Le concept de **puits de carbone**: réservoirs ayant la capacité d'absorber et de stocker le carbone de l'atmosphère (GIEC 2021).

En 2021, sur la totalité du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère :

- Environ 30% du carbone est capté par les sols et les forêts
- Environ 25% du carbone est capté par les océans
- Les 45% restants: pas absorbés et s'accumulent dans l'atmosphère. Ce sont les **émissions résiduelles**.



# Le bilan carbone

## Neutralité carbone

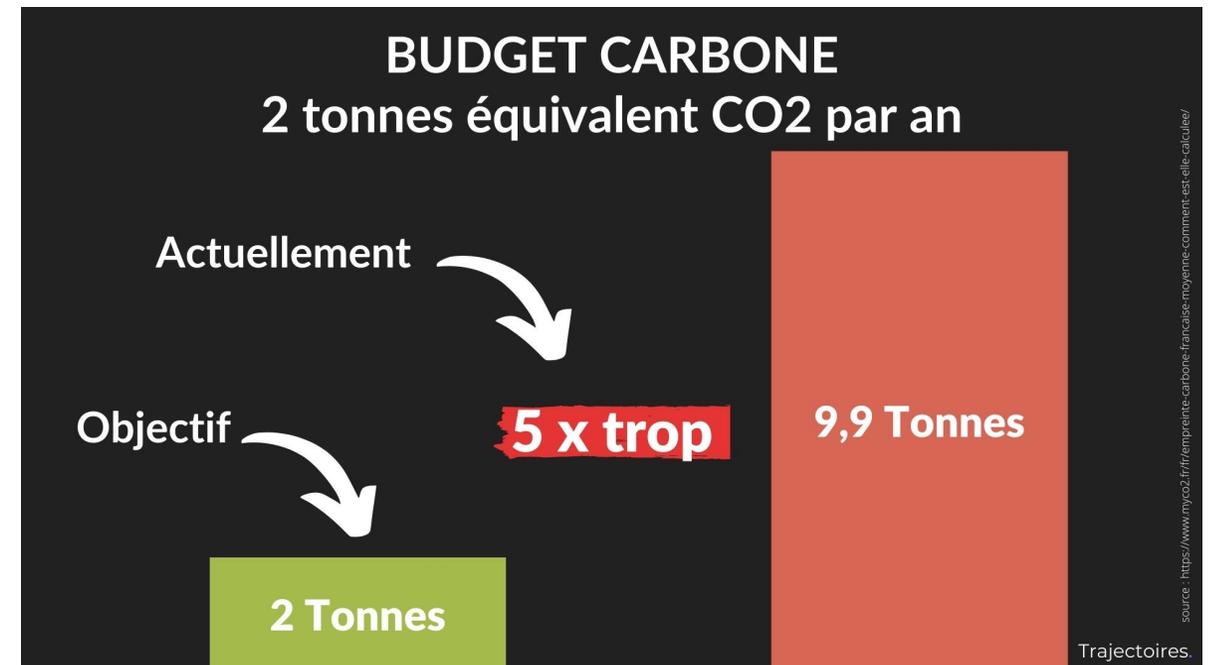
La Neutralité carbone à l'échelle mondiale: les émissions de gaz à effet de serre mondiales sont absorbées à 100% par les puits de carbone.

**Objectif:** plus d'émissions résiduelles qui s'accumulent dans l'atmosphère, le réchauffement climatique devrait s'arrêter.

Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050: il faudrait que chaque habitant à l'échelle mondiale ait une empreinte carbone de **2 tonnes de CO2-eq par an**.

En 2021, l'empreinte carbone moyenne en France est actuellement d'environ **9 tonnes de CO2-eq**.

Atteindre la neutralité carbone signifie (en France) **diviser notre empreinte carbone actuelle par environ 5**.



# Bilan carbone

## Petit bilan de carbone:

Les humains rejettent chaque année **33 milliards de tonnes** de CO<sub>2</sub>

Les « puits » de carbone (océan et végétation) absorbent **11 milliards de tonnes / an**

Est-il envisageable de **n'émettre que ces 11 milliards de tonnes** de CO<sub>2</sub> / an ?

Pour 7 milliards d'individus (en passe de devenir 9 milliards d'ici à 2050), cela représente, équitablement répartis, **moins de 1600 kg de CO<sub>2</sub> par personne / an**

# Stratégie zéro carbone

Que peut-on « faire » avec l'équivalent de 1000 kg de CO<sub>2</sub> :

- 500 m<sup>3</sup> de gaz (de quoi chauffer un appartement de 50 m<sup>2</sup> moyennement isolé) ou 380 litres de mazout
- 1 aller-retour Paris-New York en avion
- 190 allers-retours Paris-Bordeaux en train
- 14.000 km avec une Twingo en ville
- 8.500 km de 4 × 4 en ville
- 4300 kWh d'électricité
- 1,8 tonne de papier

Pour arriver la neutralité carbone, il faudrait que chaque français émette moins de **2000 kg** d'équivalent CO<sub>2</sub> par personne / an en 2050 (stratégie bas carbone).

Bilan carbone moyen d'un français par an ??

# Le bilan carbone

## Un exemple : Internet et nouvelles technologies

Son côté « virtuel » est un facteur aveuglant.

L'empreinte carbone numérique est composée de plusieurs facteurs comme :

- Equipements électroniques
- Traitement et stockage de données dans les datacenters (centres de données)
- Réseaux et infrastructures nécessaires pour faire transiter la donnée

Au total, le numérique consomme 10 à 15 % de l'électricité mondiale, soit l'équivalent de 100 réacteurs nucléaires.

Et cette consommation double tous les 4 ans !

*Depuis 2015: les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux activités du numérique sont équivalentes (supérieures) à celles du trafic aérien, deux fois plus en 2022.*



Une newsletter = 10 grammes de CO<sub>2</sub>

Empreinte carbone du spam = émissions annuelles de 3,1 millions de voitures



15.000 km = la distance moyenne parcourue par un e-mail

281 milliards = nombre d'emails envoyés chaque jour dans le monde



Une photo de vacances de 1 Mo à 10 amis = 500 mètres en voiture

Une requête Google = une ampoule de 60 W allumée pendant 17 secondes



Entre 10.000 et 50.000 e-mails non lus dans une boîte de réception

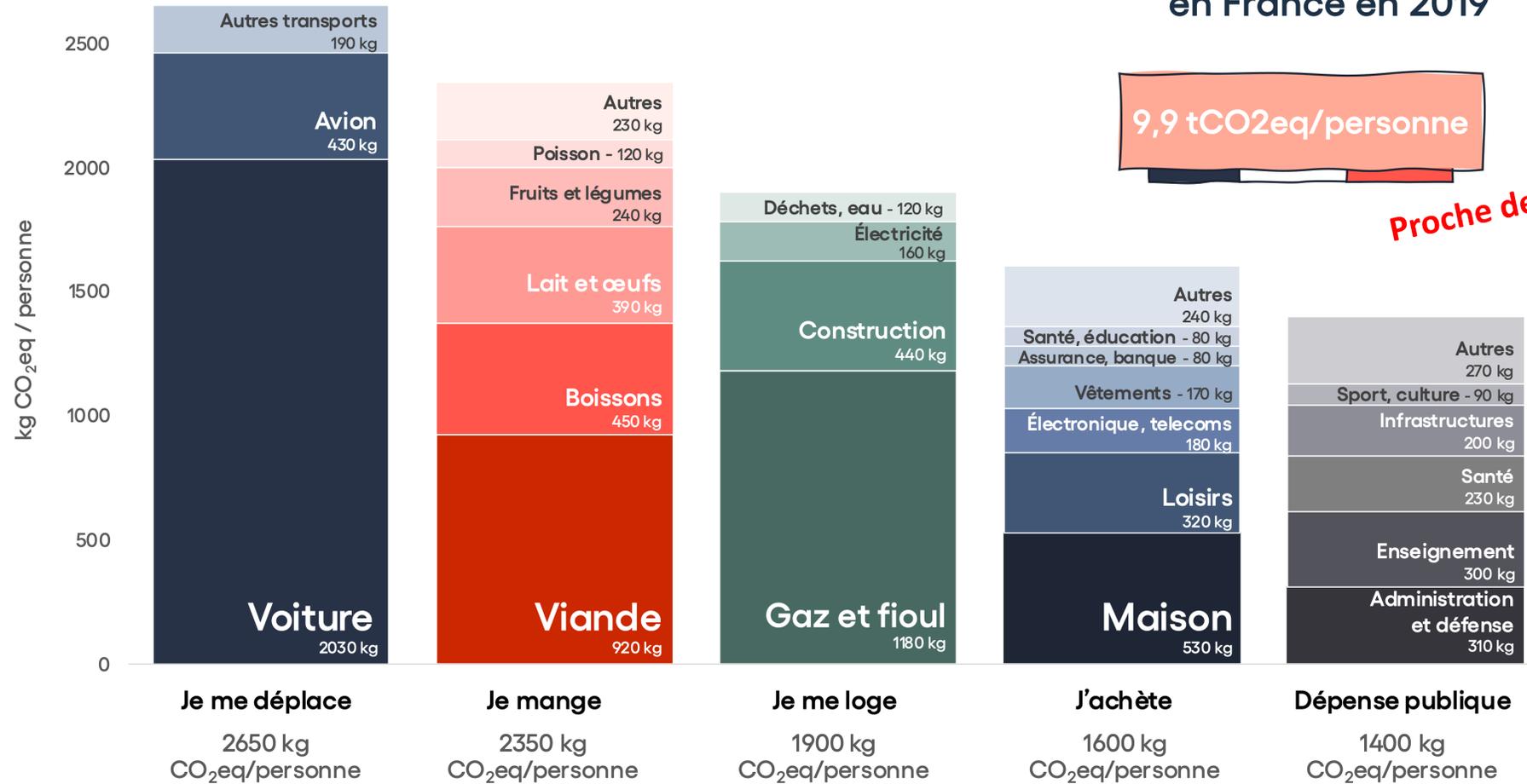
Industrie du numérique = 2% des émissions globales de CO<sub>2</sub>



# Le bilan carbone



## Empreinte carbone moyenne en France en 2019



Gaz inclus : CO<sub>2</sub> (hors UTCATF France), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, SF<sub>6</sub>, PFC, H<sub>2</sub>O (trainées de condensation).

Source : MyCO<sub>2</sub> par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalyse V3 et INCA 3.

## Réduire les énergies fossiles

### OBJECTIF

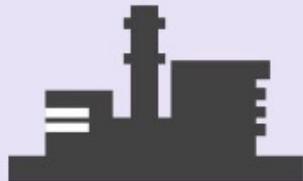


Diviser par deux  
les émissions de gaz  
à effet de serre  
d'ici 2030 par rapport  
à leur niveau de 1990.

Émissions actuelles mondiales :  
environ 59 GtCO<sub>2</sub>-eq\* (2019)

Charbon, gaz naturel, pétrole  
sont responsables de

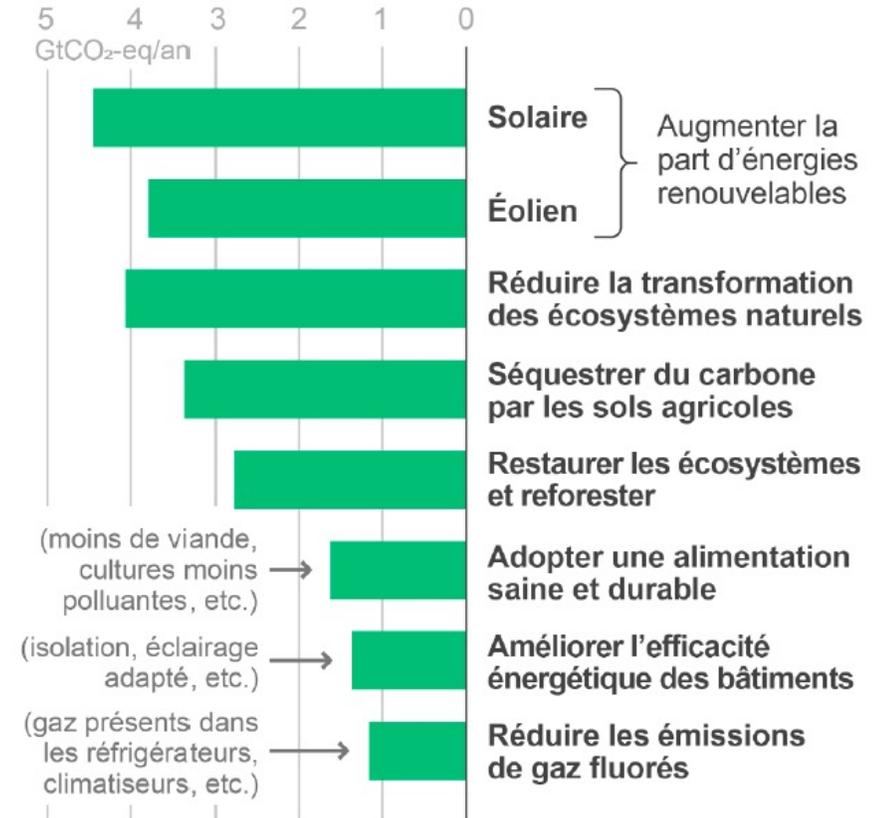
79% des émissions  
mondiales de CO<sub>2</sub>



## Le bilan carbone

## Huit des principales solutions proposées par le Giec

Contribution potentielle à la réduction des  
émissions de gaz à effet de serre en 2030  
(en gigatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an)



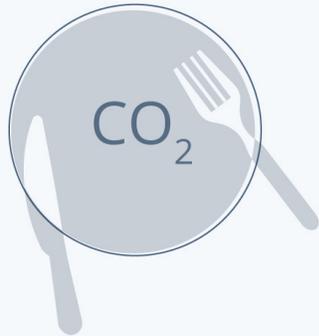
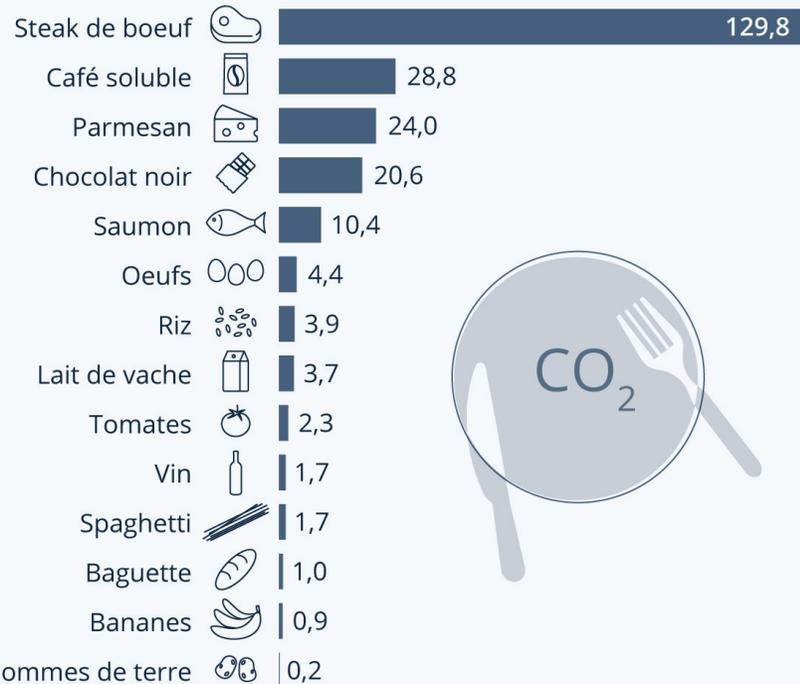
\* L'équivalent CO<sub>2</sub> est une unité qui permet de cumuler dans une seule mesure les émissions des différents gaz à effet de serre, en calculant le niveau de CO<sub>2</sub> ayant le même pouvoir de réchauffement.

Brief.science

# Le bilan carbone

## L'empreinte carbone de nos aliments

Émissions de gaz à effet de serre par kilogramme d'une sélection d'aliments et boissons (en kg d'équivalent CO<sub>2</sub>) \*



\* Estimations calculées en 2022 et prenant en compte la production, la transformation et le transport des denrées alimentaires.

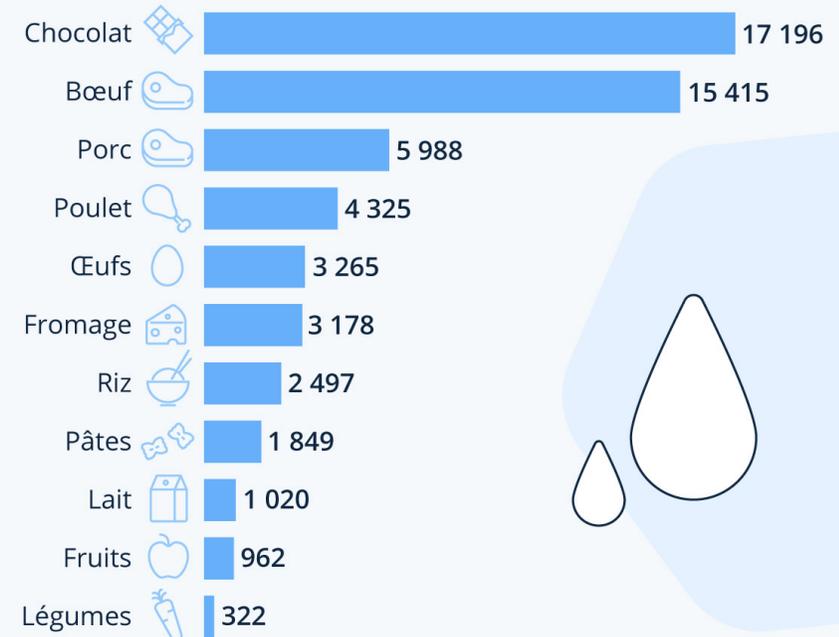
Source : Our World In Data



statista

## La consommation en eau de nos aliments

Empreinte hydrique moyenne totale liée à la production de 1 kg des aliments suivants \*



\* Ces données prennent en compte : eau de pluie consommée par les plantes, arrosage/consommation animale et eau polluée durant la production (engrais, pesticides, lavage...).

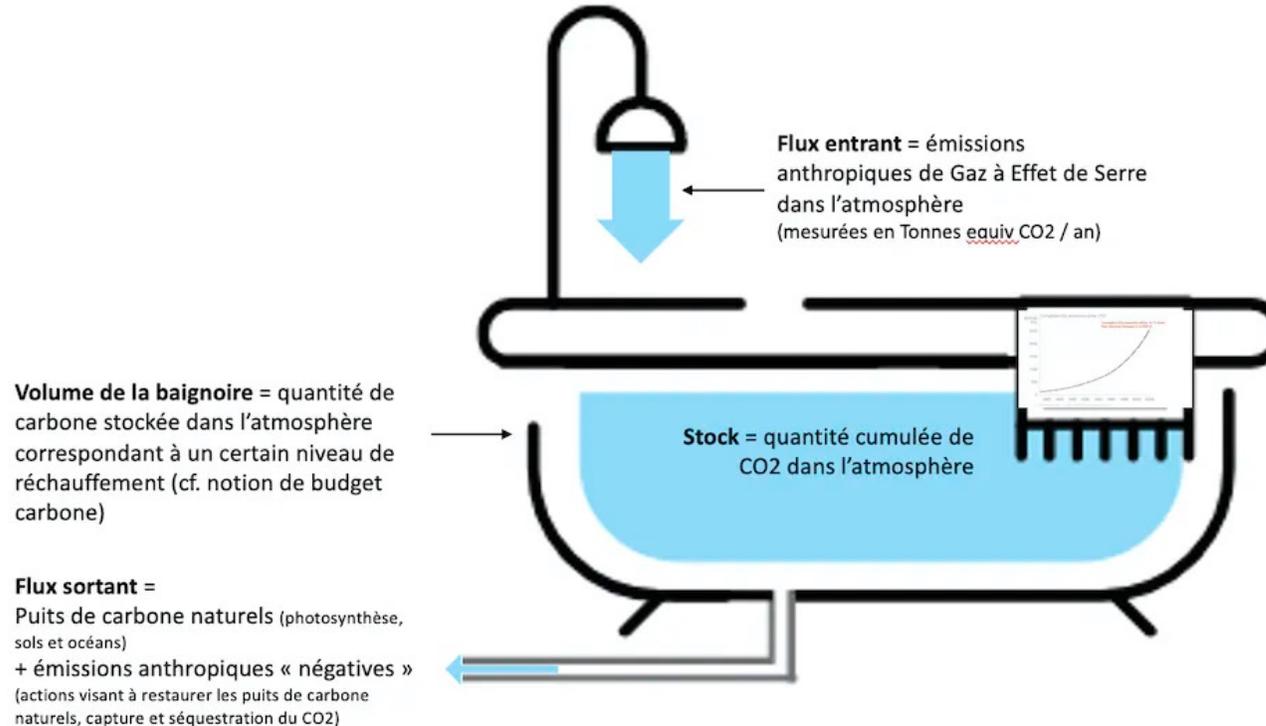
Source : Water Footprint Network



statista

# Le bilan carbone

La métaphore de la baignoire permet de comprendre rapidement l'un des principaux problèmes du changement climatique.



Une représentation du changement climatique problème de stock: la métaphore de la baignoire (source: Aurélien Acquier)

**Bilan** : la baignoire est déjà bien remplie et si l'on réduit le débit d'eau de 50 %, cela ne règlera pas le problème de moitié. Tant que le robinet reste ouvert, l'eau va continuer de monter et la baignoire finira par déborder ...

## LE CLASSEMENT DES PAYS LES PLUS POLLUEURS

MONDE ENTIER 2017	Emission CO2 en Milliards de T 32,84	Emission CO2 en % 100 %	Emission CO2 par habitant 4,37
CHINE	9,26	28,2%	6,68
ÉTATS-UNIS	4,76	14,5%	14,61
INDE	2,16	6,6%	1,61
RUSSIE	1,54	4,7%	10,64
JAPON	1,13	3,4%	8,94
ALLEMAGNE	0,72	2,2%	8,70
CORÉE DU SUD	0,60	1,8%	11,66
IRAN	0,57	1,7%	6,99
CANADA	0,55	1,7%	14,99
ARABIE SAOUDITE	0,53	1,6%	16,16
INDONÉSIE	0,50	1,5%	1,88
MEXIQUE	0,45	1,4%	3,62
BRÉSIL	0,43	1,3%	2,04
AFRIQUE DU SUD	0,42	1,3%	7,43
AUSTRALIE	0,38	1,2%	15,63
TURQUIE	0,38	1,2%	4,71
ROYAUME-UNI	0,36	1,1%	5,43
ITALIE	0,32	1,0%	5,31
FRANCE	0,31	0,9%	4,56

## Bilan carbone

### Emissions de carbone mondiales par habitant:

2022 : 4,27 tCO2/hb  
 2015 : 4,29 tCO2/hb  
 2013 : 4,40 tCO2/hb

## LES PAYS QUI GÈNÈRENT LE PLUS DE CO2 PAR HABITANT

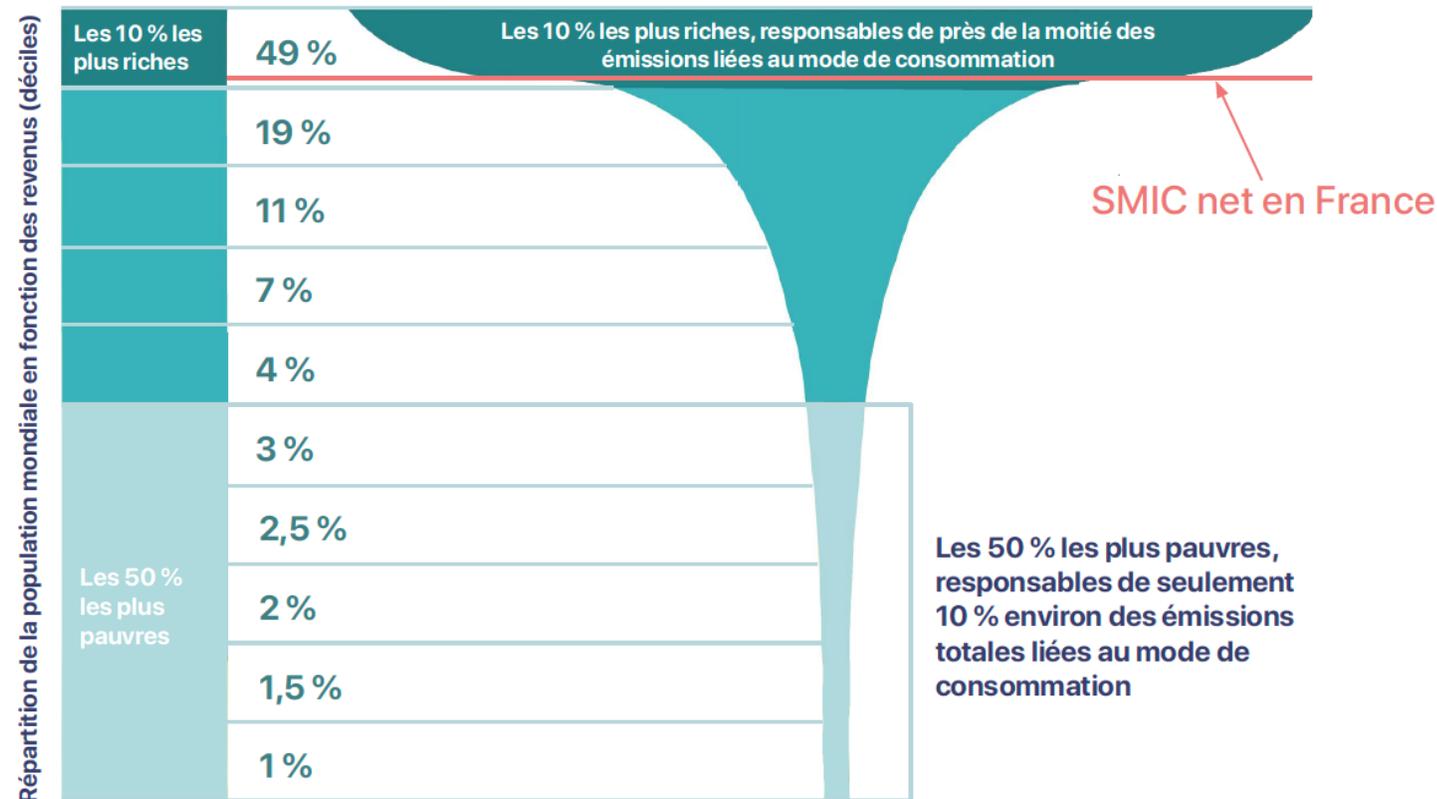
MONDE ENTIER 2017	Emission CO2 par habitant 4,37	Emission CO2 en Milliards de T 32,84	Emission CO2 en % 100 %
ARABIE SAOUDITE	16,16	0,53	1,6%
AUSTRALIE	15,63	0,38	1,2%
CANADA	14,99	0,55	1,7%
ÉTATS-UNIS	14,61	4,76	14,5%
CORÉE DU SUD	11,66	0,60	1,8%
TAIWAN	11,38	0,27	0,8%
RUSSIE	10,64	1,54	4,7%
JAPON	8,94	1,13	3,4%
ALLEMAGNE	8,70	0,72	2,2%
POLOGNE	7,96	0,31	0,9%
AFRIQUE DU SUD	7,43	0,42	1,3%
IRAN	6,99	0,57	1,7%
CHINE	6,68	9,26	28,2%
ESPAGNE	5,45	0,25	0,8%
ROYAUME-UNI	5,43	0,36	1,1%
ITALIE	5,31	0,32	1,0%
TURQUIE	4,71	0,38	1,2%
FRANCE	4,56	0,31	0,9%

# Le bilan carbone

Source: *Inventons nos vies bas carbone*

Déciles de revenus au niveau mondial  
et émissions dues au mode de consommation correspondantes

## Pourcentage des émissions de CO<sub>2</sub> dans la population mondiale



Source : Oxfam 2015

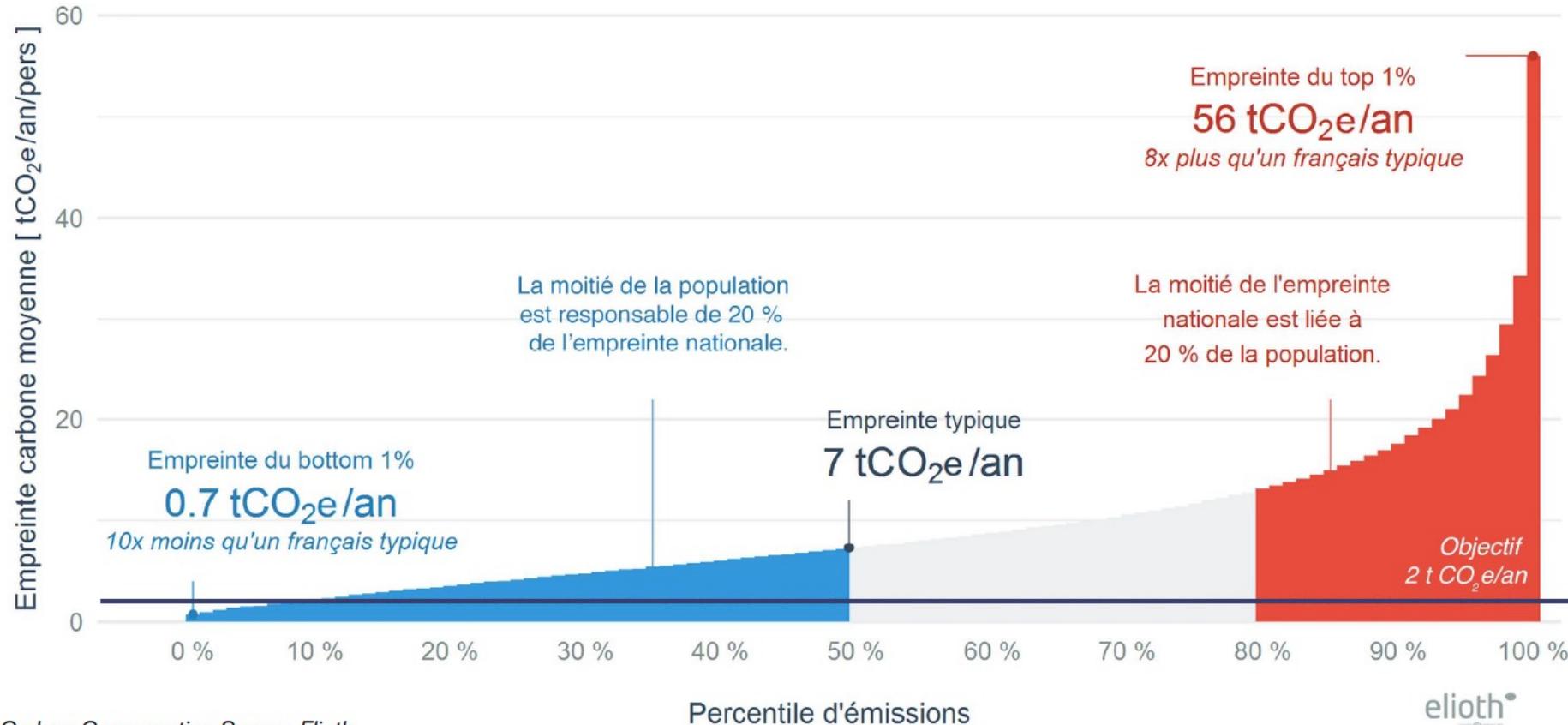
INVENTONS  
NOS VIES  
BAS CARBONE

# Le bilan carbone

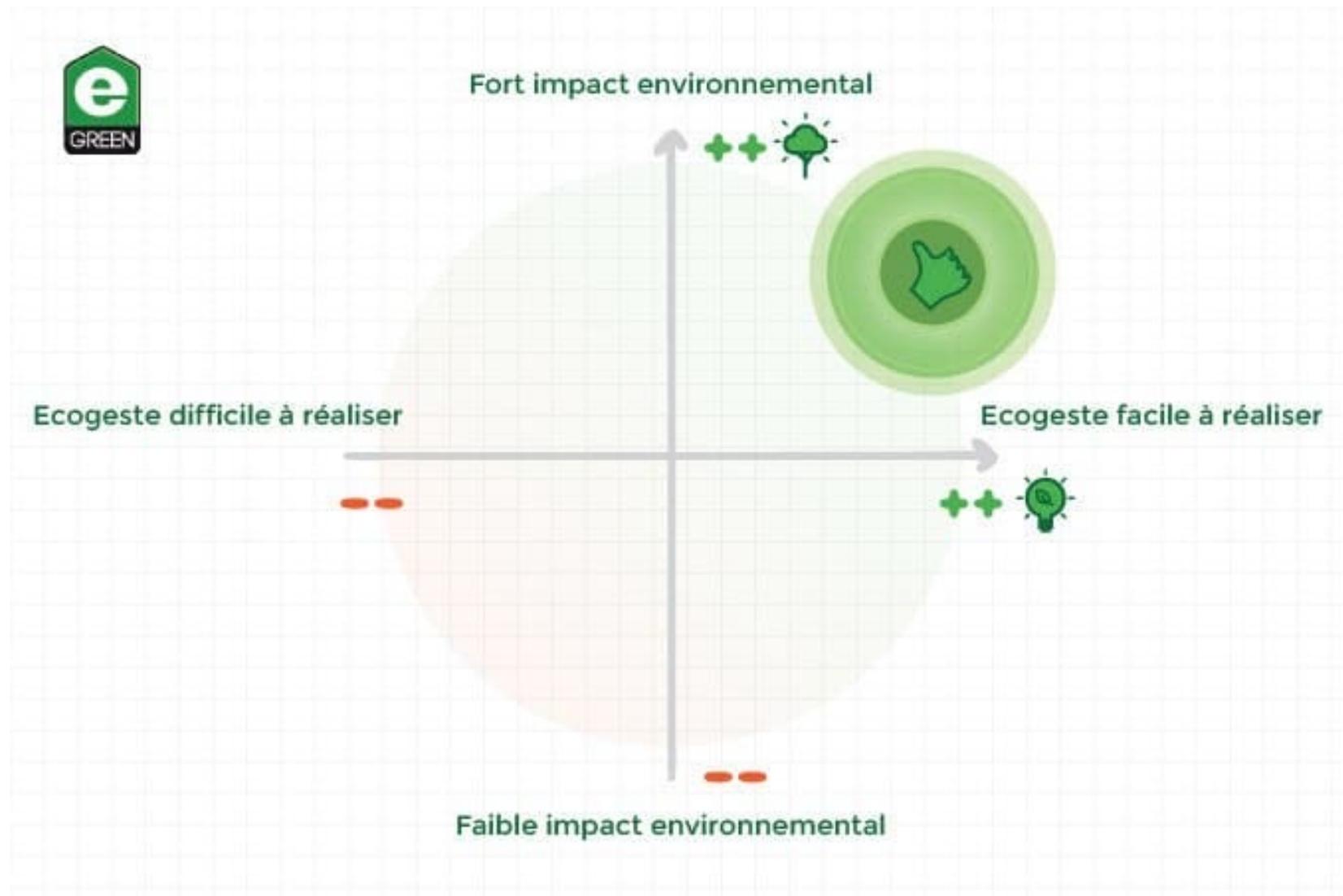
Source: *Inventons nos vies bas carbone*

## Que se cache-t-il derrière l'empreinte carbone de la France ?

Distribution de l'empreinte carbone des français en 2011, d'après les données de l'étude "Carbon consumption survey".



# Matrice Impact et faisabilité, pour débattre des solutions:



Source : le wiki du climat / la fresque du climat:

Exemple de matrice Impact et faisabilité, pour que les participants débattent des solutions qu'ils ont à proposer

# Le changement climatique: médaille CNRS 2023

