

La part du Soleil

Tous les onze ans, en moyenne, notre étoile connaît un regain d'activité qui se manifeste par une augmentation du nombre de « taches solaires » (points noirs sur la photo) et de la quantité d'énergie solaire arrivant sur Terre. Cela se traduit par une fluctuation de $0,1^{\circ}\text{C}$ (au plus) de la température moyenne à la surface de la Terre. L'activité du Soleil ne peut donc pas expliquer à elle seule le réchauffement planétaire observé au cours des dernières décennies.

Le climat sous influence

Soleil, éruptions volcaniques, effet de serre naturel et, depuis peu, activités humaines... De nombreux facteurs interviennent sur le climat de la Terre.

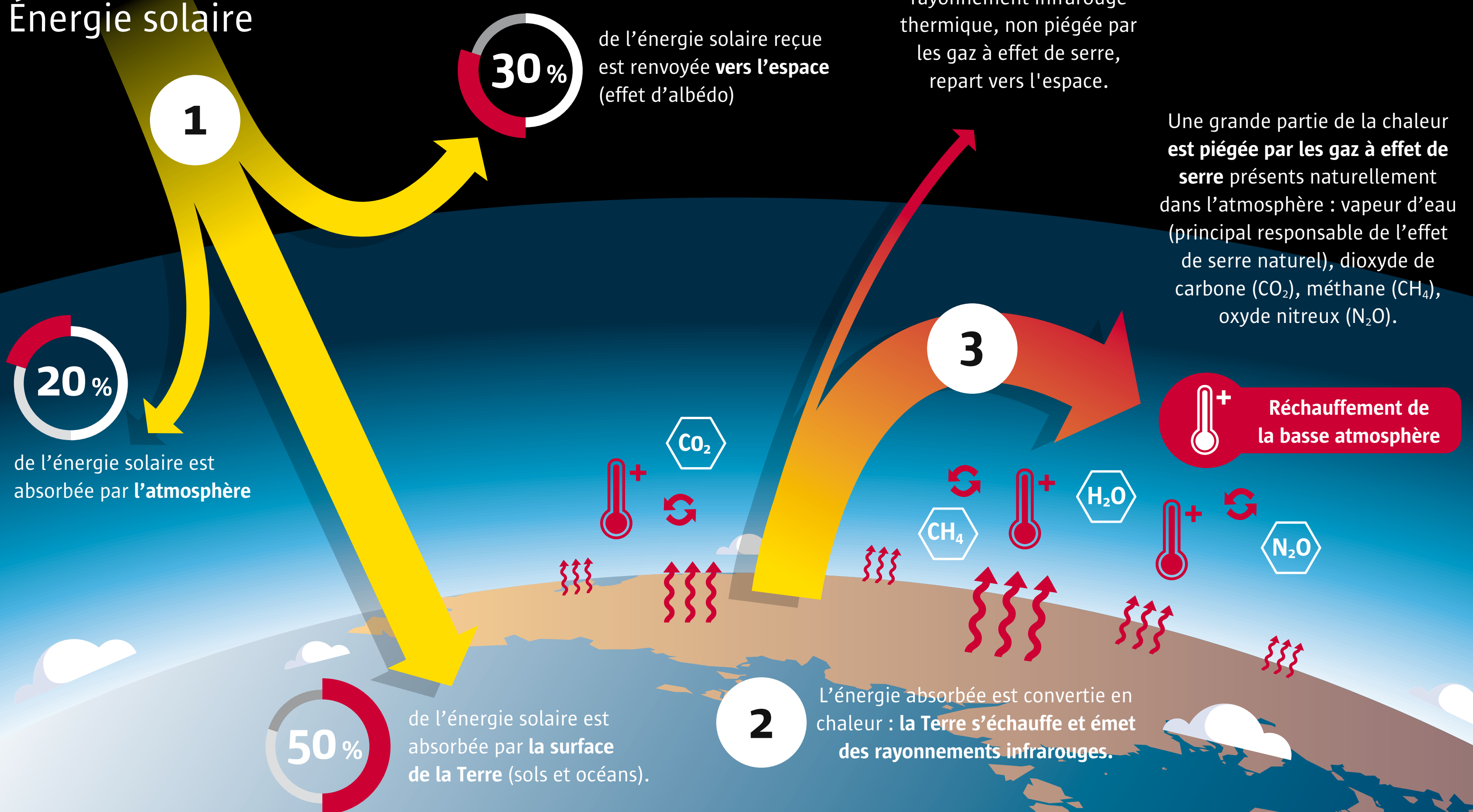
Plusieurs facteurs naturels agissent sur le climat de la Terre. En premier lieu, le Soleil qui est le moteur de la machine climatique. La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre est variable. Elle dépend de l'inclinaison de son axe de rotation et des caractéristiques de son orbite autour du Soleil. Ces paramètres astronomiques sont à l'origine des périodes glaciaires et interglaciaires qui ont marqué les variations du climat terrestre au cours des derniers millions d'années. L'activité volcanique conditionne également le climat de la Terre, de même que l'effet de serre. Présents dans l'atmosphère, certains gaz comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂) ou le méthane (CH₄) retiennent une partie de la chaleur reçue du Soleil. Sans ces gaz à effet de serre (GES),

la température moyenne de la Terre avoisinerait -18°C au lieu de +15°C. Ils sont donc essentiels au développement de la vie sur Terre. À l'échelle géologique (millions d'années), l'effet de serre naturel a varié en fonction notamment du volcanisme et de la capacité particulière des océans à stocker du dioxyde de carbone lors des glaciations. Depuis le début de l'ère industrielle (200 ans), les activités humaines produisent elles aussi des GES, qui s'ajoutent à ceux naturellement présents dans l'atmosphère. Cet effet de serre additionnel augmente le réchauffement de l'atmosphère et permet d'expliquer, selon le Giec (5^e rapport), le réchauffement planétaire observé depuis 1950.

UN EFFET DE SERRE QUI S'AMPLIFIE

En rejetant dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, qui viennent s'ajouter à ceux déjà présents, **les activités humaines amplifient le phénomène naturel de l'effet de serre, avec un risque de déséquilibre climatique pour la planète.**

Énergie solaire



L'ATMOSPHERE, UNE COUCHE TRÈS FINE

600 km
Épaisseur de l'ensemble des couches de l'atmosphère

6 371 km
Rayon de la Terre



Thermosphère : de 90 à 600 km

Mésosphère : de 50 à 90 km

Stratosphère : de 8-15 à 50 km

Troposphère : entre 8 et 15 km d'altitude (basse atmosphère)

contient
90%
des gaz à effet de serre

Les experts du climat

20 000 scientifiques collaborent à l'étude du climat et de son évolution passée et future. Le Giec est chargé de livrer une synthèse des connaissances.

La climatologie est une science pluridisciplinaire et internationale. Physiciens, chimistes, glaciologues, statisticiens, océanographes, météorologues, géologues, astronomes, biologistes, historiens, géographes... 20 000 scientifiques dans le monde, dont un millier en France, étudient le climat ainsi que son évolution au cours des temps anciens et de ceux à venir. Ils bénéficient de l'aide d'informaticiens et de mathématiciens dans la mise au point de puissants modèles informatiques capables de simuler la machine climatique et de prédire ses variations futures (cf partie III). Techniciens et ingénieurs innovent, quant à eux, pour mettre au point des instruments de mesure toujours plus performants (sondes, satellites...). Cinq organismes suivent l'évolution de la température moyenne à la surface de la planète : l'Agence américaine de l'océan

et de l'atmosphère (Noaa), l'Agence spatiale américaine (Nasa), le Centre Hadley du Met Office britannique, l'université de Berkeley et l'Agence météorologique japonaise. Chaque année, la climatologie produit des milliers de publications scientifiques. D'où la nécessité de faire régulièrement une synthèse de l'état des connaissances. C'est le rôle du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec*), créé en 1988 par les Nations unies et l'Organisation météorologique mondiale, dont les rapports (le 5^e a été publié en 2013 et 2014) sont rédigés par des centaines d'auteurs, sur la base des publications scientifiques, et relus par plus de 1 000 chercheurs. Ce socle scientifique, construit collectivement et approuvé par l'ensemble des gouvernements, sert de base aux négociations internationales sur le climat.

* En anglais, IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

DANS QUEL MONDE VIVRONS-NOUS DEMAIN ?

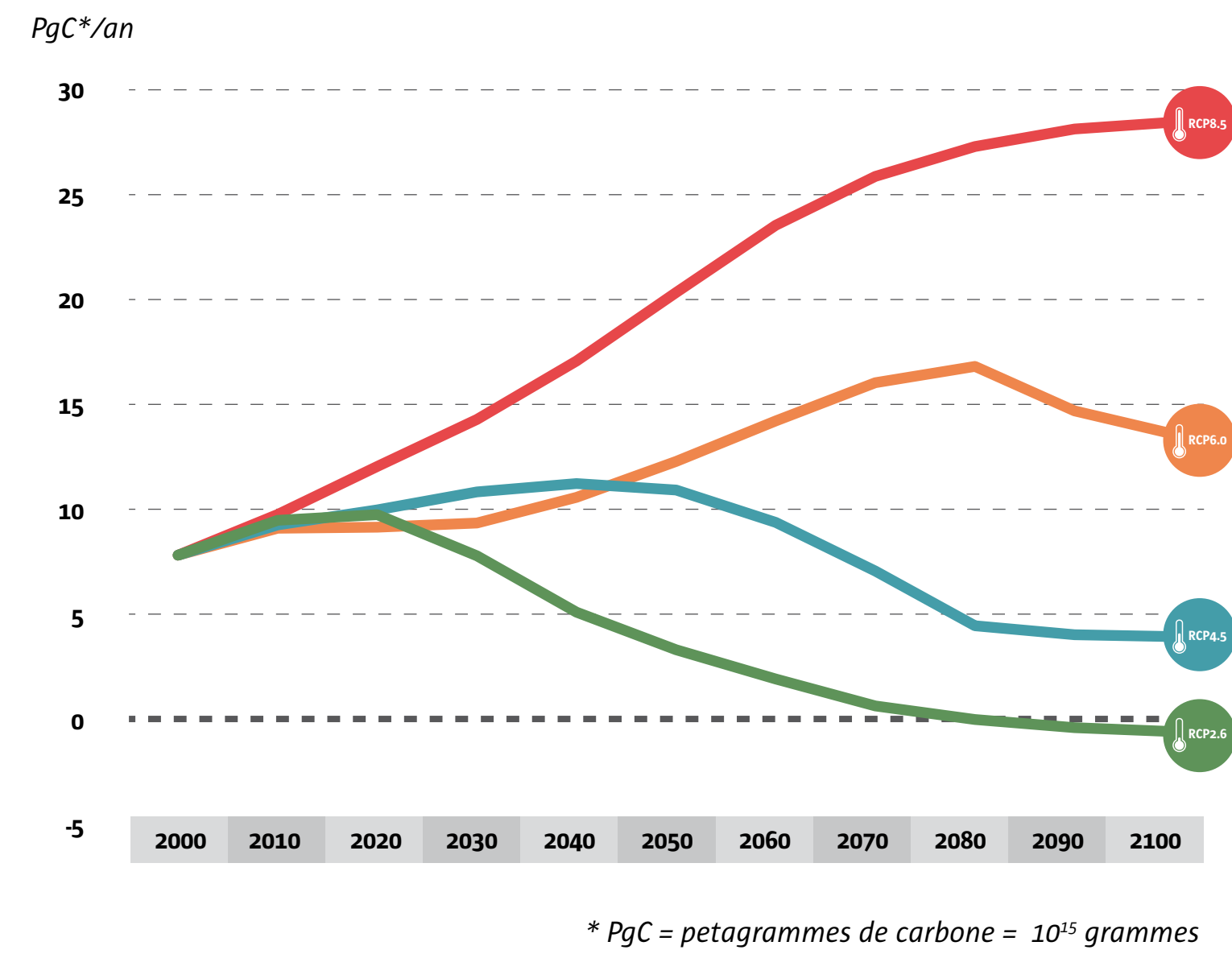
LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS JUSQU'EN 2100

Les climatologues produisent des projections climatiques pour le futur à partir de quatre scénarios de concentrations de gaz à effet de serre (RCP*). Les économistes et sociologues élaborent, quant à eux, des scénarios de développement compatibles avec ces RCP. Le scénario RCP2.6 est le seul qui permet de rester, en 2100, sous le seuil des 2°C de réchauffement par rapport à la période pré-industrielle, objectif que se sont fixés la majorité des États de la planète (cf partie IV).



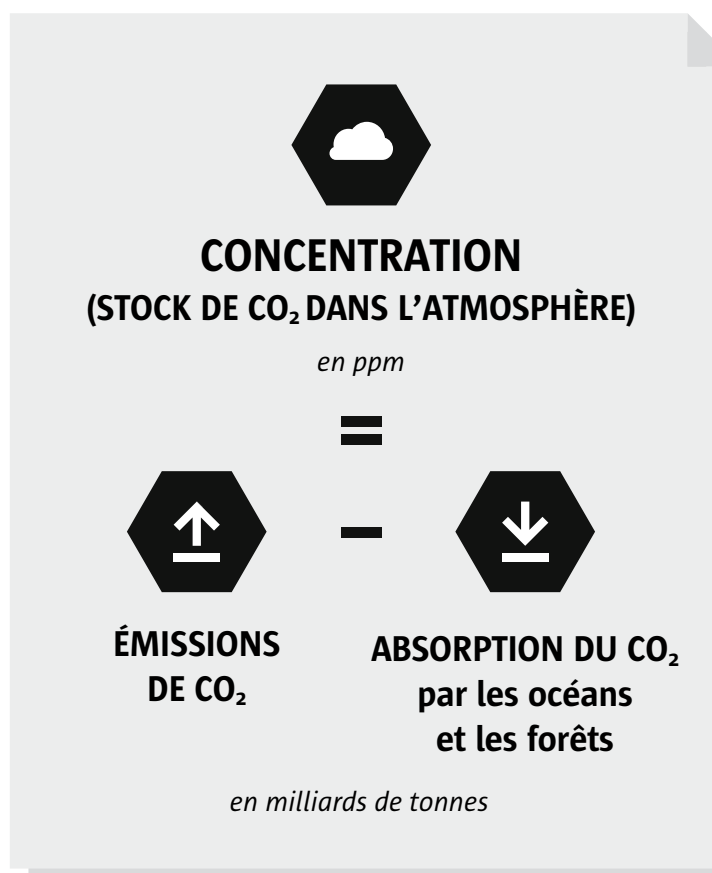
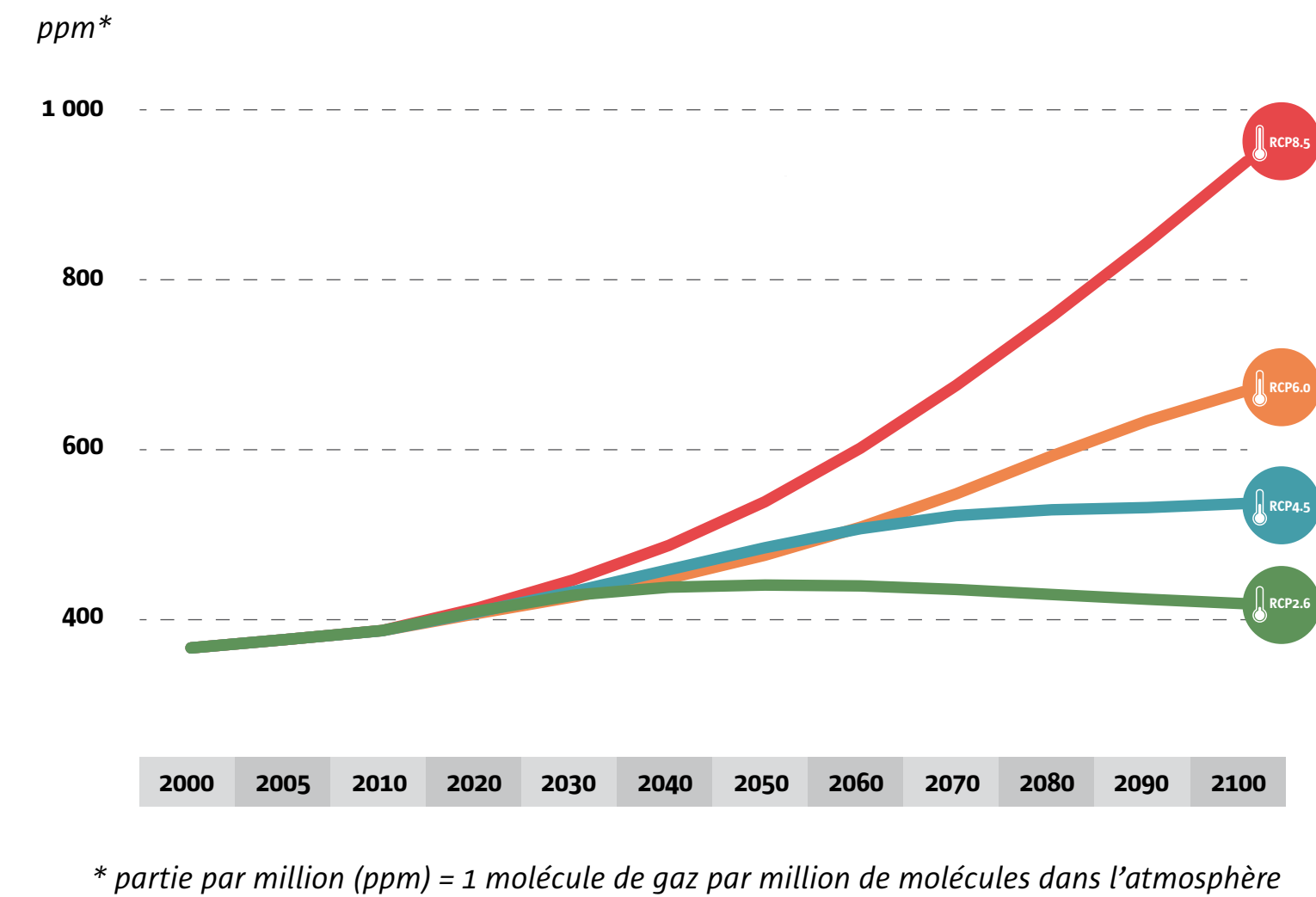
* RCP : Representative Concentration Pathways

EMISSIONS HUMAINES DE CO₂ DANS L'ATMOSPHÈRE



RCP8.5 : poursuite de l'exploitation croissante des énergies fossiles (évolution actuelle)
RCP6.0 et RCP4.5 : scénarios intermédiaires de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre à un niveau plus ou moins élevé.
RCP2.6 : réduction forte des émissions de gaz à effet de serre à partir de 2030, pour être pratiquement nulles à l'horizon 2100. Scénario impliquant des politiques climatiques rapidement déployées et des transitions énergétique et agricole.

CONCENTRATION DE CO₂ DANS L'ATMOSPHÈRE

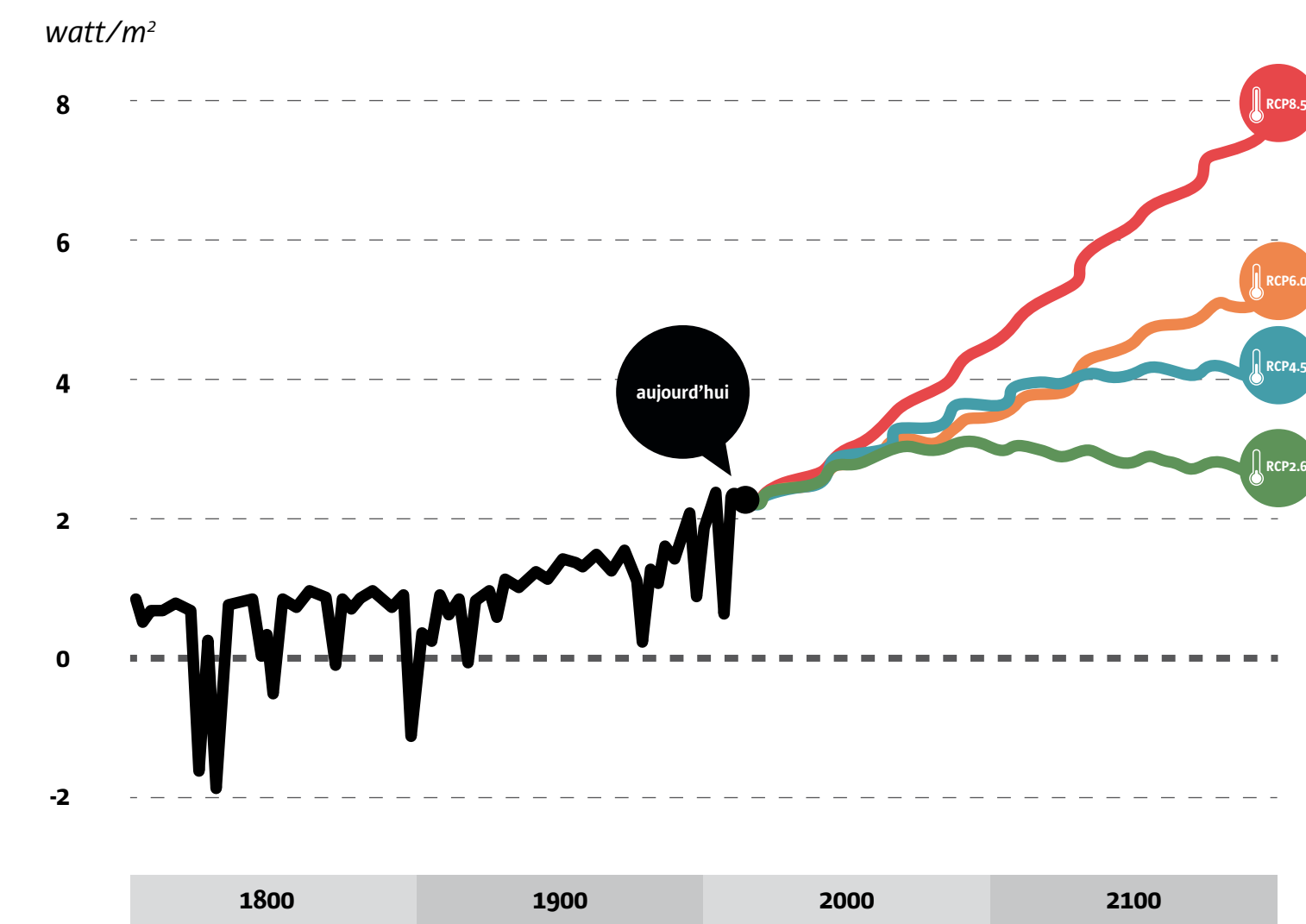


LES 5 SCÉNARIOS DES SOCIOLOGUES ET ÉCONOMISTES

Ces scénarios de base représentent des évolutions économiques, démographiques et technologiques. Le travail consiste ensuite à les associer à des politiques climatiques afin d'atteindre les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre compatibles avec les différents RCP.

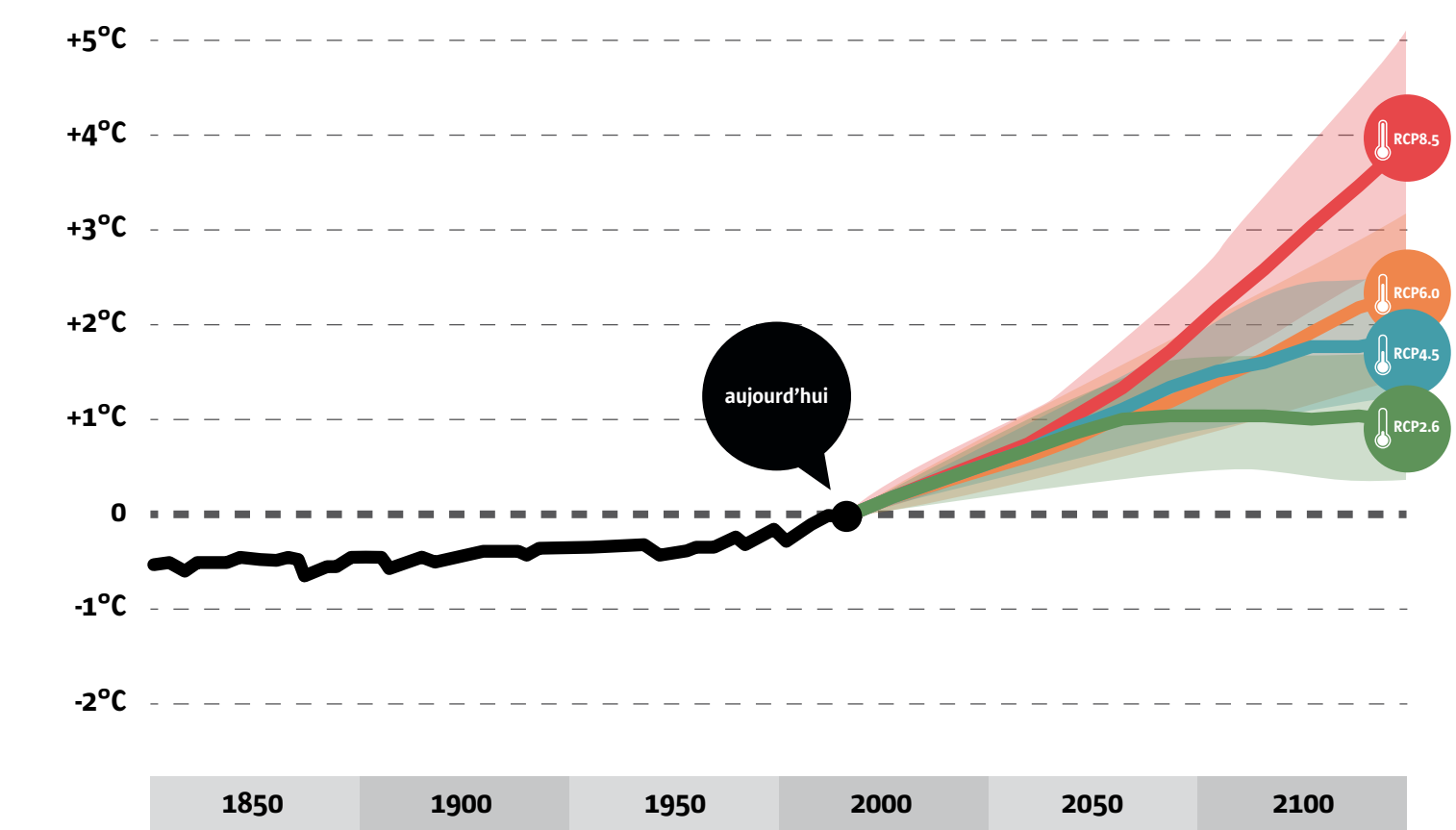


BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA TERRE OU "FORÇAGE RADIATIF"



Les gaz à effet de serre produits par les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique de la planète et conduisent à un réchauffement terrestre. Cette perturbation est appelée "forçage radiatif". Le nombre associé à chaque scénario correspond à une estimation de ce "forçage radiatif" pour 2100, soit +2,6w/m² pour le scénario RCP2.6 ou +8,5w/m² pour le scénario RCP8.5.

ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE À LA SURFACE DE LA TERRE



Pour un même scénario, l'amplitude du réchauffement varie d'un modèle à l'autre. C'est notamment dû à la façon dont certains microprocessus comme les nuages sont modélisés.



Alberto Garcia/Corbis

Des particules refroidissantes

En éjectant des quantités importantes de cendres et d'aérosols sulfatés, les éruptions volcaniques de type explosif (ici, celle du Pinatubo aux Philippines en juin 1991) contribuent à un refroidissement de courte durée (de un à trois ans) de l'atmosphère. Certaines particules de pollution – qui proviennent des fumées industrielles, des gaz d'échappement ou des feux de forêt – ont également un effet refroidissant sur le climat, lequel atténue l'effet réchauffant des gaz à effet de serre.



L’empreinte chauffante d’El Niño

Les océans, qui couvrent 71 % de la surface du globe et absorbent 93 % de l’énergie stockée par la Terre, jouent un rôle déterminant dans le système climatique. À court terme, le principal mode de variabilité naturelle du climat à l’échelle globale est El Niño, un phénomène de réchauffement des eaux de surface de l’océan Pacifique équatorial qui se produit tous les deux à sept ans. Il en résulte une succession d’évènements météorologiques extrêmes (inondations ou sécheresses) dans les régions tropicales, et un réchauffement de la température moyenne globale*. Fort en 2015, ce phénomène avait été encore plus intense en 1998.

* Il arrive aussi que le phénomène s’inverse : c’est La Niña, qui conduit à un refroidissement de la température du globe.

UN EXCÈS DE CO₂ DANS L'ATMOSPHÈRE

ÉMISSIONS DANS L'ATMOSPHÈRE EN 2013

Combustion d'énergies fossiles
et production de ciment

36,1
milliards
de tonnes de CO₂

39,4
MILLIARDS
de tonnes de CO₂

Déforestation
et feux de forêts

3,3
milliards
de tonnes de CO₂

ABSORPTION (PUITS DE CARBONE) EN 2013

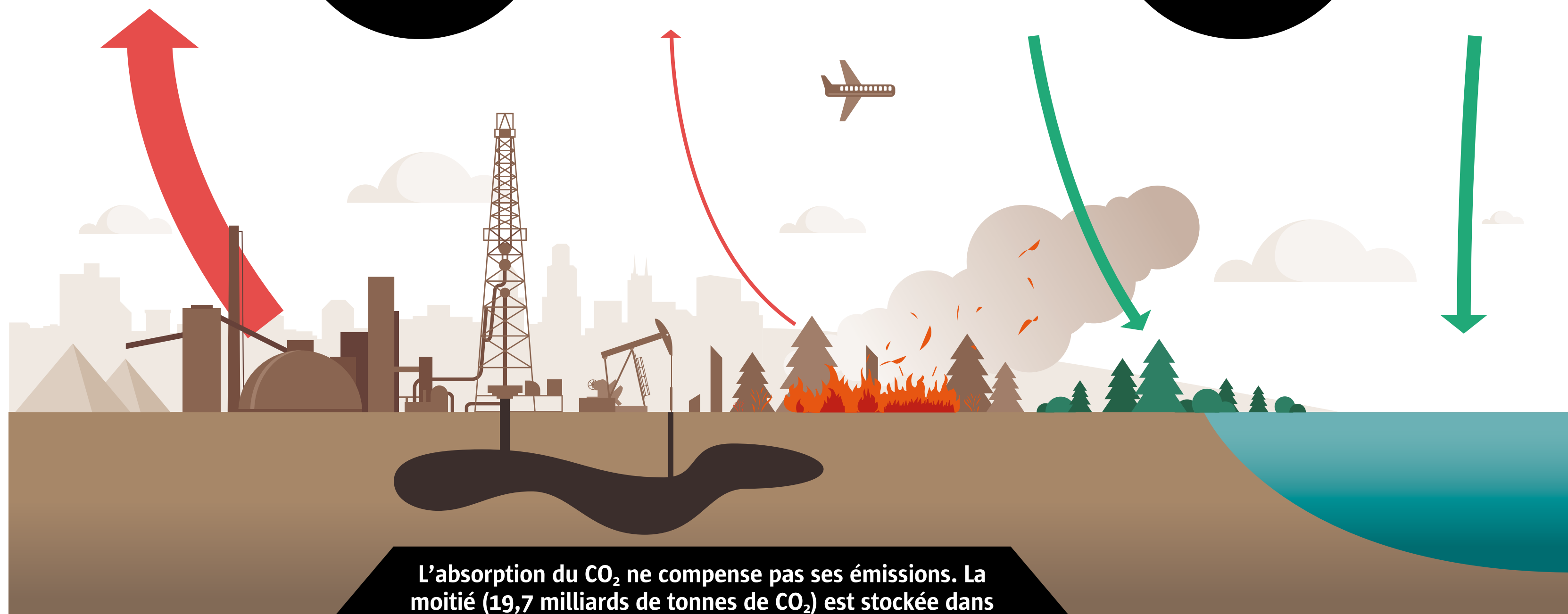
Absorption par
les forêts

9,2
milliards
de tonnes de CO₂

19,7
MILLIARDS
de tonnes de CO₂

Absorption
par les océans

10,5
milliards
de tonnes de CO₂

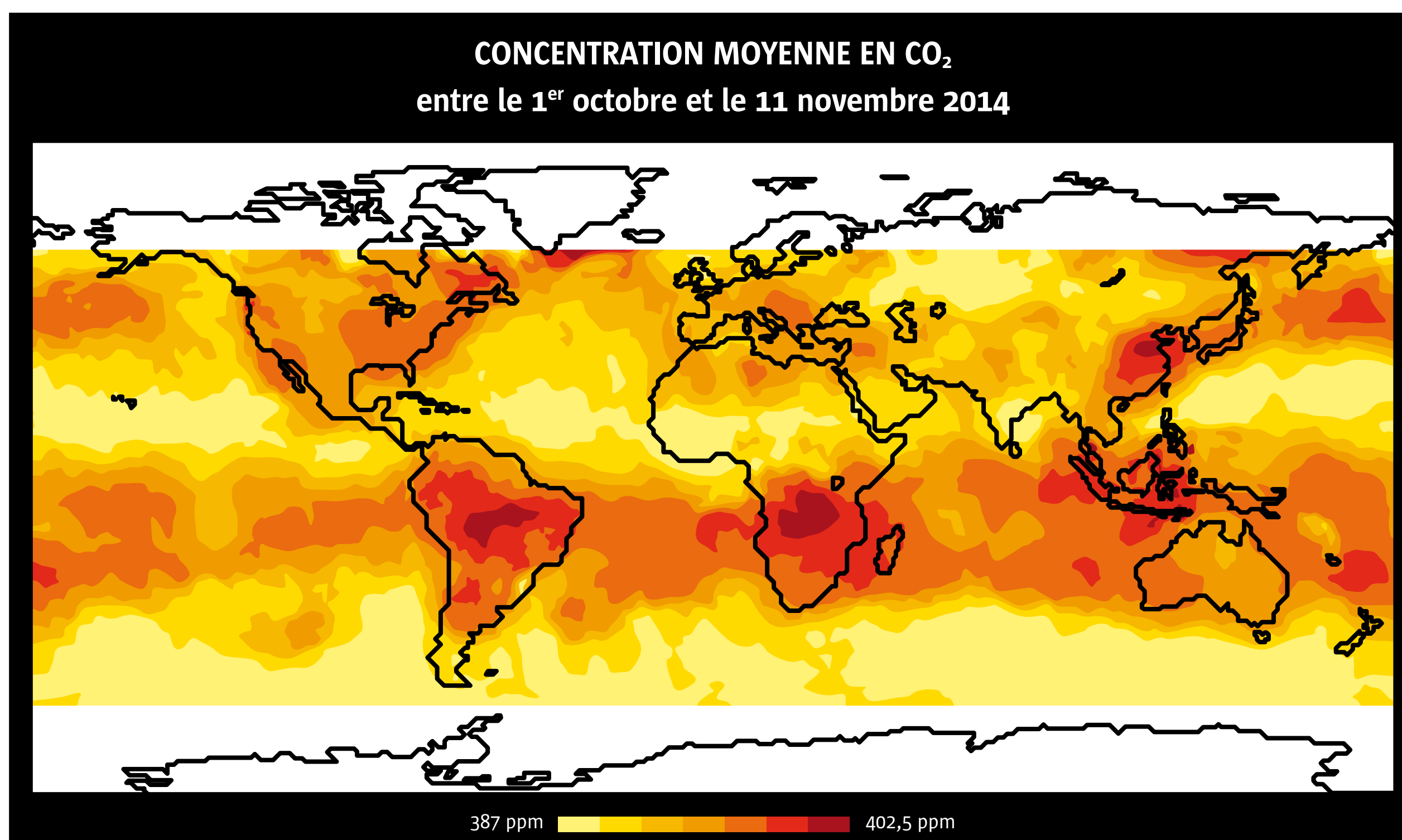


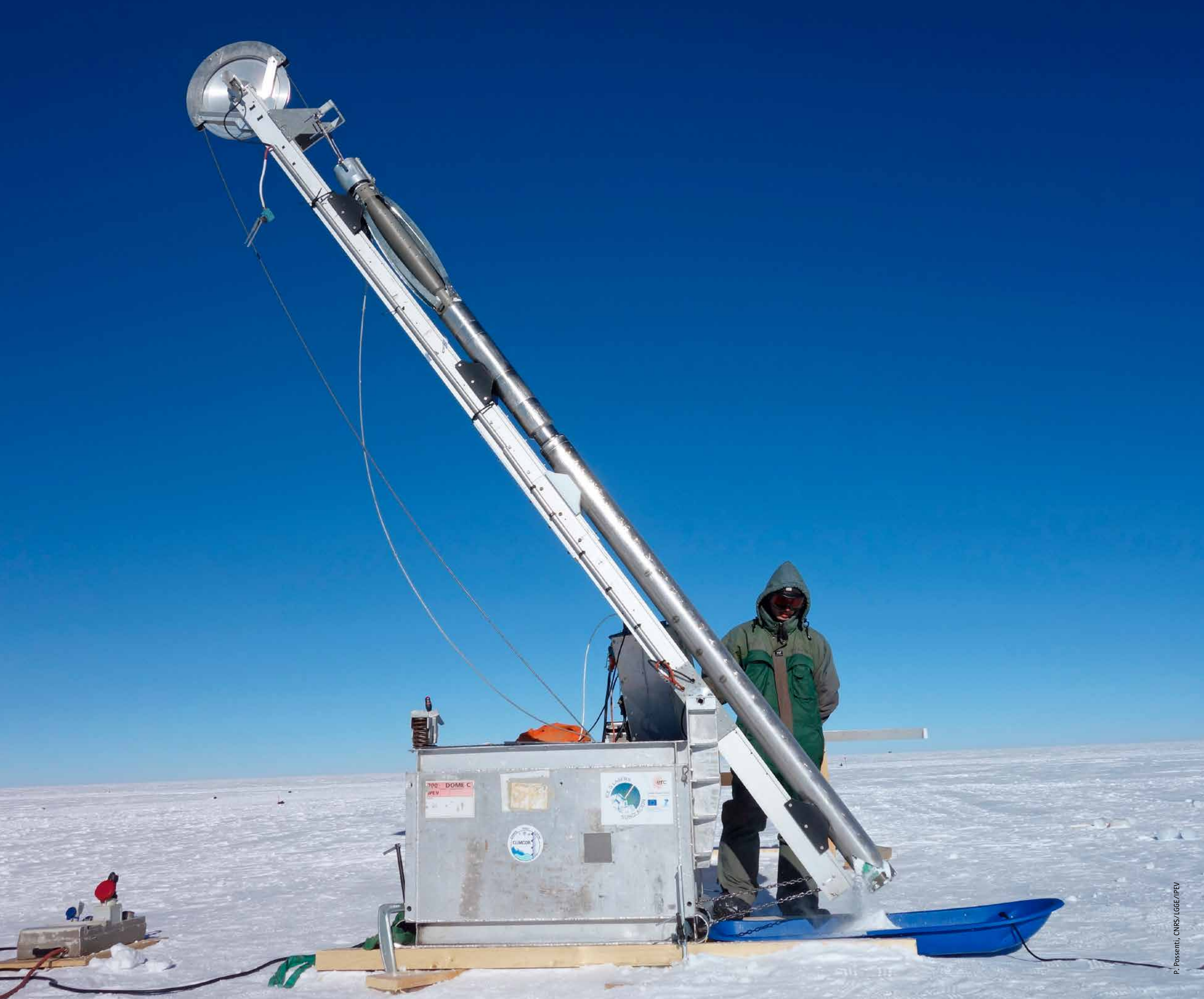
L'absorption du CO₂ ne compense pas ses émissions. La moitié (19,7 milliards de tonnes de CO₂) est stockée dans l'atmosphère et s'ajoute à celles des années précédentes (2000 milliards de tonnes au total aujourd'hui).

Source : Global Carbon Project

UNE CARTOGRAPHIE DES SOURCES ET DES PUIITS DE CO₂

Lancé par la Nasa le 2 juillet 2014, le satellite OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory) a pour mission d'identifier les régions émettrices de CO₂ et celles qui, au contraire, absorbent ce gaz à effet de serre. Les premiers résultats (couvrant la période du 1^{er} octobre au 11 novembre 2014) révèlent des concentrations élevées de dioxyde de carbone au nord de l'Australie, au sud de l'Afrique et à l'est du Brésil, qui pourraient avoir été causées par des feux de forêts.





L'air piégé des glaces

800 000 ans d'analyse du CO₂ et de la température dans la glace de l'Antarctique montrent que, parallèlement au réchauffement global de la planète, la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de 40 % depuis 1750 du fait des activités humaines. Les glaciologues sont en effet capables de repérer dans l'air piégé des glaces la signature d'une combustion de matières fossiles. Le consortium européen d'études des carottes de glace vise à étendre cet enregistrement sur plus d'un million d'années. Pour cela, le projet français Subglacior développe un nouveau type de carottier-sonde, avec une technologie laser.

Premier gaz incriminé :

le CO₂

Le dioxyde de carbone représente plus de la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) induites par les activités humaines.

Les activités humaines rejettent différents gaz à effet de serre dans l'atmosphère : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O), ozone (O₃), HCFC (substituts des CFC interdits par le protocole de Montréal depuis 1987)... Le CO₂ est produit par la combustion des matières fossiles ou par les feux de forêts. Le CH₄ est issu des rizières, de la digestion des ruminants ou des pertes lors de l'extraction, du transport ou de l'utilisation du gaz naturel. Le N₂O est rejeté par certains processus industriels et par la transformation des engrais azotés par les sols, et l'O₃ est issu de polluants produits par le transport, le chauffage ou certaines industries. Les CFC, quant à eux, qui restent encore présents dans l'atmosphère, ont longtemps été utilisés comme gaz réfrigérants ou propulseurs. Le CO₂ représente plus de la moitié des émissions

mondiales de gaz à effet de serre (GES) induites par les activités humaines, loin devant le CH₄ (15 %), l'O₃ (12 %), les CFC (11%) et l'oxyde nitreux (5 %). C'est pourquoi on mesure l'effet des autres GES en équivalent CO₂. De plus, le CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère a une longue durée de vie (jusqu'à plusieurs milliers d'années) : 20 % au moins des rejets actuels auront encore un effet dans l'atmosphère dans 1 000 ans. Ce qui n'est pas le cas du méthane : il a un pouvoir de réchauffement 23 fois plus important que le dioxyde de carbone mais sa durée de vie est beaucoup plus courte (10 à 20 ans). Le CO₂ est donc le principal responsable de l'effet de serre induit par les activités humaines (« forçage radiatif » de 1,7 watts/m² sur un total de 2,3 watts/m²).

L'Homme, acteur du réchauffement

Selon les dernières données scientifiques, il ne fait quasiment plus aucun doute que les activités humaines sont la cause principale du réchauffement observé depuis 1950.

Pour le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Giec), il est « extrêmement probable » que les activités humaines (exploitation de combustibles fossiles, intensification des activités agricoles, déforestation...) sont la cause principale du réchauffement observé depuis 1950 par les gaz à effet de serre qu'elles libèrent dans l'atmosphère. Pour connaître l'évolution de la composition atmosphérique au cours du temps, les scientifiques combinent des mesures directes et l'analyse de l'air ancien piégé dans les glaces de l'Antarctique. Résultat : ils observent une élévation de la teneur en CO₂ qui coïncide avec le début de la révolution industrielle et qui s'accompagne d'une diminution de l'oxygène,

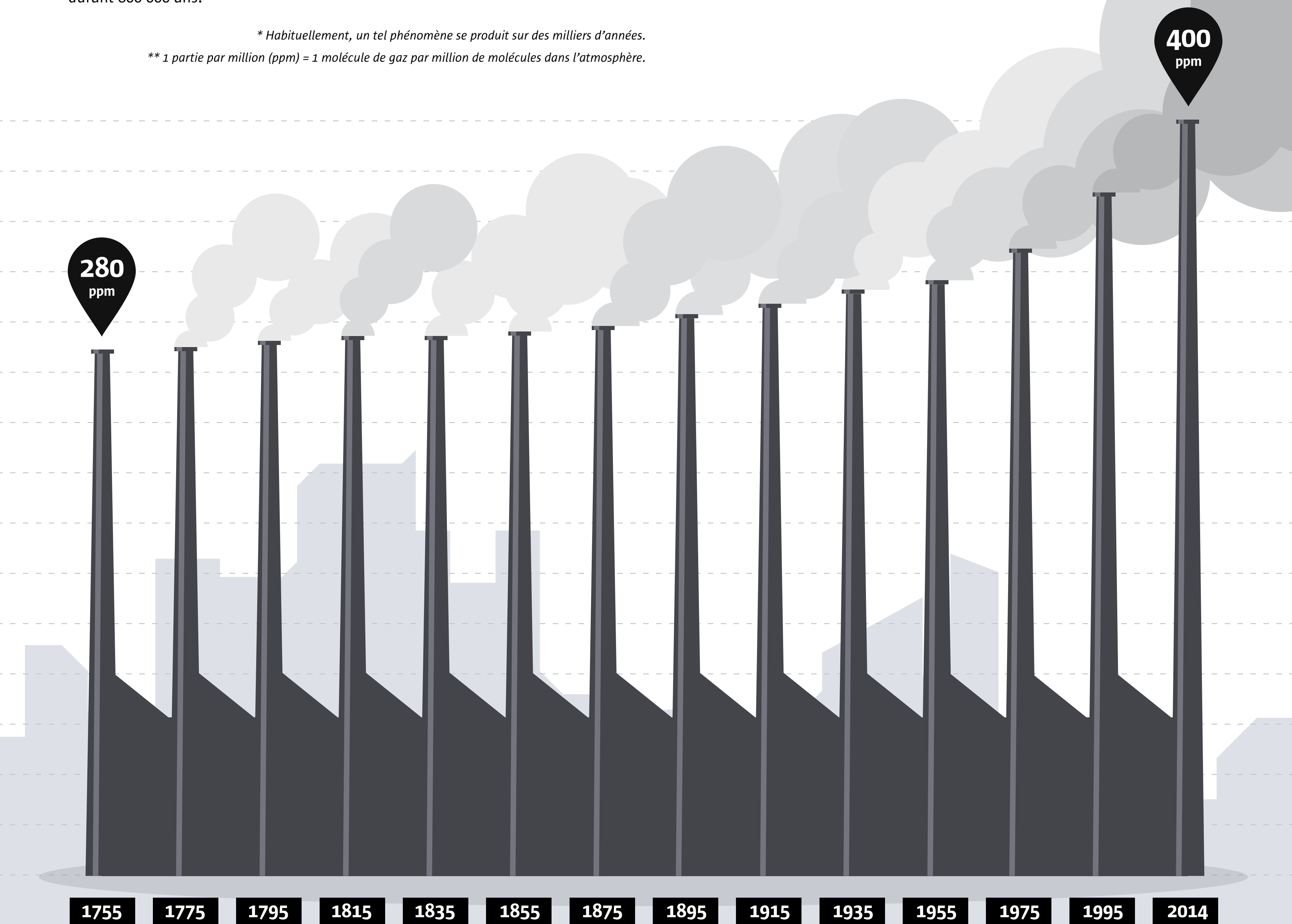
ce qui démontre que le dioxyde de carbone supplémentaire est produit par des processus de combustion, donc par les activités humaines. Autre argument en faveur de l'action humaine sur le climat : les simulations climatiques basées sur les seuls facteurs d'origine naturelle (variations solaires et éruptions volcaniques) ne parviennent pas à expliquer le réchauffement observé depuis les années 1950. Le rôle des gaz à effet de serre est donc dominant dans l'élévation du thermomètre mondial bien qu'il soit partiellement compensé par l'effet refroidissant de certaines particules de pollution produites elles aussi par les activités humaines.

LE CO₂ DE 1750 À AUJOURD'HUI

Un consensus se dégage chez les scientifiques : l'augmentation fulgurante* de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère de 280 ppm** en 1750 (début de la révolution industrielle) à 400 ppm en 2014 est due aux activités humaines. La concentration actuelle en CO₂ dépasse tous les enregistrements relevés dans les carottes de glace durant 800 000 ans.

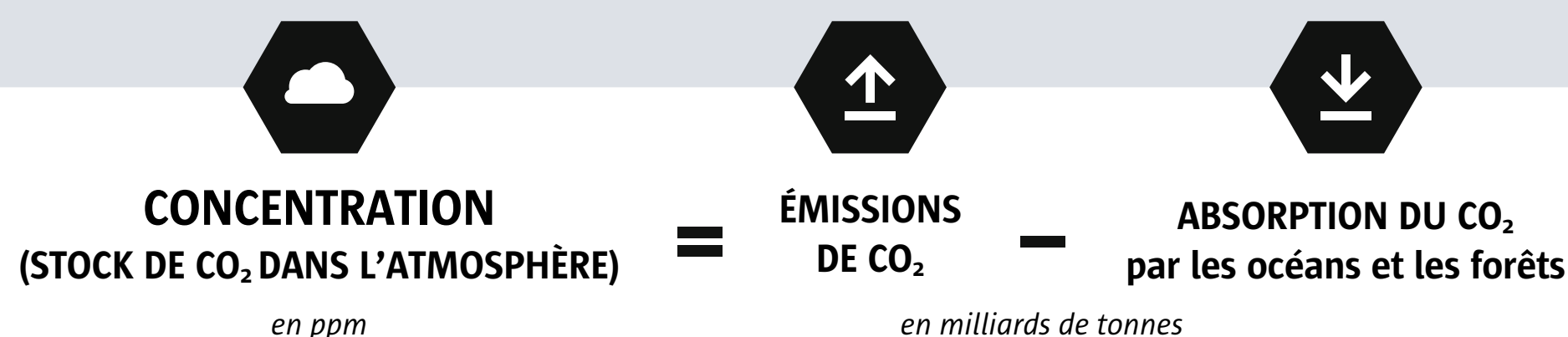
* Habituellement, un tel phénomène se produit sur des milliers d'années.

** 1 partie par million (ppm) = 1 molécule de gaz par million de molécules dans l'atmosphère.



Source : Giec, 5^e rapport

D'une année à l'autre, l'évolution de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone dépend de l'évolution des sources et des puits de CO₂.





Des forêts qui s'amenuisent...

Dans le monde, les feux de forêts et la déforestation (en particulier, la destruction massive des forêts tropicales) comptent pour 11 % des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est la deuxième source d'émission de dioxyde de carbone, après la combustion des matières fossiles. D'une part, du CO₂ est dégagé lors des incendies ; d'autre part, les végétaux détruits ne jouent plus leur rôle majeur d'absorption du CO₂ par photosynthèse.



Charbon ultra polluant

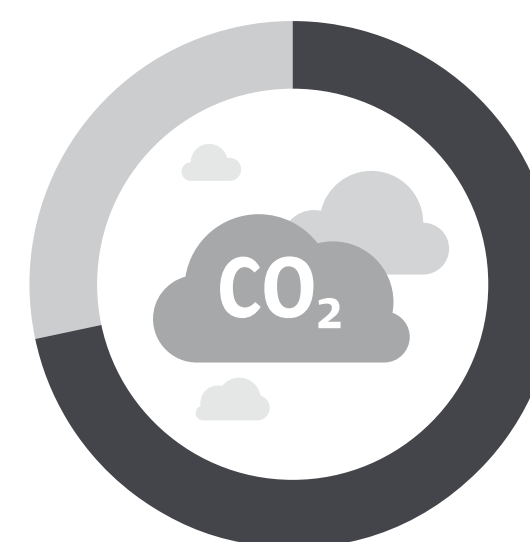
Le charbon est la plus polluante des matières fossiles : sa combustion génère 43 % des émissions mondiales de CO₂, suivi par le pétrole (33 %) et le gaz naturel (18 %). La Chine représente à elle seule près de la moitié de la consommation mondiale de charbon. En Europe, c'est l'Allemagne qui consomme le plus de charbon pour son électricité, devant la Pologne (ici, la centrale de Belchatow) et la Grande-Bretagne.

PALMARÈS DES ÉMISSIONS DE CO₂

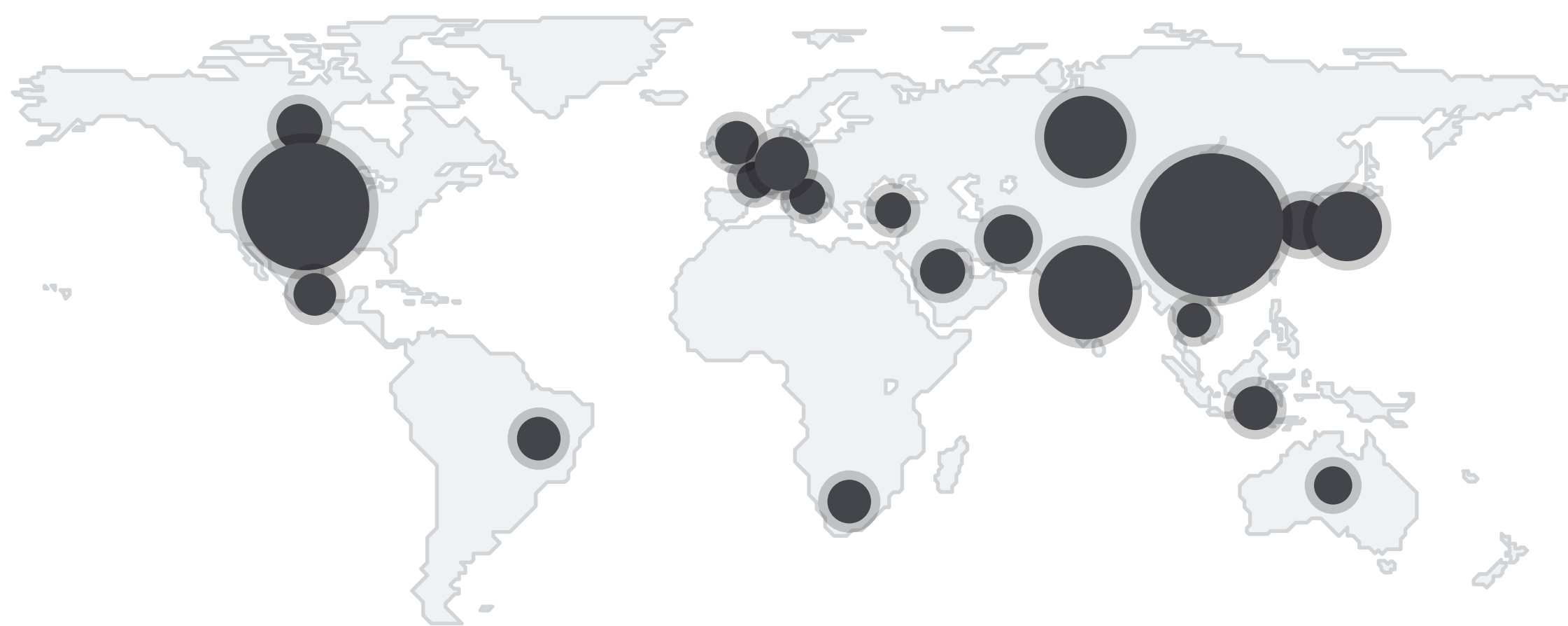
ÉMISSIONS DE CO₂ PAR PAYS (EN 2013)

En 2013, les émissions mondiales de dioxyde de carbone se sont élevées à 39,4 milliards de tonnes. Cela représente une hausse de 61% par rapport à 1990, l'année de référence du Protocole de Kyoto (accord international adopté en 1997 dont l'objectif est de réduire les émissions de gaz à effet de serre des pays développés).

1 milliard de tonnes de CO₂ = 1 gigatonne de CO₂ = 10⁹ tonnes



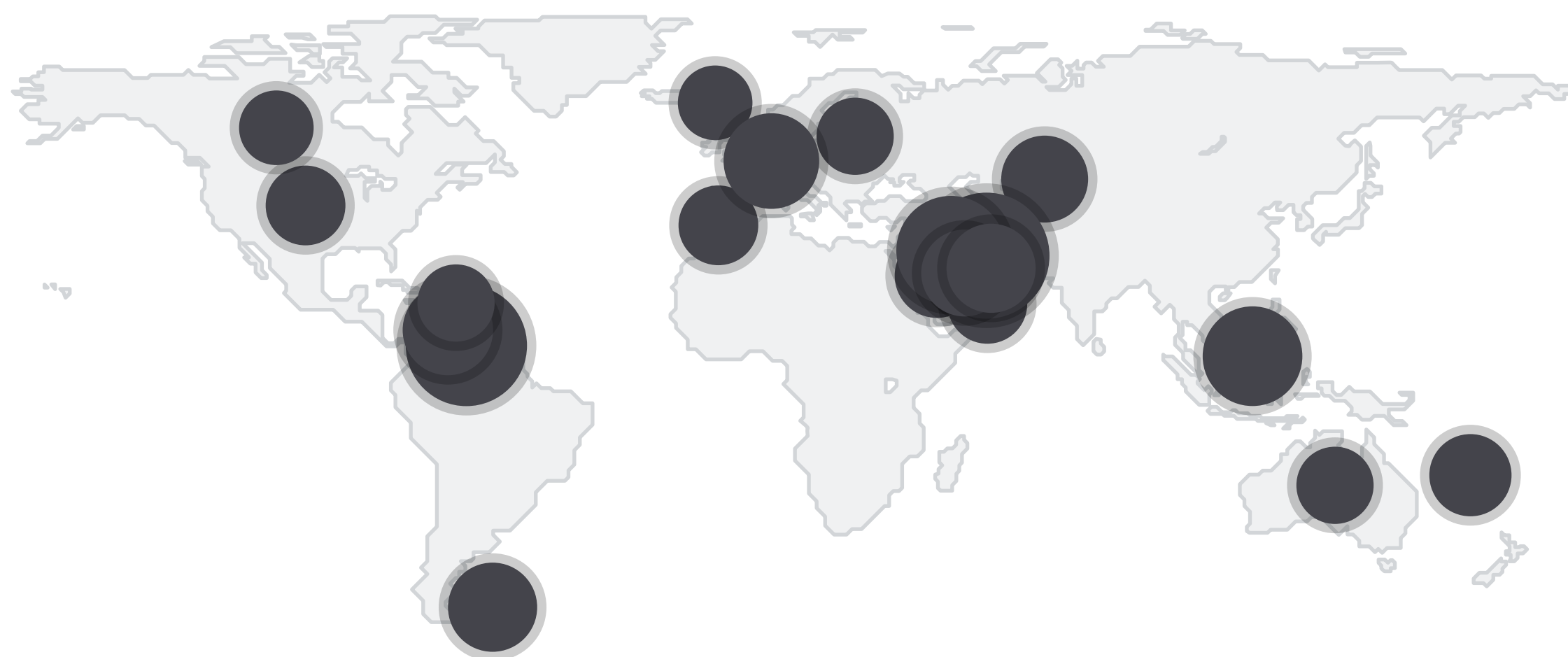
15 PAYS
REPRÉSENTENT À EUX SEULS
70%
DES ÉMISSIONS MONDIALES
DE CO₂



	MtCO ₂	
1	Chine	9 977
2	États-Unis	5 233
3	Inde	2 407
4	Russie	1 812
5	Japon	1 246
6	Allemagne	759
7	Corée du Sud	616
8	Iran	611
9	Arabie Saoudite	519
10	Canada	503
11	Indonésie	494
12	Brésil	482
13	México	466
14	Royaume-Uni	462
15	Afrique du Sud	448
16	Italie	353
17	France	344
18	Australie	341
19	Thaïlande	327
20	Turquie	325

ÉMISSIONS DE CO₂ PAR HABITANT (EN 2013)

Historiquement, ce sont les pays développés qui ont le plus contribué au rejet des gaz à effet de serre mais aujourd'hui, certains pays émergents, comme la Chine, émettent plus de dioxyde de carbone par habitant que la France. L'Inde est le troisième pays émetteur de CO₂, après les États-Unis et la Chine. Mais, rapporté à sa population, l'Inde émet 10 fois moins de carbone par habitant que les États-Unis.



	tCO ₂ /habitant	
1	Qatar	40
2	Trinidad et Tobago	37
3	Koweït	30
4	Brunei	25
5	Aruba	23
6	Luxembourg	20
7	Émirats Arabes Unis	20
8	Îles Falkland	20
9	Kazakhstan	19
10	Bahrein	19
11	Arabie Saoudite	18
12	Nouvelle Calédonie	17
13	États-Unis	16
14	Oman	16
15	Gibraltar	16
16	Montserrat	15
17	Estonie	15
18	Australie	15
19	Îles Féroé	14
20	Canada	14
<hr/>		
51	Chine	7
71	France	5



Sommes-nous entrés dans l'ère de l'Anthropocène ?

Pour certains scientifiques, dont le Prix Nobel de chimie néerlandais Paul Crutzen, nous aurions quitté l'ère géologique de l'Holocène (commencée il y a environ 11 700 ans) pour entrer dans celle de l'Anthropocène, où l'Homme, par son mode de vie, serait devenu le principal facteur de modification de l'environnement. Chargé de statuer sur la question, un comité de scientifiques rendra son verdict en 2016.

LES SECTEURS ÉMETTEURS DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS LE MONDE

Le secteur de l'énergie est le plus polluant en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Les combustibles fossiles - pétrole, charbon, gaz - restent dominants (plus de 80% aujourd'hui) dans la production énergétique mondiale.

