



BULLETIN DE L'OMM SUR LES GAZ À EFFET DE SERRE

Bilan des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, d'après les observations effectuées à l'échelle du globe en 2020

N° 17 | 25 octobre 2021

ISSN 2078-0796

De nos jours, environ la moitié du dioxyde de carbone (CO_2) d'origine humaine demeure dans l'atmosphère. Le reste est absorbé par les océans et les écosystèmes terrestres. La fraction des émissions qui demeure dans l'atmosphère, aussi appelée fraction transportée par l'air ou fraction atmosphérique, est un indicateur précieux du rapport qui existe entre les sources et les puits. Elle varie beaucoup d'une année à l'autre et, ces 60 dernières années, sa moyenne annuelle, relativement incertaine, a oscillé entre 0,2 (20 %) et 0,8 (80 %). Cependant, l'analyse statistique montre qu'il n'existe aucune tendance significative de la valeur moyenne (0,42) de la fraction transportée par l'air sur le long terme (environ 60 ans) (voir la figure 1). Cela signifie que seulement 42 % des émissions anthropiques de CO_2 demeurent dans l'atmosphère. Les puits de CO_2 terrestres et océaniques augmentent proportionnellement à l'augmentation des émissions. On ignore encore la manière dont la fraction transportée par l'air va évoluer à l'avenir, compte tenu de l'influence déterminante qu'exercent le climat et les changements d'affectation des terres sur les processus d'absorption.

Les variations de la fraction transportée par l'air auront une incidence majeure sur la possibilité de réaliser les objectifs de l'Accord de Paris, notamment de contenir le réchauffement mondial bien en deçà de 2°C , et exigera des ajustements du calendrier et/ou de l'ampleur des engagements en matière de réduction des émissions.

Les changements climatiques en cours et leurs répercussions, telles que la multiplication des sécheresses et l'augmentation connexe du nombre et de l'intensité des incendies [2], pourraient limiter l'absorption de CO_2 par les écosystèmes terrestres. Il est également possible que l'absorption océanique diminue à cause du réchauffement des eaux de surface, de la baisse du pH provoquée par l'absorption de CO_2 [3] et du ralentissement de la circulation méridienne océanique dû à la fonte accélérée des glaces de mer [4]. Il est indispensable de disposer d'informations récentes et exactes sur les variations de la fraction transportée par l'air pour anticiper les éventuelles modifications du rapport entre les sources et les puits.

Fort heureusement, on dispose d'informations tirées des observations du CO_2 atmosphérique effectuées dans des endroits stratégiques du monde entier au titre du Programme de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM. Ces observations fiables réalisées sur de longues périodes aident à mieux comprendre l'évolution de la concentration atmosphérique du CO_2 et des autres gaz à effet de serre (GES), comme on peut le voir dans la présente édition et les éditions précédentes du Bulletin. Ces données peuvent être associées à d'autres observations (concernant par exemple le rapport entre isotopes stables et le rapport oxygène/azote (O_2/N_2)) et à des modèles inverses (qui utilisent des modèles de transport d'indicateurs atmosphériques). Elles peuvent également permettre

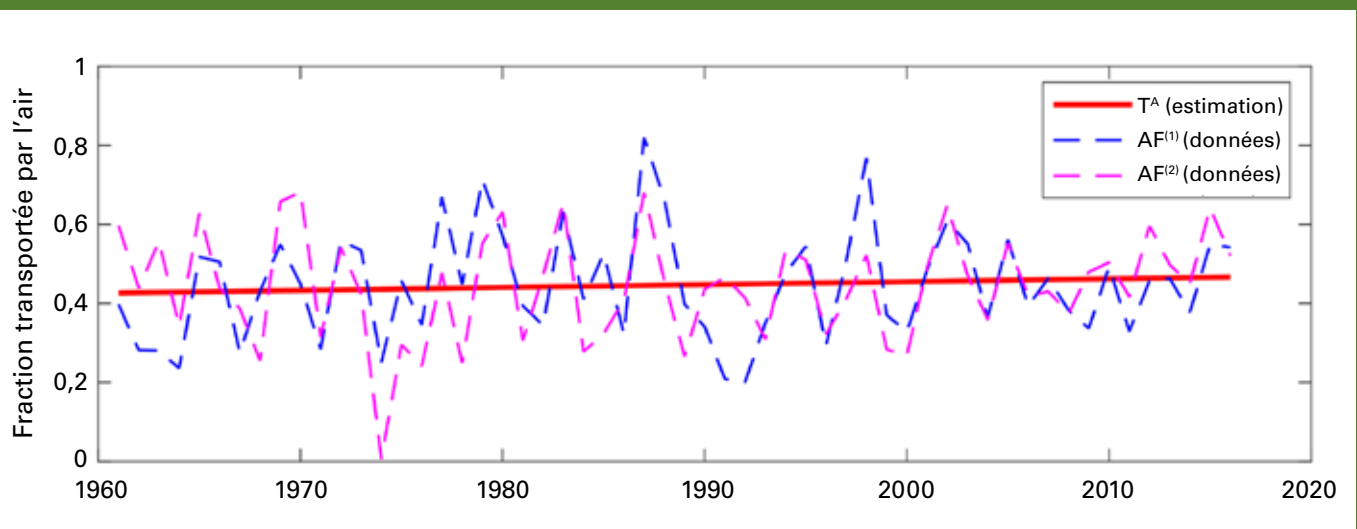


Figure 1. Estimation ajustée de la tendance linéaire de la fraction transportée par l'air (TA) sur la période 1960–2016 [1]. Des estimations distinctes de la valeur moyenne annuelle de la fraction transportée par l'air sont représentées par des lignes en tirets fondées sur deux méthodes, l'une correspondant à un déséquilibre du budget carbone nul (AF(1)) et l'autre à un déséquilibre du budget carbone non nul (AF(2)). Le fait que la tendance estimée soit légèrement à la hausse n'est pas statistiquement significatif.

d'obtenir des informations quantitatives sur l'intensité des principaux processus d'absorption de CO₂ au sein du cycle global du carbone et d'analyser la fraction transportée par l'air et les facteurs responsables de ses variations [5].

Ces informations fondées sur des observations directes permettent d'obtenir des projections plus fiables des niveaux de CO₂ pour les scénarios d'émissions attendus et d'améliorer ainsi les projections climatiques. La figure 2 fournit un exemple d'analyse relative à des observations réalisées sur une longue période dans une même station qui peuvent servir à déterminer la répartition des émissions de CO₂ émanant de combustibles fossiles entre puits terrestres et puits océaniques. Cette analyse se fonde sur le fait que, dans le cas de la respiration et de la photosynthèse, le CO₂ et l'O₂ covariant, tandis qu'ils ne le font pas pour les échanges gazeux océaniques. Il est à noter que l'analyse porte sur une période différente de celle de la figure 1 et qu'elle ne tient pas compte de toutes les sources d'incertitude, telles que la représentativité de la station et les incertitudes d'étalonnage.

Une durabilité accrue de l'actuel réseau de surveillance in situ ainsi que des données *in situ* supplémentaires sont nécessaires pour mieux étayer les politiques de gestion des GES par des analyses des puits naturels et des émissions émanant de combustibles fossiles et les transposer au niveau régional ou local. Cela va de pair avec un développement des

capacités de détection à distance, particulièrement dans les régions actuellement sous-échantillonnées telles que l'Afrique ou d'autres régions tropicales.

Le dernier rapport sur l'état d'avancement du SMOC (2021) [6] fait état de récentes améliorations concernant la disponibilité des observations, notamment grâce au réseau de surveillance des GES relevant de la VAG et des observations par satellite; il indique cependant quatre domaines qui doivent encore être améliorés et qui consistent à:

- assurer la durabilité des observations,
- remédier aux lacunes du système,
- assurer un accès permanent, libre et gratuit aux observations,
- apporter un soutien accru aux politiques découlant de l'Accord de Paris de la CCNUCC.

Ce dernier objectif nécessiterait un plus grand nombre d'observations régionales (grâce à des réseaux urbains ou participants tels que le Système intégré d'observation du carbone) sur l'ensemble du globe. La VAG de l'OMM y contribue, notamment par l'intermédiaire du Système mondial intégré d'information sur les gaz à effet de serre (IG³IS) (<https://ig3is.wmo.int/>; voir également le *Bulletin sur les gaz à effet de serre* – N° 12), où il est indiqué qu'une norme internationale pour la surveillance des GES en milieu urbain est en cours d'élaboration.

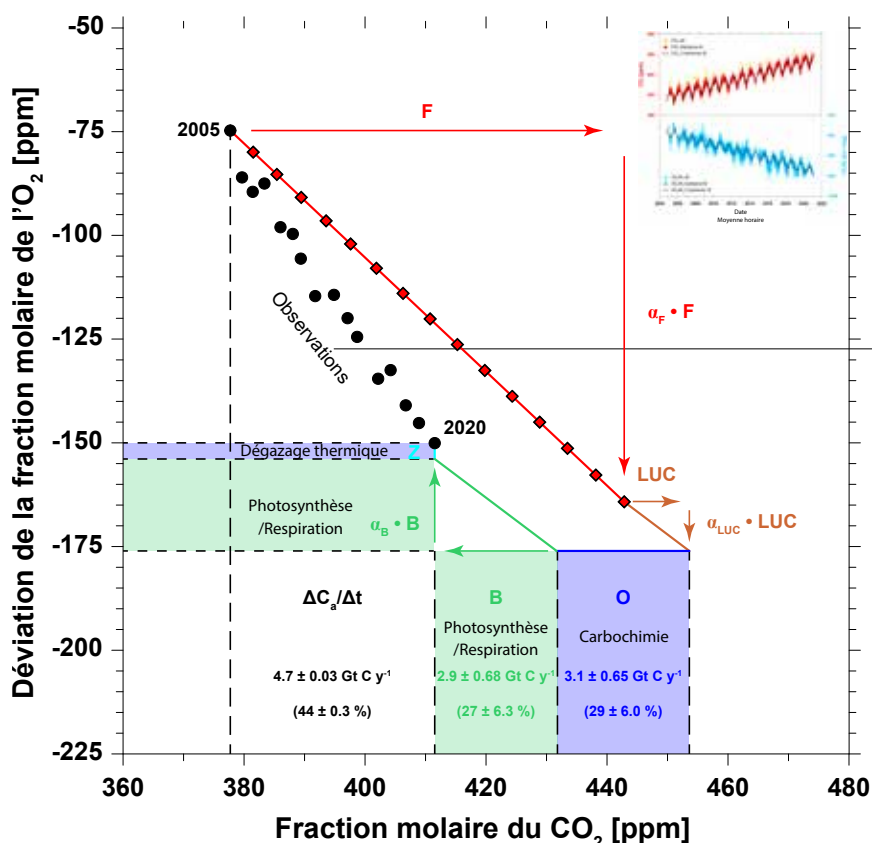


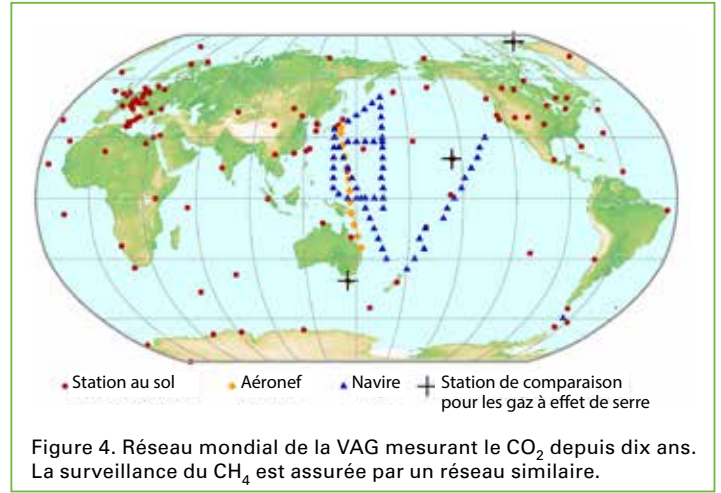
Figure 2. Analyse du budget carbone mondial à partir des observations du CO₂ et de l'O₂ réalisées dans la station mondiale de la VAG de l'OMM établie au Jungfraujoch, en Suisse [7]. L'encadré en haut à droite présente la série chronologique horaire sous-jacente pour le CO₂ et le rapport O₂/N₂ de 2005 à 2021. Le résultat final de l'analyse montre que, sur cette période de 16 ans, le pourcentage des émissions demeurant dans l'atmosphère est de 44 % ($\Delta C_a/\Delta t = 0,44$), celui correspondant à l'absorption par la biosphère mondiale (B) est de 27 % et celui correspondant à l'absorption océanique mondiale (O) est de 29 %. La ligne rouge décrit les variations théoriques des niveaux de CO₂ et de l'O₂ sous l'effet des émissions émanant de combustibles fossiles (F) et des émissions liées aux changements d'affectation des terres (LUC). (Z) représente les variations du niveau d'O₂ dues au dégazage thermique des océans.

Résumé

La toute dernière analyse des données d'observation recueillies par le réseau d'observation *in situ* du Programme de la VAG de l'OMM révèle que les fractions molaires¹⁾ en surface moyennées à l'échelle du globe ont atteint de nouveaux pics en 2020, s'établissant à $413,2 \pm 0,2$ ppm²⁾ pour le dioxyde de carbone (CO₂), à $1 889 \pm 2$ ppb³⁾ pour le méthane (CH₄) et à $333,2 \pm 0,1$ ppb pour l'oxyde nitreux (N₂O). Ces valeurs représentent respectivement 149 %, 262 % et 123 % des niveaux préindustriels (avant 1750). Le taux d'accroissement du CO₂ entre 2019 et 2020 a été légèrement plus faible que le taux observé entre 2018 et 2019, mais cependant supérieur au taux d'accroissement annuel moyen portant sur les dix années précédentes, et ce malgré la baisse d'environ 5,6 % des émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles en 2020 en raison des restrictions liées à la pandémie de COVID-19. S'agissant du CH₄, son taux d'accroissement de 2019 à 2020 a été supérieur à celui observé entre 2018 et 2019 et également supérieur au taux d'accroissement annuel moyen pour les dix années précédentes. Quant au NO₂, son taux d'accroissement de 2019 à 2020 a été supérieur à celui observé entre 2018 et 2019 et également supérieur au taux d'accroissement annuel moyen pour les dix années précédentes. Selon l'indice annuel d'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (AGGI) publié par l'Administration américaine pour les océans et l'atmosphère (NOAA) [8], le forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants s'est accru de 47 % entre 1990 et 2020, le CO₂ étant à l'origine d'environ 80 % de cette augmentation.

Récapitulatif des observations réalisées par le réseau d'observation *in situ* de la VAG en 2020

Le présent *Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre*, le dix-septième de la série, rend compte de l'évolution de la concentration atmosphérique et du taux de variation des principaux gaz à effet de serre persistants (CO₂, CH₄ et N₂O) et présente un récapitulatif de la contribution des



autres GES. Avec le dichlorodifluorométhane (CFC-11) et le trichlorofluorométhane (CFC-12), ces trois gaz sont responsables d'environ 96 %⁽⁴⁾ [8] du forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants (figure 3).

Toutes les contributions en pourcentage au forçage radioactif citées dans le présent Bulletin sont calculées à l'aide de la méthodologie employée dans [8], utilisent 1750 comme période de référence et ne prennent en compte que les gaz à effet de serre persistants.

Le Programme de la VAG de l'OMM coordonne les observations et les analyses systématiques des gaz à effet de serre et autres éléments à l'état de traces. La figure 4 montre l'emplacement des stations qui ont servi à mesurer les gaz à effet de serre depuis une décennie. Les données communiquées par les pays concernés sont archivées et distribuées par le Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre (CMDGS) de l'OMM, qui est hébergé par le Service météorologique japonais.

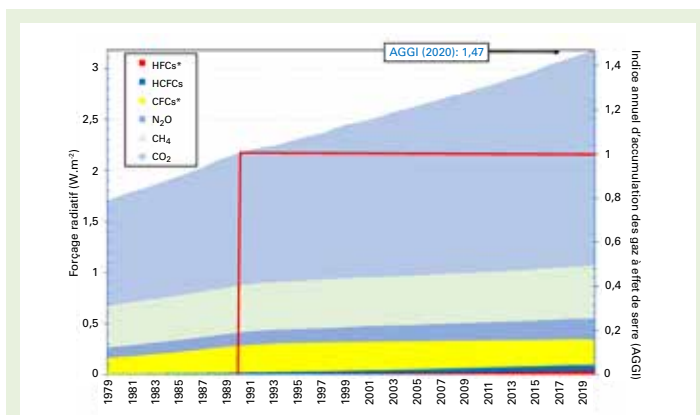


Figure 3. Forçage radiatif atmosphérique (par rapport à 1750) dû aux gaz à effet de serre persistants correspondant à l'actualisation pour 2020 de l'indice AGGI de la NOAA [8]. Il est à noter que les nouveaux calculs publiés dans le rapport de 2021 du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [9] n'ont pas été intégrés dans cette estimation. En plus des chlorofluorocarbones (CFC) le groupe des «CFC*» comprend d'autres gaz à longue durée de vie (CCl₄, CH₂CCl₂, halons, etc.), mais ce sont les CFC proprement dits qui assurent la plus grande part (95 % en 2020) de ce forçage radiatif. Le groupe des «HCFC» comprend les trois hydrochlorofluorocarbones (HCFC) les plus abondants (HCFC-22, HCFC-141b et HCFC-142b). Quant au groupe des «HFC*», il comprend les hydrofluorocarbones (HFC) les plus abondants (HFC-134a, HFC-23, HFC-125, HFC-143a, HFC-32, HFC-152a, HFC-227ea et HFC-365mfc) ainsi que l'hexafluorure de soufre (SF₆) dans un souci d'exhaustivité, bien que le SF₆ ait été à l'origine d'une petite fraction seulement du forçage radiatif imputable à ce groupe en 2020 (13 %).

Tableau. Concentrations moyennes annuelles à la surface du globe (en 2020) et évolution des principaux gaz à effet de serre d'après les données transmises par le réseau d'observation *in situ* de la VAG. Les valeurs sont exprimées en fractions molaires d'air sec et les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance de 68 %. La méthode de calcul de la moyenne est décrite dans le rapport N° 184 de la série consacrée à la VAG [11].

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentration moyenne mondiale en 2020	413,2±0,2 ppm	1889±2 ppb	333,2±0,1 ppb
Concentration en 2020 par rapport à 1750 ^a	149 %	262 %	123 %
Augmentation en valeur absolue entre 2019 et 2020	2,5 ppm	11 ppb	1,2 ppb
Augmentation en % entre 2019 et 2020	0,61 %	0,59 %	0,36 %
Augmentation annuelle moyenne en valeur absolue depuis 10 ans	2,40 ppm/an	8,0 ppb/an	0,99 ppb/an

^a Selon l'hypothèse d'une fraction molaire préindustrielle de 278 ppm pour le CO₂, de 722 ppb pour le CH₄ et de 270 ppb pour le N₂O. Nombre de stations utilisées pour les analyses: 139 pour le CO₂, 138 pour le CH₄ et 105 pour le N₂O.

CarbonWatchNZ: utiliser les mesures atmosphériques à long terme du CO₂ pour mieux comprendre l'absorption du carbone par les forêts en Nouvelle-Zélande.

En Nouvelle-Zélande, les forêts compensent 30 % des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les estimations de l'absorption du carbone par les forêts restent très incertaines. Le rapport national d'inventaire, qui évalue les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs de réduction des émissions fixés par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), utilise, pour estimer le taux d'absorption du carbone par les forêts, des mesures du diamètre et de la hauteur des arbres effectuées par un réseau national de stations [25]. Cette approche suit les lignes directrices des meilleures pratiques internationales [26], mais ne permet pas toujours de rendre compte de l'ensemble des processus de l'écosystème forestier de manière adéquate.

Des estimations indépendantes établies à partir de mesures et de modèles relatifs au CO₂ atmosphérique suggèrent que l'absorption du carbone par les forêts pourrait être fortement sous-estimée, tant par le rapport national d'inventaire que par les modèles de la biosphère terrestre [27]. Les tout derniers résultats, étayés par des mesures et des sorties de modèle additionnelles, confirment l'existence de ce puit et montrent qu'il persiste depuis au moins une dizaine d'années (figure 10).

Cette absorption de carbone supplémentaire a lieu dans un des endroits les plus surprenants du pays, à savoir le sud-ouest de l'île Sud, une région qui regorge de forêts naturelles anciennes (figure 11). On pense depuis longtemps que les forêts naturelles de Nouvelle-Zélande absorbent moins de carbone que la foresterie de plantation, qui se compose principalement d'essences exotiques à croissance rapide. Ces résultats pourraient mener à une nouvelle manière plus durable de gérer l'absorption de carbone par les forêts du pays et qui pourrait avoir

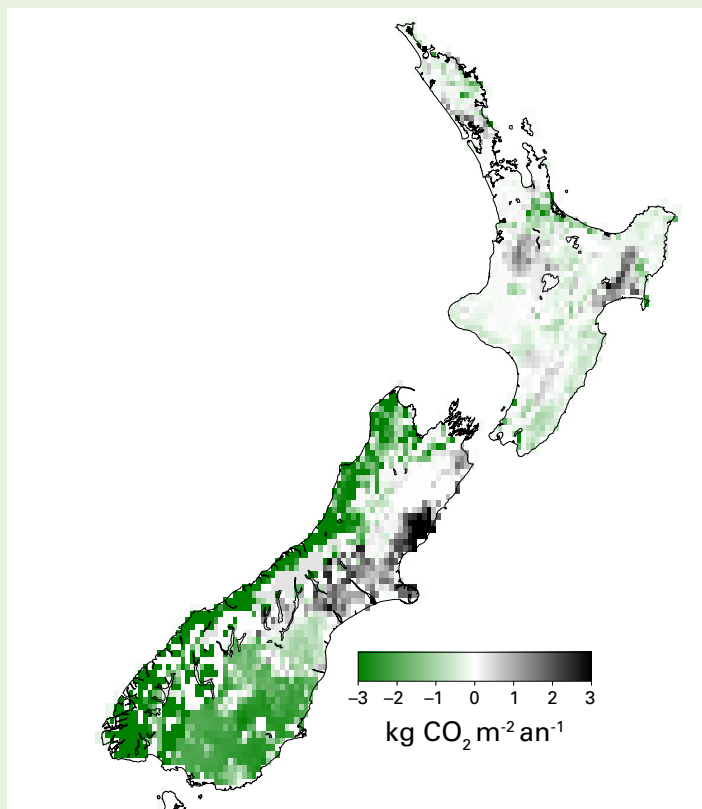


Figure 11. Absorption moyenne de la biosphère terrestre de Nouvelle-Zélande entre 2011 et 2020, établie à partir de mesures et de modèles atmosphériques.

de nombreuses retombées positives sur le plan environnemental [27].

La Commission néo-zélandaise sur le changement climatique a dernièrement recommandé l'abandon progressif de la foresterie de plantation et conseillé au pays de se tourner vers la plantation de forêts naturelles afin de favoriser le stockage du carbone. Cependant, on sait très peu de choses sur la sensibilité des forêts naturelles uniques en leur genre de la Nouvelle-Zélande face aux changements climatiques

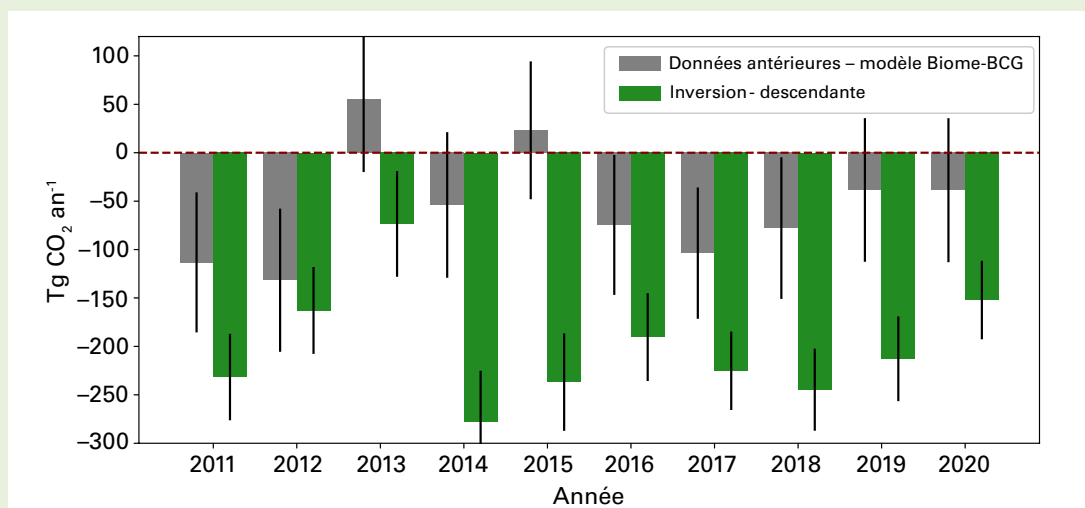


Figure 10. Flux de carbone moyen annuel de la biosphère terrestre de Nouvelle-Zélande établi à partir du modèle Biome-BGC (gris) et de mesures et modèles relatifs au CO₂ atmosphérique (vert) [27].

Les observations font la lumière sur le cycle du carbone des régions tropicales: l'Amazonie est une source nette de CO₂

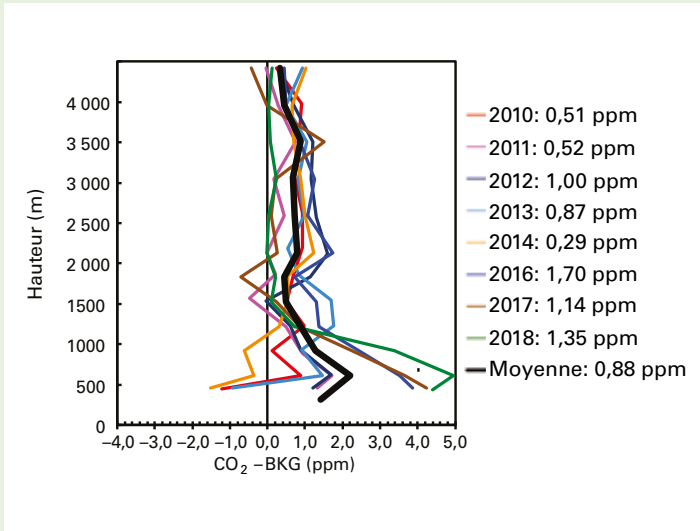


Figure 12. Profils verticaux moyens annuels établis à partir des mesures collectées à l'aide d'aéronefs sur le site ALF au Brésil [28].

à venir. Les mesures effectuées actuellement aideront à mieux comprendre la sensibilité de ces forêts au changement climatique et la manière dont leur capacité d'absorption du carbone réagira à un monde en mutation.

Les régions tropicales comme l'Amazonie jouent un rôle important dans le bilan carbone mondial. L'Amazonie abrite la plus grande forêt tropicale de la planète, mais comme c'est le cas pour d'autres régions tropicales, on y réalise un nombre limité d'observations *in situ*, pourtant nécessaires pour déterminer les flux de carbone à grande échelle. Afin d'améliorer les estimations de la contribution de l'Amazonie au

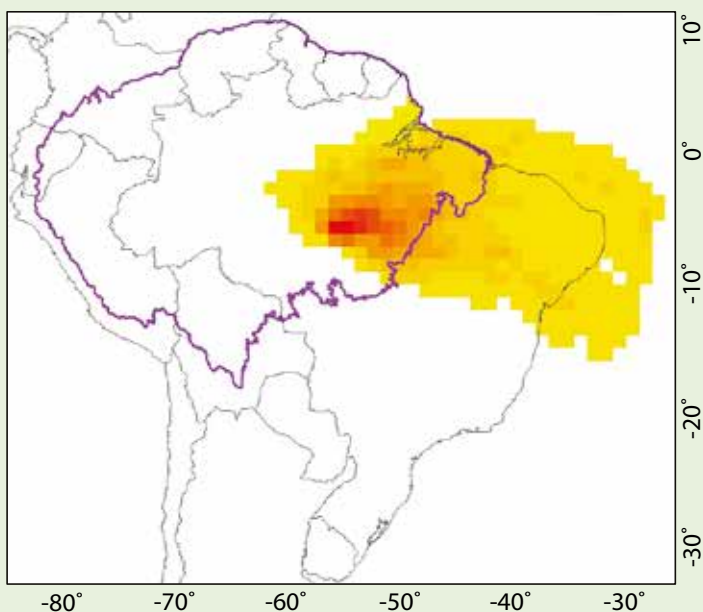


Figure 13. Empreinte établie à partir des mesures collectées à l'aide d'aéronefs sur le site ALF (surface moyennée entre 2010 et 2018).

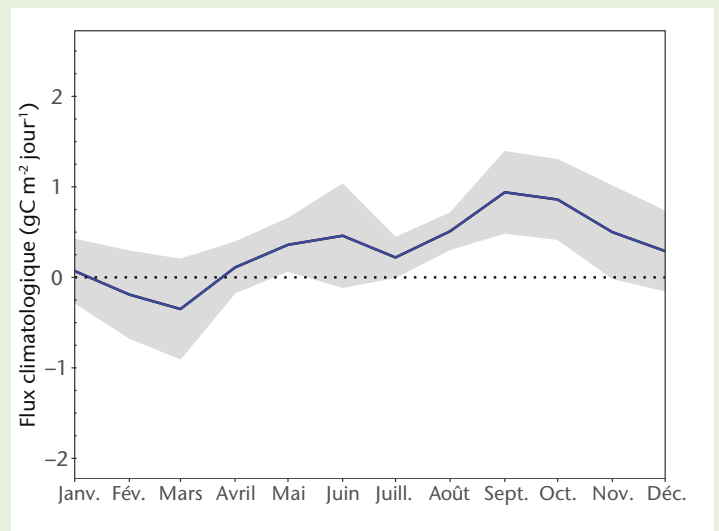


Figure 14. Moyenne mensuelle des flux de carbone sur le site ALF, établie à partir des données moyennes de la période 2010-2018. La bande grise indique l'écart type des moyennes mensuelles et la ligne pleine correspond à la moyenne sur neuf ans du flux de carbone climatologique du sud-est de l'Amazonie [28].

budget carbone mondial, un programme de mesures effectuées à partir d'aéronefs a été lancé en 2010 sur quatre sites différents de la région: Alta Floresta (ALF), Rio Branco (RBA), Santarém (SAN) et Tabatinga/Tefé (TAB/TEF). Les profils verticaux s'étendent de la proche surface à environ 4,5 km au-dessus du niveau de la mer, et les données rassemblées permettent d'établir le bilan du flux de surface d'une large partie de l'Amazonie (environ 80 % du bassin de l'Amazonie en Amérique du Sud). Au total, 600 profils verticaux du CO₂ et du CO ont été collectés à l'aide d'aéronefs entre 2010 et 2018 [28].

La figure 12 montre les profils verticaux moyens annuels qui ont été obtenus. C'est la région du sud-est, prise en compte par le site ALF (8,80° S, 56,75° W; voir la figure 13), qui rejette le plus de CO₂ dans l'atmosphère (figure 14), suivie de la région du nord-est. Au contraire, les gradients verticaux des sites de la partie ouest (non représentés ici) indiquent un bilan carbone presque neutre ou la présence de puits de carbone. D'après les gradients de CO₂ des profils verticaux moyens annuels et les flux de carbone estimés de ces sites, les zones qui sont les plus touchées par les changements dans l'utilisation et la couverture des sols sont aussi celles qui rejettent davantage de carbone dans l'atmosphère. Les régions de la partie est de l'Amazonie connaissent de très fortes hausses de températures pendant la saison sèche, une diminution des précipitations ainsi qu'une importante déforestation depuis une quarantaine d'années. À l'opposé, les régions de la partie ouest sont sujettes à des perturbations d'origine humaine relativement limitées et à une évolution climatique plutôt modérée durant la saison sèche.

Les résultats du CMDGS relatifs aux concentrations moyennes et aux taux d'accroissement à l'échelle du globe dont il est fait mention ici diffèrent légèrement, pour les années considérées, de ceux communiqués par la NOAA [10] car les stations utilisées, les méthodes de calcul des moyennes et les périodes auxquelles se rapportent les chiffres ne sont pas exactement les mêmes. Le CMDGS applique la procédure décrite en détail dans la publication intitulée *GAW Report No. 184* [11]. Les résultats relatifs à la concentration de CO₂ diffèrent légèrement de ceux figurant dans les précédents numéros du *Bulletin sur les gaz à effet de serre* (d'environ 0,2 ppm), car les données sont désormais transmises selon la nouvelle échelle d'étalonnage du CO₂ adoptée par l'OMM (WMO-CO₂-X2019) [12]. Les données historiques ont donc été converties selon la nouvelle échelle pour assurer la cohérence des tendances rapportées.

Le tableau présente les concentrations atmosphériques, moyennées à l'échelle du globe, des trois principaux gaz à effet de serre en 2020 et l'évolution de ces concentrations depuis 2019 et depuis 1750. Ne sont pas prises en compte pour cette analyse mondiale les données provenant de stations mobiles (représentées par des triangles bleus et des losanges orange sur la figure 4), à l'exception des données d'échantillonnage de la NOAA concernant le Pacifique oriental.

Les trois gaz à effet de serre du tableau sont étroitement liés aux activités humaines et interagissent par ailleurs fortement avec la biosphère et les océans. Pour prévoir l'évolution des concentrations atmosphériques de ces gaz, il est nécessaire de disposer de données quantitatives sur leurs multiples sources et puits ainsi que sur leurs transformations chimiques qui se produisent dans l'atmosphère. Les observations de la VAG livrent de précieuses informations sur les limites dans lesquelles s'inscrivent les bilans de ces gaz et des autres gaz à effet de serre persistants. Elles servent aussi à améliorer les estimations des émissions et à évaluer les données satellitaires sur les gaz à effet de serre persistants moyennés sur la colonne correspondante. L'IG³IS fournit des informations supplémentaires sur les sources de gaz à effet de serre aux niveaux national et infranational.

L'indice AGGI de la NOAA mesure l'augmentation du forçage radiatif total causé par l'ensemble des gaz à effet de serre persistants depuis 1990 [8]. Il s'est établi à 1,47 en 2020, ce qui représente une augmentation du forçage radiatif total de 47 %⁴ depuis 1990 et de 1,8 % entre 2019 et 2020 (figure 3). La valeur de ce forçage radiatif en 2020 (3,18 W/m²) correspond à une fraction molaire de 504 ppm en équivalent CO₂ [8]. Les

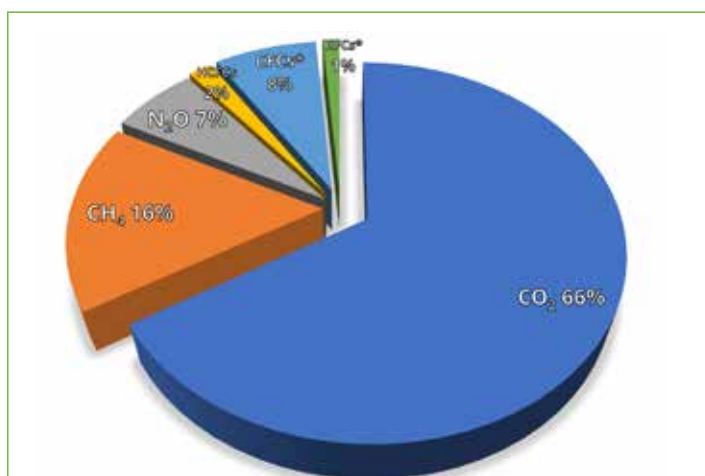


Figure 5. Contributions des principaux gaz à effet de serre persistants à l'augmentation du forçage radiatif mondial depuis l'époque préindustrielle jusqu'en 2020 [8].

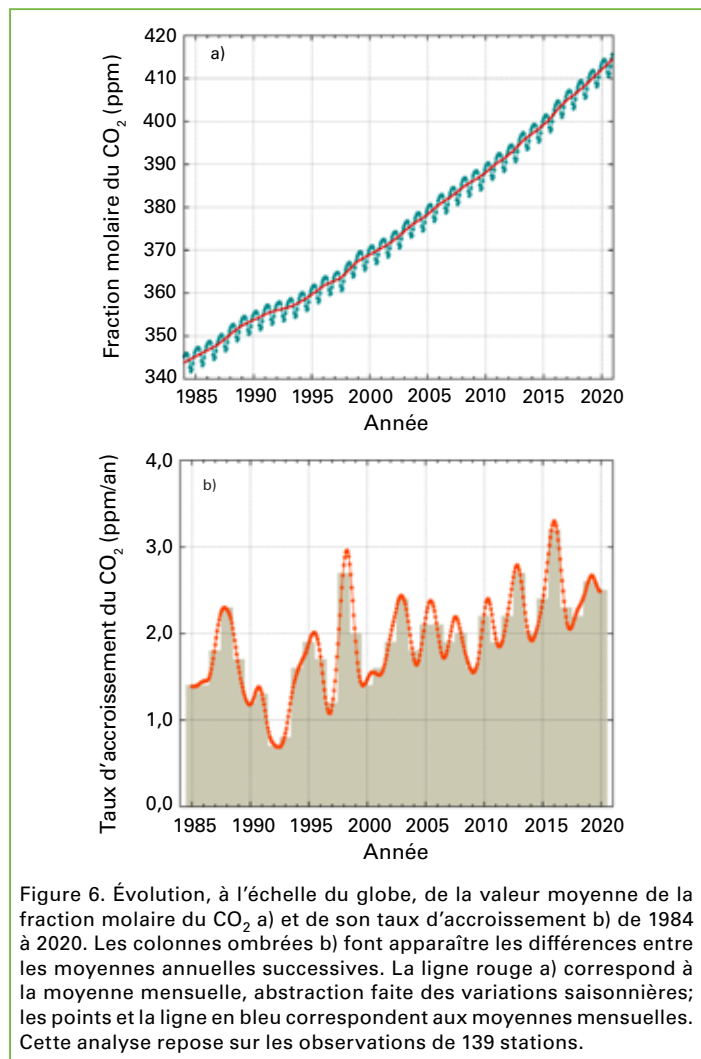


Figure 6. Évolution, à l'échelle du globe, de la valeur moyenne de la fraction molaire du CO₂ a) et de son taux d'accroissement b) de 1984 à 2020. Les colonnes ombrées b) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives. La ligne rouge a) correspond à la moyenne mensuelle, abstraction faite des variations saisonnières; les points et la ligne en bleu correspondent aux moyennes mensuelles. Cette analyse repose sur les observations de 139 stations.

contributions relatives des autres gaz au forçage radiatif total depuis l'époque préindustrielle sont indiquées dans la figure 5.

Dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre d'origine humaine le plus abondant dans l'atmosphère, puisqu'il contribue pour quelque 66 %⁴ au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. De plus il contribue pour 82 %⁴ environ à l'augmentation de ce forçage depuis une décennie et également pour 82 % environ à l'augmentation observée ces cinq dernières années. La fraction molaire préindustrielle de 278 ppm représentait une situation d'équilibre des flux entre l'atmosphère, les océans et la biosphère terrestre. En 2020, la fraction molaire moyenne de CO₂ à l'échelle du globe s'est établie à 413,2 ± 0,2 ppm (figure 6). L'augmentation de la moyenne annuelle entre 2019 et 2020 (2,5 ppm) a été légèrement plus faible qu'entre 2018 et 2019, mais cependant légèrement supérieure à la moyenne du taux d'accroissement annuel des dix années précédentes (2,40 ppm/an), malgré la diminution d'environ 5,6 % des émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles en 2020 par suite des restrictions liées à la pandémie de COVID-19 [13]. Il est à noter que la concentration moyenne de CO₂ à la surface du globe pour 2019 mentionnée dans le seizième *Bulletin sur les gaz à effet de serre* a été modifiée, passant de 410,5 ppm à 410,7 ppm, par suite de la remise à niveau de toutes les données selon la nouvelle échelle d'étalonnage CO₂-X2019 [12].

En 2020, la teneur de l'atmosphère en CO₂ s'établissait à 149 % de ce qu'elle était à l'époque préindustrielle, essentiellement

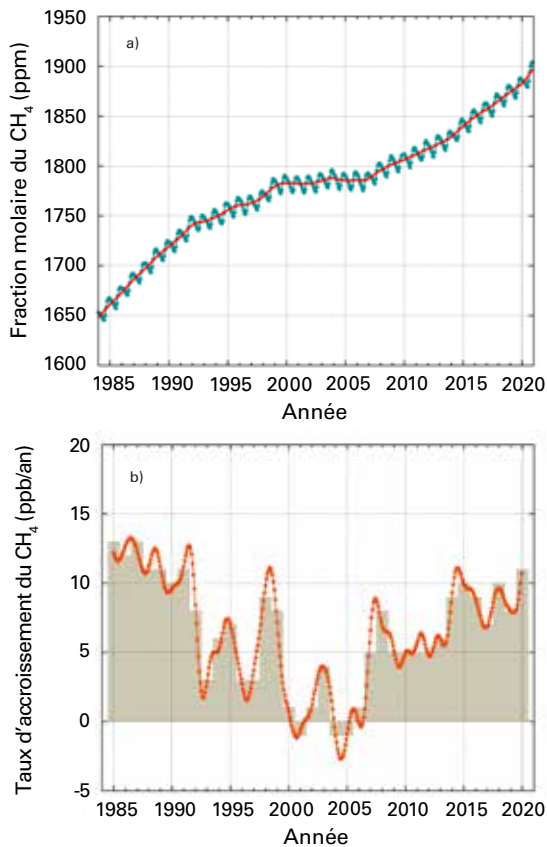


Figure 7. Évolution, à l'échelle du globe, de la valeur moyenne de la fraction molaire du CH₄ a) et de son taux d'accroissement b) de 1984 à 2020. Les colonnes ombrées b) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives. La ligne rouge a) correspond à la moyenne mensuelle, abstraction faite des variations saisonnières; les points et la ligne en bleu correspondent aux moyennes mensuelles. Cette analyse repose sur les observations de 138 stations.

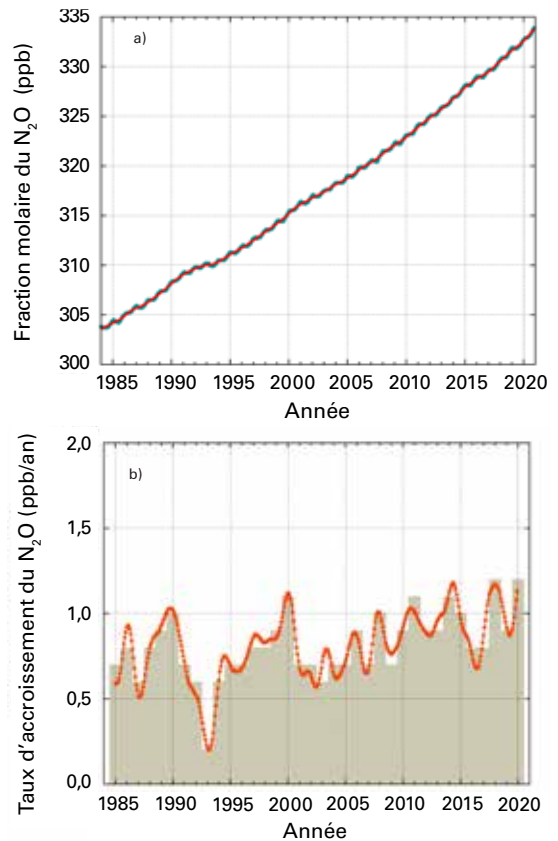


Figure 8. Évolution, à l'échelle du globe, de la valeur moyenne de la fraction molaire du N₂O a) et de son taux d'accroissement b) de 1984 à 2020. Les colonnes ombrées b) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives. La ligne rouge a) correspond à la moyenne mensuelle, abstraction faite des variations saisonnières; sur ce graphique, la ligne rouge chevauche les points et la ligne en bleu qui correspondent aux moyennes mensuelles. Cette analyse repose sur les observations de 105 stations.

à cause des émissions résultant de la combustion des combustibles fossiles et de la production de ciment. Selon l'Agence internationale de l'énergie, les émissions de CO₂ provenant des combustibles fossiles ont atteint 31,5 GtCO₂⁵⁾ en 2020, en baisse par rapport aux 33,4 GtCO₂ en 2019 [14]. Selon l'étude menée en 2020 dans le cadre du Projet mondial sur le carbone (GCP), la déforestation et autres changements d'affectation des terres sont responsables de 5,7 GtCO₂/an (moyenne pour la période 2010–2019). Sur l'ensemble des émissions qui ont résulté des activités humaines entre 2010 et 2019, 46 % environ se sont accumulées dans l'atmosphère, 23 % dans les océans et 31 % sur les terres émergées; le solde non attribué est de 0,4 % [15]. La fraction du CO₂ résultant de la combustion des combustibles fossiles qui demeure dans l'atmosphère (la fraction transportée par l'air) varie d'une année à l'autre en raison de la forte variabilité naturelle des puits de CO₂, sans tendance générale discernable (voir aussi l'article en couverture).

Méthane (CH₄)

Le méthane contribue pour quelque 16 %⁴⁾ au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Environ 40 % des rejets de méthane dans l'atmosphère sont d'origine naturelle (zones humides, termites, etc.) et environ 60 % d'origine humaine (élevage de ruminants, riziculture, exploitation de combustibles fossiles, décharges, combustion de biomasse, etc.) [16]. Moyennée à l'échelle du globe, la teneur de l'atmosphère en CH₄, calculée à partir d'observations *in situ*, a atteint un nouveau pic en 2020 – 1 889 ± 2 ppb –, soit une augmentation de 11 ppb par rapport à l'année précédente (figure 7). Cette hausse est supérieure

à l'augmentation de 8 ppb enregistrée entre 2018 et 2019 et au taux d'accroissement annuel moyen des dix dernières années. Après avoir atteint quelque 12 ppb par an à la fin des années 80, le taux d'accroissement annuel moyen du CH₄ a diminué pour se stabiliser à une valeur proche de zéro entre 1999 et 2006. Depuis 2007, la concentration de CH₄ atmosphérique a augmenté jusqu'à atteindre, en 2020, 262 % du niveau qu'elle avait à l'époque préindustrielle du fait de l'accroissement des émissions anthropiques. D'après des études fondées sur les mesures du CH₄ effectuées dans le cadre de la VAG, cette augmentation récente est probablement due à une hausse des émissions de méthane provenant des terres humides des régions tropicales ainsi que de sources anthropiques aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord.

Des études récentes ont par ailleurs mis en évidence les avantages climatiques à court terme et la rentabilité des mesures de réduction des émissions de méthane [17]. Quelques mesures correctives sont présentées dans l'évaluation mondiale du méthane menée par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) [18].

Oxyde nitreux (N₂O)

L'oxyde nitreux contribue pour quelque 7 %⁴⁾ au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants, ce qui le place au troisième rang des facteurs du forçage combiné. Ses émissions dans l'atmosphère sont d'origine naturelle (environ 60 %) et humaine (environ 40 %) et proviennent notamment des océans, des sols, de la combustion de biomasse, des engrais et de divers procédés industriels. Moyennée à l'échelle du globe, la fraction molaire du N₂O a atteint 333,2 ± 0,1 ppb

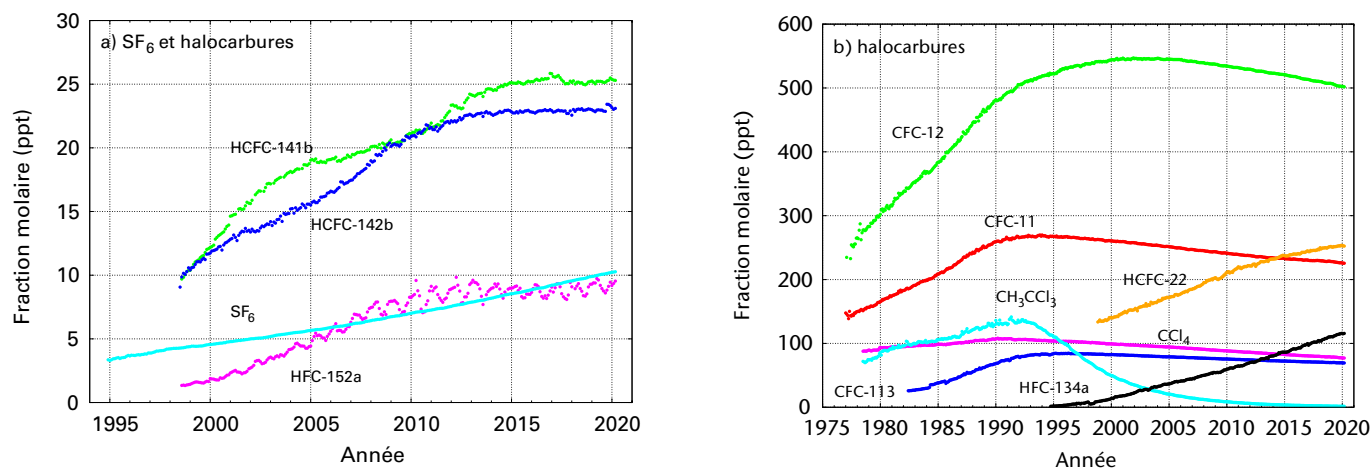


Figure 9. Évolution des valeurs de la fraction molaire mensuelle moyenne du SF₆ et des principaux halocarbures: (a) SF₆ et halocarbures à faible fraction molaire; (b) halocarbures à fraction molaire plus élevée. Nombre de stations utilisées pour les analyses de chaque gaz: SF₆ (87), CFC-11 (23), CFC-12 (25), CFC-113 (22), CCl₄ (22), CH₃CCl₃ (25), HCFC-141b (10), HCFC-142b (15), HCFC-22 (14), HFC-134a (11), HFC-152a (10).

en 2020, soit 1,2 ppb de plus que l'année précédente (figure 8) et 123 % du niveau qu'elle avait à l'époque préindustrielle (270 ppb). La hausse enregistrée entre 2019 et 2020 a été supérieure à celle survenue entre 2018 et 2019 ainsi qu'au taux d'accroissement moyen calculé sur les dix dernières années (0,99 ppb/an). Les émissions mondiales de N₂O d'origine humaine, qui sont principalement dues aux apports d'engrais azotés, ont augmenté de 30 % au cours des quatre dernières décennies pour atteindre 7,3 (fourchette: 4,2-11,4) millions de tonnes d'azote par an. L'agriculture, par l'emploi d'engrais azotés et de fumier, est responsable de 70 % de toutes les émissions anthropiques de N₂O. L'augmentation de la teneur de l'atmosphère en N₂O est principalement due à cette progression [19].

Autres gaz à effet de serre

Les chlorofluorocarbones (CFC) destructeurs d'ozone stratosphérique, qui sont réglementés par le Protocole de Montréal, et les gaz halogénés mineurs contribuent à hauteur d'environ 11 %⁴⁾ au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Si les CFC et la plupart des halons sont en baisse, certains hydrochlorofluorocarbones (HCFC) et hydrofluorocarbones (HFC), qui sont également de puissants gaz à effet de serre, augmentent à un rythme relativement rapide, même si les concentrations relevées sont encore faibles (de l'ordre de la ppt⁶⁾). Le réseau d'observation actuel des CFC ne permet pas de détecter les principales sources d'émissions en temps opportun [20]. Bien que sa concentration soit tout aussi faible, le SF₆ est un gaz à effet de serre persistant extrêmement puissant. Produit par l'industrie chimique, il est surtout utilisé comme isolant dans les systèmes de distribution électrique. Sa fraction molaire représente plus du double aujourd'hui de ce qu'elle était vers le milieu des années 90 (figure 9 a)).

Le présent Bulletin traite principalement des gaz à effet de serre persistants. L'ozone troposphérique, qui a une durée de vie relativement courte, provoque un forçage radiatif comparable à celui qu'induisent les halocarbures [21]. Beaucoup d'autres polluants, tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, bien qu'ils ne soient pas assimilés à des gaz à effet de serre, ont une légère influence – directe ou indirecte – sur le forçage radiatif [9]. Les aérosols (particules en suspension) sont des substances éphémères qui ont aussi une incidence sur le bilan radiatif. Tous les gaz mentionnés dans le présent Bulletin ainsi que les aérosols font l'objet d'une surveillance dans le cadre du

programme d'observation de la VAG, avec le soutien des Membres de l'OMM et des réseaux participants [22].

Remerciements et sites Internet

Cinquante-cinq Membres de l'OMM ont transmis des données sur le CO₂ et d'autres gaz à effet de serre au CMDGS relevant de la VAG. Environ 40 % des relevés communiqués au CMDGS proviennent de stations qui font partie du réseau coopératif d'échantillonnage d'air relevant du Laboratoire de recherche sur le système terrestre (ESRL) de la NOAA. Pour les autres réseaux et stations, voir le rapport N° 255 de la série consacrée à la VAG [23]. Les données d'observation du réseau AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) ont également été utilisées. Les stations d'observation de la VAG qui ont fourni des données utilisées pour établir le présent Bulletin (voir la figure 4) apparaissent dans la liste des stations participantes figurant sur le site Web du CMDGS (<https://gaw.kishou.go.jp/>). Elles sont par ailleurs décrites dans le système d'information sur les stations de la VAG (GAWSYS) (<https://gawsys.meteoswiss.ch>) administré par MétéoSuisse (Suisse). Le présent Bulletin est rédigé sous la supervision du Groupe consultatif scientifique pour les gaz à effet de serre de la VAG.

Comité de rédaction

Alex Vermeulen (Système intégré d'observation du carbone – Consortium pour une infrastructure européenne de recherche (ICOS ERIC)/ Université de Lund, Suède), Yousuke Sawa (Service météorologique japonais, CMDGS, Japon) et Oksana Tarasova (OMM)

Auteurs (par ordre alphabétique)

Luana Basso (Institut national de recherches spatiales, Brésil), Andy Croxwell (ESRL NOAA, Institut coopératif de recherche en sciences de l'environnement, Université du Colorado à Boulder, États-Unis d'Amérique), Han Dolman (Université libre d'Amsterdam, Pays-Bas), Luciana Gatti (Institut national de recherches spatiales, Brésil), Christoph Gerbig (Institut Max Planck de biogéochimie, Allemagne), David Griffith (Université de Wollongong, Australie), Bradley Hall (ESRL NOAA, États-Unis d'Amérique), Armin Jordan (Institut Max Planck de biogéochimie, Allemagne), Paul Krummel (Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth, Australie), Markus Leuenberger (Université de Berne, Suisse), Zoë Loh (Organisation de recherche scientifique et industrielle du Commonwealth, Australie), Sara Mikaloff-Fletcher (GNS Science, Manaaki Whenua – Landcare Research, et Université de Waikato, Nouvelle-Zélande), Yousuke Sawa (Service météorologique

japonais, CMDGS, Japon), Michael Schibig (Université de Berne, Suisse), Oksana Tarasova (OMM), Jocelyn Turnbull (GNS Science, Nouvelle-Zélande/Institut coopératif de recherche en sciences de l'environnement, Université du Colorado à Boulder, États-Unis d'Amérique), Alex Vermeulen (ICOS ERIC/Université de Lund, Suède).

Références

- [1] Bennedsen, M., E. Hillebrand et S.J. Koopman, 2019: Trend analysis of the airborne fraction and sink rate of anthropogenically released CO₂. *Biogeosciences*, 16: 3651–3663, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3651-2019>.
- [2] Ciavarella, A. *et al.*, 2021: Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166: 9, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>.
- [3] Jiang, L.Q., *et al.*, 2019. Surface ocean pH and buffer capacity: past, present and future. *Scientific Reports*, 9: 18624, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4>.
- [4] Caesar, L. *et al.*, 2021: Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14: 118–120, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.
- [5] Manning, A. et R.F. Keeling, 2006: Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 58(2): 95–116, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00175.x>.
- [6] GCOS, 2021: The Status of the Global Climate Observing System 2021: *The GCOS Status Report*, (GCOS-240), OMM, Genève.
- [7] Schibig, M.F., 2015: Carbon and oxygen cycle related atmospheric measurements at the terrestrial background station Jungfraujoch. Thèse de doctorat, Université de Berne.
- [8] Butler, J.H. et S.A. Montzka, 2020: The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [9] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (sous la direction de V. Masson-Delmotte *et al.*). Cambridge University Press, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [10] NOAA, Earth System Research Laboratories, Global Monitoring Laboratory, 2020: Trends in atmospheric carbon dioxide, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [11] Tsutsumi, Y. *et al.*, 2009: *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases* (WMO/TD-No. 1473). GAW Report No. 184. Genève, OMM, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=12631.
- [12] Hall, B.D. *et al.*, 2021: Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14: 3015–3032, <https://doi.org/10.5194/amt-14-3015-2021>.
- [13] Le Quéré, C. *et al.*, 2020: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10: 647–653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.
- [14] International Energy Agency, 2021: Global energy review: CO₂ emissions in 2020, <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>.
- [15] Friedlingstein, P. *et al.*, 2020: Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4): 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- [16] Saunio, M. *et al.*, 2020: The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
- [17] Nisbet, E.G. *et al.*, 2020: Methane mitigation: methods to reduce emissions, on the path to the Paris Agreement. *Reviews of Geophysics*, 58(1): e2019RG000675, <https://doi.org/10.1029/2019RG000675>.
- [18] UNEP and Climate and Clean Air Coalition, 2021: *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*.

- Nairobi, PNUE, <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>.
- [19] Tian, H. *et al.*, 2020: A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586: 248–256, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.
 - [20] Weiss, R.F., A.R. Ravishankara et P.A. Newman, 2021: Huge gaps in detection networks plague emissions monitoring. *Nature*, 595: 491–493, <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01967-z>.
 - [21] OMM, 2018: *Bulletin de l'OMM sur les gaz réactifs: faits saillants du Programme de la Veille de l'atmosphère globale*, N° 2, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20668#.YXvIbJ5ByUk.
 - [22] OMM, 2021: *Bulletin de l'OMM sur la qualité de l'air et du climat*, N°1, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21942.
 - [23] WMO, 2020: *20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques* (GGMT-2019). GAW Report No. 255. Genève, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10353.
 - [24] Henne, S. *et al.*, 2008: Mount Kenya Global Atmosphere Watch station (MKN): installation and meteorological characterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11): 2946–2962, <https://doi.org/10.1175/2008jamc1834.1>.
 - [25] New Zealand Ministry for the Environment, 2021: *New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019* Wellington, <https://environment.govt.nz/publications/new-zealands-greenhouse-gas-inventory-1990-2019/>.
 - [26] IPCC, 2019: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
 - [27] Steinkamp, K. *et al.*, 2017: Atmospheric CO₂ observations and models suggest strong carbon uptake by forests in New Zealand. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(1): 47–76, <https://acp.copernicus.org/articles/17/47/2017/>.
 - [28] Gatti, L.V. *et al.*, 2021: Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595: 388–393, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

Contacts

Organisation météorologique mondiale
Division de la recherche sur l'environnement atmosphérique
Département des sciences et de l'innovation
Genève, Suisse
Courriel: gaw@wmo.int
Site Web: <https://community.wmo.int/activity-areas/gaw>

Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre
Service météorologique japonais
Tokyo, Japon
Courriel: wdcgg@met.kishou.go.jp
Site Web: <https://gaw.kishou.go.jp>

Notes:

- 1) L'expression «fraction molaire» est employée de préférence à «concentration» lorsqu'on parle d'un mélange de gaz ou de fluides. En chimie atmosphérique, elle sert à exprimer la concentration comme étant le nombre de moles d'un composé par mole d'air sec.
- 2) ppm = nombre de molécules du gaz considéré par million (10⁶) de molécules d'air sec.
- 3) ppb = nombre de molécules du gaz considéré par milliard (10⁹) de molécules d'air sec.
- 4) Ce pourcentage correspond à la contribution relative du gaz mentionné à l'accroissement du forçage radiatif mondial dû à l'ensemble des gaz à effet de serre persistants depuis 1750.
- 5) 1 GtCO₂ = 1 milliard (10⁹) de tonnes de dioxyde de carbone
- 6) ppt = nombre de molécules du gaz considéré par billion (10¹²) de molécules d'air

Quelques stations d'observation des gaz à effet de serre

Mont Kenya (MKN)



Photo: OMM

La station de la VAG au mont Kenya (identifiant de station: MKN) est établie sur le versant nord-ouest du mont Kenya, à proximité de la route Sirimon et à environ 5 km au sud-ouest et 200 m au-dessous de Timau Hill [24]. Elle est exploitée par le Service météorologique kényan de Nairobi. La station a pour but d'effectuer des mesures sur le long terme des gaz à effet de serre et des aérosols en Afrique équatoriale, ainsi que de déterminer la contribution des brûlis et des activités de déboisement sur l'accumulation d'ozone dans la région. Le mont Kenya est une montagne d'origine volcanique isolée et de forme presque conique, qui se détache légèrement de l'avant-pays qui l'entoure (1 800-2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer) et s'élève à environ 4 300 mètres au-dessus du niveau de la mer. La zone est protégée et fait partie du Parc national du mont Kenya depuis 1949 et a été désignée comme site classé au patrimoine mondial en 1997.

Le bâtiment de la station est composé de deux conteneurs mobiles entièrement équipés et mis en service en Allemagne par l'Institut de météorologie et de recherche sur le climat – recherche sur l'environnement atmosphérique du Centre de recherche de Karlsruhe (FZK). La station a été expédiée au Kenya d'un seul bloc et a été inaugurée en octobre 1999. Elle fait partie du réseau d'échantillonnage en flacons du Global Monitoring Laboratory de la NOAA, qui analyse des échantillons de CO, CO₂, N₂O, CH₄, H₂, SF₆ ainsi que les isotopes d'hydrogène et d'oxygène. L'étalonnage des instruments est effectué tous les deux ans par le Laboratoire fédéral suisse d'essai des matériaux et de recherche (EMPA). La station est alimentée par une ligne électrique terrestre de 26 km qui traverse la forêt tropicale.

Emplacement

Pays: Kenya
Latitude: 0,0622° S
Longitude: 37,2922° E
Altitude: 3 644 mètres au-dessus du niveau de la mer
Fuseau horaire: Heure locale = UTC + 3



Barrow (BRW)

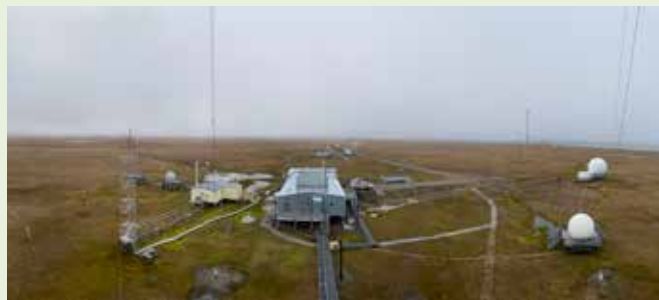


Photo: NOAA

Officiellement établi en 1973, le Barrow Atmospheric Baseline Observatory (Observatoire de référence atmosphérique de Barrow) (BRW) est la station de la NOAA qui se situe la plus au nord et qui est le plus ancien observatoire du climat atmosphérique fonctionnant sans interruption de l'Arctique. Située à 8 km au nord-est d'Utqiagvik (anciennement Barrow) en Alaska, la station BRW est établie à dessein à dessein au vent des habitations humaines, dans une zone isolée qui permet de surveiller la composition d'un air non altéré par des sources de pollution atmosphérique régionales.

Le bâtiment original de l'observatoire, d'une superficie de 74 m², a été construit en 1973 et a accueilli de nombreuses activités de mesure des variables climatiques à long terme et des expériences de plus courte durée au cours de son existence. Après 47 ans, la bâtisse ne répondait plus aux besoins des chercheurs et a été remplacée en 2020 par un nouveau bâtiment principal complété par des structures portantes, pour une surface totale de 273 m². La nouvelle infrastructure comprend une plateforme emménagée sur le toit, une tour d'échantillonnage de 30 m de haut, une plateforme permettant de loger deux conteneurs de 6 m pour les missions scientifiques de courte durée ainsi qu'une connexion en fibre optique à haut-débit reliée au reste des équipements voisins fournis par les États-Unis, qui ont été transférés dans le nouveau bâtiment à la fin de l'année 2020. Aujourd'hui, la station BRW permet d'effectuer plus de 200 mesures et de mener ainsi des recherches sur la composition de l'atmosphère, le climat, le rayonnement solaire, les aérosols et l'ozone stratosphérique.



Emplacement

Pays: États-Unis d'Amérique
Latitude: 71,323° N
Longitude: 156,611° W
Altitude: 11 mètres au-dessus du niveau de la mer
Fuseau horaire: Heure locale = UTC - 9

