



Organisation
météorologique
mondiale
Temps · Climat · Eau



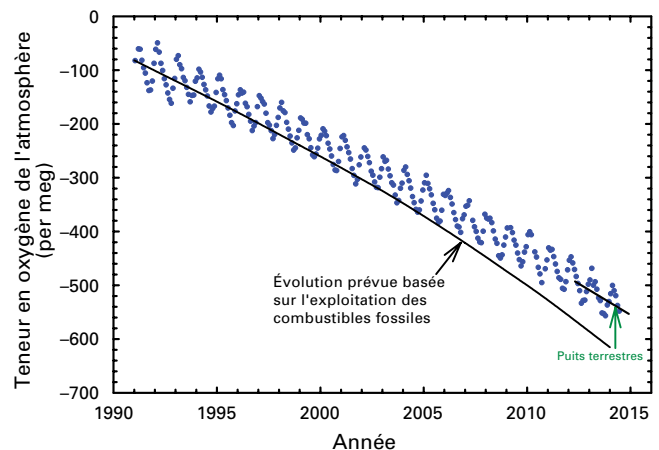
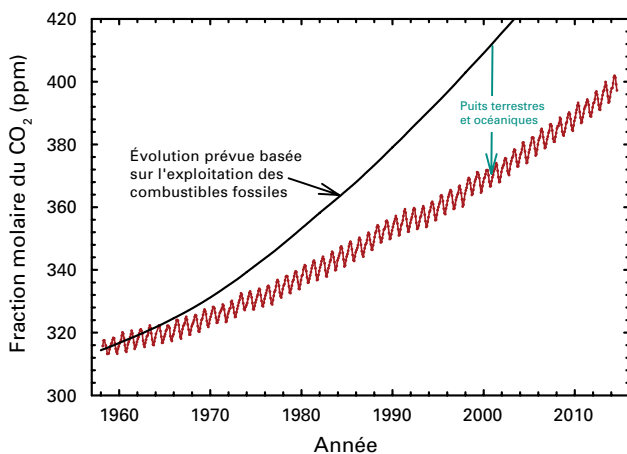
GLOBAL
ATMOSPHERE
WATCH

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 2013

N° 10 | 6 novembre 2014

ISSN 2078-080X



La mesure des concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) et d'oxygène (O_2) dans l'atmosphère nous livre de précieuses informations sur les perturbations que subit le cycle mondial du carbone du fait des activités humaines. La croissance du CO_2 atmosphérique fait l'objet d'un suivi rigoureux depuis 1958, date à laquelle l'observatoire de Mauna Loa a commencé d'effectuer des mesures précises sous la direction de C.D. Keeling (graphique ci-dessus à gauche). Ce sont les méthodes appliquées à l'époque pour garantir la qualité des mesures qui sont utilisées désormais pour les observations effectuées dans le cadre de la Veille de l'atmosphère globale. La hausse des concentrations de CO_2 ne représente qu'environ la moitié de celle à laquelle on aurait pu s'attendre si tout le CO_2 résultant de l'exploitation des combustibles fossiles était resté dans l'atmosphère. L'autre moitié a été absorbée par la biosphère terrestre et les océans, mais les données relatives au seul CO_2 ne rendent pas bien compte des rôles respectifs joués par les terres émergées et par les océans. Les mesures qui portent sur l'oxygène sont utiles dans ce contexte.

La figure de droite représente l'une des plus longues séries chronologiques dont on dispose sur l'oxygène, grâce aux échantillons prélevés à Cape Grim (Tasmanie) et analysés

par la Scripps Institution of Oceanography. L'évolution de la teneur en oxygène est présentée ici comme une variation relative du rapport oxygène/azote (O_2/N_2). Une diminution de 100 per meg^[1] correspond à la perte de 100 molécules d'oxygène pour chaque million de molécules de ce gaz présentes dans l'atmosphère. La teneur de l'atmosphère en oxygène a diminué très légèrement, dans la mesure où celui-ci est absorbé lors du processus de combustion des combustibles fossiles. Ce recul est moins important que le laisserait supposer le volume de combustibles fossiles consommé, car lorsque le CO_2 est absorbé par les végétaux dans le cadre de la photosynthèse, de l'oxygène est restitué à l'atmosphère. Cette différence permet donc de quantifier les puits terrestres de dioxyde de carbone. Quant aux puits océaniques de CO_2 , on peut aussi déterminer leur importance en partant du principe que la somme des puits doit correspondre au total calculé d'après les données sur le CO_2 . Les données relatives à l'oxygène mettent aussi en évidence des fluctuations saisonnières et des fluctuations intervenant à d'autres échelles temporelles: en livrant des informations supplémentaires sur le fonctionnement à grande échelle de la biosphère, elles viennent compléter les données sur le CO_2 . (Figures fournies gracieusement par R. Keeling, de la Scripps Institution of Oceanography, États-Unis d'Amérique).

Résumé

La toute dernière analyse des données d'observation recueillies dans le cadre du Programme de la Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM révèle qu'à l'échelle du globe, les fractions molaires du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O) ont atteint de nouveaux pics en 2013, s'établissant respectivement à $396,0 \pm 0,1$ ppm^[2], $1\,824 \pm 2$ ppb^[3]

et $325,9 \pm 0,1$ ppb. Ces valeurs représentent respectivement 142 %, 253 % et 121 % des niveaux préindustriels (avant 1750). Le taux d'accroissement du CO_2 atmosphérique entre 2012 et 2013 est de 2,9 ppm, soit la plus forte augmentation interannuelle de la période 1984–2013. Pour le N_2O , la hausse relevée en 2013 par rapport à 2012 est inférieure à celle constatée entre 2011 et 2012 mais comparable au taux moyen de progression depuis dix ans. Quant au CH_4 atmosphérique, son taux d'accroissement

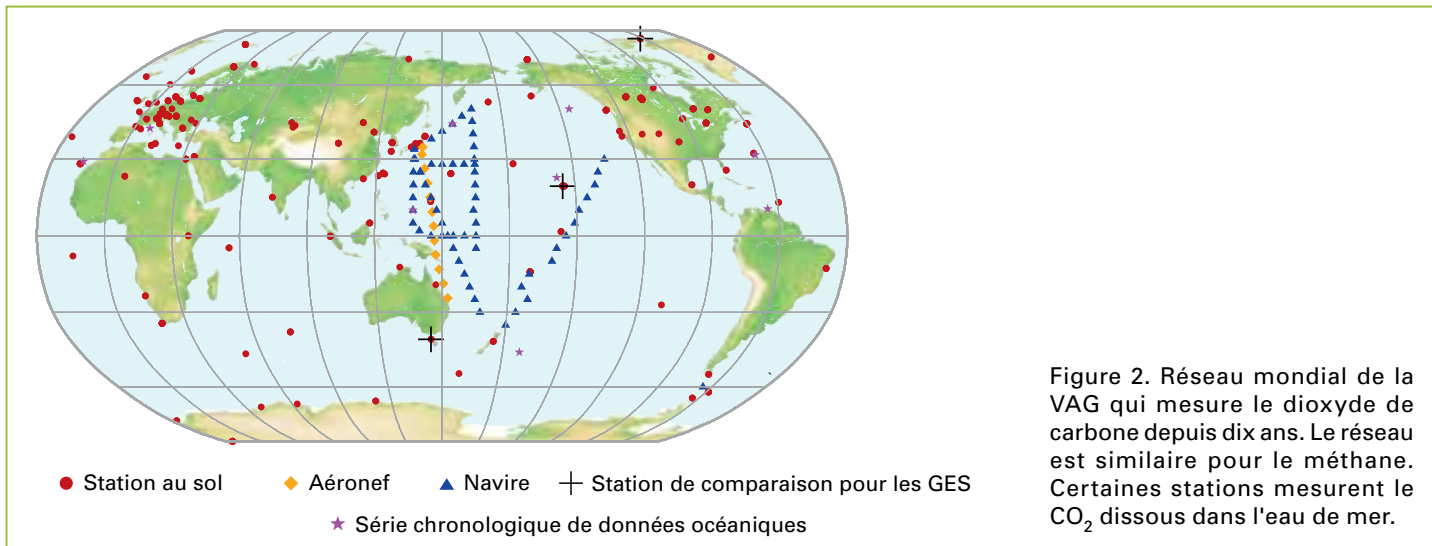


Figure 2. Réseau mondial de la VAG qui mesure le dioxyde de carbone depuis dix ans. Le réseau est similaire pour le méthane. Certaines stations mesurent le CO₂ dissous dans l'eau de mer.

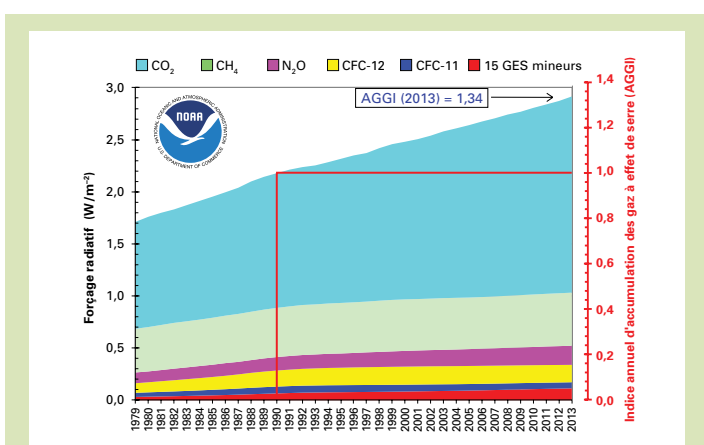


Figure 1. Forçage radiatif de l'atmosphère, relativement à 1750, dû aux gaz à effet de serre persistants et valeur actualisée pour 2013 de l'indice annuel d'accumulation des gaz à effet de serre (AGGI) de la NOAA.

Tableau 1. Concentrations moyennes annuelles dans le monde (en 2013) et évolution des principaux gaz à effet de serre d'après les données transmises par le réseau mondial de surveillance des gaz à effet de serre relevant de la VAG. Les valeurs sont exprimées en fractions molaires d'air sec et les incertitudes sont pour un intervalle de confiance à 68 %.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Concentration mondiale en 2013 ^[4]	396,0±0,1 ppm	1 824±2 ppb	325,9±0,1 ppb
Concentration en 2013 par rapport à l'année 1750 ^a	142 %	253 %	121 %
Augmentation en valeur absolue entre 2012 et 2013	2,9 ppm	6 ppb	0,8 ppb
Augmentation en pourcentage entre 2012 et 2013	0,74 %	0,33 %	0,25 %
Augmentation annuelle moyenne en valeur absolue depuis 10 ans	2,07 ppm/an	3,8 ppb/an	0,82 ppb/an

^a En supposant 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: 124 pour le CO₂, 121 pour le CH₄ et 33 pour le N₂O. (La valeur préindustrielle du CH₄ utilisée dans les précédents bulletins a été mise à jour, ce qui réduit légèrement le forçage radiatif et l'augmentation en pourcentage de ce gaz depuis 1750. Cela n'a pas d'incidence sur l'AGGI).

se situe dans la moyenne des cinq dernières années. 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), le forçage radiatif de l'atmosphère induit par les gaz à effet de serre persistants s'est accru de 34 % entre 1990 et 2013, le dioxyde de carbone étant à l'origine d'environ 80 % de cette augmentation. L'absorption de CO₂ anthropique par l'océan a entraîné une hausse des concentrations de ce gaz dans l'eau de mer et des taux d'acidité accrus de celle-ci. Sur les vingt dernières années, le pH de l'eau de mer, indicateur de l'acidité, a diminué de 0,0011 à 0,0024 unités par année, et la quantité de CO₂ dissous dans l'eau de mer (pCO₂) a accusé une hausse annuelle comprise entre 1,2 et 2,8 µatm, d'après les séries chronologiques provenant de plusieurs stations océaniques.

Aperçu général

Le présent bulletin, le dixième d'une série de bulletins sur les gaz à effet de serre publiés chaque année par l'OMM dans le cadre du Programme de la VAG, rend compte de l'évolution de la concentration atmosphérique des principaux gaz à effet de serre persistants (dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote) et présente un récapitulatif de la contribution des autres gaz. Avec les CFC-11 et CFC-12, ces trois gaz sont responsables de 96 %^[5] environ du forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants (figure 1). Le présent numéro contient une nouvelle section sur l'acidification des océans établie en collaboration avec la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, dans le cadre de son Projet international de coordination des données sur le carbone océanique (IOCCP), le Comité scientifique pour les recherches océaniques (SCOR) et le Centre de coordination de l'action internationale relative à l'acidification des océans de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Le Programme de la VAG (<http://www.wmo.int/gaw>) permet de coordonner l'observation systématique et l'analyse des gaz à effet de serre et autres éléments à l'état de traces. La figure 2 montre l'emplacement des stations qui mesurent les gaz à effet de serre depuis une décennie, et en particulier de plusieurs stations mesurant la teneur de l'eau de mer en CO₂. Les données d'observation de l'atmosphère communiquées par les organismes concernés sont archivées et distribuées par le Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre (CMDGS), qui est hébergé par le Service météorologique japonais.

Le tableau 1 présente les concentrations en 2013, moyennées à l'échelle du globe, des trois principaux gaz à effet de serre persistants et l'évolution de ces concentrations depuis 2012

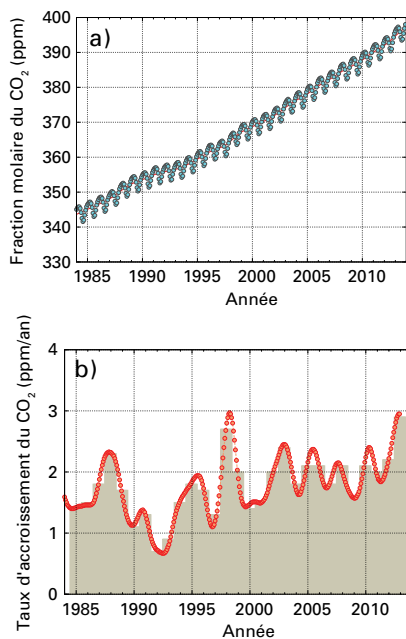


Figure 3. Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CO₂ a) et de son taux d'accroissement b) pendant la période comprise entre 1984 et 2013. Les colonnes ombrées (en b)) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives.

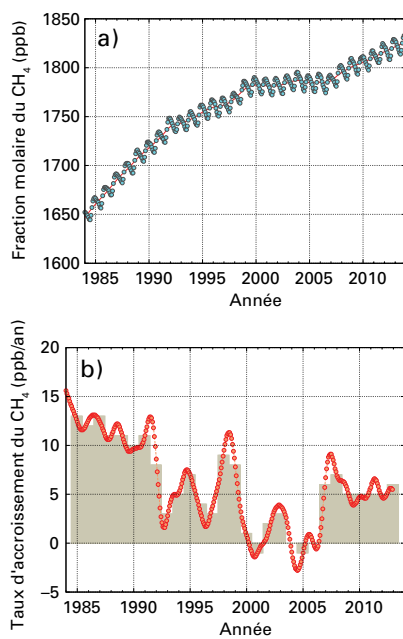


Figure 4. Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du CH₄ a) et de son taux d'accroissement b) pendant la période comprise entre 1984 et 2013. Les colonnes ombrées (en b)) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives.

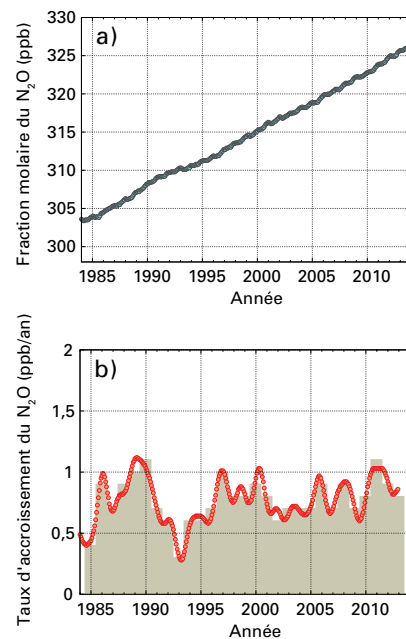


Figure 5. Évolution de la valeur moyenne à l'échelle du globe de la fraction molaire du N₂O a) et de son taux d'accroissement b) pendant la période comprise entre 1984 et 2013. Les colonnes ombrées (en b)) font apparaître les différences entre les moyennes annuelles successives.

et depuis 1750. Ces résultats sont le fruit de l'analyse (OMM, 2009) d'un ensemble de données pouvant être rapportées, pour chaque gaz, à l'étalon mondial de référence de l'OMM. Sont exclues de l'analyse les mesures provenant de stations mobiles, à l'exception des données d'échantillonnage de la NOAA en provenance de navires sillonnant l'océan Pacifique.

Les trois gaz à effet de serre du tableau 1 sont étroitement liés aux activités humaines et interagissent aussi fortement avec la biosphère et les océans. Pour prévoir l'évolution des concentrations atmosphériques de ces gaz, il est nécessaire de bien connaître, sur le plan quantitatif, leurs multiples sources et puits ainsi que les 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 GES persistants, et elles servent aussi à vérifier les inventaires d'émissions et à évaluer les données satellitaires sur les GES persistants moyennés sur la colonne.

L'indice annuel d'accumulation des gaz à effet de serre de la NOAA s'établissait à 1,34 en 2013, soit une augmentation (relativement à 1750) du forçage radiatif total induit par l'ensemble des gaz à effet de serre persistants de 34 % depuis 1990 et de 1,5 % entre 2012 et 2013 (figure 1). Ce forçage radiatif correspondait en 2013 à une fraction molaire de 479 ppm en équivalent CO₂ (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi>).

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 65 %^[5] au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Il est à l'origine de l'augmentation de ce forçage à hauteur de 84 % environ depuis une décennie et de 83 % ces cinq dernières années. La fraction molaire préindustrielle, de quelque 278 ppm, représentait une situation d'équilibre des flux bidirectionnels annuels, relativement grands,

entre l'atmosphère et les océans (environ 80 PgC/an) et entre l'atmosphère et la biosphère terrestre (environ 120 PgC/an). En 2013, la teneur de l'atmosphère en CO₂ s'établissait à 142 % de ce qu'elle était à l'époque préindustrielle, essentiellement à cause des émissions liées à l'exploitation des combustibles fossiles et à la production de ciment (les émissions de CO₂ ont atteint 9,7±0,5 PgC^[6] en 2012; voir <http://www.globalcarbonproject.org>). Cela concorde avec les mesures de la VAG qui portent sur la répartition spatiale du CO₂ à la surface de la Terre et le rythme d'augmentation de ce gaz, et qui mettent aussi en évidence la diminution de la teneur de l'atmosphère en oxygène (O₂) et du rapport isotopique ¹³C/¹²C dans le CO₂ atmosphérique. L'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ est due aussi, dans une bien moindre mesure, au déboisement et autres changements d'affectation des sols (1,0±0,5 PgC en 2012), même si l'effet net des flux de la biosphère terrestre est celui d'un puits. L'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ entre 2003 et 2013 correspond en moyenne à 45 % environ du CO₂ émis par les activités humaines, les 55 % restants étant absorbés par les océans et la biosphère terrestre, qui sont les principaux puits du CO₂ résultant de l'exploitation des combustibles fossiles. C'est grâce aux observations du dioxyde de carbone et de l'oxygène atmosphériques, effectuées dans le cadre de la VAG, que l'on connaît les rôles respectifs joués par ces puits. L'absorption du CO₂ atmosphérique par les océans entraîne par ailleurs une acidification de ces derniers (voir plus loin).

En 2013, en moyenne mondiale, la concentration de CO₂ était de 396,0±0,1 ppm (figure 3 a)), soit 2,9 ppm de plus qu'en 2012. Ce chiffre est supérieur à l'augmentation constatée entre 2011 et 2012, à la progression annuelle moyenne des années 90 (environ 1,5 ppm/an) et à celle de la décennie écoulée (environ 2,1 ppm/an). L'augmentation récente des émissions de CO₂ provenant de l'exploitation des combustibles fossiles (environ 2 % par an, ou 0,2 PgC par an) ne saurait expliquer la variabilité interannuelle du taux de croissance du CO₂ ni la progression plus forte que la moyenne enregistrée entre 2012 et 2013. Les mesures du rapport isotopique ¹³C/¹²C du CO₂



Centre de coordination
de l'action internationale
relative à l'acidification
des océans
OA-ICC



ACIDIFICATION DES OCÉANS

L'océan absorbe aujourd'hui le quart des émissions anthropiques de CO_2 , limitant ainsi l'accroissement du CO_2 atmosphérique causé par l'exploitation des combustibles fossiles. L'absorption de quantités accrues de ce gaz par les mers du globe modifie le cycle des carbonates marins qui régit l'acidité de l'eau de mer. En se dissolvant dans l'eau de mer, le CO_2 forme de l'acide carbonique (H_2CO_3), acide faible qui se dissocie en bicarbonate (HCO_3^-) et ions d'hydrogène (H^+). Or, plus il y a d'ions d'hydrogène, plus l'acidité est forte (pH plus faible). L'augmentation de l'acidité des océans est déjà mesurable vu que ces derniers absorbent environ 4 kg de CO_2 par jour et par personne. Le rythme d'acidification est limité par la présence d'ions carbonates (CO_3^{2-}), qui fixent la plupart des ions H^+ nouvellement formés pour donner du bicarbonate. Cette réaction tampon consomme toutefois des ions carbonates, ce qui réduit la capacité d'absorption chimique du CO_2 par les eaux de surface. Cette capacité d'absorption ne représente plus aujourd'hui que 70 % de ce qu'elle était au début de l'ère industrielle, et elle pourrait bien être ramenée à seulement 20 % d'ici à la fin du XXI^e siècle. Le rythme actuel d'acidification des océans semble sans précédent depuis au moins 300 millions d'années, si l'on en croit les données indirectes livrées par les paléo-archives. Le processus d'acidification continuera de s'accélérer au moins jusqu'au milieu du siècle, d'après les projections établies à l'aide de modèles du système terrestre. Les changements climatiques ont une légère influence sur les rythmes d'acidification, mais celle-ci représente moins de 10 % de l'évolution causée par l'accroissement du CO_2 . Il n'empêche que la baisse de la salinité des eaux provoquée notamment par la fonte accrue des glaces de l'Arctique peut accélérer sensiblement l'acidification des océans.

Alors que les observations et les modèles donnent en général une image assez précise des processus chimiques en jeu dans l'acidification des océans, les conséquences que celle-ci peut avoir pour les organismes marins sont plus complexes. La réaction des organismes calcifiants tels que les coraux, les algues corallines, les mollusques et certains planctons est une grande source d'inquiétude vu que leur aptitude à former leur coquille ou leur exosquelette (via la calcification) dépend de la quantité de CO_3^{2-} . Pour beaucoup d'entre eux, l'augmentation de l'acidité a une influence néfaste sur la calcification. Parmi les autres conséquences de l'acidification sur les organismes marins on peut citer la réduction de leurs taux de survie et de développement, l'altération de leurs fonctions physiologiques et une diminution de la biodiversité.

La diminution du pH de l'océan de surface et l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ (pression partielle du CO_2) de surface du fait de l'absorption de carbone anthropique par les océans sont déjà détectables. Ces tendances ont été mises en évidence et quantifiées par des observations océaniques systématiques et portant sur de longues périodes qui ont permis d'obtenir les séries chronologiques de données nécessaires à la description des changements constatés dans la biogéochimie et les écosystèmes marins. La figure 6 et le tableau 2 fournissent quelques exemples de ces séries chronologiques. À tous les sites d'observation (plus de dix années de mesures),

la $p\text{CO}_2$ de surface a augmenté en raison de l'accroissement du CO_2 anthropique, qui s'est accompagné d'une acidification de l'océan. Ces stations d'observation représentent en général de vastes territoires, qui vont des régions subpolaires (MUNIDA, Station P et KNOT/K2) aux régions subtropicales (BATS, HOT, ESTOC, DYFAMED) et tropicales (CARIACO, section 137° E). Des données de surface provenant de ces séries chronologiques et corrigées des variations saisonnières ont été utilisées et une tendance linéaire a été appliquée sur les périodes de mesure de façon à obtenir des évolutions décennales comparables pour ces stations. Tout en accusant des variations saisonnières et interannuelles, la $p\text{CO}_2$ a progressé au rythme de 1,2 à 2,8 μatm par an (la fraction molaire atmosphérique a augmenté en moyenne de 2,1 ppm par an sur les dix dernières années), tandis que le pH de l'océan de surface a diminué pendant la période d'observation au rythme moyen de 0,0011 à 0,0024 unités par année, en fonction du lieu. Le rythme de ces changements dépend non seulement de la chimie mais aussi d'autres facteurs spécifiques à chaque région. Aux stations ESTOC, HOT et BATS, la $p\text{CO}_2$ de surface augmente au rythme de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique. Parallèlement, le pH a diminué régulièrement, ce qui cadre avec le rythme d'acidification que suppose l'équilibre avec l'atmosphère. À 10°N sur la section 137°E, la hausse de la $p\text{CO}_2$ et la baisse du pH ont été légèrement moins marquées, ce qui pourrait être lié à des modifications de la circulation du tourbillon subtropical. La série chronologique DYFAMED met en évidence des modifications de la circulation coïncidant avec un fort signal saisonnier, ce qui se traduit par de grandes marges d'incertitude sur la tendance linéaire. À la station CARIACO, la $p\text{CO}_2$ mesurée en surface fait partie des plus élevées qui aient été observées. La forte augmentation de la $p\text{CO}_2$ et la diminution du pH constatées au fil du temps peuvent être attribuées au réchauffement des eaux de surface lui-même lié à une réduction des remontées d'eaux profondes, qui entraîne à son tour une baisse de la productivité biologique. Les séries chronologiques de données relatives aux régions subpolaires ont accusé des extrêmes parmi les plus marqués qui sont dus en partie aux fortes variations saisonnières de la température et de la productivité biologique. À la station MUNIDA, le rythme d'accroissement de la $p\text{CO}_2$ de surface était faible alors qu'à la station KNOT/K2, elle a augmenté au rythme de son équivalent atmosphérique; la baisse du pH à cette dernière station n'en était pas moins l'une des plus marquées. Enfin, l'échantillonnage à la Station P ne s'est pas fait de façon aussi régulière, mais la baisse du pH et l'augmentation de la $p\text{CO}_2$ traduisent une évolution comparable à celle observée sur les autres sites.

L'accent est mis ici sur les observations en surface, mais l'absorption de carbone anthropique et ses répercussions sur la chimie des océans ont une incidence sur une grande partie de la colonne d'eau. Malheureusement, seule une poignée de stations chargées d'établir des séries chronologiques mesurent actuellement le CO_2 , ce qui est loin de faciliter la quantification des tendances s'agissant de l'acidification des océans et de la chimie des carbonates. Il convient de pérenniser et d'étendre les observations du CO_2 provenant de stations qui établissent des séries chronologiques, de même que les mesures océaniques en surface et en profondeur effectuées par des navires.

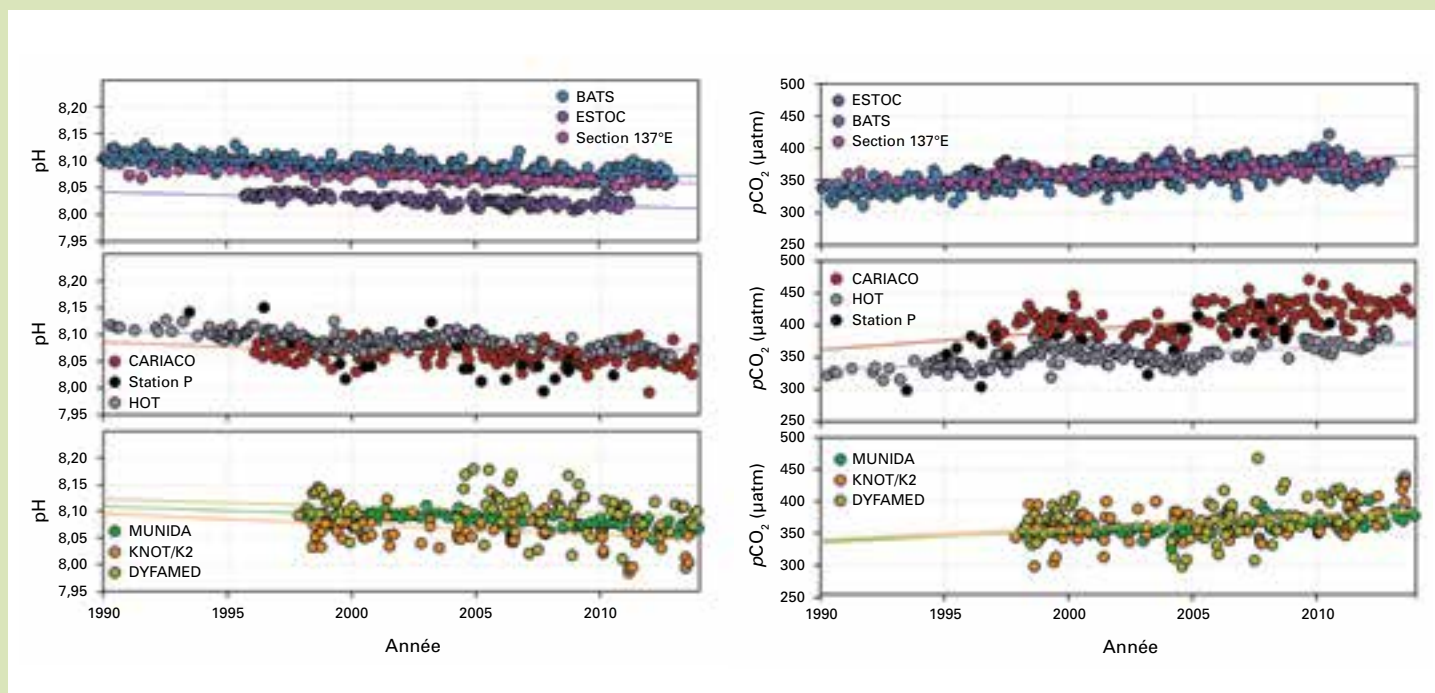


Figure 6. Séries chronologiques de données, corrigées des variations saisonnières, sur le pH de l'eau de mer en surface, avec les tendances linéaires respectives (à gauche) et sur la $p\text{CO}_2$ de surface (μatm), avec les tendances linéaires respectives (à droite). Les séries chronologiques considérées sont les suivantes: BATS (Bermuda Atlantic Time-series Study, en bleu), ESTOC (Station européenne pour l'acquisition de séries chronologiques de données océaniques à proximité des îles Canaries, en violet), HOT (Hawaii Ocean Time series, en gris), CARIACO (en rouge), Station P (en noir), MUNIDA (en vert), KNOT (Kyodo North Pacific Time series, en orange), DYFAMED (Dynamique des Flux Atmosphériques en MEDiterranée, en jaune), Section 137°E (ligne de mesures hydrographiques répétées du Service météorologique japonais à 10°N, 137°E, en rose). La figure 2 montre l'emplacement des stations de mesure. Fréquence d'échantillonnage variable: mensuelle à annuelle.

Tableau 2. Tendances linéaires et erreurs-types pour le pH^a de surface et la $p\text{CO}_2$ aux neuf stations considérées établissant des séries chronologiques de données océaniques

Série chronologique	pH (par an)	$p\text{CO}_2$ ($\mu\text{atm}/\text{an}$)	Référence
BATS ^b	$-0,0017 \pm 0,0001$	$1,75 \pm 0,08$	Bates <i>et al.</i> , 2014
ESTOC ^b	$-0,0014 \pm 0,0001$	$1,78 \pm 0,15$	Bates <i>et al.</i> , 2014 González-Dávila <i>et al.</i> , 2010
HOT ^b	$-0,0017 \pm 0,0001$	$1,89 \pm 0,15$	Bates <i>et al.</i> , 2014 Dore <i>et al.</i> , 2009
CARIACO ^b	$-0,0024 \pm 0,0003$	$2,79 \pm 0,37$	Bates <i>et al.</i> , 2014 Astor <i>et al.</i> , 2013
DYFAMED ^b	$-0,0019 \pm 0,0009$	$2,56 \pm 0,85$	Touratier et Goyet, 2011
MUNIDA ^b	$-0,0016 \pm 0,0003$	$1,55 \pm 0,24$	Bates <i>et al.</i> , 2014 Currie <i>et al.</i> , 2011
KNOT/K2 ^b	$-0,0024 \pm 0,0007$	$2,22 \pm 0,67$	Wakita <i>et al.</i> , 2013
Station P ^c	c	c	Wong <i>et al.</i> , 2010
Section 137°E à 10°N ^d	$-0,0011 \pm 0,0001$	$1,15 \pm 0,06$	Midorikawa <i>et al.</i> , 2010

^a Échelle utilisée: concentration totale en ions d'hydrogène aux températures *in situ*.

^b Les valeurs du pH et de la $p\text{CO}_2$ ont été calculées à partir des mesures du carbone inorganique dissous total, de l'alcalinité totale, de la température et de la salinité (teneur en silicates et phosphates supposée nulle), sauf dans les cas où le pH est mesuré directement. Les données corrigées des variations saisonnières et les tendances linéaires ont été calculées de la manière indiquée dans le rapport N° 184 de la série consacrée à la VAG.

^c Les données disponibles pour la Station P sont trop peu nombreuses pour que l'on puisse calculer une tendance linéaire.

^d Les valeurs du pH ont été calculées à partir des mesures de la $p\text{CO}_2$, du carbone inorganique dissous total, de la température et de la salinité.

atmosphérique par les participants au Programme de la VAG révèlent que les fluctuations du taux de croissance de ce gaz sont dues à de petites oscillations des flux entre l'atmosphère et la biosphère terrestre. En règle générale, ce sont quelque 120 PgC qui sont échangés chaque année entre l'atmosphère et la biosphère terrestre, ce qui explique les cycles saisonniers du CO₂ atmosphérique observés dans l'hémisphère Nord. La légère variabilité interannuelle (1 à 2 %) de ces flux, qui résulte des variations du bilan de la photosynthèse et de la respiration ou de la quantité de biomasse brûlée, a une grande influence sur le taux de croissance du CO₂ (environ 4 PgC/an). Il est trop tôt pour savoir quels facteurs sont responsables de la progression plus forte que la moyenne enregistrée entre 2012 et 2013, mais il s'agit là d'un important domaine de recherche qui est tributaire des mesures effectuées par les participants au Programme de la VAG.

Méthane (CH₄)

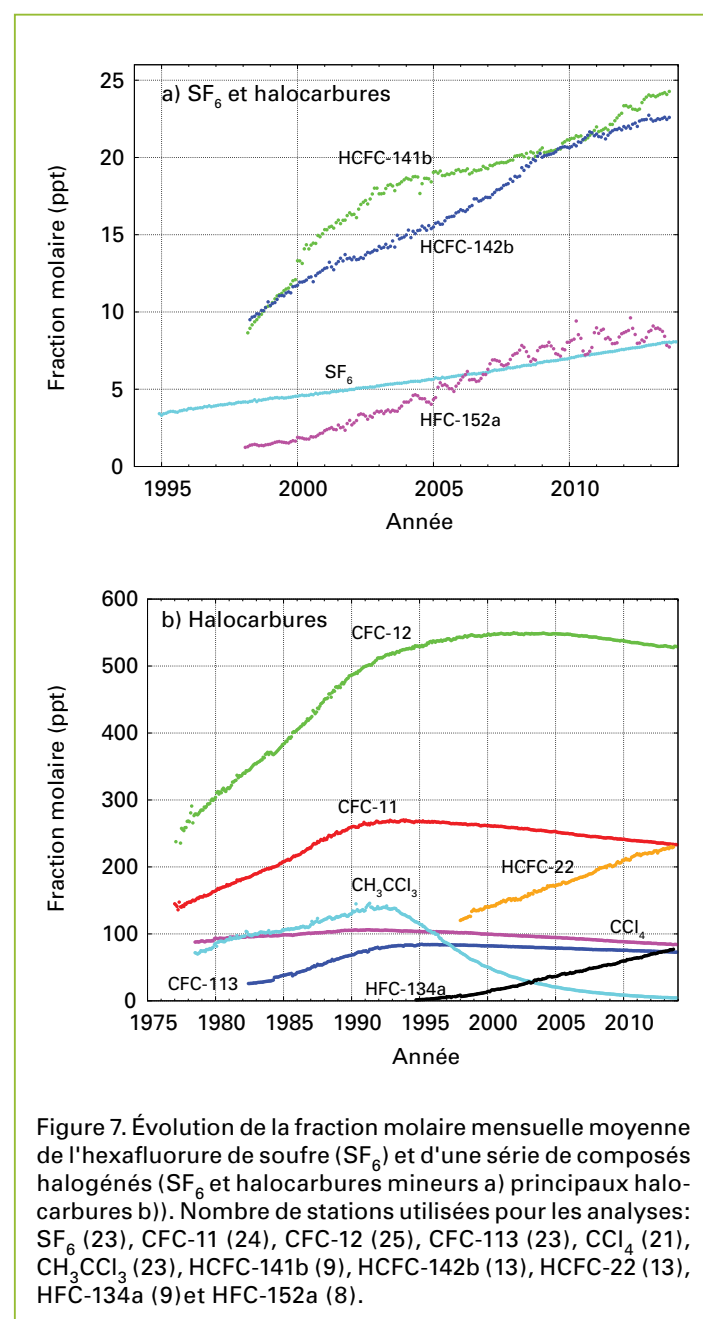
Le méthane contribue pour quelque 17 %^[5] au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Environ 40 % des rejets de méthane dans l'atmosphère sont d'origine anthropique (zones humides, termites, etc.) et 60 % d'origine humaine (élevage de ruminants, riziculture, exploitation de combustibles fossiles, décharges, combustion de biomasse, etc.). Le CH₄ atmosphérique a atteint en 2013 253 % du niveau qu'il avait à l'époque préindustrielle (environ 722 ppt) du fait de l'accroissement des émissions anthropiques. Les valeurs sont passées de quelque 1 650 ppt au début des années 80 à un nouveau pic de 1 824 ± 2 ppt en 2013 (figure 4 a)). Après avoir atteint quelque 13 ppt par an au début des années 80, le taux d'accroissement du CH₄ atmosphérique a diminué pour se stabiliser à une valeur proche de zéro entre 1999 et 2006. À cette évolution sur le long terme s'ajoute la forte variabilité interannuelle de ce gaz. L'étude de ce facteur aide à comprendre les processus qui contribuent à l'émission de CH₄ et à son élimination de l'atmosphère. Depuis 2007, la teneur de l'atmosphère en méthane augmente à nouveau, la moyenne mondiale accusant une hausse de 6 ppt entre 2012 et 2013. D'après les mesures effectuées dans le cadre de la VAG, cette évolution est probablement due à une hausse des rejets de CH₄ provenant des terres humides des régions tropicales ainsi que de sources anthropiques aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Comme il en est fait état dans le bulletin précédent (N° 9), la hausse des émissions dans l'Arctique n'a pas contribué à l'accroissement continu du CH₄ atmosphérique observé depuis 2007.

Protoxyde d'azote (N₂O)

Le protoxyde d'azote contribue pour quelque 6 %^[5] au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants, ce qui le place au troisième rang des agents en cause. Il se situe par ailleurs au premier rang, sur le plan des émissions, des substances qui appauvrissent la couche d'ozone (O₃) stratosphérique, après pondération par le potentiel de destruction de l'ozone. Avant l'ère industrielle, la teneur de l'atmosphère en N₂O représentait un équilibre entre les rejets de ce gaz par les sols et les océans et son élimination de la stratosphère par réaction chimique. À l'ère industrielle, de nouvelles émissions de ce gaz proviennent des engrais azotés synthétiques (rejets directs par les champs fertilisés ou indirects par les cours d'eau touchés par le ruissellement agricole), de l'exploitation des combustibles fossiles, de la combustion de la biomasse et de divers processus mineurs. Aujourd'hui, les sources anthropiques représentent environ 40 % des émissions totales. Ces dernières, qui sont déterminées par la moyenne mondiale de la fraction molaire du N₂O (figure 5 a)), calculée sur la base des mesures effectuées dans le cadre de la VAG, et par son taux d'accroissement au cours des dernières années (figure 5 b)), s'élèvent à quelque 16 TgN par an. Les engrais azotés synthétiques représentent le principal facteur d'accroissement du N₂O depuis l'époque préindustrielle. Moyennée à

l'échelle du globe, la fraction molaire du N₂O a atteint 325,9 ± 0,1 ppt en 2013, soit 0,8 ppt de plus que l'année précédente et 121 % du niveau qu'elle avait à l'époque préindustrielle (270 ppt). Le taux d'accroissement entre 2012 et 2013 est comparable à la moyenne calculée sur les dix dernières années (0,82 ppt/an).

Les mesures du N₂O effectuées dans le cadre de la VAG ont servi, avec l'aide des modèles de transport chimique dans l'atmosphère, à estimer les émissions pour des échelles spatiales allant de la région au continent. Des études récentes ont révélé que les terres émergées des régions tropicales et subtropicales constituent les principales sources d'émission du N₂O (Thompson *et al.*, 2014), et elles ont mis en évidence des tendances statistiquement significatives pour ce qui est des émissions de ce gaz en Asie (Saikawa *et al.*, 2014). Même si l'on en sait aujourd'hui davantage sur le bilan du N₂O, il faut encore améliorer la compatibilité des mesures effectuées par les réseaux de la VAG, et comme le N₂O a une longue durée de vie dans l'atmosphère (130 ans), les gradients spatiaux sont faibles. Aussi, pour pouvoir déduire des émissions à partir de données d'observation combinées à un modèle de transport, les décalages systématiques entre les programmes de mesure



doivent être faibles – <0,1 ppb –, objectif difficile à atteindre avec les techniques de mesure les plus courantes.

Autres gaz à effet de serre

L'hexafluorure de soufre est un puissant gaz à effet de serre persistant. Les émissions de ce gaz sont presque toutes d'origine anthropique, et il est utilisé surtout comme isolant dans les systèmes de distribution électrique. Sa fraction molaire est environ le double aujourd'hui de ce qu'elle était au milieu des années 90 (figure 7 a)). Comme sa durée de vie dans l'atmosphère est très longue (3 200 ans), les émissions s'y accumulent et peuvent être calculées à partir du taux d'accroissement mesuré par les participants au Programme de la VAG. L'analyse des données d'observation révèle que les émissions signalées en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques sont nettement sous-estimées et ne concordent pas avec les relevés atmosphériques (Levin *et al.*, 2010). Les données d'observation du SF₆ recueillies dans le cadre de la VAG sont aussi très utiles dans la mesure où elles permettent de valider le mélange atmosphérique pris en compte dans les modèles de transport chimique mentionnés ci-dessus dans le cas du N₂O.

Les chlorofluorocarbures (CFC) destructeurs d'ozone et les gaz halogénés mineurs contribuent pour quelque 12 %^[5] au forçage radiatif induit par les gaz à effet de serre persistants. Si les CFC et la plupart des halons sont en diminution, les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC), qui sont eux aussi de puissants gaz à effet de serre, augmentent à un rythme assez rapide, même s'ils sont encore peu abondants (leur concentration se mesure en ppt^[8], figure 7 a) et b)).

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. Beaucoup d'autres polluants, tels que le monoxyde de carbone, 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. Les aérosols (particules en suspension) sont eux aussi des substances éphémères qui ont une incidence sur le bilan radiatif. Tous les gaz mentionnés ici ainsi que les aérosols font l'objet d'une surveillance dans le cadre du Programme de la VAG, avec le soutien des pays Membres de l'OMM et des réseaux participants.

Distribution des bulletins

Le Secrétariat de l'OMM élabore et distribue ces bulletins en collaboration avec le Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre (CMDGS), hébergé par le Service météorologique japonais, et le Groupe consultatif scientifique pour les gaz à effet de serre relevant de la VAG; il bénéficie également du concours du Laboratoire de recherche sur le système terrestre (ESRL) de la NOAA. On peut consulter les bulletins sur la page Web du Programme de la VAG et sur la page d'accueil du CMDGS.

Remerciements et sites Internet

Cinquante pays Membres de l'OMM ont transmis des données sur le CO₂ au CMDGS. Environ 46 % des relevés de mesures communiqués au CMDGS proviennent de stations qui font partie du réseau coopératif mondial d'échantillonnage d'air relevant du laboratoire ESRL de la NOAA. Pour les autres réseaux et stations, voir le rapport N° 206 de la série consacrée à la VAG (accessible à l'adresse <http://www.wmo.int/gaw>). Les données d'observation du réseau AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) ont également été utilisées. Enfin, les stations de surveillance de la VAG qui ont fourni des données utilisées pour établir le présent bulletin apparaissent dans la figure 2 et

dans la liste des stations participantes figurant sur le site Web du CMDGS (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>). Elles sont par ailleurs décrites dans le système d'information sur les stations de la VAG (GAW SIS) (<http://gaw.empa.ch/gawsis/>) administré par MétéoSuisse (Suisse).

La section sur l'acidification des océans et l'évolution de la pCO₂ océanique a été établie conjointement par la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, dans le cadre de son Projet international de coordination des données sur le carbone océanique (IOCCP), le Comité scientifique pour les recherches océaniques (SCOR) et le Centre de coordination de l'action internationale relative à l'acidification des océans de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), avec le concours de l'OMM. Sont particulièrement remerciés Y. Astor, N. Bates, M. Church, L. Coppola, K. Currie, M. González-Dávila, L. Miller, T. Nakano et M. Wakita pour les séries chronologiques de données qu'ils ont fournies et interprétées.

Références

- Astor, Y.M., L. Lorenzoni, R. Thunell, R. Varela, F. Muller-Karger, L. Troccoli, G.T. Taylor, M.I. Scranton, E. Tappa et D. Rueda, 2013: Interannual variability in sea surface temperature and fCO₂ changes in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Res. II*, 93:33–43, doi:10.1016/j.dsr2.2013.01.002.
- Bates, N.R., Y.M. Astor, M.J. Church, K. Currie, J.E. Dore, M. González-Dávila, L. Lorenzoni, F. Muller-Karger, J. Olafsson et J.M. Santana-Casiano, 2014: A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO₂ and ocean acidification. *Oceanography*, 27(1):126–141, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.16>.
- Conway, T.J., P.P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, D.R. Kitzis, K.A. Masarie et Ni Zhang, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network. *J. Geophys. Res.*, 99(D11):22831–22855.
- Currie, K.I., M.R. Reid et K.A. Hunter, 2011: Interannual variability of carbon dioxide drawdown by subantarctic surface water near New Zealand. *Biogeochemistry*, 104(1–3):23–34, doi:10.1007/s10533-009-9355-3.
- Dore, J.E., R. Lukas, D.W. Sadler, M.J. Church et D.M. Karl, 2009: Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *PNAS*, 106(30):12235–12240, doi:10.1073/pnas.0906044106.
- González-Dávila, M., J.M. Santana-Casiano, M.J. Rueda et O. Llinás, 2010: The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences*, 7:3067–3081, doi:10.5194/bg-7-3067-2010.
- Levin, I., T. Naegler, R. Heinz, D. Osusko, E. Cuevas, A. Engel, J. Ilmberger, R.L. Langenfelds, B. Neiningner, C. v. Rohden, L.P. Steele, R. Weller, D.E. Worthy, et S.A. Zimov, 2010: The global SF₆ source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(6):2655–2662, doi:10.5194/acp-10-2655-2010.
- Midorikawa, T., M.A. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Nemoto et H.Y. Inoue, 2010: Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus B*, 62:649–659. Mise à jour basée sur: http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/co2_trend/co2_trend_en.html; http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/english/oa/oceanacidification_en.html.
- Montzka, S.A., E.J. Dlugokencky et J.H. Butler, 2011: Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476:43–50, doi:10.1038/nature10322.
- OMM, 2009: *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases* (Y. Tsutsumi, K. Mori, T. Hirahara, M. Ikegami et

- T.J. Conway). Rapport N° 184 de la série consacrée à la VAG (WMO/TD-No. 1473), Genève, 29 p.
- Saikawa, E., R.G. Prinn, E. Dlugokencky, K. Ishijima, G.S. Dutton, B.D. Hall, R. Langenfelds, Y. Tohjima, T. Machida, M. Manizza, M. Rigby, S. O'Doherty, P.K. Patra, C.M. Harth, R.F. Weiss, P.B. Krummel, M. van der Schoot, P.J. Fraser, L.P. Steele, S. Aoki, T. Nakazawa, et J.W. Elkins, 2014: Global and regional emissions estimates for N₂O. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(9):4617–4641, doi:10.5194/acp-14-4617-2014.
- Thompson, R.L., F. Chevallier, A.M. Crotwell, G. Dutton, R.L. Langenfelds, R.G. Prinn, R.F. Weiss, Y. Tohjima, T. Nakazawa, P.B. Krummel, L.P. Steele, P. Fraser, S. O'Doherty, K. Ishijima et S. Aoki, 2014: Nitrous oxide emissions 1999 to 2009 from a global atmospheric inversion. *Atmos. Chem. Phys.*, 14(4):1801–1817, doi:10.5194/acp-14-1801-2014.
- Touratier, F. et C. Goyet, 2011: Impact of the Eastern Mediterranean Transient on the distribution of anthropogenic CO₂ and first estimate of acidification of the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research I*, 58(1):1–15, doi: 10.1016/j.dsr.2010.10.002.
- Wakita, M., S. Watanabe, M. Honda, A. Nagano, K. Kimoto, K. Matsumoto, M. Kitamura, K. Sasaki, H. Kawakami, T. Fujiki, K. Sasaoka, Y. Nakano et A. Murata, 2013: Ocean acidification from 1997 to 2011 in the subarctic western North Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 10:7817–7827, doi:10.5194/bg-10-7817-2013.
- Wong, C.S., J.R. Christian, S.-K. Emmy Wong, J. Page, Liusen Xie et S. Johannessen, 2010: Carbon dioxide in surface seawater of the eastern North Pacific Ocean (Line P), 1973–2005. *Deep-Sea Res. I*, 57(5):687–695, doi:10.1016/j.dsr.2010.02.003.

Contacts

Organisation météorologique mondiale

Division de la recherche sur l'environnement atmosphérique,
Département de la recherche, Genève
Courriel: AREP-MAIL@wmo.int
Site Web: <http://www.wmo.int/gaw>

Centre mondial de données relatives aux gaz à effet de serre

Service météorologique japonais, Tokyo
Courriel: wdcgg@met.kishou.go.jp
Site Web: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg>

- [¹] 1 per meg équivaut à une variation de 0,0001 % du rapport O₂/N₂ de l'air par rapport à une référence.
- [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] Les marges d'incertitude indiquées sont calculées selon une méthode «bootstrap» d'après Conway *et al.*, 1994. Le degré d'incertitude est calculé avec un intervalle de confiance à 68 % (un écart type).
- [⁶] 1 PgC = 1 milliard (10⁹) de tonnes de carbone.
- [⁷] TgN = téragrammes d'azote.
- [⁸] ppt = nombre de molécules du gaz considéré par billion (10¹²) de molécules d'air sec.

Quelques observatoires des gaz à effet de serre



La station de recherche australienne sur l'atmosphère tropicale (ATARS) de **Gunn Point** (12,25°S, 131,05°E, 25 m au-dessus du niveau de la mer) est située près de Darwin, dans le Territoire du Nord. Créée en 2010, elle est devenue en 2012 une station régionale de la VAG. Elle est implantée au même endroit qu'une station radar de recherche du Bureau météorologique australien, et son exploitation est financée par le Bureau et par l'Organisation de la recherche scientifique et industrielle du Commonwealth (CSIRO, Australie). Cette station vient compléter le réseau d'observation de l'atmosphère dans la région tropicale Asie-Australie, qui est en train de se développer, et elle est d'autant plus importante que l'atmosphère tropicale, à l'échelle du globe, est encore peu étudiée. Les mesures portent actuellement sur les principaux gaz à effet de serre et gaz à l'état de traces apparentés (mesure *in situ* du CO₂, du CH₄ et du radon et programme d'échantillonnage en flacon pour le CO₂, le CH₄, le N₂O, le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂), le ¹³CO₂ et le ¹⁸OCO), ainsi que sur le coefficient de diffusion des aérosols, le carbone noir, l'ozone, les oxydes d'azote, le mercure élémentaire gazeux et les halocarbures à courte durée de vie provenant des eaux côtières tropicales. Les programmes de mesure *in situ* seront étendus prochainement au N₂O, au CO, à la concentration numérique des particules et aux composés organiques volatils.



Pha Din (21,57°N 103,52°E, 1 466 m au-dessus du niveau de la mer) est une toute nouvelle station régionale de la VAG, implantée sur une colline entourée de forêts dans le nord-ouest du Viet Nam et exploitée par le Service hydrométéorologique national (SMHN) du Viet Nam. C'est une station météorologique depuis 2011, lorsqu'une tour a été érigée pour l'installation d'un radar météorologique. Le bâtiment

comporte un laboratoire climatisé et offre un hébergement fonctionnel aux exploitants de la station et aux chercheurs de passage. Début 2014, le SMHN a doté la station des capacités nécessaires pour l'observation en continu des gaz à effet de serre et des propriétés optiques des aérosols avec le soutien de deux organismes suisses – le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (EMPA) et l'Institut Paul Scherrer – dans le cadre du projet CATCOS (renforcement des capacités et jumelages pour les systèmes d'observation du climat). Ce projet est coordonné par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) et financé par la Direction suisse du développement et de la coopération (DDC). Le CO₂, le CH₄ et le CO sont mesurés par la technique de spectroscopie d'absorption à l'aide d'une cavité optique. La station Pha Din est la première du genre à observer les gaz à effet de serre, l'ozone en surface et les propriétés des aérosols en milieu rural au Viet Nam.