



SPARC

Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate
Core project of the World Climate Research Programme

Fiche élaborée
par le
SPARC Office
2013

Protocole de Montréal: conséquences pour la couche d'ozone et le climat

Stahelin¹, J., S. Reimann² und C. Arndt¹

¹ SPARC Office, EPF Zurich, johannes.stahelin@env.ethz.ch, et carolin.arndt@sparc-climate.org, ² Empa, section Polluants atmosphériques/Technique de l'environnement, stefan.reimann@empa.ch

Depuis le début des années 70 les substances anthropiques qui appauvrissent la couche d'ozone (en anglais ozone depleting substances, voir **tableau 1**) ont atteint la stratosphère, c'est-à-dire, aux latitudes moyennes, la couche atmosphérique située entre 10 et 50 km d'altitude. Les conséquences furent une diminution de la couche d'ozone, en particulier dans les années 80 (voir **figure 1**), et une augmentation du trou de la couche d'ozone au pôle sud. La couche d'ozone est vitale pour la protection des êtres vivants terrestres contre les dangers du rayonnement solaire. Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone sont des hydrocarbures halogénés présentant diverses propriétés physiques et chimiques (voir tableau 1 et figure 3). Une fois émises à la surface de la Terre, elles

se dispersent d'abord dans la basse atmosphère, sans toutefois se décomposer. Elles parviennent ensuite dans la stratosphère, où le rayonnement solaire à ondes courtes (rayonnement ultraviolet) les transforme à haute altitude. Le processus libère les atomes de chlore et de brome, qui détruisent l'ozone stratosphérique.

Le Protocole de Montréal, entré en vigueur en 1987, se fonde sur la Convention de Vienne de 1985 et constitue le premier accord international visant à protéger la couche d'ozone. Il réglemente la production et utilisation des substances qui appauvrissent la couche d'ozone dans le monde entier. **Figure 2** montre l'évolution temporelle de l'ensemble des substances appauvrissant la couche d'ozone sur l'échelle EESC (en anglais Equivalent

Classe de substances	Nom anglais	Composition
<u>Substances qui appauvrissent la couche d'ozone</u> CFC chlorofluorocarbures Halons hydrocarbures bromés	CFC chlorofluorocarbon halon	Cl, F, C Br, Cl, C, H
<u>Substances qui appauvrissent peu la couche d'ozone</u> HCFC chlorofluorocarbures partiellement halogénés	HCFC hydrochlorofluorocarbon	H, Cl, F, C
<u>Substances qui n'appauvrissent pas la couche d'ozone</u> HFC hydrofluorocarbures PFC perfluorocarbures	HFC hydrofluorocarbon PFC perfluorocarbon	H, F, C F, C

Tableau 1: Substances appauvrissant la couche d'ozone et substituts, de la famille des hydrocarbures halogénés (en anglais halocarbons). Toutes les substances mentionnées sont des gaz à effet de serre.

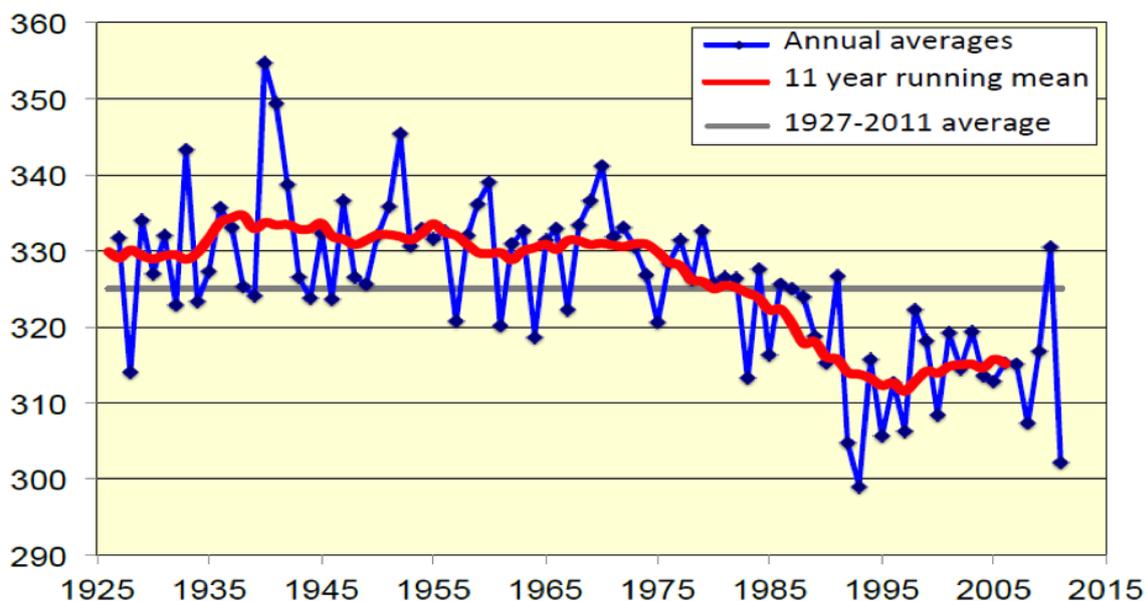


Figure 1: Moyenne annuelle de l’ozone total à Arosa (Suisse). Ces mesures sont effectuées depuis 1926 – ce qui fait de cette série la plus longue au monde –, et depuis 1988 par MétéoSuisse. Etant donné le recours à plusieurs types de spectrophotomètres Dobson, il s’est avéré nécessaire d’homogénéiser la série avec minutie (Staehelin *et al.*, 1998) à l’aide de l’unité Dobson (DU, anglais pour Dobson Unit), unité de mesure de l’ozone sur l’ensemble de la colonne atmosphérique. La quantité d’ozone de basse altitude (sur les dix premiers kilomètres, où l’ozone est un polluant contribuant au smog estival) est faible par rapport à l’ensemble de la colonne atmosphérique, raison pour laquelle les variations de l’ozone total représentent presque exclusivement la situation de l’ozone stratosphérique.

Effective Stratospheric Chlorine), qui tient compte des effets du chlore et du brome sur la couche d’ozone stratosphérique. Le respect des quantités d’émissions prévues par les premières conventions du Protocole de Montréal et par son premier amendement (Londres, 1990) aurait ralenti et retardé la destruction croissante de l’ozone, mais ne l’aurait pas empêchée. Seuls les accords négociés à partir de 1992 à Copenhague visant à durcir les précédents accords garantissent le rétablissement (lent et) durable de la couche d’ozone dans son ensemble. Les états signataires se sont engagés à renoncer complètement à l’utilisation des chlorofluorocarbures (CFCs) à partir de 2010 et ont élaboré un calendrier visant aussi une interdiction totale des HCFC ces prochaines années.

Les CFCs ont servi d’agents réfrigérants, extincteurs, et moussants ainsi que, jadis, de solvants et propulseurs dans les aérosols. Pour remplacer les CFCs, le Protocole de Montréal (1987) a autorisé pour un certain temps les HCFCs comme agents réfrigérants; leur atteinte à l’ozone stratosphérique est plus faible par rapport aux CFCs (tableau 1).

Les concentrations de la plupart des CFCs dans l’atmosphère baissent lentement en raison de leur longue durée de vie dans l’atmosphère. Les mesures au Jungfraujoch (**figure 3**) documentent, par exemple, la diminution de CFC-11. Parallèlement, les concentra-

tions de HCFC (HCFC-141b à la figure 3) ont sensiblement augmenté au cours des années 1990 en tant que substituts des CFCs, puis progressivement depuis le début du nouveau millénaire. A l’heure actuelle, le recours aux HCFC est pratiquement interdit dans les pays industrialisés et le sera à partir de 2030 dans les pays en développement. L’apparition des fluorocarbures (tant partiellement qu’entièrement halogénés, HFCs et PFCs) vise à remplacer les HCFCs et leurs concentrations sont alors en hausse constante (HFC-134a à la figure 3). Ces fluorocarbures sont inertes au regard de la couche d’ozone et leur utilisation n’est pas réglementée par le Protocole de Montréal. Ils sont néanmoins des gaz à effet de serre puissants, qui figurent donc dans le Protocole de Kyoto.

Les mesures continues de la couche d’ozone effectuées à Arosa révèlent que la diminution de la couche d’ozone a été jugulée aux latitudes moyennes (figure 1). La série de mesures indique également les fortes fluctuations d’une année à l’autre de la couche d’ozone aux latitudes moyennes. Elles s’expliquent par la variabilité météorologique considérable dans ces régions. En raison de la très lente baisse des concentrations stratosphériques des substances qui appauvrissent la couche d’ozone, il faudra encore plusieurs décennies pour que la couche d’ozone se reconstitue entièrement et que le « trou d’ozone » se referme au-dessus du pôle sud.

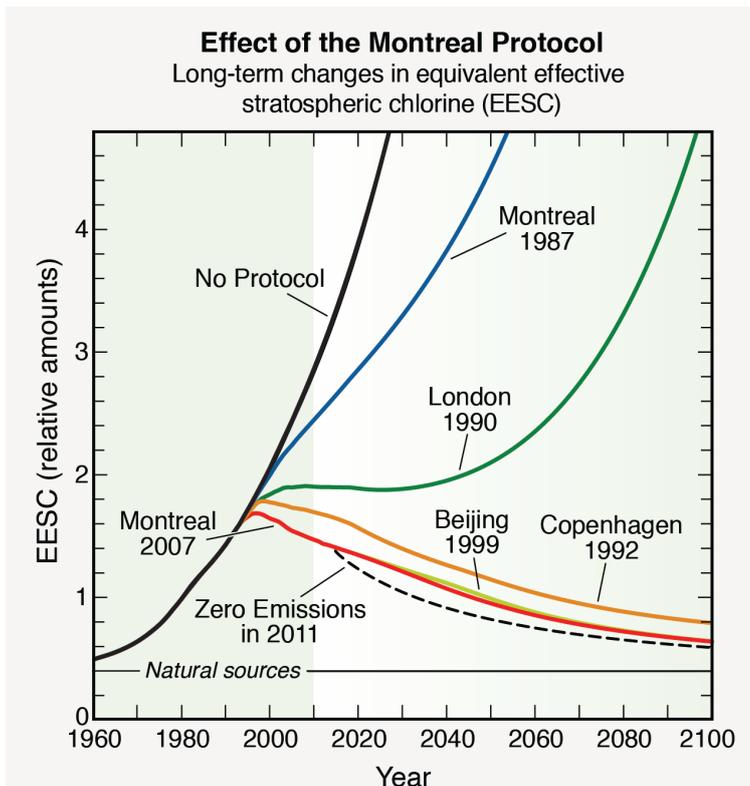


Figure 2: Influence du Protocole de Montréal et ses amendements sur l'évolution effective et projetée de la concentration des substances qui appauvrissent la couche d'ozone dans la stratosphère jusqu'en 2100 (OMM, 2011, voir le texte). Dans le cas « No Protocol », les calculs se fondent sur une croissance annuelle de 3 % des émissions globales des substances appauvrissant la couche d'ozone (scénario « business-as-usual »), les autres courbes se basent sur l'hypothèse d'une réduction totale des émissions autorisées selon les amendements différents.

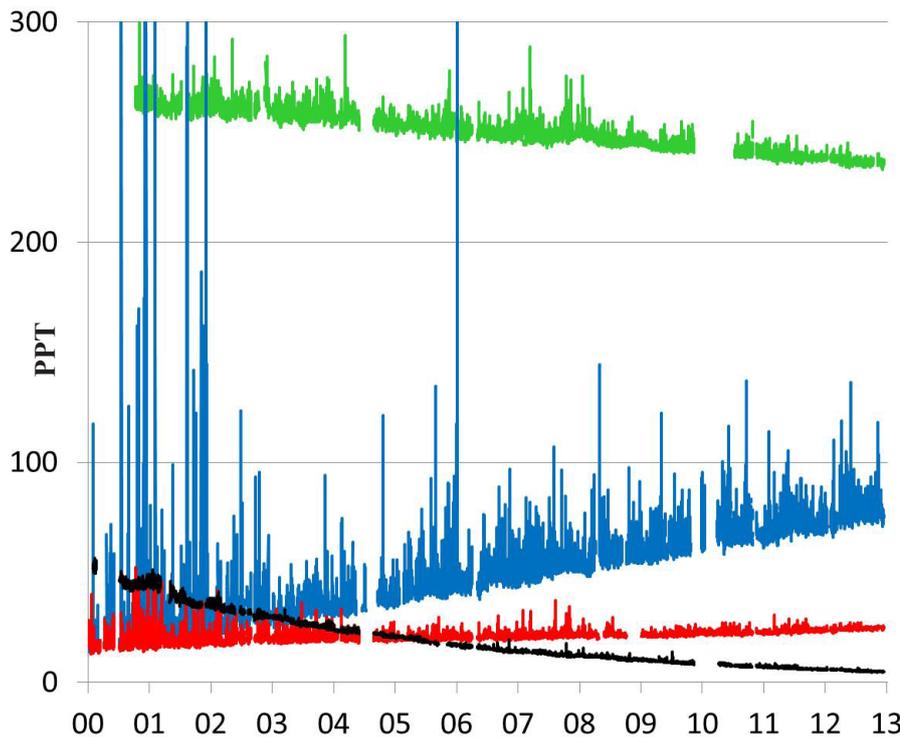


Figure 3: Mesures de CFC-11, HCFC-141b, CH₃CCl₃, et HFC-134a au Jungfraujoch en Suisse (3580 m d'altitude) pour la période 2000-2013, effectuées par l'EMPA (unités en ppt: parts per trillion, 1x10⁻¹²). Pour les abréviations, se référer au tableau 1 (selon les données du rapport HALCLIM-5, Reimann *et al.*, 2013).

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et les autres hydrocarbures halogénés sont également des gaz à effet de serre puissants. Le forçage radiatif (en anglais radiative forcing) permet d'estimer le réchauffement climatique due aux substances dans l'atmosphère (gaz à effet de serre, aérosols, etc.) ou par la modification de l'intensité du rayonnement solaire. Le for-

çage radiatif des gaz à effet de serre tient compte de leurs propriétés physiques et chimiques (comme la durée de vie dans l'atmosphère) ainsi que de l'évolution temporelle de leurs émissions, depuis le début de l'industrialisation jusqu'à un moment donné. Le forçage radiatif des gaz halogénés, qui appauvrissent souvent la couche d'ozone, ainsi que leur participation aux

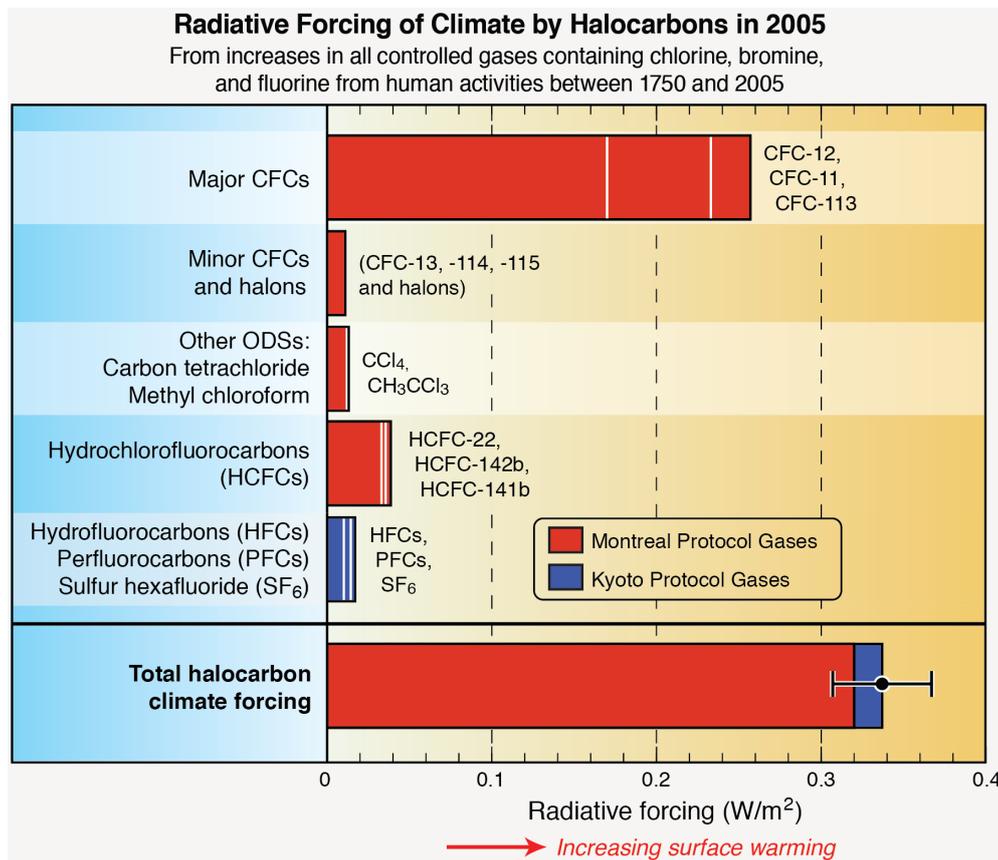


Figure 4: Forçage radiatif (1750 à 2005) des gaz halogénés (substances appauvrissant la couche d’ozone et substances utilisées comme substituts). La figure montre aussi quels gaz sont réglementés dans quel accord international (OMM, 2011). Pour le dioxyde de carbone, la valeur du forçage radiatif s’élève à près de 1.62 W/m² en 2005. Pour les abréviations, se référer au tableau 1.

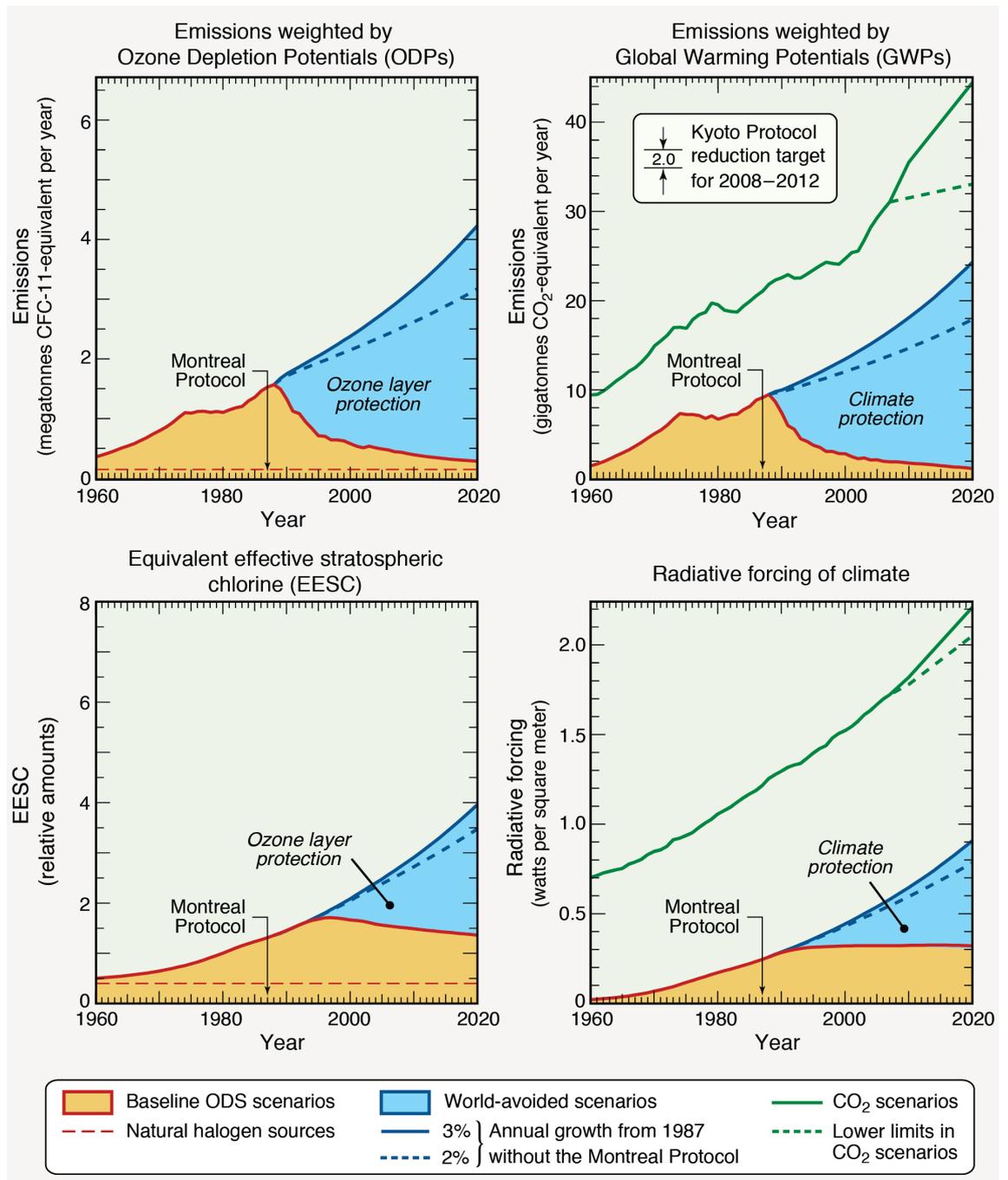
changements climatiques sont représentés à la **figure 4**. Les contributions des différents gaz halogénés au réchauffement climatique sont très variables. Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂, non mentionné à la figure 4) ont contribué la plus grande part aux changements climatiques anthropiques; la participation des gaz halogénés au forçage radiatif global est considérable et représente plus de 20 % de celle du dioxyde de carbone en 2005.

Figure 5 compare les effets du Protocole de Montréal sur la couche d’ozone (à gauche) et le réchauffement climatique (à droite). La courbe bleue montre l’impact des gaz halogénés auquel on devrait s’attendre sans protocole (pour ce cas, l’hypothèse se fonde sur une hausse annuelle de 2 ou 3 % des substances appauvrissant la couche d’ozone). L’échelle ODP (en anglais Ozone Depletion Potential, en haut à gauche) décrit les effets des émissions; afin de représenter la destruction de la couche d’ozone tout en tenant compte de l’influence des différentes substances, les émissions ont été comparées avec celles de CFC-11 (voir figure 5). Les effets des gaz halogénés ont été convertis en équivalents de CO₂ (en anglais Global Warming Potential, en haut à droite) pour décrire le réchauffement climatique. L’échelle EESC (en anglais Equivalent Effective Stratospheric Chlorine, en bas à gauche) représente l’ensemble des conséquences des émissions anthropogènes passées

sur l’ozone stratosphérique. L’échelle du forçage radiatif en équivalents de CO₂ (courbe verte) permet de représenter les atteintes au climat (en bas à droite); ce faisant, le forçage radiatif attendu est représenté pour deux scénarios. Si le Protocole de Kyoto (1997), qui réglemente les émissions de gaz à effet de serre, avait été mis en oeuvre dans le monde entier (certains pays, à l’instar des Etats-Unis et du Canada, ne l’ont pas ratifié), il en aurait découlé une diminution des gaz à effet de serre de l’ordre de 2,5 gigatonnes d’équivalents-CO₂ par an pendant la période allant de 2008 à 2012. Suite à la réduction des gaz halogénés obtenue grâce au Protocole de Montréal, le forçage radiatif à travers le monde a diminué de 9 à 12,5 gigatonnes d’équivalents-CO₂ par an.

A présent, l’emploi des CFCs et des halons (hydrocarbures bromés) sont interdits par le Protocole de Montréal (à l’exception de quelques applications des halons dans la médecine et le trafic aérien notamment). En outre, l’usage des HCFCs est pratiquement interdit dans les pays industrialisés et considérablement limité dans les pays en développement, avec pour objectif une interdiction totale en 2030. Les HFCs et les PFCs, à savoir des substances halogénées comprenant exclusivement du fluor, ne portent pas atteinte à la couche d’ozone, mais sont des gaz à effet de serre. Leur utilisation est alors réglementée dans le Protocole de Kyoto et non celui

Figure 5: Effets du Protocole de Montréal sur la couche d’ozone (à gauche) et le climat (à droite). La courbe bleue montre comment l’influence des substances appauvrissant la couche d’ozone aurait évolué sans protocole (croissance des émissions suite à l’entrée en vigueur du Protocole de Montréal avec une hausse de 3 ou 2 %), OMM, 2011, voir le texte.



de Montréal. La participation des HFC et des PFC aux changements climatiques est encore modeste (voir les substances marquées à la figure 4). La future substitution des substances appauvrissant la couche d’ozone devrait entraîner une hausse des émissions de ces gaz à effet de serre, à même de fournir une contribution notable aux changements climatiques relative à leurs propriétés spécifiques (comme leur durée de vie dans l’atmosphère). Aussi est-il à craindre que leurs émissions n’augmentent fortement à l’avenir, ce qui ne ferait que déplacer le problème de la couche d’ozone vers le climat.

Les mesures des substances appauvrissant la couche d’ozone (figure 3) et de l’épaisseur de cette dernière

(figure 1) révèlent que les réductions convenues en matière d’émissions ont été réalisées. Les chiffres démontrent clairement que le Protocole de Montréal est non seulement très efficace pour protéger la couche d’ozone, mais qu’il a aussi fourni une contribution essentielle à la protection du climat. L’interdiction mondiale et presque totale des substances qui appauvrissent la couche d’ozone a permis d’obtenir des réductions des émissions de gaz à effet de serre de près de quatre fois plus élevées que les objectifs du Protocole de Kyoto pour les années de 2008 à 2012.

Le succès incontesté du Protocole de Montréal est le fruit d’une étroite collaboration entre les gouvernements, le

monde scientifique et l'industrie. Quant à l'utilisation des CFCs et des HCFCs, des délais plus longs ont été accordés aux pays en développement, qui bénéficient du soutien d'un fonds financé par les pays industrialisés pour l'introduction de technologies dépourvues de substances appauvrissant la couche d'ozone.

Le Protocole de Montréal régleme uniquement les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et ne tient pas compte de l'effet préjudiciable des substituts sur le climat. Il y aurait donc lieu d'étendre les réglementations du Protocole de Montréal, qui couvrent la production, l'utilisation, et l'émission des substances appauvrissant la couche d'ozone, aux HFCs et aux PFCs dans le monde entier afin d'apporter une contribution décisive à la protection du climat.

Bibliographie

Reimann, S., M.K. Vollmer, D. Brunner, M. Steinbacher, M. Hill, and L. Emmenegger (2013) HALCIM-5: Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen auf dem Jungfraujoch, 1. Zwischenbericht, Mai 2013. Disponible à : www.empa.ch/climate_gases.

Stahelin, J., A. Renaud, J. Bader, R. McPeters, P. Viatte, B. Högger, V. Bugnion, M. Giroud, and H. Schill (1998) Total ozone series of Arosa (Switzerland). Homogenization and data comparison. *J. Geophys. Res.*, **103**, 5827-5841.

WMO (2011) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Twenty Questions and Answers about the Ozone Layer, Q18 and Q19 (p. Q.55-Q.63, Coordinating Lead Authors: David Fahey and Michaela Hegglin). Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 52, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2011. Disponible à l'adresse www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2010/ozone_asst_report.html.

SPARC Office

Le SPARC Office, rattaché à l'EPF de Zurich, constitue une partie importante du projet international SPARC (Stratosphere-troposphere Processes And their Role in Climate, www.sparc-climate.org), qui est un élément clé du World Climate Research Programme (WCRP). SPARC coordonne, à l'échelle mondiale, les projets de recherche étudiant la stratosphère (et donc l'évolution de l'ozone), l'influence de la stratosphère sur le climat, et la modélisation des processus chimiques et dynamiques atmosphériques. L'une des activités de recherche porte par exemple sur le changement de la répartition verticale globale de l'ozone, avec une comparaison des mesures au sol et par satellite, afin d'évaluer et de quantifier la variation temporelle due au Protocole de Montréal et d'éventuelles conséquences des changements climatiques. Le SPARC Office est soutenu par l'EPF de Zurich, l'OFEV, MétéoSuisse, et le WCRP.