

Les 30 ans du Protocole de Montréal: une véritable success story !

Martine De Mazière et
François Hendrick

Le 16 septembre 1987, il y a exactement 30 ans, la version initiale du 'Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone' ou communément appelé 'Protocole de Montréal' a été signée pour prendre effet au 1er janvier 1989. Cet article a pour objectif d'apporter un éclairage sur le contexte dans lequel le Protocole de Montréal est intervenu, d'en expliquer les lignes de force, de montrer l'impact de ce Protocole depuis sa signature jusqu'à ce jour et d'envisager les perspectives futures. Vous constaterez qu'il s'agit d'une véritable success story en terme de politique environnementale sur le plan international !

Les prémices du Protocole de Montréal

L'atmosphère terrestre contient de l'ozone, une molécule constituée de 3 atomes d'oxygène (notation chimique O_3) et produite lorsque l'oxygène moléculaire (O_2) est exposé à un rayonnement de haute énergie (p.ex. une lumière ultraviolette avec une longueur d'onde inférieure à 242 nm), libérant des atomes d'oxygène (O). Ceux-ci se recombinent ensuite avec l' O_2 disponible pour former l'ozone. L'odeur de l'ozone est celle que vous sentez à proximité d'une lampe UV de forte intensité ou lors d'un orage violent accompagné de nombreux éclairs. L'étymologie grecque du mot ozone signifie d'ailleurs 'sentir'.

L'ozone est omniprésent dans l'atmosphère terrestre mais se trouve principalement (pour plus de 90 %) dans la stratosphère, dans la couche appelée 'couche d'ozone' qui se situe entre 25 et 40 km d'altitude. L'ozone stratosphérique nous protège du fort rayonnement UV provenant du Soleil, sa présence est donc indispensable à la vie sur Terre. Celui-ci ne doit pas être confondu avec l'ozone dit troposphérique qui se trouve près de la surface terrestre, dans l'air que nous respirons, et qui représente les 10 % restants du contenu at-

mosphérique total de ce gaz. Cet ozone est fort heureusement présent en bien moindre quantité car il est toxique pour l'homme et tous les êtres vivants. Il est à noter que des recherches approfondies sur l'ozone atmosphérique ont été menées depuis 1930. L'un des pionniers de cette recherche est le Baron Marcel Nicolet, premier directeur de l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB). Depuis lors, l'ozone reste l'un des thèmes de recherche les plus importants de l'IASB.

L'ozone stratosphérique est donc indispensable à la vie sur Terre et si cette couche d'ozone se réduit ou disparaît, il est impératif de s'en préoccuper. Pareil phénomène s'est effectivement produit au siècle dernier, à partir des années septante. A cette période, l'homme a commencé à développer et produire des composés chlorofluorocarbonés (CFC, aussi appelés fréons), destinés à être appliqués dans les techniques de réfrigération, comme gaz propulseur dans les aérosols, ou encore dans la fabrication de mousses isolantes. De par leur utilisation, ces gaz se retrouvent en partie dans l'atmosphère et s'y accumulent car ils sont très inertes à basse altitude et ont donc une durée de vie de l'ordre de plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'années. Lorsqu'ils diffusent à des altitudes plus élevées jusque dans la stratosphère, ils sont décomposés sous l'effet du rayonnement solaire énergétique, libérant des atomes d'halogènes (chlore, brome, fluor). Le chlore et le brome étant particulièrement réactifs, ils réagissent entre autres avec l'ozone, qui est converti en oxygène moléculaire. Cette réaction peut en outre se répéter de nombreuses fois (on parle alors de réaction catalytique) parce que l'atome de chlore ou de brome y est recyclé et est donc susceptible de réagir à nouveau avec une autre molécule d'ozone, avec pour conséquence une diminution de la quantité d'ozone stratosphérique. Notons toutefois que les halogènes sont naturellement présents dans l'atmosphère mais dans des proportions plus faibles : à titre d'exemple, moins de 20 % des sources de chlore dans la stratosphère étaient encore d'origine naturelle en 1990.

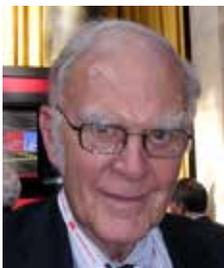
Les premières personnes à avoir mis en évidence le danger des CFC étaient F. S. Rowland et M. J. Molina, en 1974⁽¹⁾. Mais la menace ne fut seulement prise au sérieux qu'en 1985 lorsqu'une diminution spectaculaire de l'ozone stratosphérique fut constatée au-dessus de la baie d'Halley en Antarctique au cours du printemps (Farman et al., 1985). Ce phénomène fut mis en évidence à partir d'une série temporelle de me-



Baron Marcel Nicolet



M.J. Molina
(CC <http://science.in2pic.com-SA 3.0>)



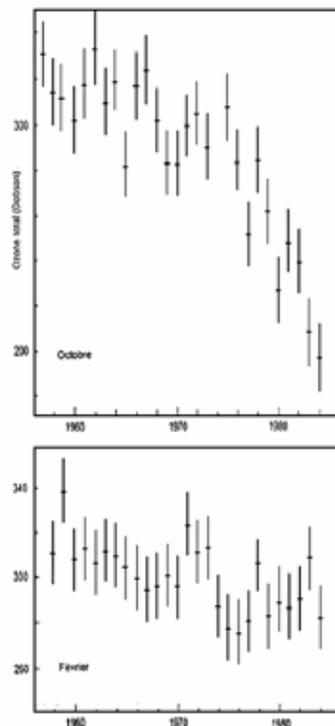
F.S. Rowland
(CC Markus Pössel (Mapos)-SA 3.0)

sures d'ozone réalisées en continu depuis 1956. La Figure 1 montre une version actualisée de la figure originale de l'article susmentionné. La communauté scientifique tira alors la sonnette d'alarme ! Primo, un phénomène aussi spectaculaire – une diminution de l'ozone d'un tiers de sa valeur sur une période de moins de 10 ans – n'avait pas été prévue par les théories de l'époque et donc de nouvelles recherches s'avéraient nécessaires, et secundo les scientifiques se sont rendus compte que des mesures urgentes s'imposaient pour endiguer toute dégradation ultérieure. Deux ans plus tard, le Protocole de Montréal était né !



Jonathan Shanklin manipulant un spectromètre Dobson à Halley Bay en 1982. (source : J. Shanklin)

Figure 1 : Série temporelle des colonnes totales d'ozone au-dessus de la baie d'Halley en Antarctique en octobre (en haut) et en février (en-bas) pour la période 1956-1984, exprimées en unité Dobson (DU ; 1 unité Dobson équivaut à $2,69 \cdot 10^{16}$ molécules d'ozone par cm^2). Version adaptée à partir de (Farman et al., 1985).



Lignes de force du Protocole de Montréal

En prélude au Protocole de Montréal, la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone avait été adoptée le 22 mars 1985: il s'agissait d'un accord-cadre en vue de la protection de la couche d'ozone au niveau mondial, entré en vigueur le 22 septembre 1988. La Belgique était

depuis le début cosignataire de ces deux accords : elle a ratifié la Convention de Vienne le 17 octobre 1988 et le Protocole de Montréal le 30 décembre 1988. Le 16 septembre 2009, cette Convention ainsi que le Protocole de Montréal furent les premiers traités dans l'histoire des Nations Unies à être ratifiés universellement par 197 parties signataires.

Le Protocole de Montréal a pour objectif de réduire et/ou d'arrêter la production et l'utilisation de substances destructrices d'ozone (telles que les CFC). Une des forces du Protocole était qu'il ouvrait la porte aux Adaptations et Modifications (Amendements) qui ont permis de renforcer au fil du temps les mesures à prendre et de démontrer la nécessité de faire progresser les observations et les connaissances scientifiques sur le sujet. Par ailleurs, des substances chimiques supplémentaires furent également ajoutées à la liste des produits interdits. Il est frappant de constater que les évaluations scientifiques sur l'appauvrissement de la couche d'ozone publiées tous les quatre ans par l'OMM⁽²⁾ ont été presque systématiquement suivies d'une modification du Protocole de Montréal, ce qui montre une belle interaction entre la science et la politique ! C'est ainsi que sont entrés en vigueur les amendements de Londres en 1992, de Copenhague en 1994, de Montréal en 1999 et de Pékin en 2002. Le très récent amendement de Kigali devrait entrer en vigueur le 1er janvier 2019. Celui-ci fixe le calendrier de réduction de la production et de l'utilisation des hydrofluorocarbures (HFC; hydrocarbures dans lesquels certains atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de fluor).

Les succès du Protocole de Montréal

L'impact du Protocole de Montréal ainsi que de ses adaptations et modifications successives est illustré à la Figure 2. L'axe vertical de la figure (EESC ou *Equivalent Effective Stratospheric Chlorine*) correspond à la mesure de la quantité d'halogènes effectifs détruisant l'ozone (chlore et brome) présents dans la stratosphère. Il est évident que le Protocole initial seul aurait eu un impact limité sur la réduction des substances destructrices d'ozone. Par contre, l'impact des adaptations ultérieures est tel que l'on peut s'attendre à ce que le niveau de ces substances diminuent pour atteindre un niveau équivalent à celui de 1980 (communément admis comme niveau de référence) entre 2030 et 2050. Les observations à long terme actuelles confirment la courbe de Pékin apparaissant dans la Figure 2: le niveau maximum de substances destructrices d'ozone présentes dans la stratosphère a été atteint vers 1997, et depuis lors une diminution sensible est observable. Les Figures 3 et 4 illustrent les résultats d'observations à long terme effectuées par des équipes belges, respectivement de l'évolution du chlore inorganique total dans l'atmosphère au-dessus du Jungfraujoch dans les Alpes suisses, ainsi que de l'évolution de l'oxyde de brome total dans la stratosphère au-dessus d'Harestua en Norvège. La quantité de chlore inorganique est représentative de la présence de gaz chlorés dans la stratosphère: la concentration maximale a été atteinte en 1997, et depuis lors nous observons une diminution plus ou moins continue. Les réductions des gaz bromés ont été introduites dans le Protocole de Montréal 3 ans plus tard et en conséquence,

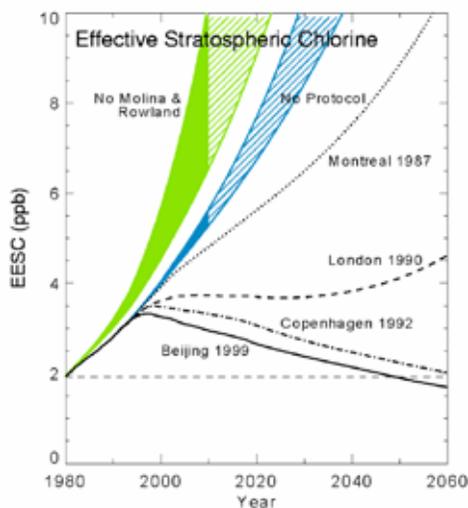


Figure 2 : Évolution de l'EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine) exprimée en partie par milliard (ppb) entre 1980 et 2060 suite aux adaptations successives au Protocole de Montréal, et dans l'hypothèse que la production de CFC se poursuivrait au rythme de 1974 ('No Rowland and Molina') ou de 1987 ('no Montreal Protocol'). (source : G. Velders, RIVM)

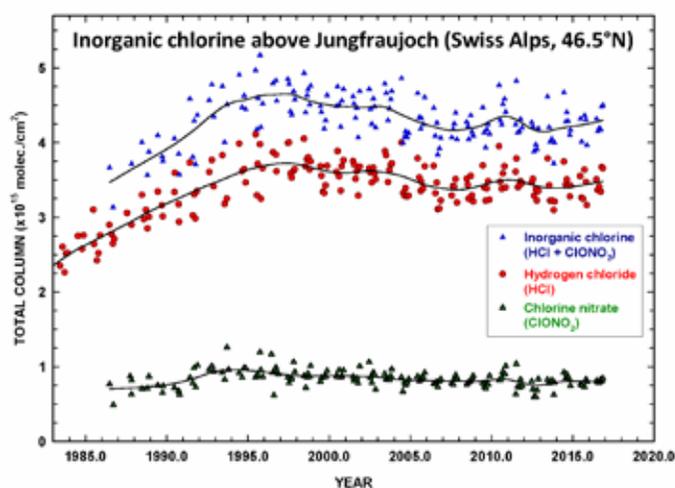
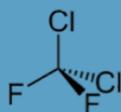


Figure 3 : Réservoirs chlorés dans la stratosphère. Séries temporelles multi-décennales des abondances mensuelles moyennes des principaux réservoirs chlorés dans la stratosphère, l'acide chlorhydrique (HCl ; cercle rouge) et le nitrate de chlore (ClONO₂ ; triangle vert), déduites des observations infrarouges réalisées à la station scientifique du Jungfraujoch (Alpes suisses). Les séries sont ici limitées aux mois de juin à novembre, caractérisés par une variabilité atmosphérique réduite. La somme des deux réservoirs (triangle bleu) donne une bonne indication de l'évolution du chlore inorganique total aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord au cours de ces 30 dernières années (source : GIRPAS – Université de Liège, 2017)

Un peu de chimie

CFC (chlorofluorocarbure) : Hydrocarbures (molécules composées d'atomes de carbone - (C) et d'hydrogène - (H)) dans lesquels un certain nombre (voire l'entièreté) des atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de chlore - (Cl) et/ou de fluor- (F).

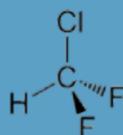
Exemples d'hydrocarbures : méthane, éthane, ...
Exemple de CFC : CFC-12 ou fréon-12 ou CCl₂F₂



HCFC (hydrochlorofluorocarbure) :

Hydrocarbures dans lesquels certains atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de chlore et/ou de fluor, tout en conservant un voire plusieurs atomes d'hydrogène.

Exemple de HCFC : HCFC-22 ou CHClF₂



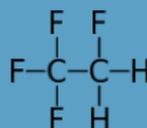
HBFC (hydrobromofluorocarbure) :

Hydrocarbures dans lesquels certains atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes de brome -(Br) et/ou de fluor.

Exemple de HBFC : CHF₂Br (même structure que CHClF₂ ci-dessus, mais l'atome de chlore est remplacé par un atome de brome)

HFC (hydrofluorocarbure) : HCFC qui ne contiennent ni chlore ni brome mais uniquement du carbone, du fluor et de l'hydrogène.

Exemple de HFC : HFC-134a ou C₂H₂F₄



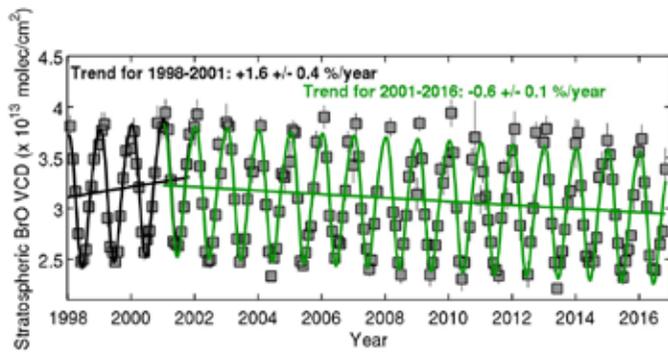


Figure 4 : Série temporelle de la colonne d'oxyde de brome (BrO) stratosphérique mesurée par l'IASB au-dessus d'Harestua (Norvège) depuis 1998. La série montre une tendance positive entre 1998 et 2001 de l'ordre de $1.6 \pm 0.4\%$ par an, et ensuite une tendance négative de l'ordre de $-0.6 \pm 0.1\%$ par an. (source: F. Hendrick et M. Van Roozendaal, 2017)

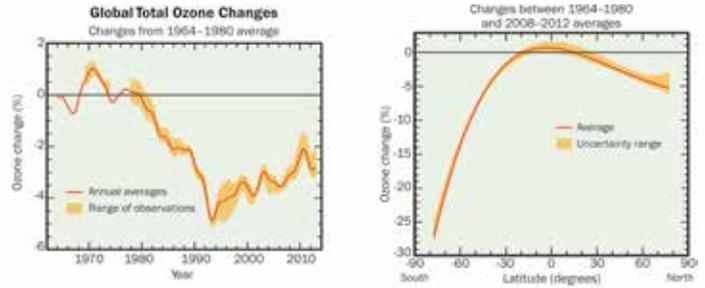


Figure 5 : Évolution de la colonne totale d'ozone en fonction de la latitude aux périodes de référence 1964-1980 et 2008-2012 sur base d'observations. La ligne rouge est la moyenne, la zone orange illustre la marge d'incertitude. Les plus grands changements sont survenus dans les régions polaires, en particulier au-dessus du Pôle Sud suite au trou dans la couche d'ozone en Antarctique. (source: Heggelin et al., 2015)

une augmentation continue de la quantité de brome dans la stratosphère est observée jusque 2001, avant de connaître ensuite une décroissance.

D'une manière générale, on peut affirmer que l'EESC a diminué respectivement de $16.2 \pm 0.4\%$ et de $8.9 \pm 1.2\%$ aux latitudes moyennes et aux pôles et ce, à partir du moment où le maximum a été atteint jusqu'en 2012.

La reconstitution de l'ozone est-elle également observable ?

Afin de pouvoir observer la reconstitution de l'ozone stratosphérique, nous avons besoin de longues séries temporelles de mesures ayant une précision suffisante (de l'ordre de 1%), ceci afin de distinguer l'évolution séculaire à long terme de l'ozone (de l'ordre de quelques pourcents – voir Figure 5) de ses variations naturelles, journalières, saisonnières, multi-annuelles, ou à la suite de phénomènes exceptionnels tels que l'éruption du volcan Pinatubo en 1991, qui a causé de manière temporaire une diminution additionnelle de l'ozone. Ces variations naturelles ont un ordre de grandeur de un à plusieurs dizaines de pourcents, en fonction de la localisation sur Terre. Procéder à de telles observations à long terme sont une des tâches prioritaires du Réseau pour la Détection du Changement de la Composition Atmosphérique (NDACC; voir <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>), auquel la Belgique a contribué de manière significative depuis sa création en 1991, et dont la coprésidence est assurée par l'IASB depuis 2013 (De Mazière et al., 2017). En outre, il est à noter que la fusion de séries temporelles consécutives d'observations satellitaires d'ozone est une source importante d'informations sur les tendances à long terme de ce gaz, en particulier depuis la fin des années 1970. Ce type d'activité est par exemple effectué dans le cadre du projet 'Initiative sur le Changement Climatique – Ozone' (O3_CCI; voir <http://www.esa-ozone-cci.org>) financé par l'ESA et coordonné par l'IASB.

La Figure 5 montre l'évolution de la quantité totale moyenne d'ozone entre la période de référence 1964-1980 (lorsqu'il n'y avait pas encore de diminution significative de l'ozone) et la période 2008-2012, à différentes latitudes. À titre d'exemple, nous observons qu'à notre latitude (52°N), la diminution de

l'ozone était de l'ordre de 3 à 4%. Les études les plus récentes (Bhartia et al., 2016 et mises à jour récentes) ont démontré qu'à



L'observatoire d'Harestua en Norvège. (Photo G. Pinardi)

moyenne latitude (entre 30 et 60°), la reconstitution de l'ozone est initiée dans la haute stratosphère (entre 35 et 45 km d'altitude) – voir Figure 6. La reconstitution du trou d'ozone en Antarctique est lui attendu pour plus tard mais selon un article paru récemment de S. Solomon (2016), les premiers signes d'une reconstitution y sont désormais également visibles.

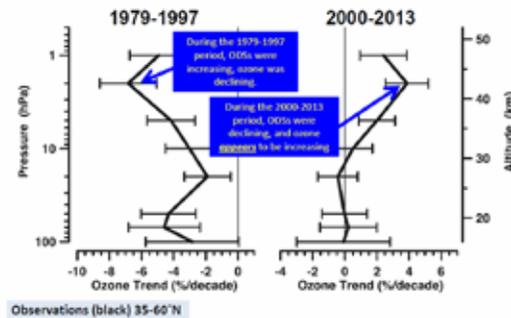


Figure 6 : Tendence (en pourcentage par décennie) dans la distribution verticale de l'ozone entre 15 et 50 km d'altitude (ou en unité de pression, entre 100 et 0.5 hPa), aux périodes de référence 1979-1997 (à gauche) et 2000-2013 (à droite). Le terme ODS (*Ozone-Depleting Substances en anglais*) désigne les substances appauvrissant l'ozone stratosphérique. Dans la période 1979-1997, l'ozone diminue à toutes les altitudes. Dans la période plus récente 2000-2013, on voit une tendance positive au-dessus de 35 km d'altitude, en d'autres termes une concentration d'ozone à la hausse de quelques pourcents par décennie. Les modèles nous apprennent que cette tendance s'explique non seulement par la réduction des ODS mais également par les changements climatiques (augmentation de la présence de gaz à effet de serre provoquant un refroidissement de la stratosphère). (source : J. Pyle, Cambridge University, UK, 2017)

Le Protocole de Montréal et le climat

Comme déjà mentionné plus haut, les adaptations successives au Protocole de Montréal ont permis d'ajouter de manière systématique de nouveaux produits à la liste des produits interdits. Ceci est principalement dû au fait qu'une attention particulière a été d'abord portée sur l'effet nocif des gaz sur l'ozone, pour lesquels l'échelle dite du *Potentiel de Destruction d'Ozone* (PDO)⁽³⁾ a été adoptée, mais dans un deuxième temps, également sur l'impact de ces gaz sur le climat, dont l'unité de mesure est le *Potentiel de Réchauffement Global* (PRG)⁽⁴⁾. Il est un fait notoire que les CFC contribuent également au réchauffement climatique, et que les produits de substitution qui ont été introduits après l'entrée en vigueur du Protocole de Montréal – essentiellement du type HCFC (voir encadré 'Un peu de chimie') - bien que moins nocifs pour l'ozone stratosphérique, ne sont pas sans danger pour le réchauffement climatique ! La Figure 7 montre pour un certain nombre de CFC parmi les plus répandus, d'une part le PDO et d'autre part le PRG. Le défi à relever consiste donc à trouver des produits de substitution pour les CFC et HCFC ayant un impact minime aussi bien en termes de PDO que de PRG. C'est également dans cet esprit que la dernière modification au Protocole de Montréal, à savoir l'amendement de Kigali, doit être interprétée: cet amendement vise à interdire les HFC (les produits de substitution introduits le plus récemment, ayant un impact négligeable en terme de PDO mais significatif en terme de PRG), afin d'endiguer leur impact nocif sur le réchauffement climatique, sans mettre en péril la reconstitution de la couche d'ozone.

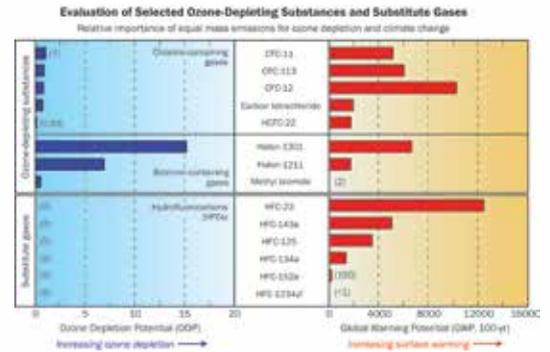


Figure 7 : Impact d'un certain nombre de CFC, HCFC et HFC sur l'ozone exprimé en terme de PDO (à gauche), et sur le climat exprimé en terme de PRG (à droite). Plus le PDO est élevé, plus le gaz est nocif pour l'ozone; plus le PRG est élevé, plus le gaz contribue au réchauffement du climat. (source: Heggelin et al., 2015)

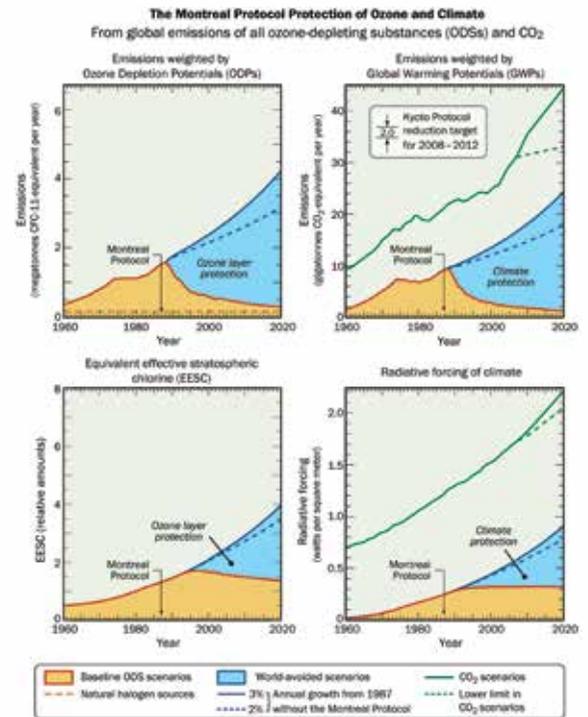


Figure 8 : Enjeu du Protocole de Montréal pour le climat. Les émissions de gaz destructeurs d'ozone sont mesurées en fonction de leur PRG ou masse d'équivalent CO₂. La surface bleue indique le régime d'émissions qui est évité grâce au Protocole de Montréal sans lequel une croissance des émissions de 3% par an (ligne bleue continue) ou de 2% par an (ligne bleue pointillée) se produirait. La surface orange indique le scénario actuel suite à la mise en oeuvre du Protocole de Montréal. À titre de comparaison: la ligne verte continue (pointillée) présente un scénario (minimal) d'émission de CO₂ ainsi que la réduction d'émissions prévue lors de la période initiale du Protocole de Kyoto. (source: Heggelin et al., 2015)

Bien que l'objectif principal du Protocole de Montréal était la protection de la couche d'ozone stratosphérique, il est incontestable que celui-ci a également insufflé un élan extrêmement positif dans la lutte contre le réchauffement climatique. La Figure 8 montre l'impact du Protocole de Montréal et de ses ajustements et amendements successifs sur les émissions de substances destructrices d'ozone, exprimé en gigatonne d'équivalent CO₂ par an, pour la période allant de 1960 jusqu'à la fin de la présente décennie. À l'horizon 2020, la réduction des

émissions correspondra à une réduction d'environ 24 (ligne bleue continue) ou 18 gigatonnes (ligne bleue pointillée), un chiffre qui doit être comparé aux émissions de CO₂ attendues en 2020, qui s'élèvent à 44 gigatonnes par an ou 33 gigatonnes par an si le scénario le plus optimiste est pris en compte. Le chiffre de 24 gigatonnes correspond à une réduction d'environ 50% et peut être comparé à l'objectif du Protocole de Kyoto sur le réchauffement climatique qui prévoyait une réduction d'à peine 2 gigatonnes (ou environ 5%) d'équivalent CO₂ par an pour la période 2008-2012. Il est à noter que dans le récent Accord de Paris sur le climat, l'objectif de l'Union Européenne est de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40% par rapport au niveau de 1990.

Pourquoi l'implémentation du Protocole de Montréal a-t-elle été aussi efficace ?

En comparaison avec les difficultés rencontrées actuellement au sein de la communauté internationale en vue d'obtenir un accord sur le climat et de réduire de manière effective les émissions de gaz à effet de serre, la mise en vigueur du Protocole de Montréal et de ses amendements et ajustements s'est faite avec beaucoup plus de facilité. Les raisons en sont les suivantes: (1) l'impact économique limité du remplacement des CFC, et (2) des alternatives aux CFC avaient déjà été partiellement développées par l'industrie, dans l'optique de rester concurrentiel et de rechercher de nouvelles applications. Par contre, la lutte contre le réchauffement climatique nécessite des mesures qui influencent plus drastiquement notre système socio-économique.

Perspectives

La Figure 9 montre l'évolution observée et attendue de la colonne totale d'ozone, à l'exception des régions polaires : les modèles prédisent un retour de l'ozone à son niveau de 1980 entre 2030 et 2050. Cette grande incertitude est due au lien étroit entre l'évolution de l'ozone stratosphérique et l'évolution du climat, ainsi qu'à l'incertitude sur cette dernière, qui se traduit par la prise en compte de plusieurs scénarios dits RCP 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5⁽⁵⁾. Les changements climatiques font que l'ozone se reconstitue plus rapidement que ce qui était prévu en se basant uniquement sur la diminution du niveau d'EESC car ce dernier n'atteindra son niveau de 1980 que d'ici la fin de ce siècle.

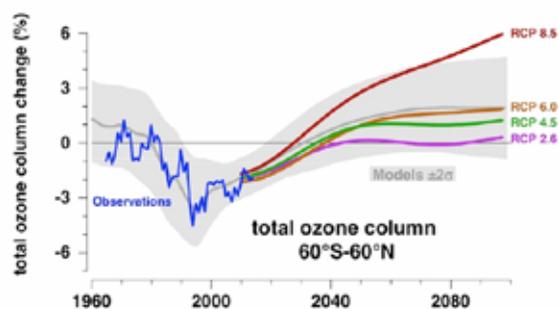


Figure 9 : Évolution observée et attendue de la colonne d'ozone en-dehors des régions polaires. La courbe bleue représente les observations, les courbes colorées représentent les calculs des modèles pour lesquels plusieurs scénarios climatiques dits RCP sont pris en compte. La zone grise représente la marge d'incertitude. (source: J. Pyle, Cambridge University, UK, 2017)

Notes

- ⁽¹⁾ F. S. Rowland, M. J. Molina et P. J. Crutzen ont reçu le Prix Nobel de Chimie en 1995 pour leurs travaux révolutionnaires sur la chimie de l'atmosphère et l'étude de la couche d'ozone.
- ⁽²⁾ OMM/WMO: Organisation Météorologique Mondiale; les évaluations scientifiques sur l'appauvrissement de la couche d'ozone publiées par l'OMM sont disponibles sur <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/>.
- ⁽³⁾ Le PDO se mesure par rapport au PDO du CFC -11 – qui a donc un PDO égal à 1. Le PDO est une mesure par unité de masse du gaz.
- ⁽⁴⁾ Le PRG se mesure par rapport à celui du CO₂ – qui a donc un PRG égal à 1. Le PRG est une mesure par unité de masse du gaz.
- ⁽⁵⁾ RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 sont quatre scénarios relatifs à l'évolution future de la concentration des gaz à effet de serre au cours du 21^e siècle, élaborés par le *Groupe Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat* (GIEC) dans leur 5^{ème} Rapport d'évaluation.

Références

- Bhartia, P.K., N. Harris, M. Van Roozendaal, M. Weber, R. Eckman, D. Loyola, J. Urban, C. von Savigny, M. Dameris, S. Godin-Beekmann (Editors), Changes in the vertical distribution of ozone – the SI2N report, Special issue jointly organized between Atmospheric Chemistry and Physics, Atmospheric Measurement Techniques, and Earth System Science Data.
- De Mazière, M., Thompson, A. M., Kurylo, M. J., Wild, J., Bernhard, G., Blumenstock, T., Hannigan, J., Lambert, J.-C., Leblanc, T., McGee, T. J., Nedoluha, G., Petropavlovskikh, I., Seckmeyer, G., Simon, P. C., Steinbrecht, W., Strahan, S., and Sullivan, J. T.: The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC): History, status and perspectives, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-402>, in review, 2017.
- Farman, J.C., B. G. Gardiner and J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interactions, *Nature*, Vol. 315, 16 May 1985.
- Heggelin, M., D.W. Fahey, M. McFarland, S.A. Montzka, E.R. Nash, Twenty questions and answers about the ozone layer: 2014 update. Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2015.
- Solomon, S., Diane J. Ivy, Doug Kinnison, Michael J. Mills, Ryan R. Neely III, Anja Schmidt, Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science* 10.1126/science.aae0061 (2016).
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, 2014

Les auteurs

Martine De Mazière est Directeur général a.i. de l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique et y dirige le groupe de recherche des observations en infrarouge et des expériences en laboratoire. François Hendrick est Chef de travaux au sein du groupe 'UVVIS DOAS Research' de l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique.