



## Modifications de la couche d'ozone suite au changement climatique

Stahelin<sup>1</sup>, J., F. Tummon<sup>1</sup>, A. Stenke<sup>2</sup>, C. Arndt<sup>1</sup> et P. Bratfisch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SPARC Office, EPF Zurich, johannes.stahelin@env.ethz.ch, fiona.tummon@env.ethz.ch, carndt@ethz.ch, petra.bratfisch@env.ethz.ch;

<sup>2</sup>Institut pour l'atmosphère et le climat, EPF Zurich, andrea.stenke@env.ethz.ch

### Couche d'ozone et changement climatique

L'atmosphère terrestre est constituée de plusieurs couches. La troposphère, qui s'étend de la surface jusqu'à une altitude d'environ dix kilomètres aux latitudes moyennes, correspond à l'air ambiant. Au-dessus se situe la stratosphère, jusqu'à une altitude de 50 kilomètres. La frontière entre les deux s'appelle la tropopause. La plus grande partie de l'ozone atmosphérique se trouve dans la stratosphère (la «couche d'ozone»), protégeant les êtres vivants terrestres des parts nocives (ultraviolettes) du rayonnement solaire. De fortes concentrations d'ozone dans l'air ambiant peuvent en revanche se révéler dangereuses pour la santé humaine et les écosystèmes. De plus, l'ozone est un puissant gaz à effet de serre, en particulier au niveau de la tropopause.

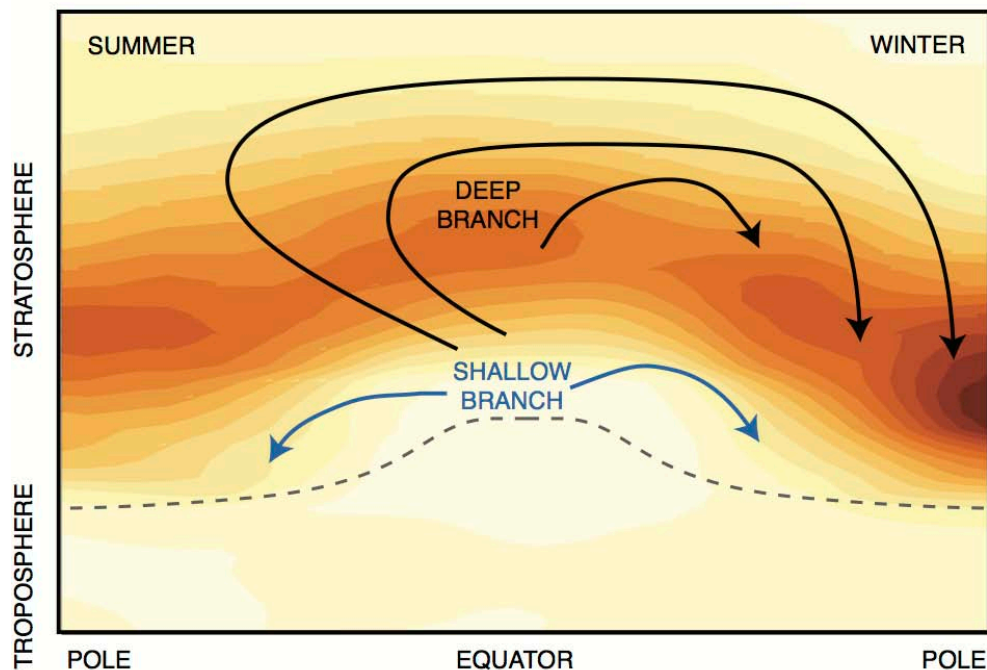
Le changement climatique à l'échelle mondiale ainsi que la couche d'ozone et sa destruction par l'activité humaine sont interdépendants: une augmentation des émissions de gaz à effet de serre à longue durée de vie, comme le dioxyde de carbone (résultant principalement de la combustion des combustibles fossiles), favorise le réchauffement de la planète, participant ainsi au changement climatique. La fiche «Protocole de Montréal: conséquences pour la couche d'ozone et le climat» montre que le Protocole de Montréal (1987) et les durcissements subséquents se sont non seulement avérés décisifs pour la protection de la couche d'ozone dans son ensemble, mais ont également contribué

d'une manière substantielle à la protection du climat (les substances appauvrissant la couche d'ozone, dit halogénés, sont également des puissants gaz à effet de serre). La présente fiche explique comment le changement climatique anthropogène se répercute sur la stratosphère et la couche d'ozone dans son ensemble.

### Mouvements stratosphériques

L'ozone stratosphérique se forme avec le rayonnement solaire à ondes courtes (inférieure à 252 nm) par dissociation photolytique de la molécule d'oxygène ( $O_2 + hv \rightarrow O + O$  suivi de  $O + O_2 (+M) \rightarrow O_3 (+M)$ , où M désigne une particule qui n'est pas impliquée dans la réaction). Comme l'intensité du rayonnement solaire est la plus forte dans les tropiques, l'ozone stratosphérique se forme principalement à ces latitudes. La circulation dite de Brewer-Dobson décrit les mouvements atmosphériques moyens qui caractérisent le transport de l'air et donc les gaz présents à l'état de trace dans la stratosphère (**figure 1**). Des tropiques, l'air stratosphérique est transporté dans les latitudes moyennes de l'hémisphère d'hiver, où la circulation est la plus intense. Dans les latitudes plus élevées, en particulier les régions polaires, l'air est transporté vers la troposphère. Ces processus de transport stratosphériques sont déterminés par différents processus troposphériques (ondes synoptiques, planétaires, et de gravité).

Par la répartition géographique de la formation d'ozone



**Figure 1:** présentation schématique de la circulation de Brewer-Dobson dans la stratosphère (WMO/UNEP 2014). Les lignes révèlent le tracé des mouvements atmosphériques à différentes altitudes ; la ligne en pointillé l'évolution moyenne de l'altitude de la tropopause. La nuance de couleur montre la concentration d'ozone dans l'hiver septentrional dans une coupe méridionale.

et des mécanismes de transport dans la stratosphère, l'épaisseur de la couche d'ozone total aux latitudes moyennes présente des fluctuations saisonnières caractéristiques, avec des quantités plus importantes au printemps et plus faibles à la fin de l'automne.

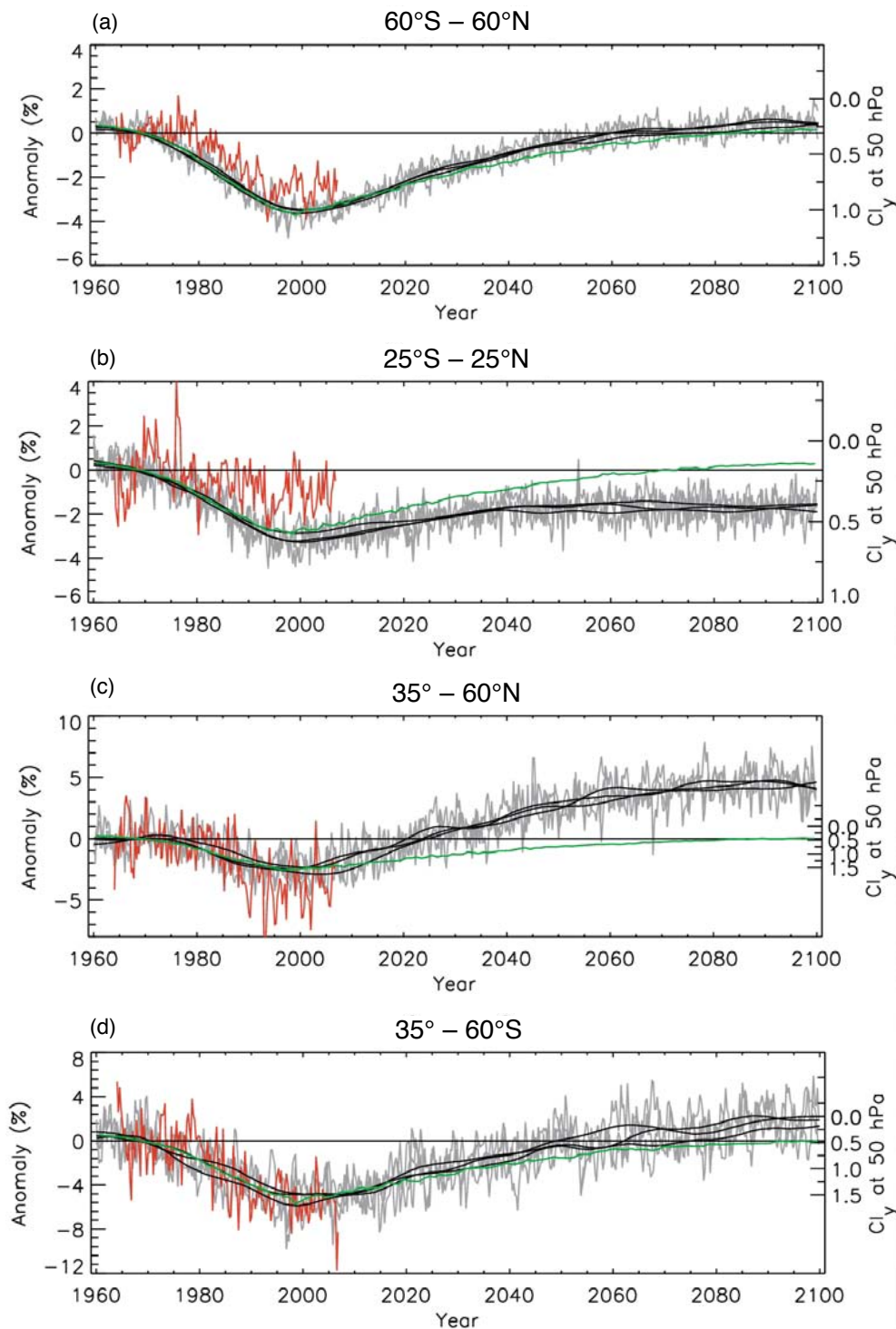
### Comment le changement climatique modifie-t-il la couche d'ozone ?

Des concentrations accrues des gaz à effet de serre ont des impacts différents sur les diverses couches atmosphériques: une hausse de ces concentrations dans la troposphère conduit à un réchauffement dans cette couche mais à un refroidissement dans la stratosphère, plus fort à haute altitude. La baisse des températures stratosphériques entraîne une modification des vitesses de réactions chimiques importantes: celles appauvrissant la couche d'ozone sont plus lentes, modifiant les concentrations de l'ozone dans la stratosphère. Le changement climatique devrait en plus accélérer la circulation de Brewer-Dobson. Du fait de ce transport plus rapide des masses d'air tropicales aux latitudes plus élevées, il reste moins de temps pour les réactions appauvrissant la couche d'ozone de se produire, avec pour corollaire une augmentation de l'ozone dans les latitudes moyennes et élevées.

### Comment connaître les propriétés de la couche d'ozone à la fin de ce siècle?

Les rapports complexes entre processus chimiques et transport à l'échelle mondiale sont aujourd'hui étudiés

dans des modèles climatiques et chimiques décrivant les influences de la destruction de l'ozone par des substances liées à l'activité humaine ainsi que l'impact du changement climatique. Les résultats de telles simulations numériques sont exposés en **figure 2** à titre d'exemple. Au début des années 1960, les substances appauvrissant la couche d'ozone n'avaient pas ou peu atteint la stratosphère et l'impact du changement climatique était minime. Jusqu'au milieu des années 1990, l'épaisseur de la couche d'ozone a diminué suite à la destruction de l'ozone stratosphérique, corroborant les mesures d'ozone aux latitudes moyennes (lignes rouges de la figure 2). Le fait que l'épaisseur de la couche d'ozone n'ait pas diminué dans les tropiques peut s'expliquer par une augmentation de l'ozone dans la troposphère. Les concentrations d'ozone sont ensuite réparties à la hausse dans les régions extratropicales. La conséquence du Protocole de Montréal apparaît principalement dans la diminution des substances appauvrissant l'ozone (courbe verte de la figure 2). À partir de 2060, la couche d'ozone sera en grande partie régénérée en conséquence du Protocole de Montréal et le changement ultérieur de l'ozone dépendra de l'évolution de la circulation de Brewer-Dobson. Dans les régions extratropicales, les projections montrent des concentrations d'ozone stratosphérique supérieures aux valeurs des années 1960. L'ozone y sera plus rapidement transporté de la source (tropiques). Ce phénomène est qualifié de «super recovery». Dans les zones tropicales, en revanche, les concentrations d'ozone stratosphériques resteront moins élevées.

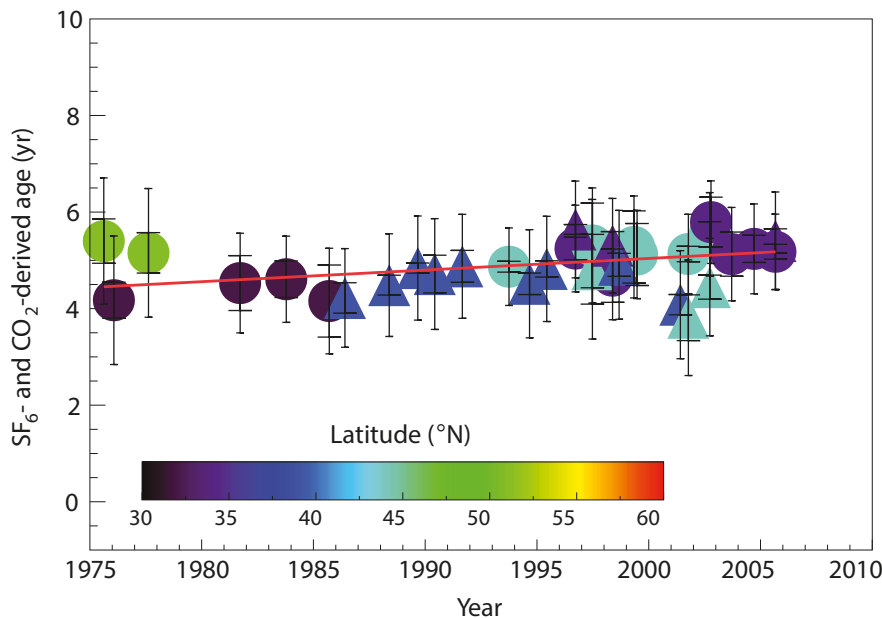


**Figure 2:** fluctuation temporelle de l’ozone stratosphérique à l’échelle mondiale. Lignes noires: résultats d’un ensemble du modèle climatique et chimique concernant la stratosphère (CMAM); lignes rouges: mesures d’ozone; lignes vertes:  $Cl_y$ , une mesure de la destruction de l’ozone stratosphérique par les substances appauvrissant la couche d’ozone. Illustration d’après Shepherd (2008).

### Les projections des modèles climatiques sont-elles fiables pour la circulation Brewer-Dobson ?

Si l’impact positif du Protocole de Montréal est visible par la lente modification de la couche d’ozone, il est cependant difficile de déduire des observations d’ozone disponibles si l’évolution de la circulation stratosphérique induite par le changement climatique est déjà opérante. L’intensification de la circulation de Brewer-Dobson conduit à un échange accru entre l’air troposphérique et stratosphérique. Ainsi, l’air entre dans la stratosphère par les tropiques, circulent

jusqu’à revenir dans la troposphère particulièrement dans les régions polaires. L’accélération prévue de cet échange d’air oscille entre 2,0 et 3,2 % par décennie en fonction de l’intensité du changement climatique mais également du modèle choisi. Les mesures des gaz à l’état de trace permettent de déduire l’«âge des masses d’air (stratosphérique)» (age of air), utilisée pour mesurer l’accélération de la circulation de Brewer-Dobson. Son échelle se rapporte au passage de l’air de la troposphère à la stratosphère dans les tropiques. Ses valeurs peuvent se définir à partir de la comparaison des mesures stratosphériques et troposphériques des gaz



**Figure 3:** «âge des masses d’air» moyen déterminé à partir de mesures stratosphériques par ballon de SF<sub>6</sub> (ronds) ou de CO<sub>2</sub> (triangles), où les couleurs indiquent les latitudes septentrionales des lieux de mesure. Illustration d’après Engel *et al.* (2009).

à l’état de trace ayant une très longue durée de vie, à l’instar de l’hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ces concentrations, qui augmentent progressivement dans le troposphère, sont bien connus. Elles montrent ainsi (voir **figure 3**) une (légère) augmentation depuis le milieu des années 1970, ce qui contredit l’attente d’un renforcement de la circulation de Brewer-Dobson. L’interprétation de ces mesures reste cependant controversée, car en plus du transport à partir de la troposphère, d’autres processus de mélanges de masses d’air dans le stratosphère peuvent influencer sur les rapports de concentration de ces gaz à l’état de trace et pour l’instant de telles mesures restent rares.

Les modèles climatiques et chimiques ne tiennent normalement pas en compte les mesures des mouvements stratosphériques. Les prévisions météorologiques recourent aujourd’hui à des modèles contenant aussi des données sur les processus de transport dans la stratosphère. Ainsi, en analysant les archives de ces modèles, un changement de manière systématique lors de ces dernières décennies de la circulation de Brewer-Dobson pourrait être décelé. De telles études sont en cours, et les résultats préliminaires semblent compatibles avec une accélération de la circulation de Brewer-Dobson

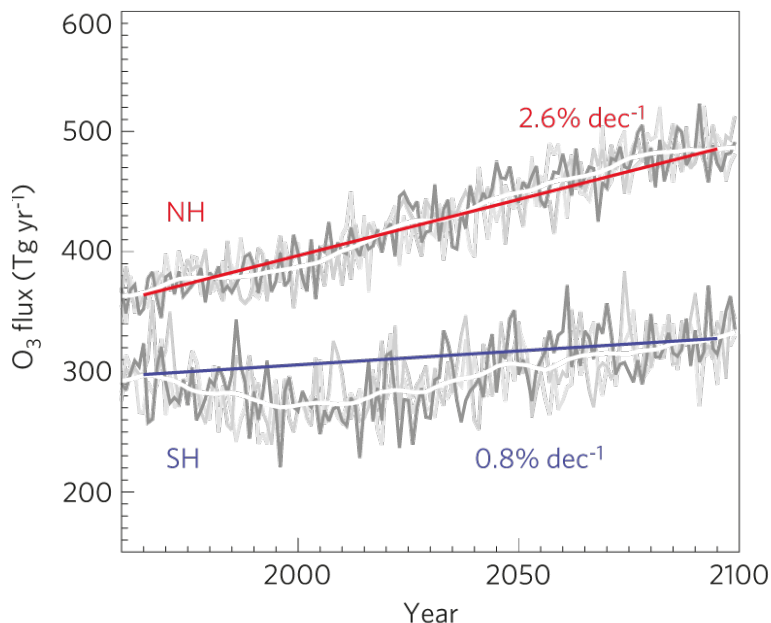
### Impact prévu des modifications de la couche d’ozone liées au climat pour l’ozone troposphérique

Le transport d’ozone de la stratosphère vers la troposphère est un élément essentiel du cycle de l’ozone troposphérique. La quantité de ce flux est accrue dans les régions extratropicales en raison de l’accélération de la circulation de Brewer-Dobson (voir **figure 4**).

Les résultats des différentes modélisations révèlent de larges disparités entre les hémisphères. La quantité et l’augmentation avec le temps du flux d’ozone sont plus importantes dans l’hémisphère nord, s’expliquant notamment par les différences hémisphériques de la dynamique ainsi que leur évolution suite au changement climatique. Comme une plus grande quantité d’ozone circule de la stratosphère vers la troposphère en raison de la modification de la circulation stratosphérique due au changement climatique (et aussi de la régénération de la couche d’ozone de l’effet de la diminution des substances appauvrissant), et l’ozone étant un gaz à effet de serre, il en résulte un impact sur le climat, notamment au niveau de la tropopause. La formation d’ozone dans la troposphère ainsi que son évolution temporelle dépend fortement des émissions anthropogènes de gaz polluants précurseurs de la formation d’ozone (oxyde d’azote, hydrocarbures volatils, et monoxyde de carbone), qui ne sont pas prises en compte dans le modèle appliqué à la figure 4. Même s’il est possible d’envisager qu’au cours de ce siècle l’évolution des concentrations d’ozone dans la troposphère puisse être régulée par celle des émissions de ces gaz précurseurs, l’augmentation prévue du flux d’ozone provenant de la stratosphère reste un processus important renforçant encore l’effet de serre anthropogène.

### Conclusions

Les meilleurs modèles climatiques et chimiques disponibles aujourd’hui montrent que le changement climatique devrait aussi modifier durablement la couche d’ozone à l’échelle mondiale: à la fin de ce siècle, son épaisseur devrait se réduire dans les tropiques par rapport aux valeurs d’avant perturbation



**Figure 4:** évolution dans le temps du flux d’ozone de la stratosphère à la troposphère. Illustration d’après Hegglin et Shepherd (2009).

(années 1960), alors qu’elle devrait augmenter dans les régions extratropicales, en particulier dans l’hémisphère nord. Le transport d’ozone stratosphérique vers la troposphère augmenterait dans les régions extratropicales, notamment dans l’hémisphère nord, avec des répercussions sur la concentration d’ozone dans la troposphère mais également son impact sur le climat.

Arblaster and N.P. Gillett (Lead Authors), Fig. 4-7, p. 4.14. Global Ozone Research and Monitoring Project, Rep. No. 55, 416 pp., World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2014. Disponible ou [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone\\_2014/ozone\\_asst\\_report.html](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2014/ozone_asst_report.html).

## Bibliographie

Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, **52**, 157–184, doi:10.1002/2013RG000448.

Engel, A., *et al.*, 2009: Age of stratospheric air unchanged within uncertainties over the past 30 years. *Nat. Geosci.*, **2**, 28–31, doi:10.1038/ngeo388.

Hegglin M. I., et T. G. Shepherd, 2009: Large climate-induced changes in ultraviolet index and stratosphere-to-troposphere ozone flux. *Nat. Geosci.*, **2**, 687-691.

Shepherd, T. G., 2008: Dynamics, stratospheric ozone, and climate change. *Atmos. Ocean*, **46**, 117–138, doi:10.3137/ao.460106.

SPARC, 2013: Montreal Protokoll: Auswirkungen auf den Ozonschild und das Klima. J. Staehelin, S. Reimann et C. Arndt, disponible ou <http://www.sparc-climate.org/publications/sparc-office-publications/>.

WMO/UNEP, 2014: Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014, Chapter 4: Stratospheric Ozone Changes and Climate, by J.M.

## 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](http://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 l’atmosphère, y compris les processus chimiques et dynamiques, ainsi que la modélisation de ces derniers. L’une des activités de recherche porte, par exemple, sur l’étude de la circulation atmosphérique (et par conséquent la circulation d’ozone) et les processus dynamiques qui la contrôlent à l’aide de modèles (Dynamic Variability, DynVar). Une autre activité évalue et améliore les modèles qui simulent le climat et la chimie atmosphérique simultanément (Chemistry-Climate Model Initiative, CMI). Le SPARC Office est soutenu par l’EPF de Zurich, l’OFEV, MétéoSuisse, et le WCRP.