



HAL
open science

Refroidissement de la stratosphère : Détection réussie mais quantification encore incertaine,

Philippe Keckhut, Alain Hauchecorne, Chantal Claud, Beatriz M. Funatsu,
Guillaume Angot

► **To cite this version:**

Philippe Keckhut, Alain Hauchecorne, Chantal Claud, Beatriz M. Funatsu, Guillaume Angot. Refroidissement de la stratosphère : Détection réussie mais quantification encore incertaine,. La Météorologie, 2013, 82, pp.31-37. hal-00863423

HAL Id: hal-00863423

<https://hal.science/hal-00863423v1>

Submitted on 26 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Refroidissement de la stratosphère

Détection réussie mais quantification encore incertaine

Philippe Keckhut¹, Alain Hauchecorne¹, Chantal Claud²,
Beatriz Funatsu^{1,2}, Guillaume Angot¹

1. LATMOS-IPSL, UVSQ, UPMC, 11 Bd d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

2. LMD-IPSL, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

Résumé

La stratosphère se refroidit sous l'effet de la diminution d'ozone et de l'augmentation de l'effet de serre. Même si les observations disponibles, qui n'ont pas été prévues initialement pour des études climatiques, présentent toutes de fortes discontinuités temporelles, on identifie clairement ce refroidissement, avec des variations en fonction de l'altitude et de la latitude. Cependant, les incertitudes concernant la quantification de ces tendances varient d'un facteur 2. Dans le futur, la synergie entre les mesures spatiales et celles depuis le sol devra se renforcer afin d'assurer notamment une meilleure continuité entre les instruments SSU et AMSU.

Abstract

**Stratospheric cooling
Detected but quantification still
uncertain**

The stratosphere cools due to both ozone depletion and greenhouse gas increase. Available data series exhibit some severe drawbacks in their temporal continuity because they were not originally designed for climate issues. A general cooling is detected with amplitude varying according to latitude and altitude. However, the uncertainty in the trend quantification is obtained within a factor of 2. In the future, the synergy between space and ground-based measurements should be reinforced mainly to improve continuity between SSU and AMSU sensors.

Introduction

Associé au réchauffement à la surface de la Terre du fait de l'augmentation de l'effet de serre, on attend également un refroidissement à de plus hautes altitudes, dans la stratosphère et la mésosphère (15-80 km). En effet, le rayonnement infrarouge émis par la surface est piégé par les gaz à effet de serre, ce qui conduit à un réchauffement des basses couches par rapport à la situation préindustrielle. Mais l'augmentation des gaz à effet de serre induit également un accroissement du rayonnement infrarouge émis par ces gaz à plus haute altitude vers l'espace, ce qui conduit à un refroidissement. Les simulations numériques de l'effet radiatif montrent que le refroidissement attendu est d'un ordre de grandeur plus grand que le réchauffement à la surface du globe et est donc plus aisément détectable (figure 1). Ce refroidissement est ainsi considéré comme un indicateur supplémentaire de la signature dans l'atmosphère de l'effet de l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et de la diminution d'ozone. Le terme anglais *fingerprint* traduit bien cette notion d'indicateur indirect.

Cependant, ce refroidissement est plus qu'un indicateur du changement climatique : c'est également un lien entre les différents compartiments atmosphériques. En effet, la température modifie l'équilibre de l'ozone et également la circulation dans la stratosphère, modifiant encore d'une autre façon la composition de la stratosphère et donc le forçage radiatif. L'évolution 3D de la structure thermique de l'atmosphère apparaît comme un élément important pour caractériser l'impact anthropique de la composition atmosphérique (Santer et al., 1996) et elle est un élément important pour les réflexions du Groupe intergouvernemental d'étude du changement climatique (IPCC, 1996).

Historiquement, l'intérêt pour l'évolution de la température de la moyenne et haute atmosphère n'a pas été motivé par le changement climatique, mais par la diminution de l'ozone stratosphérique. En effet, la concentration d'ozone est très liée à la température, car le rayonnement solaire (visible et ultraviolet) est absorbé par l'ozone, conduisant à une augmentation de la température (existence de la stratopause) et du fait que

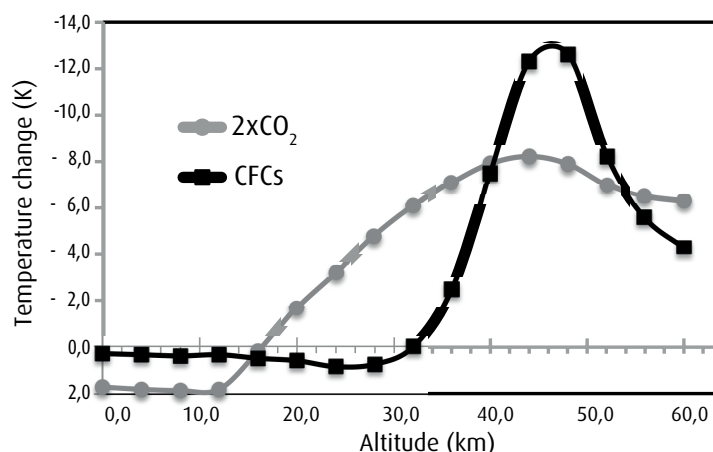


Figure 1. Profil vertical des variations de température associées à l'augmentation des gaz à effet de serre et des chlorofluorocarbones, gaz réduisant la concentration d'ozone stratosphérique (Ramanathan et al., 1987).

l'équilibre entre ozone et oxygène dépende très fortement de la température et du rayonnement. La diminution d'ozone due aux émissions des chlorofluorocarbones conduit donc à un refroidissement dans la haute stratosphère. Ce refroidissement a été largement étudié lorsque la communauté scientifique s'est intéressée à la variabilité de l'ozone stratosphérique et à sa diminution progressive. La première étude complète de la variation de la température induite par les variations d'ozone a été réalisée en 1988 (WMO, 1990) et est depuis régulièrement réévaluée parallèlement à l'évolution de l'ozone stratosphérique. Ces études sont basées d'une part sur les données historiques de fusées sondes et radiosondes, d'autre part sur les données satellites réalisées à partir de 1979 par la NOAA, ainsi que sur les mesures déployées dans le cadre du réseau pour la détection des changements stratosphériques (NDSC : Network for the Detection of Stratospheric Changes) créé en 1991. Ce réseau, qui inclut des mesures du profil de température par lidar et radiosondes, a été étendu à la haute troposphère et rebaptisé NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes). Ces premières études à partir de données recueillies dans d'autres contextes (météorologie, étude de l'ozone, conquête spatiale...) ont montré que la quantification de ces changements se heurtait à de nombreuses difficultés. Ces dernières sont liées non seulement à la continuité des séries de mesures, mais aussi à l'identification des causes des variations observées, notamment le refroidissement anthropique (potentiellement lié à la diminution d'ozone ou induit par l'augmentation des gaz à effet de serre) et les variations des sources naturelles de gaz à effet de serre (liées aux variations d'activité solaire, aux poussières émises dans l'atmosphère suite aux éruptions volcaniques majeures, ou encore aux fluctuations dynamiques d'origine interne : oscillation quasi biennale (QBO), ENSO et AO). L'un des volets du Programme mondial de la recherche climatique (PMRC), SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate), a conduit à plusieurs mises à jour des tendances de la température (Ramaswamy et al., 2001 ; Randel et al., 2009) permettant d'alimenter les rapports de l'OMM (Organisation météorologique mondiale) concernant l'état de la couche d'ozone ou ceux du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) concernant les changements climatiques. Bien que ce

refroidissement soit observé, sa quantification et son attribution aux différentes causes restent encore incertaines.

Description des jeux de données disponibles

L'incertitude majeure quant à la déduction des tendances, qu'elles soient de nature anthropique ou naturelle, est la continuité temporelle associée à chaque type d'instrument. Pour les instruments au sol, les biais apparaissent souvent soudainement et sont liés à des changements instrumentaux ou d'algorithme. Depuis l'espace, on trouve plutôt des dérives lentes. Dans la stratosphère et la mésosphère, l'un des problèmes majeurs de continuité temporelle réside dans les variations dues aux marées atmosphériques au cours du cycle diurne. L'absorption du rayonnement solaire par l'ozone et la vapeur d'eau génère des fluctuations de température de période de 24 heures (et ses harmoniques) synchrones avec la course du soleil pour les modes dits progressifs pouvant atteindre des amplitudes de $\pm 3-4$ K et se propageant à tous les niveaux de l'atmosphère. Ces fluctuations interfèrent avec les variations à long terme lorsque l'heure de mesure change au cours de la série de mesures. C'est le cas des mesures lidar (qui dépendent de la transparence du ciel), des sondages par fusées mais surtout des données issues des satellites dont les orbites changent d'un satellite à l'autre et qui dérivent avec le temps.

Radiosondages

Ces données élaborées pour des besoins de la météorologie dans les années 1940 et densifiées en un réseau mondial durant l'année géophysique de 1956, notamment sur les continents de l'hémisphère Nord, étaient une source naturellement disponible pour l'étude du climat. Le principe de la mesure de température consiste en une thermistance couplée à un émetteur radio (pour renvoyer au sol les données en temps réel) et embarquée par ballon jusqu'à une altitude de 10 à 40 km en fonction du type de ballon, du gonflage et parfois des conditions atmosphériques. Le principal inconvénient de ces séries de mesures pour l'étude du climat est leur discontinuité dans le temps (Gaffen, 1994). En effet, malgré une coordination internationale assurée par l'OMM,

les capteurs de température proviennent de fabricants différents et sont régulièrement changés pour prendre en compte les améliorations ou modifications successives réalisées par les constructeurs. Ces capteurs, non réutilisés d'un vol à l'autre, peuvent connaître des biais entre eux concernant leur calibration, le temps de réaction, les effets radiatifs ou même la traînée du ballon. On admet une précision d'environ 0,2 à 0,5 K, mais des biais peuvent exister notamment au moment des changements de type de capteurs. Un gros travail pour reconstituer l'historique de chaque site a été réalisé, notamment par la NOAA, et de nombreuses tentatives pour qualifier les séries, corriger les sauts systématiques ou sélectionner un nombre limité de sites ont été entreprises, conduisant à la création de plusieurs « produits » utilisés par les uns et les autres pour estimer des tendances dont la représentativité décroît du fait que le nombre de stations considérées se réduit, alors que les critères de qualité se renforcent. Notons par exemple l'analyse du groupe de Berlin qui, à partir de cartes journalières iso-contour réalisées à la main, a constitué une archive de données de température sur une grille régulière pour l'hémisphère Nord (Labitzke et van Loon, 1995).

Fusées sondes

Probablement justifié par la conquête spatiale, un programme de mesures systématiques de la température de la haute atmosphère par fusée-sonde a été entrepris par les Américains, les Soviétiques et les Japonais, du milieu des années 1960 jusqu'au milieu des années 1990, quand les coûts très importants et l'existence de mesures réalisées depuis l'espace et à partir de lidar (notamment dans le cadre du NDACC) ont définitivement stoppé ce programme (Finger et al., 1993). Ces mesures étaient réalisées à partir d'une fusée météorologique (environ 2 mètres de haut) qui, depuis son apogée (80-100 km), laissait retomber soit une sonde sous un parachute qui réalisait une mesure de température à partir de diverses thermistances et d'une télémesure, soit une sphère tombante dont la trajectoire suivie par radar permettait de déduire le profil de densité atmosphérique converti ensuite en un profil de température (Schmidlin, 1991). Ces techniques ont permis de constituer une base de données unique de températures entre 25 et 75 km avec des sondages hebdomadaires en continu sur 2 à 3 décennies depuis environ 13 sites, soit une source de données idéale pour estimer des tendances dans

la haute stratosphère et la mésosphère. Malgré de larges corrections radiatives, aérothermiques ou aérodynamiques comme pour les sphères lors du passage d'une vitesse de chute supersonique à subsonique autour de 70 km (Lubken et al., 1994), une précision d'environ 1 K est obtenue. L'une des limitations majeures pour l'estimation de tendances porte sur l'évolution des capteurs, tout comme pour les séries de radiosondages. Si toutes ces séries indiquent un refroidissement, son amplitude varie fortement d'un site à l'autre.

Lidar

Technique plus récente, l'émission d'une impulsion lumineuse au zénith permet de collecter la rétrodiffusion Rayleigh des particules atmosphériques et donc la densité de l'air de 30 à 80 km d'altitude (Hauchecorne et Chanin, 1980). Cette technique permet d'obtenir un profil de température avec une précision meilleure que 1 K jusqu'à environ 70 km. Des mesures systématiques (plusieurs fois par semaine) ont été conduites depuis 1979 à l'OHP (Observatoire de Haute-Provence) et depuis quelques autres sites dans le cadre du réseau de surveillance de la stratosphère (NDACC) depuis 1991 (Kurylo et Salomon, 1990). Les principales sources de biais apparaissent aux deux extrémités du profil et, aujourd'hui, seuls cinq sites donnent des mesures régulières sur plus d'une décennie. Les séries de données lidar indiquent un refroidissement comme les séries de données fusée.

Données satellites

Si de nombreuses techniques permettent de déduire la température depuis l'espace, seules deux d'entre elles ont été mises en œuvre afin d'assurer une continuité temporelle de mesures dans la moyenne atmosphère : il s'agit de la mesure basée sur le rayonnement infrarouge thermique (Nash et Forester, 1986) et de la technique micro-ondes (Spencer et Christy, 1993). Cette surveillance a été possible grâce à la succession de satellites de la NOAA mais aujourd'hui ceci se poursuit dans le cadre d'une coordination internationale multi-agences avec la notion de sentinelle qui vise à maintenir successivement les mêmes instruments sur des plateformes de différentes agences spatiales afin d'assurer une continuité temporelle avec des performances et des caractéristiques identiques (Aschbacher, 2008). Avec l'expérience Stratospheric Sounder Unit (SSU), les

différents canaux ou combinaisons de canaux ont permis d'obtenir des températures jusqu'à la basse mésosphère avec des résolutions verticales de 10-15 km. Depuis 1998, AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) propose des résolutions verticales meilleures avec 6 des 12 radiomètres dans la bande de l'oxygène entre 50 et 58 GHz couvrant la stratosphère et avec la bande la plus élevée centrée autour de 50 km. Les instruments AMSU placés sur les satellites de la NOAA, 15, 16, 17 et 18 ont été mis en orbite respectivement en 1998, 2000, 2002 et 2005 avec des durées de vie variables. Notons que AMSU sur NOAA-16, la plus longue série, est très comparable aux données lidar (Funatsu et al., 2008).

La difficulté quant à l'utilisation des données spatiales pour assurer une surveillance atmosphérique concerne leurs ajustements les uns par rapport aux autres pour assurer in fine une bonne continuité temporelle. La NOAA a utilisé tout d'abord les données de température des fusées lancées principalement du continent américain, pour assurer cette continuité (Finger et al., 1993). Cependant, les changements d'orbite des satellites ont induit de fortes variations de l'heure de mesures qui n'ont pas été prises en compte. Cette méthode a induit de nombreuses discontinuités à chaque changement de l'heure de mesure (Keckhut et al., 2001). L'ajustement à partir de moyennes zonales des températures de

brillance (méthode dite de Nash) a permis d'obtenir une meilleure continuité et c'est ce jeu de données qui jusqu'à présent était la référence pour les tendances de température. De nombreuses questions subsistent encore comme l'impact des variations de la concentration de CO₂, qui, en même temps qu'elles induisent des changements du champ de température que l'on souhaite mesurer, modifient les fonctions de poids et donc la valeur de la température (Shine et al., 2008). Avec AMSU, qui couvre la période plus récente, le même type de problèmes apparaît, sauf avec des plateformes comme MetOp qui conserve la même orbite. Le raccordement des différentes expériences successives devra prendre en compte ce problème d'orbites et de marées atmosphériques.

Séparation et identification des forçages

L'autre grande difficulté pour quantifier les variations d'origine anthropique est leur identification par rapport aux fluctuations interannuelles d'origine naturelle, notamment parce que les séries de mesures disponibles ne couvrent au mieux que 3 à 4 décennies. L'évolution de la température donnée par les instruments SSU (la figure 2 fait clairement apparaître, en fonction du niveau

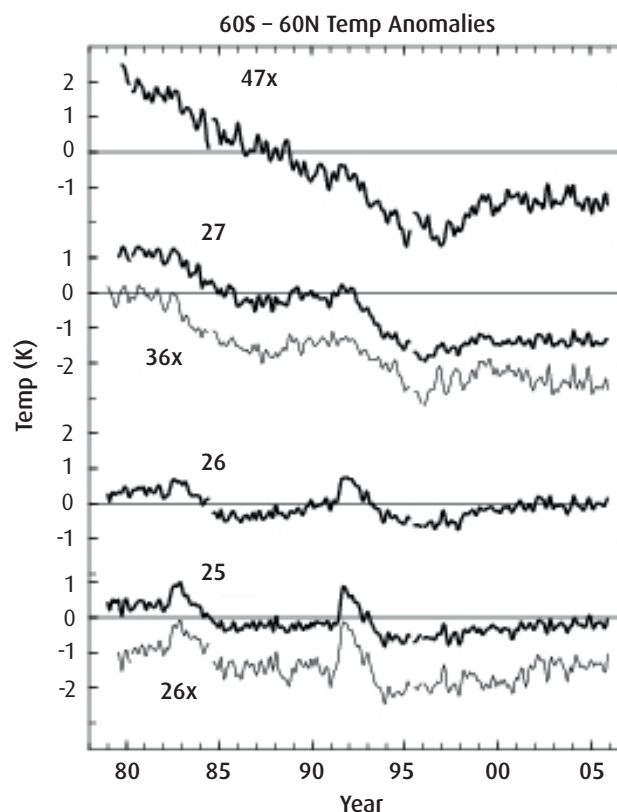


Figure 2. Évolution de la température moyenne à différentes altitudes donnée par la succession d'instruments SSU à bord des satellites de la NOAA ajustés entre eux pour plusieurs niveaux d'altitude (Ramamwamy et al., 2001).

d'altitude que l'on considère, une tendance à laquelle se superposent des fluctuations de température associées aux grandes éruptions volcaniques comme celles d'El Chichon en 1982 ou du mont Pinatubo en 1991), des fluctuations liées aux cycles solaires de 11 ans ou des combinaisons de ces effets. Les aérosols volcaniques injectés dans la stratosphère y résident plusieurs mois voire quelques années et ont donc un impact radiatif réel (Labitzke et McCormick, 1992) qui peut également causer des modifications indirectes sur la circulation atmosphérique, également à des niveaux de l'atmosphère où il n'y a pas d'aérosols. L'activité solaire, qui module le flux UV, a un effet direct sur la dissociation de l'ozone et sur le réchauffement.

Actuellement la méthode la plus utilisée pour tenter de séparer ces différentes contributions consiste à faire une régression multifonctions des séries (Weatherhead et al., 1998) à partir d'indicateurs climatiques comme l'activité solaire, l'épaisseur optique des aérosols stratosphériques, le vent équatorial pour l'oscillation quasi biennale ou les signaux d'ENSO et de NAO, ou encore de l'activité des ondes. L'une des difficultés majeures de cette approche repose sur le fait que ces indicateurs ne sont pas des fonctions mathématiques totalement décorrélées et donc peuvent conduire à des décompositions irréalistes, notamment si l'on augmente le nombre d'indicateurs (Kerzenmacher et al., 2006). Par exemple, les deux dernières éruptions volcaniques majeures

se sont produites durant des maxima d'activité solaire rendant la séparation de ces deux forçages plus difficile. Le forçage potentiellement anthropique est représenté par une fonction monotone qui ne permet pas de séparer directement le refroidissement dû à la diminution d'ozone ou à l'augmentation des gaz à effet de serre. L'inflexion des tendances d'ozone récentes devrait permettre une meilleure séparation de ces deux effets.

Estimations et cohésion d'ensemble

Dans la basse stratosphère, les données satellites et les différents jeux de radiosondages donnent des résultats cohérents, même si une large dispersion des résultats reste présente d'un jeu de données à l'autre (figure 3). La dispersion est maximale en région tropicale, probablement du fait des effets d'échantillonnage, ainsi qu'aux pôles à cause de la grande variabilité naturelle. Malgré cette dispersion, les estimations issues des différents jeux de données de radiosondage et des données SSU semblent montrer une certaine cohérence. Dans la basse stratosphère, une tendance d'environ 0,6 K par décennie est observée sur la période 1979-1994. Sur une période plus longue, la tendance est deux fois plus faible, mais la continuité des séries de radiosondages avant les années 1980 est encore plus incertaine.

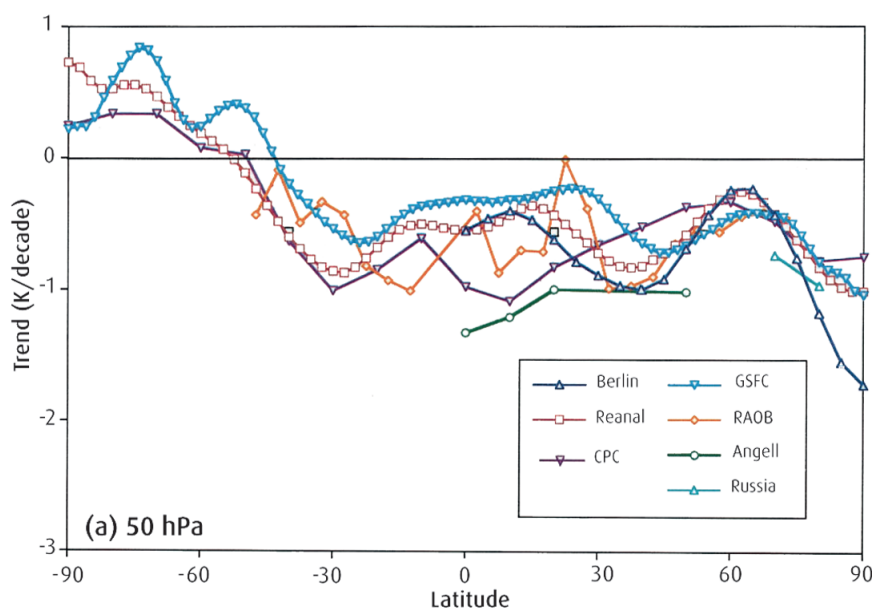


Figure 3. Estimation des tendances (K par décennie) dans la stratosphère autour de 20 km (50 hPa) et pour différentes latitudes à partir de différents sous-ensembles de radiosondages sur la période de 1979 à 1994 (Ramaswamy et al., 2001).

Les séries lidar indiquent toutes un refroidissement (figure 4), mais l'amplitude diffère d'un site à l'autre sans que des problèmes instrumentaux semblent en être la cause (Keckhut et al., 2011). L'analyse des données d'AMSU montre que l'estimation des tendances est très sensible aux effets de sous-échantillonnage et aux estimations locales par rapport aux estimations à partir de moyennes zonales (Funatsu et al., 2008). Les estimations de tendances à partir des données fusées américaines (Keckhut et al., 1999) sont en assez bon accord avec les estimations du lidar de l'OHP et avec les données de SSU. Par contre, les estimations à partir des données soviétiques, provenant notamment de l'île de Heiss à 80°N et de Volgograd à 49°N, montrent des tendances plus importantes malgré la prise en compte des changements instrumentaux.

Les tendances dans la stratosphère se comparent relativement bien à celles estimées par les modèles de Chimie-Climat (Austin et al., 2009). Mais les différents jeux de simulations indiquent des tendances variant d'un facteur 2 aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord (figure 5, haut). Aux pôles, les écarts sont encore plus importants et les estimations diffèrent même au niveau du signe (figure 5, bas).

Forçages indirects

En fait, la forte dispersion des estimations de tendances, qu'elles soient déduites des observations ou de la modélisation, ne vient pas de l'incertitude de l'effet radiatif lui-même, mais est due principalement aux effets indirects induits qui peuvent modifier de façon importante l'amplitude du refroidissement et son attribution à l'une ou l'autre des perturbations anthropiques. L'une des fortes rétroactions est le cycle de l'eau, élément qui, sous sa forme gazeuse, a un effet radiatif important notamment dans la basse stratosphère. La concentration de vapeur d'eau dans la stratosphère est susceptible d'augmenter du fait de l'oxydation du méthane mais également du fait de modifications de la circulation, soit à grande échelle, soit à travers les échanges entre troposphère et stratosphère. Les changements induits pourraient être d'une amplitude équivalente à l'effet radiatif direct associé à l'augmentation des gaz à effet de serre.

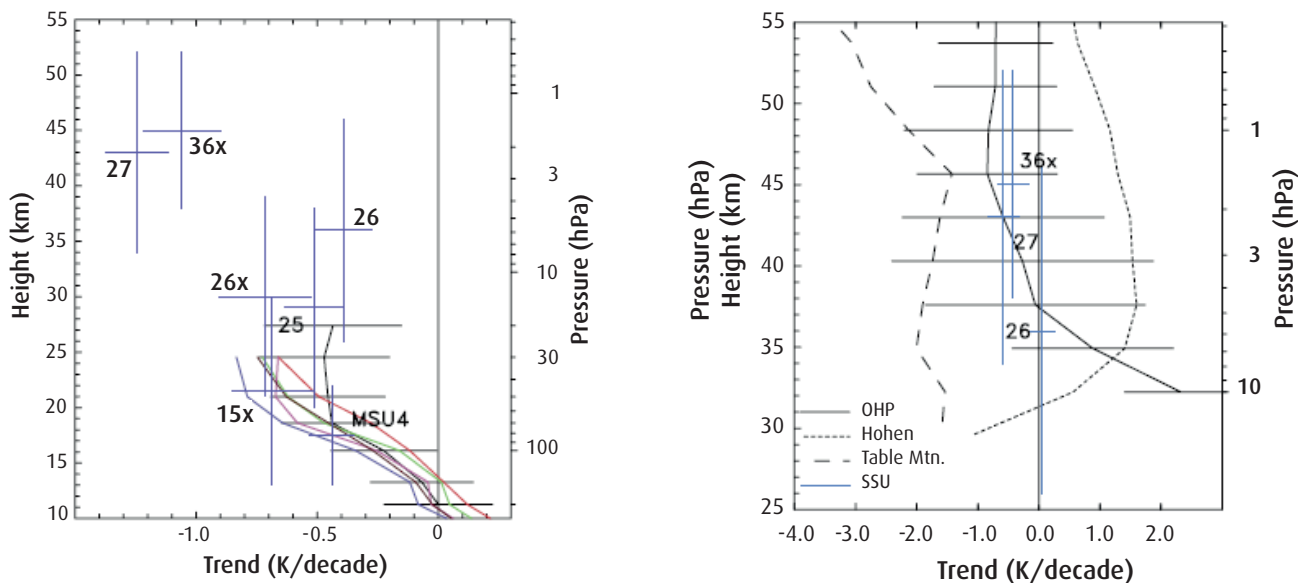


Figure 4. Estimation du profil vertical de tendances à moyenne latitude à partir des différents canaux de SSU, des radiosondages (à gauche) et des données lidar (à droite) (d'après Randel et al., 2009).

L'autre effet indirect important correspond aux modifications induites par la dynamique atmosphérique et la circulation. La composition atmosphérique dépend fortement de la circulation et cette dernière, tout comme la propagation d'ondes (et donc de quantité de

mouvement), est très sensible au champ de température moyen : même de faibles fluctuations peuvent avoir de fortes conséquences et modifier la réponse donnée par les forçages directs seuls. En pratique et pour des questions statistiques, les estimations des tendances se

font sur une base annuelle et en moyenne zonale, ce qui n'est probablement pas le plus adapté pour rendre compte des rétroactions. Ceci est très visible lorsque l'on s'intéresse aux pôles : les estimations présentent de très larges différences entre hiver et été (figure 6). L'occurrence de nuages stratosphériques polaires (PSC) sous l'effet de l'augmentation de l'effet de serre (et d'un refroidissement de la stratosphère), qui pourrait maintenir une forte destruction d'ozone malgré la réduction de la charge en chlore, ne devrait donc pas augmenter. Cependant, ces effets ne sont pas linéaires et dépendent des interactions entre ondes planétaires et circulation moyenne (avec parfois l'apparition de réchauffements stratosphériques soudains dans l'hémisphère Nord). Les études récentes à partir des données journalières montrent qu'il est possible de rendre compte de ces effets à partir d'analyses statistiques basées sur la distribution des observations plutôt que la traditionnelle moyenne (David et al., 2010 ; Angot et al., 2012).

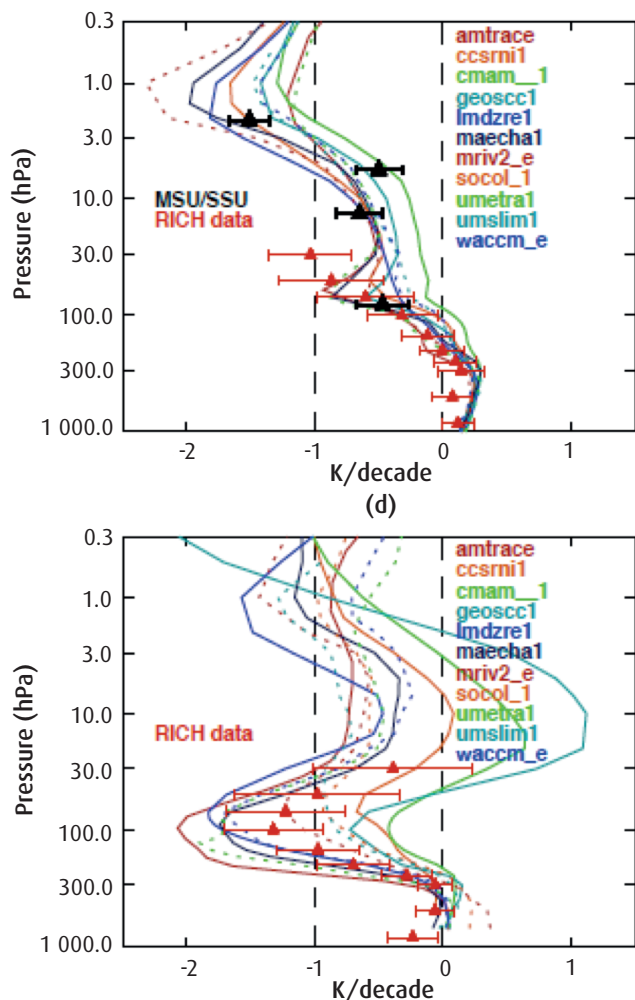
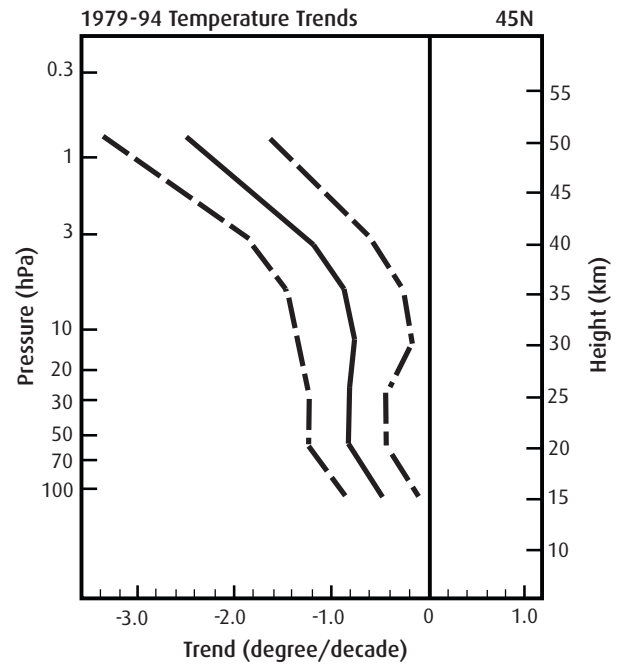
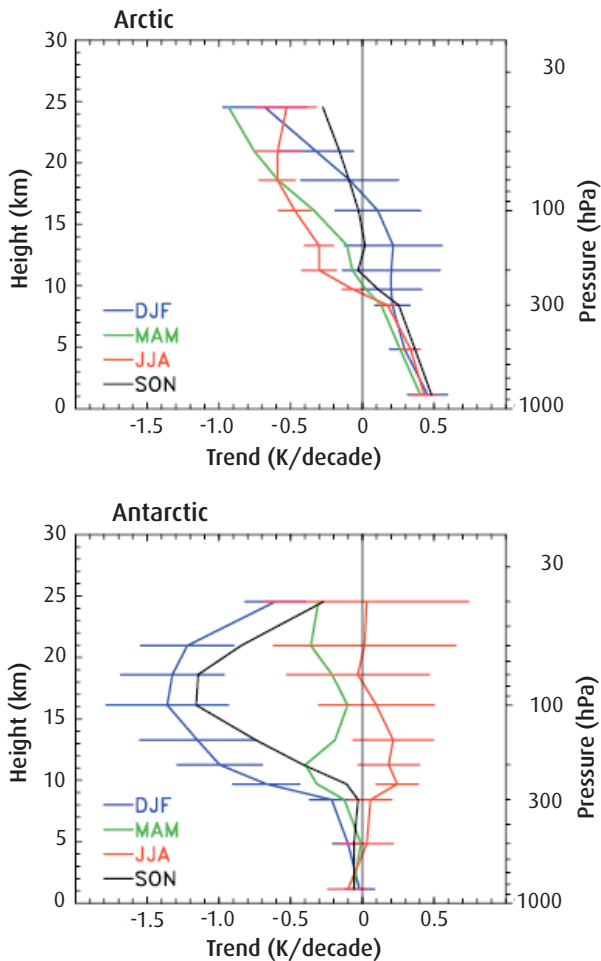


Figure 5. Tendence annuelle (K par décennie) moyennée entre 70°N et 70°S (haut) et entre 67°N et 90°N (bas) à partir de plusieurs modèles de Chimie-Climat comparés dans le cadre du projet CCMVal (Austin et al., 2009) avec le jeu de radiosondage RICH. La période couverte correspond à celle de SSU 1980-1999.

Conclusions et perspectives

Les jeux de données aujourd'hui disponibles, même s'ils n'ont pas été créés pour des questions climatiques, indiquent tous un refroidissement de la moyenne atmosphère avec une amplitude qui augmente avec l'altitude. À partir des différents jeux de données et notamment des données SSU, un profil moyen type du refroidissement dans la stratosphère a été construit (figure 7) et



▲ Figure 7. Profil vertical de tendances construit à partir de l'ensemble des jeux de données disponibles pour la période 1979-1994 (Ramaswamy et al., 2001). Les pointillés indiquent l'incertitude à 2σ , déduite de la dispersion des différentes estimations.

◀ Figure 6. Estimation du profil vertical de tendance en Arctique (haut) et Antarctique (bas) à partir de plusieurs stations de radiosondage (Randel et al., 2009). Les différentes courbes correspondent aux différentes saisons.

peut servir de référence. Les jeux de données présentent de fortes incertitudes quant à la continuité temporelle. Les séries SSU sur lesquelles est basée en grande partie la quantification des tendances font encore l'objet de débats, notamment en ce qui concerne la nouvelle ré-analyse des données (Thompson et al., 2012, Wang et Zhou 2013). Les efforts doivent donc se poursuivre pour assurer une meilleure continuité des données et des outils performants pour le suivi. C'est le cas pour les lidars dans le cadre du réseau NDACC (Steinbrecht et al., 2009), même si le nombre de sites réalisant des mesures de température reste limité, et pour les radiosondages à travers la mise en place du réseau climat Gruan (Seidel et al., 2008). Le suivi depuis l'espace se poursuit avec les capteurs AMSU qu'il faudra intercaler et avec les séries précédentes SSU.

Dans ce cadre, les données sol lidar et radiosondage joueront un rôle important. Compte tenu des impacts dans la moyenne atmosphère des marées atmosphériques, ces dernières devront faire l'objet d'études spécifiques en utilisant divers types de mesures de la dynamique atmosphérique et de modèles numériques (enjeux du projet européen Arise) pour disposer de modèles utilisables opérationnellement. L'utilisation des mesures de température à partir des récepteurs GPS depuis l'espace représente une opportunité unique pour compléter les outils finalement peu nombreux afin d'assurer la surveillance de la température de la stratosphère à l'échelle globale.

Cette quantification est importante pour valider les modèles numériques de climat qui incorporent aujourd'hui

la chimie ainsi que des couches atmosphériques toujours plus élevées en altitude. Les efforts des années à venir devront porter sur l'identification des causes ou des origines des variations interannuelles et leur quantification respective. La confrontation des observations aux modèles numériques est une approche possible. L'extension des séries et d'analyses saisonnières permettra aussi de mieux identifier l'origine du refroidissement observé et de quantifier les rétroactions notamment *via* le cycle de l'eau ou la dynamique atmosphérique. La reconstruction progressive de l'ozone permettra de séparer les deux causes anthropiques du refroidissement de la moyenne atmosphère par des analyses plus sophistiquées couplant ozone, température, dynamique et si possible vapeur d'eau.

Bibliographie

- Angot G., P. Keckhut et A. Hauchecorne, C. Claud, 2012 : Contribution of stratospheric warmings on temperature trends in the middle atmosphere as revealed by the lidar series obtained at observatory of Haute-Provence (44°N), *J. Geophys. Res.*, 117, doi:10.1029/2012JD017631.
- Aschbacher, J., 2008 : Les "Sentinelles" spatiales, de nouveaux outils au service d'une amélioration des politiques européennes en matière d'environnement et de sécurité, communiqué de presse de l'ESA du 28 février 2008 (<http://www.esa.int>).

- Austin J., R. J. Wilson, H. Akiyoshi, S. Bekki, N. Butchart, C. Claud, V. I. Fomichev, P. Forster, R. R. Garcia, N. P. Gillett, P. Keckhut, U. Langematz, E. Manzini, T. Nagashima, W. J. Randel, E. Rozanov, K. Shibata, K. P. Shine, H. Struthers, D. W. J. Thompson, F. Wu et S. Yoden, 2009 : Coupled chemistry climate model simulations of stratospheric temperatures and their trends for the recent past, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13809, doi:10.1029/2009GL038462.
- David C., P. Keckhut, A. Armetta, J. Jumelet, M. Marchand et S. Bekki, 2010 : Radiosondes stratospheric temperatures from 1957 to 2008 in Dumont D'Urville (Antarctica): trends and link with polar stratospheric clouds, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 25687-25722.
- Finger F.G., M.E. Gelman, J.D. Wild, M.L. Chanin, A. Hauchecorne et A.J. Miller, 1993 : Evaluation of NMC upper-stratospheric temperature analyses using rocket-sonde and lidar data, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 789-799.
- Gaffen D. J., 1994 : Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records, *J. Geophys. Res.*, 99, 3667–3676, doi:10.1029/93JD03179.
- Funatsu B.M., C. Claud, P. Keckhut et A. Hauchecorne, 2008 : Cross-validation of AMSU and lidar for long-term upper-stratospheric temperature monitoring, *J. Geophys. Res.*, 113, D23108, doi:10.1029/2008JD010743.
- Hauchecorne A. et M.-L. Chanin, 1980 : Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km, *Geophys. Res. Lett.*, 7, 565–568, doi:10.1029/GL007i008p00565.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 1995 : *The Science of Climate Change*, edited by Houghton et al., Cambridge Univ. Press, New York, 1996.
- Keckhut P., F.J. Schmidlin, A. Hauchecorne et M.L. Chanin, 1999 : Stratospheric and mesospheric cooling trend estimates from us rocketsondes at low latitude stations (8°S–34°N), taking into account instrumental changes and natural variability, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 447-459.
- Keckhut P., J. Wild, M. Gelman, A.J. Miller et A. Hauchecorne, 2001 : Investigations on long-term temperature changes in the upper stratosphere using lidar data and NCEP analyses, *J. Geophys. Res.*, 106, 7937-7944.
- Keckhut P., W.J. Randel, C. Claud, T. Leblanc, W. Steinbrecht, B.M. Funatsu, H. Bencherif, I.S. McDermid, A. Hauchecorne, C. Long, R. Lin et G. Baumgarten, 2011 : An evaluation of uncertainties in monitoring middle atmosphere temperatures with the lidar network in support of space observation, *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.*, 73(5-6), 627-642, doi:10.1016/j.jastp.2011.01.003
- Kerzenmacher T.E., P. Keckhut, A. Hauchecorne et M.L. Chanin, 2006 : Methodological uncertainties in multi-regression analyses of middle-atmospheric data series, *J. Environ. Monit.*, 8, 682-690, doi:10.1039/b603750j.
- Kurylo M.J. et S. Solomon, 1990 : Network for the Detection of Stratospheric Change, NASA Rep., Code EEU.
- Labitzke K. et M. P. McCormick, 1992 : Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 207–210, doi:10.1029/91GL02940
- Labitzke K et H. von Loon, 1995 : A note on the distribution of trends below 10 hPa: The extratropical Northern Hemisphere, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 73, 883-889.
- Lubken F.-J. et al., 1994 : Intercomparison of density and temperature profiles obtained by lidar ionization gauges, falling spheres, datasondes and radiosondes during the DYANA campaign. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 1969-1984.
- Nash J. et G.F. Forrester, 1986 : Long-term monitoring of stratospheric temperature trends using radiance measurements obtained by the TIROS-N series of NOAA spacecraft. *Adv. Space Res.*, 6, 37-44.
- Ramanathan V., L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen W., Kuhn, A. Lacis, F. Luther, J. Mahlmanl, E. Reck et M. Schlesinger, 1987 : Climate-Chemical Interactions and Effects of Changing Atmospheric Trace Gases, *Rev. Geophys.*, 7, 1441-1482.
- Ramaswamy V., M.L. Chanin, J. Angell, J. Barnett, D. Gaffen, M. Gelman, P. Keckhut, Y. Kolshelkov, K. Labitzke, J.-J. R. Lin, A. O'Neill, J. Nash, W. Randel, R. Rood, K. Shine, M. Shiotani et R. Swinbank, 2001 : Stratospheric temperature trends: observations and model simulations, *Rev. Geophys.*, 39, 71-122.
- Randel W.J., K. Shine, J. Austin, J. Barnett, C. Claud, N.P. Gillett, P. Keckhut, U. Langematz, R. Lin, G. Long, C. Mears, A. Miller, J. Nash, D.J. Seidel, D.W.J. Thompson, F. Wu et S. Yoden, 2009 : An updated of observed stratospheric temperature trends, *J. Geophys. Res.*, 114, D02107, 2009, doi:10.1029/2008JD010421.
- Santer B.D. et al., 1996 : A search for human influences on the thermal structure of the atmosphere, *Nature*, 382, 39-46.
- Schmidlin F.J., 1991 : Rocket techniques used to measure the middle atmosphere, In: Goldberg A. (ed.), *Handbook of Map*, 19, 1-28.
- Seidel D.J. et al., 2008 : Reference upper-air observations for climate: Rationale, progress, and plans, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1, doi:10.1175/2008BAMS2540.1.
- Shine K. P., J. J. Barnett et W. J. Randel, 2008 : Temperature trends derived from Stratospheric Sounding Unit radiances: The effect of increasing CO₂ on the weighting function, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02710, doi:10.1029/2007GL032218.
- Spencer R.W. et J.R. Christy, 1993 : Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU technique: Validation and results, 1979-1991. *J. Climate*, 6, 1191-1204.
- Steinbrecht W., H. Claude, F. Schonenborn, I.S. McDermid, T. Leblanc, S. Godin-Beekmann, P. Keckhut, A. Hauchecorne, J.A.E. Van Gijssel, D.P.J. Swart, G. Bodeker, A. Parrish, I. Boyd, N. Kampfer, C. Hocke, R.S. Stolarski S.M. Frith, L.W. Thomason, E.E. Remsberg, C. Von Savigny, A. Rozanov et J.P. Burrows, 2009 : Ozone and temperature trends in the upper stratosphere at five stations of the network for the detection of atmospheric composition change, *Int. J. Remote Sensing*, 30, 3875-3886.
- Thompson D. W. J., D. J. Seidel, W. J. Randel, C.-Z. Zou, A. H. Butler, R. Lin, C. Long, C. Mears et A. Osso, 2013 : The mystery of recent stratospheric temperature trends, *Nature*, 491, 692-697.
- Wang L. et C.-Z. Zou, 2013 : Inter-comparison of SSU Temperature Data Records with Lidar, GPS RO, and MLS Observations, doi:10.1002/jgrd.50162.
- Weatherhead E. C., et al., 1998 : Factors affecting the detection of trends: Statistical considerations and applications to environmental data, *J. Geophys. Res.*, 103(D14), 17149-17161.
- World Meteorological Organisation, 1990 : Scientific assessment of stratospheric ozone: 1989, *Global Ozone Res. Monit. Proj.*, Geneva.