

Proposition de sujet de thèse 2020

Equipe Stratosphère – LACy – UR 8105

Ce sujet a été proposé pour un financement de l'Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l'Université de la Réunion.

Laboratoire : LACy – Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones

Titre de la thèse : **Variabilité climatique du réservoir stratosphérique tropical.**

Directeur de thèse : Thierry Portafaix - Maître de Conférences HDR – LACy – UMR 8105 – Université de la Réunion ; 0262 938215 / thierry.portafaix@univ-reunion.fr

Collaboration :

Sophie Godin-Beekmann – DR CNRS - LATMOS

Olivier Delage – LACy - Chercheur associé

Contexte :

La stratosphère (10-50 km d'altitude) est une région de l'atmosphère particulièrement surveillée. Elle est directement impliquée dans deux des thématiques majeures de la recherche atmosphérique actuelle : surveillance du rétablissement de la couche d'ozone et changement climatique en lien avec l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre (GES). Ces deux problématiques sont étroitement liées.

Dans ce contexte, la stratosphère tropicale joue un rôle fondamental. C'est le point d'entrée des masses d'air en stratosphère, et également le lieu principal de production de l'ozone stratosphérique sous l'effet du rayonnement solaire important. Cette région est donc la principale source de constituants chimiques pour toute la stratosphère, d'où son appellation de 'Réservoir' Stratosphérique Tropical (**RST**).

L'air tropical est redistribué vers les moyennes et hautes latitudes par la circulation générale méridienne dite de Brewer-Dobson (BDC). La phase montante de cette circulation se trouve à proximité de l'équateur. Elle permet le transport de grandes quantités de composés chimiques depuis le réservoir tropical jusque vers les moyennes et hautes latitudes. Le RST est situé environ entre le 20^e parallèle de l'hémisphère nord et le 20^e parallèle de l'hémisphère sud.

La BDC (Butchart et al., 2014) est relativement mal documentée par manque d'observations directes. Elle n'est pas régulière en intensité au cours de l'année. En hiver, la stratosphère tropicale est partiellement isolée de la stratosphère des moyennes latitudes. Les échanges entre ces zones sont inhibés par des barrières dynamiques de mélange [barrière dynamique subtropicale (BDS)], impliquant des gradients importants de vorticité potentielle et de constituants chimiques. Ce confinement des masses d'air dans le RST est modulé par l'activité des ondes planétaires aux moyennes latitudes. La remontée progressive des niveaux d'ozone stratosphérique suite au protocole de Montréal, combinée à l'émission anthropique massive de gaz à effet de serre, influe sur les propriétés radiatives, chimiques et dynamiques de la basse stratosphère. De nombreux modèles numériques de climat prédisent une accélération de la BDC entre les tropiques et les moyenne/hautes latitudes, un élargissement du réservoir stratosphérique tropical, et une possible diminution des quantités d'ozone en basse stratosphère aux tropiques (SPARC CCMVal, 2010, WMO, 2018). Récemment Stiller et al. (2017) ont montré à partir d'observations satellitaires et de simulations, que les variations décennales de BDC, pendant la période 2002 – 2012 dans la basse et moyenne stratosphère, pourraient induire un déplacement vers le sud des barrières tropicales, pouvant atteindre 5 degrés de latitude suivant l'hémisphère et le niveau considéré.

Les modifications climatiques dans la structure des réservoirs stratosphériques, devrait induire des changements dans la composition chimique de ces mêmes compartiments, et in fine des conséquences sur

les forçages radiatifs globaux, sur les remontées attendues d'ozone ou sur les rayonnements UV aux tropiques.

L'objectif général du travail proposé est d'étudier la variabilité du réservoir stratosphérique tropical, **et son évolution à long terme**, grâce à divers outils numériques développés au LACy et au LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales – CNRS -Université de Versailles St Quentin).

Les questions scientifiques principales que cette thèse propose de traiter sont :

- Quelles sont les tendances de la position des barrières depuis 1950 jusqu'à nos jours ? Y a-t-il un lien avec les observations faites sur l'âge moyen de l'air en stratosphère, en particulier le comportement des barrières est-il asymétrique selon l'hémisphère ?
- Quelles sont les tendances de l'intensité maximale (au sens du gradient de vorticité potentielle) des barrières durant les 70 dernières années ?
- Quels sont les forçages atmosphériques ayant une influence majeure sur cette variabilité ? Peut-on quantifier de cette influence.
- La variabilité spatiale du RST (et donc les déplacements climatiques de ses limites), a-t-elle une influence sur le bilan de l'ozone aux tropiques, et à la Réunion en particulier.

La stratégie proposée pour le projet consiste à utiliser plusieurs outils dynamiques complémentaires, afin de déterminer la position des barrières par différentes méthodes.

Tout d'abord la méthode **DyBaL** développée au LACy et basée sur le formalisme dynamique de Nakamura (Nakamura et al., 1995). Il est proposé ici de calculer deux paramètres diagnostiques complémentaires sur les champs ECMWF : le gradient de vorticité potentielle et la longueur équivalente de contour, les deux étant exprimés en coordonnées de surface. L'intensité de la barrière sera estimée par la hauteur de gradient de vorticité potentielle. Cette méthode a déjà été appliquée avec succès pour différentes études (Portafaix et al., 2003, Begue et al., 2017). Le deuxième outil s'appuie sur une méthode de classification permettant la localisation des barrières subtropicales en fonction des coordonnées réelles (Latitude×Longitude) dite **méthode des k-means** (*méthode des centres mobiles*). Cette dernière est basée sur un outil mathématique performant et complétant l'approche classique des gradients de vorticité potentielle (Kirgis, 2008).

Une fois les séries temporelles obtenues, l'analyse de la variabilité saisonnière et interannuelle des barrières (intensité et position) sera réalisée grâce à l'utilisation de plusieurs techniques développées au LACy et au LATMOS. D'une part, une méthode d'analyse de tendance par **régression multilinéaire** (Tohir, 2017), qui permet de mettre en évidence l'implication des différents forçages dont, par exemple, l'oscillation quasi-biennale (QBO) ou le cycle solaire de 11 ans. D'autre part, l'utilisation de la technique dite **EEMD** (Décomposition auto-adaptative Modale Empirique- Delage et al., 2019, Wu et al., 2009) ou EWT (Décomposition en ondelettes adaptatives, Huang, 1998) permettra de prendre en compte le caractère non stationnaire et non linéaire des séries temporelles

Une des originalités de ce travail sera d'utiliser presque 70 années de données journalières du Centre Européen de Prévision Météorologique à moyen terme (ECMWF) : le dernier jeu de réanalyses ERA5, la cinquième produite par le centre qui couvre la période 1950- présent (Hoffmann et al., 2019).

Enfin, la dernière partie de ce travail de thèse consistera à estimer l'influence de la position de la barrière (et des tendances climatiques de cette position), sur les profils verticaux d'ozone observés à la Réunion. Pour cela, nous disposons à la Réunion de mesures verticales de concentration d'ozone depuis 1993 par sondes sous ballons et depuis 2000 par lidar ozone (Differential Absorption Lidar). Ces mesures sont opérées par l'UMS3365 de l'OSU-R (Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion).

Ce travail de thèse viendra en continuation d'un stage de M2 débutant actuellement (début avril 2020) et se prolongeant jusqu'en septembre 2020. Ce stage consiste à démarrer l'étude générale par la récupération des données ERA5 sur toute la période considérée, la caractérisation de ces nouvelles réanalyses, en évaluant les différences dans l'utilisation de DyBaL directement sur les champs ERA à haute résolution (30kmx30km) et sur les champs advectés par MIMOSA (Modélisation Isentrope du transport Mésoscale de l'Ozone Stratosphérique par Advection) développé au LATMOS. Ce stage devrait permettre d'obtenir une première évaluation de la variabilité de la barrière stratosphérique subtropicale à partir de la première méthode (DyBaL).

Mots clés : Basse stratosphère tropicale, barrière dynamique, transport méridien, variation climatologique, ozone.

Données : Reanalyses ECMWF ERA 5, mesures d'ozone OPAR lidar et radiosondage.

Lieu : Université de Réunion - Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105 CNRS/UR/MF

Références :

- Begue N., Vignelles D., Berthet G., Portafaix T., Payen G., Jégou F., Bencherif H., Jumelet J., Vernier J.-P., Lurton T., Renard J.-B., Clarisse L., Duverger V., Posny F., Metzger J.-M., and Godin-Beekmann S.: Long-range isentropic transport of stratospheric aerosols over Southern Hemisphere following the Calbuco eruption in April 2015, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 15019–15036, 2017.
- Butchart, N., The Brewer-Dobson circulation, *Rev. Geophys.*, 52, 157–184, <https://doi.org/10.1002/2013rg000448>, 2014.
- Delage, O., T. Portafaix, H. Bencherif, G. Guimbretiere, R. Tato. Loua; Multi-scale variability analysis of time series in geophysics by using the empirical mode decomposition; 16th SAGA international Conference, Durban, 2019
- Hoffmann, L., Günther, G., Li, D., Stein, O., Wu, X., Griessbach, S., Heng, Y., Konopka, P., Müller, R., Vogel, B., and Wright, J. S.: From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3097–3124, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>, 2019.
- Hauchecorne A., S. Godin, M. Marchand, B. Heese and C. Souprayen, Estimation of the Transport of Chemical Constituents from the Polar Vortex to Middle Latitudes in the Lower Stratosphere using the High-Resolution Advection Model MIMOSA and Effective Diffusivity, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8289, 2002
- Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.- C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*, Proc. of the Royal Society of London A: Math., Physical and Engineering Sciences, vol. 454, no. 1971, pp. 903995, 1998.
- Kirgis, G. (2008). Thèse de doctorat 'Évaluation du transport isentropique à travers la barrière dynamique stratosphérique subtropicale de l'hémisphère sud'. Université de la Réunion, 2008
- Mert, A., A. Akan "Detrended fluctuations analysis for empirical mode decomposition based denoising, Signal Proc. Conference (EUSIPCO), 2014
- Portafaix, T., Morel, B., Bencherif, H., Godin-Beekmann, S., Baldy, S., Hauchecorne, A., Fine scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier, *J. Geophys. Res.*, 108(D6), 4196, doi: 10.1029/2002002741, 2003
- SPARC CCMVal: Neu, J. and Strahan, S.: Chapter 5. Transport, in: SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models, edited by: Eyring, V., Shepherd, T. G., and Waugh, D. W., SPARC Report No. 5, WCRP-132, WMO/TDNo. 1526, <http://www.atmosphysics.utoronto.ca/SPARC> (last access: 19 September 2017), 2010.
- Stiller, G. P., Fierli, F., Ploeger, F., Cagnazzo, C., Funke, B., Haenel, F. J., Reddmann, T., Riese, M., and von Clarmann, T.: Shift of subtropical transport barriers explains observed hemispheric asymmetry of decadal trends of age of air, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 11177–11192, <https://doi.org/10.5194/acp-17-11177-2017>, 2017.
- Tohir, A. M., Portafaix, T., Sivakumar, V., Bencherif, H., Pazmiño, A., Bègue, N.: Variability and trend in ozone over the southern tropics and subtropics, *Ann. Geophys.*, angeo-2017-146, 2017.
- WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project, Scientific Assessment of Ozone Depletion, 2018

Wu, Z. and N. E. Huang, *Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method*, Adv. Adapt. Data Anal., vol. 1, no. 1, pp. 141, 2009.

