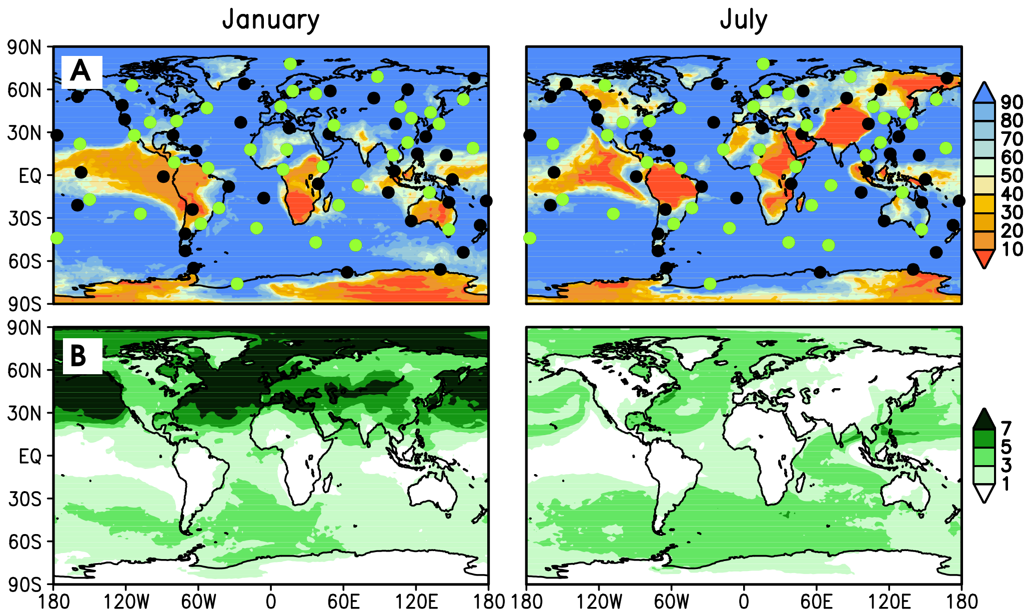

FIG. 6 – Cartes de probabilité de détection (**a**, %) d'essais sub-surface par le réseau gaz nobles (en pratique à partir de la détection du ^{133}Xe) pour les mois de juillet et janvier. Les points correspondent aux emplacements des 80 stations du réseau TICE et, parmi eux, les points gris correspondent aux stations gaz nobles. Les cartes du bas (**b**) correspondent au nombre moyen de stations détectant un essai.

3.3 Applications

Nous avons appliqué cette approche à l'évaluation de l'effacticité des réseaux TICE (Hourdin and Issartel, 2000). Dans ce cas, l'approche inverse permet de remplacer tous les lieux possibles d'explosions par seulement 40 ou 80 points : les stations. On fait donc comme si l'essai avait lieu à la station. On injecte l'équivalent xenon d'une explosion de 1 kt équivalent TNT (spécifications du TICE) au niveau du détecteur D. On remonte le temps avec le modèle LMD-ZT et on dit qu'il y a détéction par le détecteur D d'un essai effectué en un lieu S du globe si la rétroconcentration en S dépasse le seuil de détection. La »TICE montre des cartes de probabilité de détection reconstituées à partir de tels calculs effectués à partir d'un grand nombre de situtations météorologiques pour les mois de janvier et Juillet (original en couleur).

L'ensemble de ce travail a été réalisé en collaboration étroite avec Jean-Pierre Issartel (CEA), Bertand Cabrit (Xeres) et Abderrahmane Idelkadi. Au delà des aspects nucléaires, cette approche de l'inversion du transport devrait pouvoir être appliquée à de nombreux problèmes inverses, en particulier pour des traceurs linéaires. C'est le cas par exemple de l'inversion des sources et puits de CO_2 et nous collaborons actuellement en ce sens avec l'équipe de Phillipe Ciais au LSCE.

4 Modélisation du climat de Titan

Titan, plus gros satellite de Saturne, possède comme la terre une atmosphère dense d'azote. La photo-dissociation de l'azote moléculaire et du méthane dans la haute atmosphère initie une photochimie impliquant notamment des hydrocarbures et des nitriles. Une dizaine de molécules différentes ont d'ores et déjà été identifiées dans son atmosphère. Cette atmosphère est particulièrement intéressante car elle représente une expérience grandeur nature du développement d'une chimie complexe en l'absence de vie. D'autre part, la polymérisation des plus grosses molécules produit des brumes orangées qui voilent l'ensemble de la surface.

L'atmosphère de Titan est également très intéressante d'un point de vue dynamique. Avec un rayon de 2500 km, une période de rotation de 16 jours terrestres et des vents zonaux d'ouest de l'ordre de 100 à 150 m/s, la stratosphère de Titan tourne environ 10 à 15 fois plus vite que la planète solide. C'est du moins ce que prédisent les simulations de la circulation atmosphérique (Hourdin et al., 1995).

La sonde américaine Cassini, en route vers le système de Saturne, emporte la sonde européenne Huygens qui descendra pendant 3 heures dans cette atmosphère encore mystérieuse, en 2005. La préparation de cette mission a motivé, notamment en France sous l'impulsion de Daniel Gautier et François Raulin, le développement d'études théoriques et numériques concernant à la fois la chimie, la micro-physique et la dynamique de l'atmosphère de Titan. Les efforts de modélisation numéérique, développés au départ séparément (respectivement au CESR à Toulouse, au SA à Paris et au LMD), ont été regroupés ces dernières années pour bâtir un modèle complet du climat de Titan avant l'arrivée de la mission.

On sait que les couplages entre chimie, microphysique et dynamique sont particulièrement importants dans l'atmosphère de Titan. Les espèces chimiques observées par Voyager en 1981 montraient par exemple des contrastes latitudinaux très marqués, avec des enrichissement pouvant atteindre un facteur dix dans la région polaire nord qui sortait alors de l'hiver. De même, les variations saisonnières de l'albédo global de Titan, enregistrées depuis la terre, ont été interprétées comme la signature de variations saisonnières de la répartition des brumes. Les brumes étaient aussi responsables d'un contraste hémisphérique marqué entre les deux hémisphère au moment de la rencontre avec Voyager.

Or une partie des espèces chimiques et les brumes ont un impact non négligeable sur le bilan radiatif dans la stratopshère de Titan (Bézard et al., 1995).

Les études sur la dynamique de l'atmosphère de Titan avaient été jusque-là menées au LMD avec le modèle de circulation tri-dimensionel. Mais ce modèle est extrêmement lourd en temps de calcul. Nous avons donc décidé de développer un modèle de climat à partir d'une version 2D latitude-altitude du modèle de circulation. Ce modèle est une restriction à une longitude du modèle 3D. Il prend en compte de façon explicite la composante axi-symmétrique de la circulation générale. En revanche, l'effet des ondes transitoires sur la circulation moyenne doit être paramétré. Les études tri-dimensionnelles ont montré que les ondes jouaient un rôle fondamental dans l'établissement et le maintien de la superrotation de l'atmosphère. Ces ondes, essentiellement barotropes, se développent principalement vers 150-300 km d'altitude sur le côté du jet stratosphérique le plus proche de l'équateur. Ces ondes ont pour origine l'instabilité barotrope de ce jet, elle-même créée par le transport de moment cinétique par la circulation méridienne. Jusqu'à présent, l'effet de ces ondes est simplement représenté par une super-viscosité horizontale dans le modèle de climat latitude-altitude.

Les aérosols ont été introduits dans le modèle de Titan il y a deux ans par Pascal Rannou. Les aspects chimiques ont été développés en collaboration avec le CESR dans le cadre de la thèse de Sebastien Lebonnois, thèse codirigée par Dominique Toublanc et moi-même.

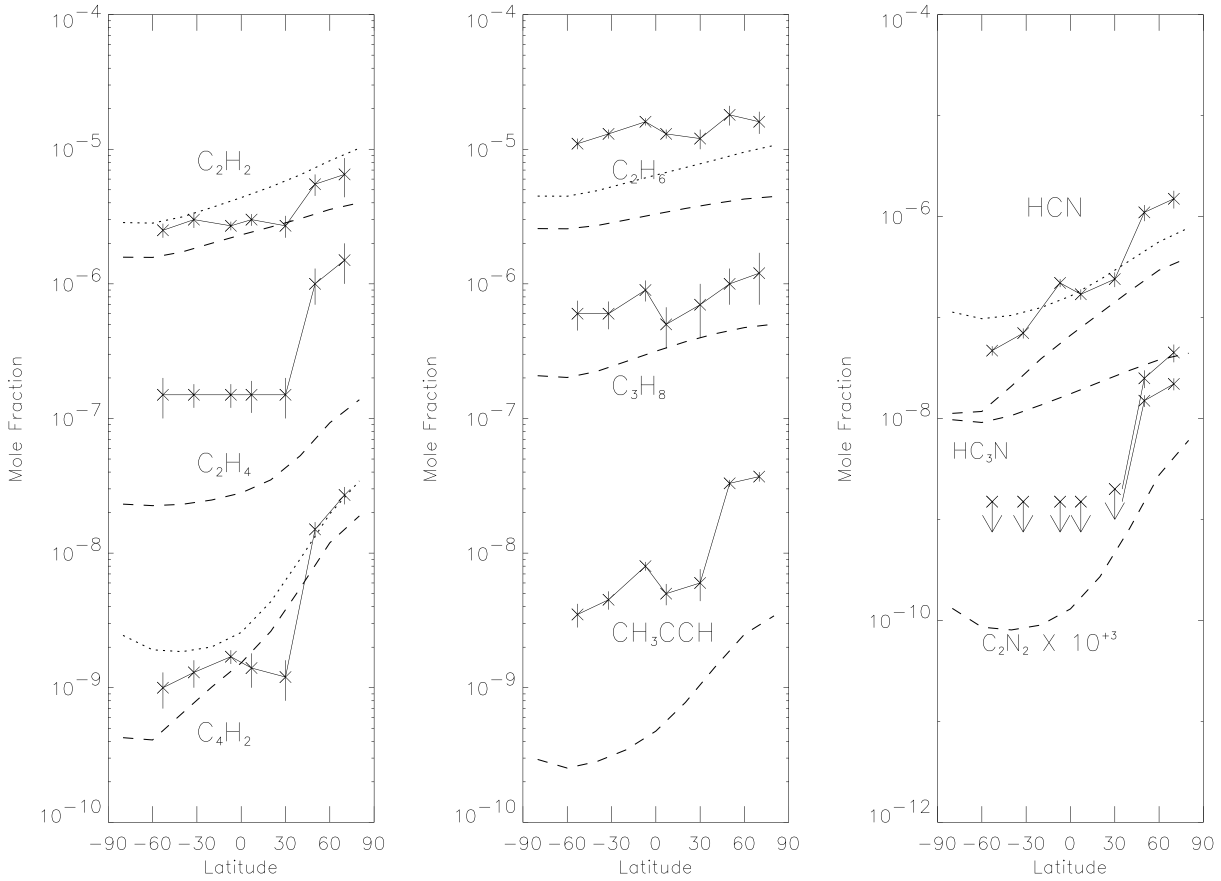

FIG. 7 – Profils latitudinaux de la concentration des espèces chimiques observées par Voyager. Les croix correspondent aux observations. Les tiretés au résultats du modèle de chimie-transport. Ce modèle inclue une quarantaine d'espèces chimiques. Le transport prend en compte la circulation méridienne moyenne et une paramétrisation du mélange latitudinal par les ondes transitoires. Les pointillés correspondent à des simulations avec des traceurs idéalisés pour lesquels le calcul des réactions chimiques est remplacé par une relaxation vers un profil vertical. Profil de rappel et temps de relaxation sont estimés à partir du modèle photochimique complet. Dans ces simulations, le forçage saisonnier n'intervient qu'au travers des modifications de la circulation méridienne. C'est le fait que le profil de rappel croisse fortement verticalement, couplé au transport méridien, qui explique l'enrichissement en espècess chimiques dans l'hémisphère nord : cet hémisphère sort alors de l'hiver, saison pendant laquelle l'air descendait dans cette région.

4.1 Variations latitudinales et saisonnières de la distribution des espèces chimiques

Sebastien Lebonnois a développé lors de sa thèse un modèle latitude-altitude de transport-chimie. Dans cette première approche, la circulation est préscrite à partir de résultats du modèle de circulation. Les espèces chimiques sont transportées mais ne rétroagissent pas sur l'écoulement. Les simulations effectuées par Sebastien Lebonnois (cf. »sebastien) ont permis de donner une explication cohérente des observations latitudinales des espèces chimiques observées par Voyager (Lebonnois et al., 2000).

L'idée est la suivante. Les espèces chimiques sont créées dans la haute atmsophère par photo-dissociation de l'azote et du méthane. Cette source en altitude a pour conséquence que presque toutes les espèces chimiques ont une concentration qui croit fortement avec l'altitude. Les raies infra-rouges liées à ces espèces se forment, elles, pour l'essentiel, dans la basse stratosphère vers 150-300 km d'altitude, dans une région où les molécules chimiques sont avant tout amenées depuis le haut par le transport atmosphérique.

Ce transport vertical se fait essentiellement par des grandes cellules méridiennes d'échelle planétaire avec, dans une longue saison autour d'un solstice, une subsidence sur le pôle hivernal compensée par une ascendance dans l'autre hémisphère. La bascule entre les deux saisons se fait autour de l'équinoxe. Ce transport est responsable de la création des contrastes latitudinaux avec des concentrations plus fortes dans l'hémisphère d'hiver.

Couplées à cette circulation méridienne, les ondes planétaires horizontales ont elles plutôt tendance à attenuer les contrastes latitudinaux.

Cette vision est schématisée sur la »titanschema. La description de la circulation qui avait permis d'expliquer la création de la superrotation sur Titan s'avère donc capable d'expliquer également la distribution des espèces chimiques. En même temps, le bon accord entre observations et modèle fournit une validation indépendante de la circulation atmosphérique prédite par le modèle de circulation.

4.2 Couplage avec les brumes

On pense que les brumes oranges qui obscurcissent la surface de Titan sont crées à partir de la polymérisation d'espèces chimiques. Les macro-molécules ainsi créées coagulent, sédimentent et sont enfin entrainées par la circulation atmosphérique.

Avec Pascal Rannou (SA), nous avons couplé un modèle de micro-physique des aérosols (modèle basé sur une description fractale d'agrégats et développé à l'origine par Michel Cabane) avec la version 2D du modèle de circulation générale. Des résultats très récents montrent que les aérosols s'accumulent aux pôles dans la stratosphère sous l'effet de la subsidance (en moyenne sur l'année l'air descend dans les régions polaires). Ces aérosols ont avant tout un effet de radiateur qui tend à refroidir davantage ces régions et à intensifier en retour la subsidence dans les régions polaires.

Cas de figure assez exceptionnel, le forçage radiatif correspondant aux variations en latitude de la brume est finalement du même ordre de grandeur que le forçage lié aux variations latitudinales et saisonnières de l'ensoleillement. La prise en compte de ce couplage, en renforçant les gradients pôles-équateur de température, renforce également le jet des moyennes latitudes conduisant à un bien meilleur accord avec les observations (**?**).

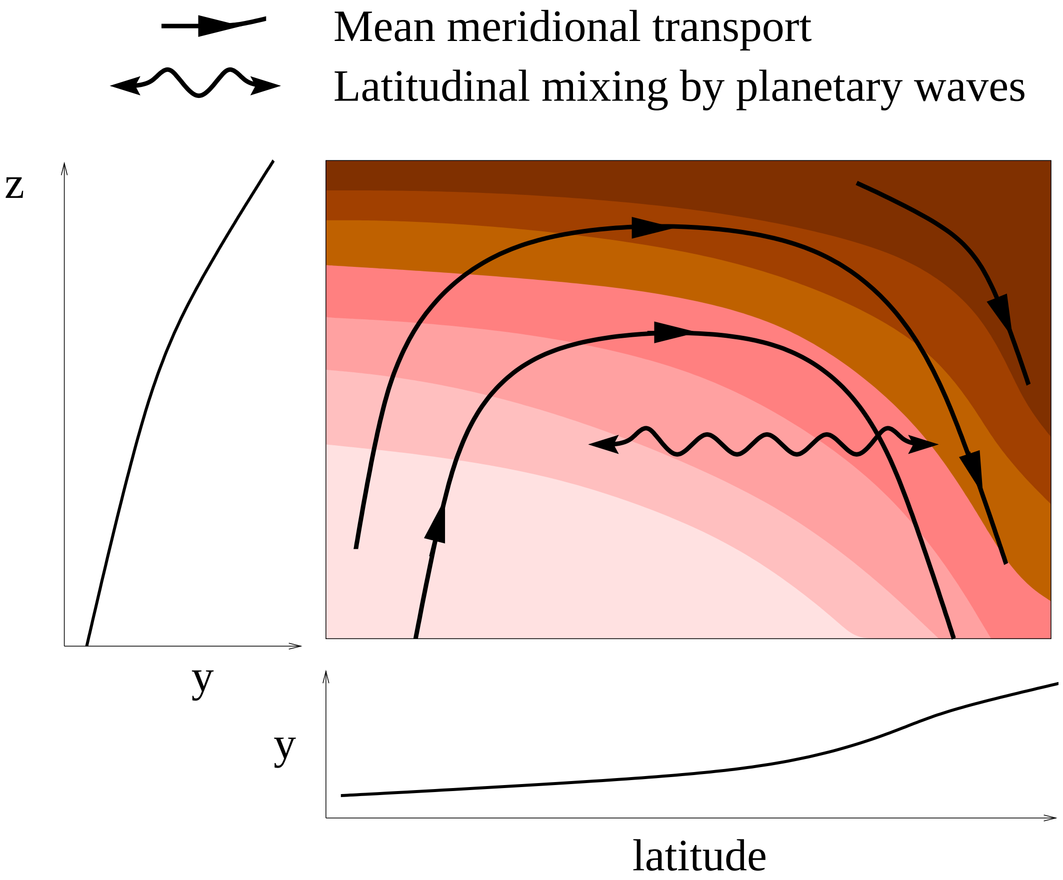

FIG. 8 – Schema de la circulation atmosphérique méridienne (flèches) et du transport des espèces chimiques (iso-concentrations en grisés) dans la stratopshère de Titan. Les profils en bas et à gauche représentent des coupes horizontale et verticale de la concentration en espèce chimique.

4.3 Etude des ondes planétaires

On a souligné que les ondes planétaires jouent un rôle essentiel dans cette circulation stratophérique. Or, jusque récemment, ces ondes étaient représentées de façon très sommaires dans le modèle 2D longitude-latitude, en utilisant un opérateur de dissipation latitudinal avec un coefficient de diffusion réglé de façon relativement arbitraire. Afin d'étudier ce point particulier, David Luz, qui effectue sa thèse à cheval entre Lisbonne et le LMD sous ma responsabilité, utilise un modèle global à une couche basé sur les équation de l'eau peu profonde. Ce modèle est forcé en rappelant le vent zonal vers un profil latitudinal avec un jet instable dans les moyennes latitudes. Nous nous sommes d'abord focalisés sur la quantification de la relation entre l'intensité du transport par les ondes et le degré d'instabilité de l'écoulement moyen. Ce travail a ensuite été utilisé pour dériver une paramétrisation plus physique de ces ondes transitoires pour le modèle climatique latitude-altitude. Deux publications seront prochainement soumises sur ce travail.

5 Autres

Indépendamment, j'ai continué à travailler sur Mars.

J'ai notamment collaboré avec une équipe de Louvain la Neuve pour pédire l'effet sur la rotation de Mars des modifications de la répartition des masses de CO_2 et du moment cinétique atmosphérique (Defraigne et al., 2000).

Nous avons également, avec Chritophe Hourdin, Jean-Louis Dufresnes (LMD) et Richard Fournier (LESETH/Toulouse), développé une nouvelle version du modèle radiatif martien (lui-même issu du modèle développé par Jean-Jacques Morcrette) basée sur le concept de puissances nettes échangées.

6 Objectifs et projets

J'ai commencé à m'investir sur le modèle LMDZ à partir des applications planétaires. J'ai largement participé à la mise sur pied de la version terrestre qui sert maintenant d'ossature au modèle du système Terre développé à l'IPSL. Ce modèle est à une période charnière. Il a été adopté par une large communauté mais il doit maintenant être nettement amélioré au niveau de sa climatologie pour répondre à l'ensemble des besoins (couplage avec l'océan, bonne représentation des échanges troposphère-stratosphère, ...). Ce sera un enjeu fondamental du LMD dans les quelques années qui viennent et je compte continuer à m'impliquer fortement sur ce point.

Je compte en particulier axer une part importante de mon activité de recherche dans les années qui viennent sur l'amélioration de la paramétrisation de la couche limite, en utilisant le "modèle du thermique" décrit plus haut. Au delà des améliorations possibles de la paramétrisation pour les situtions claires, elle doit maintenant être complétée, notamment en y ajoutant le cycle de l'eau et les nuages. Je compte également mettre sur pied un projet de validation en continu de la couche limite du modèle LMDZ sur le SIRTA (Site instrumenté de l'IPSL situé à l'école Polytechnique) en utilisant les capacités de rafinement (zoom) et de guidage (nudging) offertes par le modèle.

Pour Titan, nous allons poursuivre le développement du modèle climatique. L'objectif est de disposer d'un modèle 2D et sans doute 3D couplé dynamique/chimie/micro-physique avant l'arrivée de Cassini-Huygens dans le système de Saturne. Le modèle devrait pouvoir être utilisé pour prévoir les séquences d'observations de Titan, en particulier en collaboration avec le DESPA.

Enfin, je voudrais également reprendre le travail sur l'investigation paramétrique des régimes de circulation atmosphérique ébauché lors de ma thèse.

Références

Abdella, K., and N. McFarlane, 1997 : A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1850–1867.

Ayotte, K. W., P. P. Sullivan, A. Andrén, S. C. Doney, A. A. Holtslag, W. G. Large, J. C. McWilliams, C.-N. Moeng, M. J. Otte, J. J. Tribbia, and J. C. Wyngaard, 1996 : An evaluation of neutral and convective planetary boundary-layer parameterizations relative to large eddy simulations, *Boundary-layer Meteorol.*, **79**, 131–175.

Bézard, B., A. Coustenis, and C. P. McKay, 1995 : Titan's stratospheric temperature asymmetry : a radiative origin, *Icarus*, **113**, 267–276.

Deardorff, J. W., 1972 : Theoretical expression for the countergradient vertical heat flux, *J. Geophys. Res.*, **77**, 5900–5904.

Defraigne, P., O. de Viron, V. Dehant, T. Van Hoolst, and F. Hourdin, Mars atmospheric rotation induced by atmospheric co2 and winds, JGR, in press, 2000.

Graziani, C., W. Klug, and S. Mosca, Real-time long-range dispersion model evaluation of the ETEX release, technical report, Joint Research Center, Office for Official Publications of the European Communities, 1996.

Hess, P. G., S. Nanda, and S. J. Flocke, 1996 : Trajectories and related variations in the chemical composition of air for the mauna loa observatory during 1991 and 1992, *J. Geophys. Res.*, **101**, 14,543–14,568.

Holtslag, A. A. M., and B. A. Boville, 1993 : Local versus non-local boundary-layer diffusion in a global climate model, *J. Climate*, **6**, 1825–1842.

Hourdin, F., and A. Armengaud, 1999 : Test of a hierarchy of finite-volume schemes for transport of trace species in an atmospheric general circulation model, *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 822–837.

Hourdin, F., and J.-P. Issartel, 2000 : Sub-surface nuclear tests monitoring through the ctbt xenon network, *Geophys. Res. Lett.*, 2245–2248.

Hourdin, F., F. Forget, and O. Talagrand, 1995 : The sensitivity of the Martian surface pressure to various parameters : A comparison between numerical simulations and Viking observations, *J. Geophys. Res.*, **100**, 5501–5523.

Hourdin, F. H., A. Idelkadi, M. Bonazola, L. Fairhead, M.-A. Filiberti, and J.-P. Issartel, 1999 : Exercice de simulation de dispersion atmosphérique pour l'accident de tokaimura, *La météorologie, 8eme serie.*

Hourdin, F., F. Couvreux, and L. Menut, Parameterisation of the dry convective boundary layer based on a mass flux representation of thermals, submitted to J. of Atmosph. Sci., 2000.

Lebonnois, S., D. Toublanc, F. Hourdin, and P. Rannou, Seasonal variations of Titan's atmospheric composition, submitted to Icarus, 2000.

Merrill, J. T., 1994 : Isentropic airflow probability analysis, *J. Geophys. Res.*, **99**, 25,8881–25,8889.

Pleim, J. E., and J. S. Chang, 1992 : A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer, *Atmosph. Environ.*, **26A**, 965–981.

Prather, M. J., 1986 : Numerical advection by conservation of second order moments, *J. Geophys. Res.*, **91**, 6671–6681.

Ramonet, M., J. C. Le Roulley, P. Bousquet, and P. Monfray, 1996 : Radon-222 measurements during the tropoz ii campaign and coparison with a global atmospheric transport model, *J. Atmos. Chem.*, **23**, 107–136.

Russell, G. L., and J. A. Lerner, 1981 : A new finite-differencing scheme for the tracer transport equation, *J. Appl. Met.*, **20**, 1483–1498.

Stull, R. B., 1984 : Transilient turbulence theory. Part I : The concept of eddy-mixing across finite distances, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 3351–3367.

Troen, I., and L. Mahrt, 1986 : A simple model of the atmospheric boundary layer : Sensitivity to surface evaporation, *Boundary-layer Meteorol.*, **37**, 129–148.

H. Van Dop and K. Nodop (Eds.), *ETEX, A european tracer experiment*, vol. 32 of *Atmos. Enrionn. special issue, pp. 4089–4378*, 1998.

Van Leer, B., 1977 : Towards the ultimate conservative difference scheme : IV. a new approach to numerical convection, *J. Computational Phys.*, **23**, 276–299.

IV. Autres activités liées au métier de chercheur

Co-encadrement de thèses

- Circulation générale et photochimie dans l'atmosphère de Titan (Sébastien Lebonnois, 30%, soutenue en 2000).
- A numerical study of barotropic waves (David Luz, 100%, en cours).
- Initialisation et inversion de simulations de la campagne INDOEX (Marine Bonazzola, 30%, en cours).
- Simulation du transport atmosphérique aux échelles continentales avec le modèle LMDZT (Abderrahmane Idelkadi, 100%, en cours).

Autres

- Encadrement de stages une à deux fois par an (Magistère ou DEA).
- Enseignement dans le magistère des sciences de la Terre de l'ENS. 15 heures de cours, avec 15 heures de TD encadrées par une autre personne.
- Membre de la CSE de Versailles/St-Quentin.
- Rôle moteur dans le projet LMDZ (développement du code, validation, organisation de réunions mensuelles).
- Mise sur pied d'une lettre d'information semestrielle sur le modèle LMD-Z, LMD-Zinfo (le second numéro est sorti en mai 2001).
- Co-convener de sessions EGS.
- A l'origine d'un contrat avec l'Agence Spatiale Européenne pour le développement d'une base de données climatiques martienne. Ce contrat a permis de financer depuis 4 ans un CDD en continu plus des moyens informatiques et des missions.
- Contrats avec le CEA/DAM pour effectuer des études dans le cadre du TICE (cf. plus haut).
- Encadrement de CDDs liés aux deux contrats précédents.
- Participation de moins en moins active aux différents programmes nationaux dont le caractère technocratique et inefficace s'affirme chaque jour.