Chapitre 1

Introduction

1.1 Avant propos

Deux objectifs m'ont guidé dans la rédaction de ce document. Le premier est d'ordre statutaire : pour soutenir une Habilitation à Diriger des Recherches, il faut rédiger une synthèse de ses travaux antérieurs, souvent déjà publiés en anglais dans des revues à comité de lecture. J'ai profité de cet exercice imposé pour essayer d'écrire un texte qui puisse servir plus ou moins directement de support pédagogique sur différents sujets auxquels je me suis intéressé au cours des dix dernières années. Vue la tourmente programmatique – dans laquelle nous sommes chaque jour davantage plongés – et vue l'ambition affichée, les objectifs – en partie contradictoires – ne sont certainement que partiellement atteints. J'espère que l'exercice restera malgré tout utile.

Le texte est composé de quatre parties plus ou moins indépendantes, avec à chaque fois une introduction assez complète et des conclusions et perspectives. L'introduction et la conclusion du document sont donc plutôt là pour brosser le cadre général du travail pour l'une et tracer des perspectives générales pour l'autre. Le fil conducteur de ces différentes parties est le transport atmosphérique et la modélisation de ce transport dans les modèles de climats globaux.

1.2 Couplages entre composition et transport atmosphérique

Les couplages entre composition et transport atmosphérique occupent une place grandissante dans l'étude des atmosphères planétaires.

Ces couplages sont tout d'abord au centre d'une grande partie des questions relatives au changement climatique. En effet, une partie importante des incertitudes relatives au réchauffement global du climat terrestre provient des incertitudes sur l'évolution de la composition même de l'atmosphère (CO_2, méthane, ozone troposphérique, aérosols). Or l'évolution de cette composition est étroitement liée au transport atmosphérique et au climat. Pour le CO_2 par exemple, l'augmentation des concentrations atmosphériques sous l'effet des émissions anthropiques conduit à une augmentation du stockage dans les océans et les écosystèmes. Le puits biosphérique est cependant lui-même très sensible à l'évolution du climat et les estimations actuelles prévoient une réduction du puits biosphérique consécutive au changement climatique qui pourrait correspondre à une rétroaction positive de 15% sur la teneur en CO_2 de l'atmosphère (**?**). La modification de l'ozone troposphérique est également étroitement couplée à l'évolution de la température et de l'humidité. Les changement des vents en surface peuvent également modifier le soulèvement des poussières désertiques ou les émissions de DMS (précurseurs des aérosols soufrés) par les océans UNE CITATION DE BOUCHER

ET AL. AVEC UNE MICRO EXPLICATION.

Au-delà des modifications de la composition, la sensibilité du climat à changement de concentration imposé est également souvent conditionnée par des processus de transport. La fameuse rétroaction vapeur d'eau (l'atmosphère plus chaude se charge en vapeur d'eau ce qui augmente en retour l'effet de serre) peut par exemple être fortement modulée par les processus de transport. Si on suppose par exemple que le réchauffement résulte également en une augmentation de l'altitude de la pénétration de la convection (convection nuageuse ou grands systèmes de Hadley-Walker) l'air subsidant autour de ces zones convectives sera au contraire plus sec. Cette hypothèse avancée par CITATION DE LINDZEN pour contredire les "tenants" du réchauffement climatique est trop simpliste car, même dans les zones sèches, la vapeur d'eau est contrainte par une compétition entre transport latitudinal par les ondes et advection verticale CITER PIERREHUMBERT. Il n'en reste pas moins que le degrés d'humidification de l'atmosphère lors d'un réchauffement climatique peut être fortement modulé par les changements d'advection CONFIRMATION AUPRÈS DE SANDRINE ET JEAN-LOUIS. Les effets indirects des aérosols (une augmentation du nombre de noyaux de condensation résultant en des nuages formés de plus petites gouttes donc plus brillants et moins précipitants) sont également une des sources importantes d'incertitude sur l'amplitude du changement climatique.

Concernant les couplages entre composition et dynamique atmosphérique sur les autres planètes, on mentionnera d'abord le cas des poussières sur Mars. En dehors des bandes d'absorption du CO_2, constituant majoritaire de la fine atmosphère martienne, la poussière est le principal constituant actif radiativement. Cette poussière est en permanence soulevée du sol du grand désert martien par des rafales de vent, des tornades ou de petites tempêtes locales. Régulièrement, des tempêtes plus importantes se déclenchent, soulevant la poussière sur des milliers de kilomètres. A certaines périodes de l'année, ces tempêtes peuvent finalement dégénérer en évènements globaux spectaculaires, au cours desquels la surface de Mars est entièrement voilée pour l'oeuil d'un observateur extérieur. La circulation est alors profondément modifiée (Hourdin et al., 1993). Notons enfin les couplages entre la photochimie, la microphysique des brumes et la circulation stratosphérique sur Titan qui ont largement retenu notre attention au cours des années passées et qui font l'objet d'un chapitre du présent document.

1.3 Modélisation du climat

La modélisation numérique globale est devenue un outil de base pour aborder ces systèmes complexes. Les modèles de circulation générale atmosphérique, développés au début des années soixante-dix pour les besoins de la prévision météorologique, se sont petit à petit enrichis tant sur le plan physique (représentation des nuages, modèles thermodynamiques du sol, paramétrisation de la convection) que par la prise en compte du couplage avec les autres composantes du système climatique. On pense en particulier pour la terre au couplage avec l'océan, la végétation, la chimie ou les aérosols. Ces développements ont abouti dans les années récentes au concept de "modèles intégrés du climat" (les "Earth system models" ...) utilisés notamment pour essayer de prévoir les évolutions futures du climat. Un modèle de ce type est actuellement développé et utilisé à l'IPSL. Il comprend, couplé au modèle de circulation générale atmosphérique LMDZ, le modèle de circulation générale océanique ORCALIM, le modèle des surfaces continentales ORCHIDEE et le module aérosols-chimie INCA. Ce modèle est actuellement impliqué dans la réalisation de "scénarios climatiques" pour le prochain rapport de l'IPCC. Ce travail, auquel j'ai largement participé au cours des dernières années, est seulement évoqué dans le présent document.

Une des originalités de la modélisation du climat au LMD est de mener de front et avec le même outil, LMDZ, l'étude du climat de la Terre et d'autres planètes du système solaire, en particulier Mars et Titan. En parallèle du développement du modèle intégré terrestre, et souvent même avant, les versions planétaires ont connues des évolutions similaires. Sur Mars se sont les couplages avec le cycle du carbone (un quart de l'atmosphère de CO_2 se condense saisonnièrement dans les calottes polaires), des poussières (on en a parlé plus haut) et de l'eau (avec l'enjeu de déterminer les réservoirs d'eau sous la surface et de comprendre les évolutions passées du climat de la planète rouge) qui ont été inclus dans les modèles de circulation existants. Pour Titan, les couplages avec la photochimie et la brume (Rannou et al., 2002; Lebonnois et al., 2003b; Hourdin et al., 2004a) ou le méthane (Tokano et al., 2001) ont également été inclus dans les modèles existants.

1.4 Représentation du transport des traceurs dans les modèles globaux

Pour la modélisation des couplages entre composition et climat, une étape essentielle du travail de développement consiste à introduire, dans le modèle de circulation générale atmosphérique, les algorithmes permettant de représenter le transport des espèces traces. Il faut traiter à la fois le transport par l'écoulement explicitement représenté dans le modèle de circulation (c'est à dire pour des échelles supérieures à quelques centaines ou dizaines de kilomètres) et le transport par les écoulement non résolus, turbulents ou convectifs. C'est en fait l'introduction, dans le modèle LMDZ, de schémas permettant de représenter le transport à grande échelle qui a donné le coup d'envoi à l'ensemble des études présentées ici. Nous avons plus particulièrement implanté dans le modèle LMDZ des schémas en volumes finis développés à l'origine par (Van Leer, 1977). Les version terrestre et planétaires étant développées de front, ce travail d'introduction du transport a été effectué de fait à la fois pour la version terrestre et pour les atmosphères de Mars et de Titan. Cette version avec transport des traceurs du modèle LMDZ est à l'origine d'un grand nombre de développements et applications concernant à la fois les aérosols soufrés, la chimie terrestre (le modèle a à cette fin été couplé avec le modèle de chimie-aérosols INCA), et, pour les planètes, le cycle des poussières et de l'eau sur Mars et les couplages entre brumes, photochimie et dynamique sur Titan. Ce travail préliminaire est décrit dans le Chapitre 2.

Je me suis ensuite plus particulièrement intéressé au transport vertical par les structures méso-échelles de la couche limite convective. Ces structures (rouleaux, cellules thermiques), bien connues des amateurs de vols libres (deltaplanes, planeurs, para-pentes), ne sont en général pas considérées de façon spécifique dans les modèles de circulation globaux, qui privilégient à un bout une vision en diffusion du transport turbulent dans la couche limite et à l'autre bout des schémas de convection profonde, contrôlés pour une bonne part par les changement de phase de l'eau. Les modèles doivent du coup inclure des traitement adhoc ("contre-gradients", "ajustement convectif") pour palier l'absence de paramétrisation des structures convectives de couche limite ; ces structures convectives qui, sur des régions désertiques ou sur une planète-désert comme Mars, peuvent dominer le transport vertical jusqu'à plusieurs kilomètres au-dessus de la surface. Cette nouvelle paramétrisation, le "modèle du thermique", basée sur une formulation dite "en flux de masse", est décrite en détails dans le Chapitre 3. Y sont également présentés un certain nombre de validations par rapport à des simulations numériques des grands tourbillons ou à des observations.

1.5 Calculs de dispersion et surveillance de l'environnement

En marge des questions relevant directement des couplages chimie-climat, les outils développés pour le transport des espèces traces peuvent être utilisés pour étudier la dispersion de polluants

atmosphériques à écoulement atmosphérique connu. On présente dans les chapitres 2 et 3 de tels calculs de dispersion, réalisés ici à des fins de validation des algorithmes de transport. Dans ces simulations numériques, on force le modèle de circulation atmosphérique à suivre au plus près la situation synoptique afin de comparer au jour le jour les concentrations observées de certains constituants avec des données de terrain. La technique employée est baptisée "nudging" en Anglais ce qu'on traduira ici par "guidage". Cette technique consiste à relaxer en permanence les champs météorologiques du modèle vers des données d'"analyses" ou "réanalyses" produites par les grands centres de prévisions météorologiques. Dans ce cas, le modèle de circulation joue le rôle d'une espèce d'interpolateur physique sur le maillage choisi permettant de recalculer un jeu cohérent de grandeurs physiques nécessaires à la représentation du transport grande échelle et sous-maille. Les grandeurs nécessaires pour les algorithmes de transport des traceurs peuvent être soit passées directement aux algorithmes concernés soit stockées dans des fichiers puis relues pour le seul calcul du transport des espèces traces. On parlera de modes "branché" et "débranché".

Il s'avère que le modèle guidé et débranché, développé à l'origine pour des besoins de validation dans le cadre des études couplées chimie-climat, est un modèle global de dispersion atmosphérique parfaitement adapté à certaines questions relatives à la surveillance de l'environnement. Un travail spécifique a été entrepris dans ce domaine suite à une demande du CEA relative à la surveillance des essais nucléaires à partir de la mesure de la concentration en éléments radioactifs. Il s'agit d'un cas classique de problème inverse dans lequel on veut obtenir des contraintes sur les sources à partir de mesures de concentration. Avec Robert Sadourny, nous nous sommes convaincu à l'époque de cette demande qu'il était légitime, pour répondre à cette question, d'inverser la direction du temps dans le modèle de transport (débranché) pour calculer, en émettant un traceur au niveau des détecteurs, quelle était la distribution d'origine de l'air échantillonné à la station.

L'utilisation du transport inverse et de "modèles de détecteurs" pour aborder ce type de question n'est pas nouvelle. Mais le fait qu'on puisse utiliser directement les codes eulériens à rebours dans le temps (ce que nous appellerons le "rétro-transport eulérien") reste encore suspect pour certains. Ce travail sur la détection des essais nucléaires a donc été l'occasion de clarifier la théorie sous-jacente. Le "rétro-transport" eulérien peut être présenté d'un point de vue physique comme une formulation eulérienne de l'approche des rétro-trajectoires Lagrangiennes, largement utilisée dans la communauté des chimistes de l'atmosphère pour interpréter des mesures de composition ponctuelles. Le rétro-transport eulérien peut également être présenté d'un point de vue mathématique comme l'adjoint du transport direct pour un produit scalaire particulier, pondéré par la masse de l'air soutendant le transport. Les visions à la base des rétro-trajectoires et de l'approche adjointe sont cependant suffisamment différentes pour que les outils développés le soient aussi avec des conséquences importantes sur l'efficacité des algorithmes d'inversion. Le Chapitre 4 présente de façon détaillée à la fois les aspects théoriques, des illustrations numériques et des exemples d'application pour la surveillance des essais nucléaires. Les outils développés à cette occasion sont en cours d'intégration dans une chaîne opérationnelle au CEA.

1.6 Couplages entre composition et dynamique sur Titan

La dernière partie de ce document concerne Titan, le plus gros satellite de Saturne. Titan fait partie de ces objets fascinants du système solaire révélés par l'épopée Voyager. En 1981, les responsables des missions Voyager choisissent de privilégier pour la sonde Voyager 1 un survol de Titan plutôt que de poursuivre la course vers Uranus et Neptune (périple magistralement réussi ensuite par Voyager 2). On sait en effet à l'époque que Titan est, avec la Terre, le seul corps tellurique du système solaire entouré d'une atmosphère dense d'azote (1,5 bar à la surface). Les photos renvoyées vers la Terre sont très décevantes. Une épaisse couche de brume orangée voile entièrement la surface. Tout juste peut-on distinguer un léger contraste entre les deux hémisphères, signe probable d'une effet saisonnier. Les mesures spectroscopiques permettent en revanche d'identifier un grand nombre de composés chimiques, hydrocarbures et nitriles. Ces espèces chimiques, créées dans la très haute atmosphère à partir de la photodissociation de l'azote moléculaire et du méthane (second constituant atmosphérique) sont ensuite transportés vers le bas dans la stratosphère où on pense qu'elles polymérisent pour donner naissance à la brume orange. L'analyse des contrastes latitudinaux de température dans la stratosphère suggère également que l'atmosphère tourne beaucoup plus vite que le satellite, lui-même en phase bloquée autour de Saturne, avec une durée du jour de 16 jours terrestres environ. Si la direction de la rotation de l'atmosphère ne peut être obtenue à partir des observations de la température, l'analogie avec Vénus et des arguments théoriques suggèrent que l'atmosphère est en régime de "superrotation", l'atmosphère vers 200 km tournant une dizaine de fois plus vite que la surface et dans la même direction.

Suite au passage des sondes Voyager, une mission est programmée vers le système de Titan, sous l'impulsion de Toby Owen et Daniel Gautier. La sonde Américaine Cassini se consacrera au système de Saturne et emmènera à son bord la sonde Européenne Huygens qui plongera dans l'atmosphère de Titan. A l'heure ou j'écris cette introduction, Huygens s'est tout juste détachée de Cassini pour entamer sa descente vers Titan.

Au début des années 90s, sous l'impulsion de Daniel Gautier et Christopher P. McKay (NASA/Ames), différents travaux de modélisation sont entrepris pour interpréter les résultats des missions Voyager et préparer la mission Cassini-Huygens. Le modèle de circulation du LMD est adapté aux conditions de Titan (Hourdin et al., 1995a) et prédit effectivement une forte superrotation sur Titan, superrotation confirmée depuis par des mesures Doppler. En parallèle, des modèles spécifiques unidimensionnels sont développés pour la photochimie (Toublanc et al., 1995) et la microphysique des brumes (Cabane et al., 1992; Rannou et al., 1995). Il apparaît cependant rapidement que les différentes composantes de ce systèmes sont fortement couplées. Les brumes sont formées par la polymérisation des constituants chimiques et peuvent servir également de noyaux de condensation à ces dernières au niveaux de la troposphère glaciale de Titan (70 K environ). Brumes et espèces chimiques sont évidemment transportées par les vents. En retour, les contrastes latitudinaux de la composition jouent les premiers rôles dans le forçage de la circulation. Vers 1995, nous décidons avec Michel Cabanes et Dominique Toublanc de réunir les différents efforts de modélisation pour s'attaquer à ce système climatique complet.

En 1998, lors du colloque quadriénal du Programme National de Planétologie, le programme est déjà clair (Hourdin et al., 1998) :

"L'arrivée sur Titan de la mission Cassini-Huygens est sans doute une des dernières occasions avant des décennies d'explorer un système physique analogue à la terre mais encore très mal connu. Pour l'atmosphère et le climat en particulier, c'est une occasion unique avant longtemps de mettre à l'épreuve pour une planète tellurique les théories et modèles développés dans le contexte terrestre. Cette perspective ainsi que la préparation de la mission (étude en amont et préparation de l'analyse des résultats) ont motivé le développement d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère de Titan au Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, sous l'impulsion de Daniel Gautier et en collaboration avec Christopher P. McKay (NASA/Ames) et Régis Courtin (DESPA/Obs. Paris Meudon). [...] Pour Titan, le modèle prédit une stratosphère tournant environ 10 fois plus vite que la planète solide avec des vents zonaux (d'ouest) de l'ordre de 100 m s^{-1}. En plus de ce phénomène dynamique spectaculaire, les résultats du modèle ont contribué à mettre en évidence l'importance des couplages entre dynamique atmosphérique, micro-physique des aérosols, et photochimie. Ceci nous

a conduit à bâtir et à proposer au PNP pour les années à venir, un projet de modélisation du climat de Titan intégrant ces différentes composantes. L'enjeu est d'importance et la tâche ardue quand on connaît les problèmes rencontrés dans la modélisation de ces problèmes sur Terre. Mais la perspective de la confrontation du modèle aux observations de la mission Cassini-Huygens en 2005 en font [un objectif] scientifique de tout premier plan."

Après une mise en route souvent ardue, effectivement, le modèle couplé a bien été développé. Une base de données de résultats du modèle a d'ailleurs été mise à disposition de la communauté sur la toile avant l'arrivée de la mission. Cassini est là. Les photos prises lors des premiers survols de Titan par Cassini ont réservé leur lot de surprises. Les dépouillements en cours des enregistrements des spectromètres et "imageurs spectraux" n'y manqueront sans doute pas non plus. En espérant que la descente de Huygens sera également un succès.

C'est cette histoire qui clôt ce document (Chapitre 5) avant quelques conclusions générales.