

# **Institut Pierre Simon Laplace**

des Sciences de l'Environnement Global

CNRS - Université Pierre et Marie Curie - Université Versailles/Saint-Quentin

CEA - CNES -Ecole Polytechnique - Ecole Normale Supérieure – IRD



**Demande de renouvellement de la FR 636**

**2006/2009**

**RAPPORT D'ACTIVITÉ**



<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>1</b>
<b>PRÉAMBULE</b>	<b>3</b>
<b>I. BILAN DES ACTIVITÉS</b>	<b>5</b>
<b>I.1 - Pôle de Modélisation du Climat</b>	<b>6</b>
I.1.1 - Introduction	7
I.1.2 - Développement du modèle couplé de l'IPSL	8
I.1.3 - Les autres développements	15
I.1.4 - Thématiques scientifiques coordonnées par le pôle de modélisation	21
I.1.5 - Coordination des infrastructures	26
I.1.6 - La stratégie commune Météo-France/IPSL	29
I.1.7 - Conclusion.	30
<b>I.2 - Pôle de Planétologie</b>	<b>31</b>
I.2.1 - Météorologie et climat des planètes telluriques	32
I.2.2 - Interaction plasmas-planètes faiblement magnétisées : échappement atmosphérique et évolution des atmosphères	35
I.2.3 - Magnétosphères et interactions plasmas-planètes	37
I.2.4 - Physico-chimie atmosphérique de Titan et exobiologie	40
I.2.5 - Matière primitive dans le système solaire, agglomération des grains proto-solaires aux noyaux cométaires et diffusion lumineuse par des particules irrégulières	42
I.2.6 - Environnements lointains et astrophysique	44
<b>I.3 - Vers un Pôle autour du Cycle de l'Eau</b>	<b>47</b>
<b>I.4 - Vers un Pôle Spatial et Instrumental</b>	<b>48</b>
<b>I.5 - Centre de Données</b>	<b>49</b>
I.5.1 - Développement des bases thématiques	50
I.5.2 - Activités générales	52
I.5.3 - Techniques de grille appliquées aux données	53

<b>I.6 - Activités liées au statut d'OSU</b>	<b>54</b>
I.6.1 - Le Service d'Observation des changements de la stratosphère NDSC	54
I.6.2 - Observatoire RAMCES	56
I.6.3 - Le Service CARAUS (CARbone AUstral)	60
I.6.4 - Site Instrumenté Régional de Télédétection Atmosphérique (SIRTA)	62
<b>I.7 - Les Groupes de Travail</b>	<b>67</b>
I.7.1 - Assimilation de données et problèmes inverses	67
I.7.2 - Climat et statistiques	68
I.7.3 - Dynamique des fluides géophysiques	68
I.7.4 - Neuratel	69
<b>I.8 - Les projets scientifiques</b>	<b>71</b>
I.8.1 - Modèle couplé de l'atmosphère de Titan	72
I.8.2 - Projet PAMPRE	72
I.8.3 - Variabilité et prévisibilité des impacts climatiques en Amérique du Sud	73
I.8.4 - Projet SAMBAO	74
I.8.5 - Projet océan indien	75
I.8.6 - Influence de la stratosphère sur le climat	75
I.8.7 - Observation globale de la concentration de CO <sub>2</sub> dans la troposphère moyenne	77
I.8.8 - COMPERES	79
I.8.9 - Base de données Titan	82
<b>I.9 - L'enseignement</b>	<b>83</b>
<b>I.10 - La communication</b>	<b>86</b>
<b>I.11 - La valorisation</b>	<b>87</b>
<b>I.12 - Les activités de support</b>	<b>88</b>
<b>I.13 - Le renforcement des collaborations</b>	<b>90</b>
<b>I.14 - Liste des publications (parues en 2002, 2003 et 2004 et sous-presse)</b>	<b>94</b>

## Préambule

L'institut Pierre-Simon Laplace des Sciences de l'Environnement Global (IPSL) a été mis en place au début des années 1990, avec l'objectif de mettre en commun les compétences des laboratoires de la région parisienne impliqués dans les sciences de l'environnement terrestre et planétaire. Créé à l'initiative de Gérard Mégie, il regroupe cinq unités de Recherche, le Centre d'Etudes des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP), le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), le Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN) né de la fusion, au début de l'année 2005, du Laboratoire de Biochimie et Chimie Marines (LBCM) et du Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie (LODyC), le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) et le Service d'Aéronomie (SA). Les tutelles de l'IPSL sont le CNRS, l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), l'Université de Versailles-Saint-Quentin (UVSQ), le CEA, le CNES, l'IRD, l'École Polytechnique et l'École Normale Supérieure. L'IPSL a le double statut de Fédération de Recherche du CNRS depuis le 1er Janvier 1994 (renouvellements en 1998 et 2002) et d'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) rattaché à l'UVSQ (décret promulgué le 25 mai 2000 avec une mise en place effective à la fin de l'année 2002).

La création de l'IPSL en région Île-de-France a constitué un élément important de la stratégie scientifique nationale dans le domaine des sciences de l'environnement. D'une part la complexité des effets naturels et de ceux qui résultent de l'activité humaine sur les différents systèmes (océan, atmosphère, biosphère...) exige une approche pluridisciplinaire, associant chimie, physique, biologie, mathématiques, sciences de la Terre et astronomie, effective au sein de l'IPSL. D'autre part, la globalité des problèmes et la nécessité d'une prédiction réaliste impliquent une approche planétaire, et donc la mise en commun de moyens scientifiques et techniques de plus en plus importants pour atteindre une taille critique au plan international. L'IPSL assure une triple mission de recherche, de service d'observation et de formation, avec comme principaux thèmes de recherche :

- les études de processus (dynamique et chimie de l'atmosphère et de l'océan, processus d'échange de matière et d'énergie entre l'atmosphère, les océans et la biosphère, physique des interactions Soleil-Terre),
- l'établissement des bilans d'énergie et de matière (cycles biogéochimiques, bilan hydrique, cycle hydrologiques et climat, études des changements globaux du passé, environnements planétaires),
- la modélisation du système climatique couplé océan-atmosphère-biosphère cryosphère, du système ionosphère-magnétosphère et des environnements planétaires.

Autour de ces thématiques, l'IPSL fonde son activité, d'une part sur les orientations scientifiques propres des laboratoires qui le composent, d'autre part sur la mise en œuvre au niveau fédératif de services scientifiques communs, qui permettent une rationalisation des moyens et une meilleure efficacité dans la conduite des activités de recherche. Deux pôles sont aujourd'hui en place (pôles de Modélisation du Climat et Pôle de Planétologie) ; deux autres sont en gestation, l'un autour du cycle de l'eau, l'autre, des activités spatiales et instrumentales. Avec les missions d'observation et le Centre de Données, ces structures servent de support à une large part des projets fédératifs conduits par l'Institut.

L'IPSL regroupe actuellement près de 800 personnes, dont 270 chercheurs et enseignants-chercheurs, 260 ingénieurs, techniciens et agents administratifs, et environ 260 doctorants, post-doctorants et stagiaires. L'institut et ses laboratoires sont aujourd'hui implantés sur plusieurs sites en région parisienne : UPMC à Jussieu (avec, dans le cadre de la rénovation du campus, une nouvelle implantation qui en 2003 a permis un regroupement des unités présentes sur ce site : IPSL, LBCM, LMD, LODyC et SA), Verrières / Vélizy (CETP, SA), Saint-Maur (CETP), Plateau de Saclay / Gif-sur-Yvette (LMD, LSCE) et UVSQ Guyancourt (IPSL).

La période 2006-2009 sera marquée par une évolution majeure, à savoir la réalisation du projet de bâtiment sur le campus de l'UVSQ à Guyancourt qui, à partir de 2007, permettra de réduire la dispersion des laboratoires hors du campus de Jussieu. Ce regroupement sera très bénéfique à beaucoup d'égards, en particulier vis à vis des activités du futur pôle spatial et instrumental de l'IPSL.

Le présent document est rédigé dans le cadre de la demande de renouvellement de la Fédération de Recherche pour la période 2006-2009. Il est construit autour d'un bilan de l'activité portant sur les 3 dernières années (le précédent Comité d'Evaluation s'est tenu en Octobre 2001) et d'une prospective pour les 4 années à venir. Le complètent, une série de documents annexes traitant du fonctionnement de l'Institut, ainsi qu'un rapport financier. A noter que la partie "Activités" n'est pas calquée sur le modèle des rapports d'activité de laboratoires car notre objectif est de mettre en exergue la plus-value scientifique apportée par la structure fédérative par rapport aux recherches conduites au sein de ses différentes composantes. Il en résulte une présentation volontairement plus sobre et avec un nombre limité d'illustrations (celles correspondant à une recherche spécifique étant présentées dans les rapports d'activité des laboratoires dont trois - CETP, LMD et LSCE - sont en renouvellement alors que le SA vient d'être renouvelé pour la période 2005-2008 et le nouveau laboratoire, LOCEAN, d'être créé). Pour faciliter la lecture de ce document IPSL, une fiche décrivant chacun des laboratoires et ses principaux axes de recherche est jointe en annexe.

# **I. Bilan des activités**

Sur la période de référence qui couvre les années 2002, 2003 et 2004 (le précédent document de ce type ayant été rédigé pour le comité d'évaluation qui s'est tenu le 3 octobre 2001), les activités de l'IPSL se sont organisées autour de deux pôles fédératifs existants, le Pôle de Modélisation du Climat et le Pôle de Planétologie, de la gestation de deux nouveaux pôles l'un autour du "Cycle de l'Eau", l'autre des activités "Spatiales et Instrumentales", d'un Centre de Données, d'une mission d'observation liée au statut d'OSU, et de groupes de travail. Nous avons également intégré à ce bilan d'activité les rapports des projets scientifiques IPSL qui, sur proposition de son Conseil Scientifique, ont reçu un soutien de l'Institut (il s'agit de projets novateurs conduits, pour une période limitée, conjointement par des équipes rattachées à plusieurs laboratoires de l'IPSL, et éventuellement des participants extérieurs à l'Institut). Les rubriques suivantes concernent les activités d'enseignement, de communication, de valorisation et de support ainsi que celles dont l'objectif est de resserrer les liens avec d'autres instituts ou organismes sur les plans national et international. Nous terminons ce bilan par une liste des publications associées à ces différentes activités de l'IPSL.

## **I.1 - Pôle de Modélisation du Climat**

Personnels ayant contribué au cœur de l'activité du Pôle de Modélisation du Climat pour les étapes de développement du modèle système climatique de l'IPSL, les principales applications et la contribution aux premières analyses :

IPSL: *Ingénieurs permanents* : M.-A. Foujols, M.-A Filiberti, P. Cadule

*CDD* : S. Denvil, R. Benshila, M.-E Demory, A. Tallec, P. Bourcier

LMD: *Chercheurs permanents* : S.Bony, J.-L.Dufresne, J.-P.Duvel, F.Lott, J.-Y.Grandpeix, F.Hourdin, L.Li, J.Polcher

*Ingénieurs permanents* : L. Fairhead, I. Musat

*Thèses* : J.Quaas, S.Conil, A.Idelkaddi

LODYC: *Chercheurs permanents* : O.Aumont, A.Lazar, J.-P.Boulanger, G.Madec, P.Terray, S.Janicot, J.Vialard, M.Lévy, P.Bouruet-Aubertot

*Ingénieurs permanents*: C.Lévy, C.Talandier, E.Kestenare

*Thèses*: J.Leloup, M.Languagne, A.Bozec

LSCE: *Chercheurs permanents*: Y.Balkanski, L.Bopp, P.Braconnot, N.De Noblet, P.Friedlingstein, E.Guilyardi, D.Hauglustaine, O.Marti, M.Schulz, N.Viovy

*Ingénieurs permanents*: J.Bellier, P.Brockmann, A.Caubel

*Thèses* : M.Berthelot, D.Swingedouw, J.Lathière, S.Generoso *Post doctorants* : S.Bauer, G.Folberth, S.Generoso, S.Guibert, A.Klonecki, C.Textor

SA: S.Bekki, C.Clerbaux, L.Jourdain, K.Law

### Laboratoires hors IPSL :

Support calcul CEA : Y.Meurdesoif

LGGE Grenoble : G.Krinner, C.Genthon

Université Catholique de Louvain la Neuve, Belgique: T.Fichefet, H.Goosse, O.Arzel

LOA Lille : O.Boucher, I.Chiapello

LISA: L.Menut, B.Marticorena

ISPRA Italie : F.Dentener

## **I.1.1 - Introduction**

Le Pôle de Modélisation du Climat de l'IPSL s'est constitué autour d'un projet multidisciplinaire de modélisation du système climatique. C'est un centre fédérateur de recherche et d'expertise sur le climat. Il a pour missions de coordonner les études faisant intervenir les composantes du modèle de l'IPSL, d'identifier et de coordonner les simulations de référence, de fédérer et de rationaliser les moyens et les développements techniques, et d'assurer l'animation scientifique. Le Pôle est structuré en groupes de travail : des groupes scientifiques, des groupes techniques et des groupes assurant le développement des modèles (couplés ou non). Son Conseil Scientifique se réunit une fois par mois. L'organisation et le suivi des groupes de travail sont décrits sur le serveur IPSL : (<http://www.ipsl.jussieu.fr/>).

Les différentes actions entreprises concernent les études du changement et de la variabilité climatiques pour en comprendre les mécanismes et identifier les principales rétroactions. L'originalité et la force du Pôle sont de pouvoir intégrer dans l'étude du climat les interactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. L'enjeu pour les années à venir est de considérer le système climatique dans sa globalité (océan, atmosphère, surfaces continentales, glace de mer et de terre) et les différents cycles qui le gouvernent (cycle de l'énergie, cycle de l'eau, cycle du carbone, autres cycles biogéochimiques), ainsi que leurs interactions. L'activité du Pôle de Modélisation du Climat s'articule sur un ensemble d'études et de développements menés dans les différents laboratoires de l'IPSL. Au-delà des études du changement climatique, ces études couvrent :

- les études de processus en vue d'améliorer leur représentation dans les modèles,
- les liens avec les campagnes de mesures, pour aider à l'interprétation ou évaluer les résultats des modèles,
- les études de la variabilité climatique inter-annuelle à décennale, permettant de comprendre les principaux modes de variabilité et d'étudier la prévisibilité climatique,
- les études régionales, avec la perspective d'estimer les impacts climatiques,
- les études paléoclimatiques, qui permettent d'identifier les éléments clefs du système et d'évaluer les modèles.

Au niveau du Pôle de Modélisation du Climat, la réalisation d'un tel projet intégré demande un effort de coordination entre les différentes thématiques et l'intégration dans une plate forme de modélisation communautaire des différents modèles de l'IPSL. Durant les quatre dernières années, les activités se sont centrées sur la mise au point de la nouvelle version du modèle couplé de l'IPSL et sur les études du changement climatique. Cet effort s'est accompagné de la mise en place d'un projet commun avec Météo-France, de l'investissement dans les projets nationaux (mc2, ACI-FNS) et dans le projet européen ENSEMBLES (FP6), ainsi que de la coordination des prospectives relatives aux besoins en calcul intensif. L'organisation actuelle met la priorité sur le projet changement climatique, mais, en lien avec l'activité des différents laboratoires, elle cherche aussi à identifier et à coordonner les simulations de référence à partir desquelles différentes thématiques peuvent se décliner. Le Pôle a également eu un rôle d'animation scientifique et de formation aux travers de journées dédiées. Le bilan fait état successivement des développements de la nouvelle version du système climatique de l'IPSL (IPSLCM4), des réalisations autour des modèles des cycles biogéochimiques, de l'avancée des projets scientifiques, et de l'effort de mise en place d'un cadre cohérent autour des modèles de l'IPSL et de diffusion des résultats.

### **I.1.2 - Développement du modèle couplé de l'IPSL**

Il y a quatre ans, nous avons été amenés à abandonner l'ancien modèle de l'IPSL pour porter l'effort de développement sur un nouveau modèle. Cette époque a coïncidé avec la suppression des calculateurs de type Cray dans les centres de calcul de l'IDRIS et du CEA, et nous ne disposions pas de la force de travail suffisante pour à la fois porter l'ancien modèle sur les nouvelles plates-formes et développer le nouveau modèle. L'objectif pour ce nouveau modèle de climat était de faire un saut qualitatif par rapport aux versions précédentes. Une attention particulière a porté sur les points suivants: stabilité du climat simulé, gradients équateur-pôle réalistes, climatologie moyenne permettant d'aborder les différents thèmes de recherche, conservation de bilans de chaleur et d'eau, représentation des principales caractéristiques de la variabilité inter-annuelle à décennale, facilité d'utilisation, possibilité de coupler facilement le modèle climatique aux modèles des différents cycles. Cela nous a amenés à des évolutions conséquentes, tant de la physique des modèles et de leur couplage que du codage de nouvelles fonctionnalités et de l'environnement informatique permettant de réaliser et d'exploiter les simulations. Le bilan met l'accent sur le modèle couplé, sachant qu'il s'appuie sur des modèles d'atmosphère et d'océan développés respectivement au LMD et au LODyC.

## a) Evolution des composantes

*Atmosphère (LMDZ)* : L'évolution la plus significative de LMDZ, tant pour les expériences forcées par des températures de surface océaniques que pour le couplage avec l'océan, a été le remplacement du schéma de convection de Tiedke par celui de Kerry-Emanuel et la mise en oeuvre d'un nouveau schéma de nuage. Les nuages sont représentés par une fonction de distribution probabiliste (PDF) de l'eau totale (vapeur plus états condensés) à l'intérieur de la maille. L'ancienne formulation supposait une fonction de distribution de forme carrée à largeur fixe. Le nouveau schéma utilise une distribution log-normale dont la largeur est une fonction interactive de l'intensité de la convection. Un soin particulier a été aussi apporté au calcul des coefficients de traînée sur l'océan.

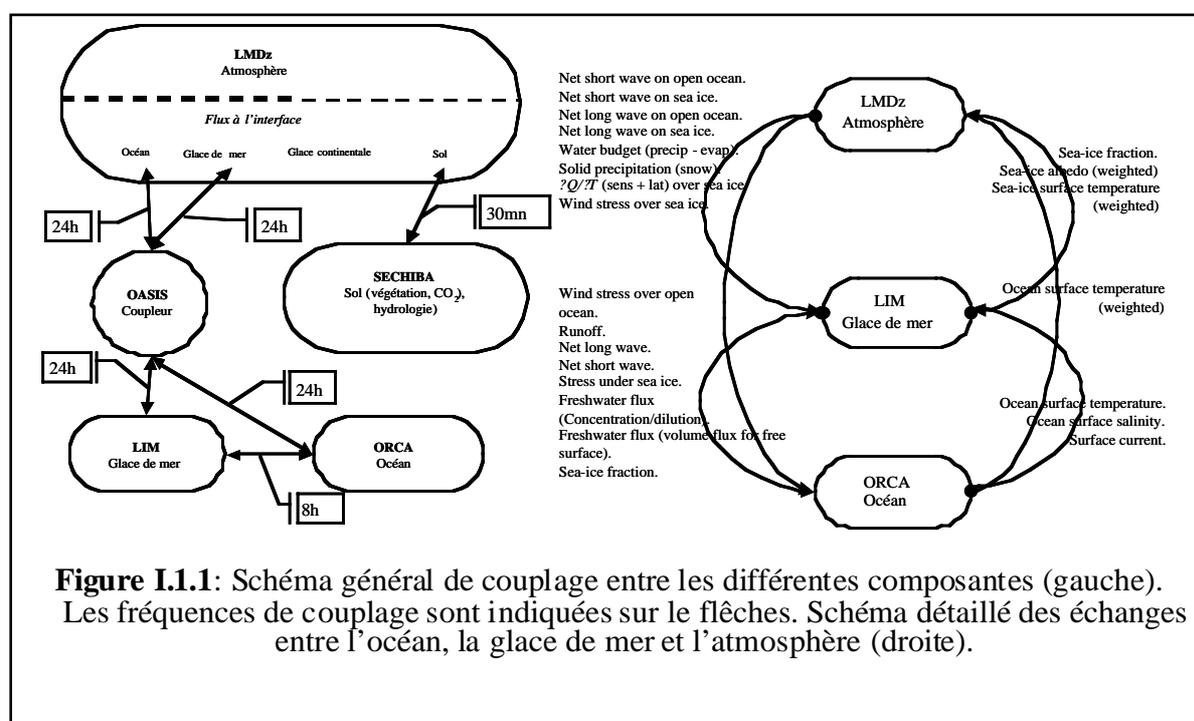
De plus un modèle d'interface a été développé afin de gérer les couplages de façon différenciée selon quatre sous-surfaces de base : océan libre, glace de mer, glace continentale et sol. Chaque surface est prise en compte au sein d'un modèle dédié : ORCA pour l'océan libre, LIM pour la glace de mer et ORCHIDEE pour le sol. La glace continentale fait l'objet d'une paramétrisation interne à LMDZ. Le schéma de diffusion verticale est résolu dans la colonne pour chaque sous-surface, qui voit donc des flux de chaleur et d'eau calculés avec des propriétés de surface (rugosité, etc ..) spécifiques.

Une autre source d'amélioration majeure est l'évolution du modèle de sol. Le modèle en 'seau' très simple a été remplacé par le modèle SECHIBA, où la conduction de chaleur dans le sol est traitée au moyen d'une discrétisation en 11 couches. Ces modifications ont réduit les pluies excessives simulées dans l'hémisphère Nord en été. La réduction est trop marquée sur l'Europe, mais les moyennes zonales des précipitations sont nettement améliorées. SECHIBA est une composante du modèle ORCHIDEE qui comprend aussi un modèle de carbone continental (STOMATE) et un modèle de végétation dynamique (LPJ). L'activation de ces composantes dans IPSLCM4 est en cours. Le modèle ORCHIDEE comprend également un modèle de ruissellement continental, permettant de calculer l'écoulement des rivières et des régions côtières vers les différents bassins océaniques.

*Océan et glace de mer (Système OPA, configuration Orca-Lim)* : Les versions précédentes du modèle de l'IPSL utilisaient soit des modèles très simplifiés de glace de mer (comparaison de la température de la mer avec le point de congélation, et éventuellement rappel à la climatologie de glace de mer), soit le modèle thermodynamique de glace de mer IGLOO développé au LODYC. Pour IPSLCM4, le modèle de dynamique et de thermodynamique de glace de mer LIM développé à l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve a été choisi. Ce modèle a été incorporé dans le système OPA, testé en mode forcé par des climatologies, puis l'ensemble a été couplé à LMDZ.

## b) Développement des modèles

La figure I.1.1 représente le schéma de couplage entre les différentes composantes du modèle couplé. Le découpage de la colonne d'atmosphère en sous-surfaces permet une conservation exacte des flux entre les différentes composantes. L'interpolation des flux de chaleur et d'eau a été conçue pour respecter cette conservation. Entre LMDZ et Orchidée, l'interface est celle développée dans le projet PILPS et correspond à un standard international. Pour le couplage entre la glace de mer, l'océan et l'atmosphère, il existe dans le monde une grande variété d'approches. Celle développée pour IPSLCM4 suit les développements faits dans la version précédente du modèle. Elle est très proche de l'interface standard conçue dans le cadre du projet européen PRISM.



**Figure I.1.1:** Schéma général de couplage entre les différentes composantes (gauche). Les fréquences de couplage sont indiquées sur le flèches. Schéma détaillé des échanges entre l'océan, la glace de mer et l'atmosphère (droite).

## c) Nouvel environnement

Depuis 4 ans, le Pôle de Modélisation du Climat a mis en place une infrastructure logicielle commune. La principale qualité de cette infrastructure est d'être utilisée aussi bien par le modèle couplé IPSL-CM4 que par les différentes composantes lorsqu'elles sont utilisées en mode forcé. Une configuration de référence inclut ainsi les sources des modèles utilisés, les outils de compilation sur les centres de calcul typiques, un ensemble de scripts permettant de lancer une expérience typique et de sauvegarder les fichiers, ainsi que des utilitaires permettant d'effectuer les premiers post-traitements et de produire des atlas.

**Modipsl** est une boîte à outils composée des éléments suivants :

- une nomenclature des répertoires utilisés ;
- un ensemble de configurations types de modèles regroupant toutes ou certaines composantes;
- un script d'accès aux configurations type accédant à une famille de serveurs CVS ;
- une famille de serveurs CVS (OPA, LMDZ, ORCHIDEE, INCA, IOIPSL, FAST et MODIPSL) permettant de gérer les sources des modèles ;
- un environnement de compilation ;
- des scripts de lancement d'expériences de référence adaptables sur les machines les plus utilisées ;
- une arborescence pour le rangement des fichiers de résultats sur les serveurs de fichiers des centres de calcul et sur les serveurs DODS (IDRIS et IPSL) pour accès à distance :
- des scripts de post-traitement permettant la génération de fichiers réarrangés par exemple pour regrouper des moyennes mensuelles, sélectionner des zones géographiques ;
- des scripts de post-traitement permettant la génération d'atlas (outils ferret-FAST) ;
- des scripts de post-traitement permettant la génération des pages web

La librairie **IOIPSL** est un autre outil largement utilisé par le modèle couplé IPSL et ses composantes. Elle se compose d'un ensemble de sous-programmes organisés en modules, qui permettent :

- la lecture/écriture des fichiers de redémarrage ;
- l'écriture de variables diagnostics après opérations de réduction comme une moyenne temporelle ou une sélection de variables sur une région ;
- la lecture de paramètres d'entrée ;
- la lecture/écriture de champs physiques ;
- le traitement du calendrier et des opérations mathématiques élémentaires ;
- lorsqu'il s'agit de fichiers binaires, le format NetCDF a été choisi et la convention CF retenue (dans sa version précédente à savoir GDT).

Il existe actuellement une dizaine de **configurations de modèles** qui s'appuient sur MODIPSL (cf tableau). Le modèle couplé et les différentes configurations sont régulièrement testés sur les calculateurs utilisés par l'IPSL : NEC SX-5 de l'IDRIS et NEC SX-6 du CEA. Récupérer le modèle couplé référencé ou une autre configuration pour lancer une étude type, produire les atlas et rendre accessibles les fichiers résultats est actuellement réalisé en quelques

commandes et quelques minutes. Obtenir le point de départ d'une nouvelle étude est ainsi devenu un jeu d'enfant. Néanmoins, aborder une nouvelle étude reste un défi !

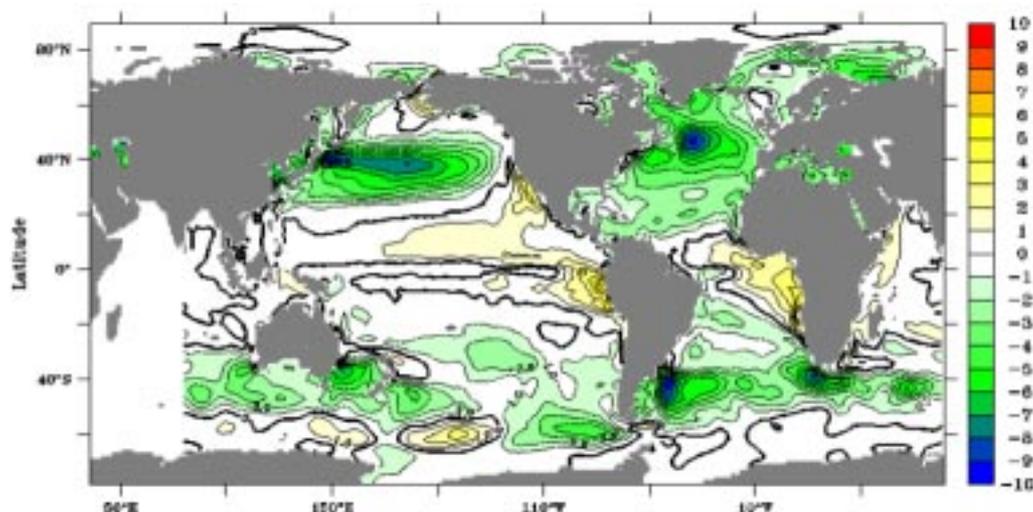
Configuration	Atmosphère	Continent	Coupleur	IOIPSL	Océan	Glace	Traceur
IPSLCM4_v1	LMDZ.3.3	ORCHIDEE 1 3	OASIS 2.3	IOIPSL	OPA8	LIM	
IPSLCM4_loop	LMDZ.3.3	ORCHIDEE	OASIS 2.3	IOIPSL	OPA8	LIM	TRC PISCES
LMDZOR	LMDZ.3.3	ORCHIDEE		IOIPSL			
LMDZ4OR	LMDZ 4	ORCHIDEE		IOIPSL			
ORCA2_LIM				IOIPSL	OPA8	LIM	
ORCA2_LIM_TRC				IOIPSL	OPA8	LIM	TRC AGE
ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE 1 3		IOIPSL			
ORCHIDEE_OL2	ORCHIDEE_OL	ORCHIDEE 2		IOIPSL-f90			
EEL2_LOBSTER1				IOIPSL	OPA8		LOBSTER

En ce qui concerne la configuration IPSLCM4, les outils fournis permettent de choisir facilement entre 2 résolutions (96x72 ou 72x45 points pour LMDZ et ORCA2° ou ORCA4° pour OPA), de paramétrer la physique de l'une ou l'autre des composantes, de partir d'un état initial standard ou des résultats d'une simulation précédente, de se repérer dans les étapes de mise en œuvre d'une autre résolution. La principale limitation de cette infrastructure est qu'elle est issue d'un développement maison, que sa maintenance repose sur les seules forces IPSL et que son évolution, impérative pour garder les outils au niveau technique, doit être planifiée.

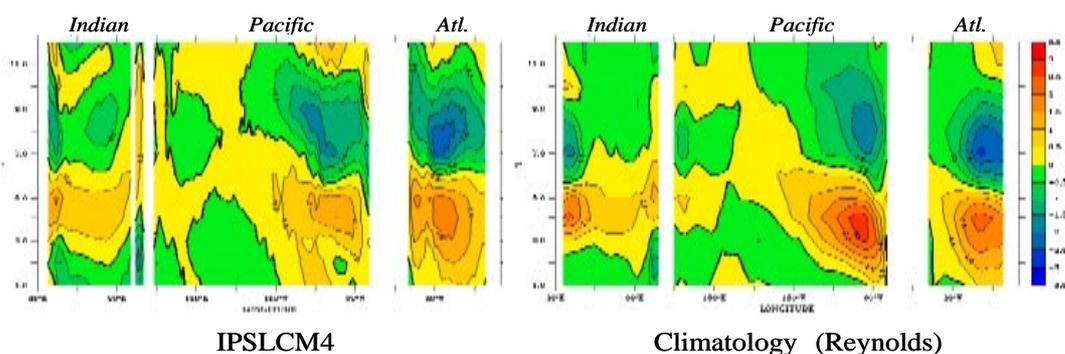
**d) Climatologie** : Le réglage de la climatologie du modèle s'est étalé sur plusieurs années. Dans l'atmosphère, la majeure partie du travail a concerné le schéma de convection, son interaction avec le schéma de nuage, et les coefficients de traînée sur l'océan. Une bonne partie des ajustements du système couplé a été réalisée en parallèle. Le réglage d'un modèle couplé est une tâche difficile car les défauts de chaque composante ont tendance à s'amplifier lors du couplage et qu'il faut arriver à faire travailler ensemble les spécialistes des différents milieux. De nombreux problèmes ont progressivement été identifiés dans les interfaces entre les modèles pour arriver à la version de référence utilisée pour les simulations IPCC.

La figure I.1.2 illustre la différence entre la température de surface simulée par IPSLCM4 et les observations en été. Dans la zone tropicale, les différences sont faibles. On observe des valeurs élevées dans les moyennes latitudes. Elles correspondent à un tassement des structures vers l'équateur souvent observé dans des modèles à cette résolution. L'évolution saisonnière de la température de surface de l'océan moyennée entre 2°S et 2°N est reportée figure I.1.3. Le modèle simule de façon très réaliste la phase du cycle saisonnier à l'équateur. L'amplitude dépend fortement des réglages du modèle. Elle est un peu faible dans sa version finale en raison de compromis avec la climatologie dans d'autres régions. Les premières

analyses de la variabilité tropicale montrent une bonne variabilité de type ENSO. En particulier, plusieurs types d'ENSO sont présents, avec des phasages saisonniers différents, que l'on peut faire correspondre à des évènements ENSO observés. Néanmoins, le modèle manque de variabilité à basse fréquence, ce que l'on peut relier à la faible résolution employée. Les résultats peuvent être consultés directement via les pages web de l'IPSL (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr>). La documentation est disponible en ligne. Elle fait un état plus complet des différentes améliorations, présente une comparaison entre la version disponible à l'été 2003, qui a déjà fait l'objet d'analyses, et de la version IPSLCM4.v1 utilisée pour les simulations IPCC.



**Figure I.1.2** : Différence entre la température de surface simulée par IPSLCM4 et les observations (Reynolds) ; Moyenne juin-juillet-août. Simulation 2L20.



**Figure I.1.3** : Evolution saisonnière (moyenne annuelle soustraite) de la température de surface de l'océan entre 2°N-2°S pour une simulation du climat actuel (à gauche) et les observations (à droite).

**e) Scénarios climatiques** : Plusieurs simulations du changement climatique sont en cours avec la nouvelle version du modèle couplé. Elles concernent la réalisation des scénarios climatiques du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat) ainsi que les simulations du climat de l'Holocène moyen et du dernier maximum glaciaire (projet international PMIP : Paléoclimate Modeling Intercomparison Projet).

*Scénarios du GIEC* : Un effort particulier doit être développé en 2004-2005 pour réaliser les simulations imposées pour le prochain rapport du GIEC, simulations qui ont comme objectifs :

- de balayer (si possible en les encadrant) les évolutions futures des perturbations anthropiques en proposant plusieurs scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et d'aérosols sulfatés, en fonction des pressions économiques ou démographiques.
- De fournir des ensembles de simulations climatiques, prenant en compte les incertitudes des modèles actuels, à partir desquels il est possible d'établir l'état le plus probable du système compte tenu de l'état de l'art en modélisation.

Ces ensembles de simulations représentent une source de données très intéressantes pour les communautés d'impact et différentes études du risque climatique. Elles constituent également des références pour toutes les études que nous effectuons pour comprendre le fonctionnement et étudier le rôle des différents éléments du système climatique et de leurs couplages. Pour réaliser ces scénarios, les effets direct et indirect des aérosols sulfatés ont été introduits dans le modèle d'atmosphère suivant Quaas et al. (2004). Un travail d'ajustement a été réalisé pour que l'introduction de la distribution de la taille des gouttes de pluie ne modifie pas les ajustements du modèle. Ce travail s'est fait en validant chaque étape par rapport aux données de propriétés radiatives issues des observations par satellite.

*Simulations des climats passés* : Les résultats obtenus ces dernières années à partir de simulations des climats passés poussent à considérer les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces englacées et la végétation dans les changements de climat. L'accent est mis sur l'analyse du rôle de l'océan et des changements de végétation (cf. Braconnot et al 2003, pour une synthèse). Les simulations du climat de l'Holocène moyen et du dernier maximum glaciaire ont démarré avec la nouvelle version du modèle.

Ces simulations du dernier maximum glaciaire seront les premières réalisées en couplé à l'IPSL. Un effort particulier a porté sur l'ajustement du système en période froide. Il concerne principalement l'ajustement de l'océan et les modifications du cycle hydrologique, liés au ruissellement continental dans les régions arctiques et dans l'atlantique nord. Cette thématique est principalement développée au LSCE, mais de nombreuses analyses se font en regard des projections climatiques futures.

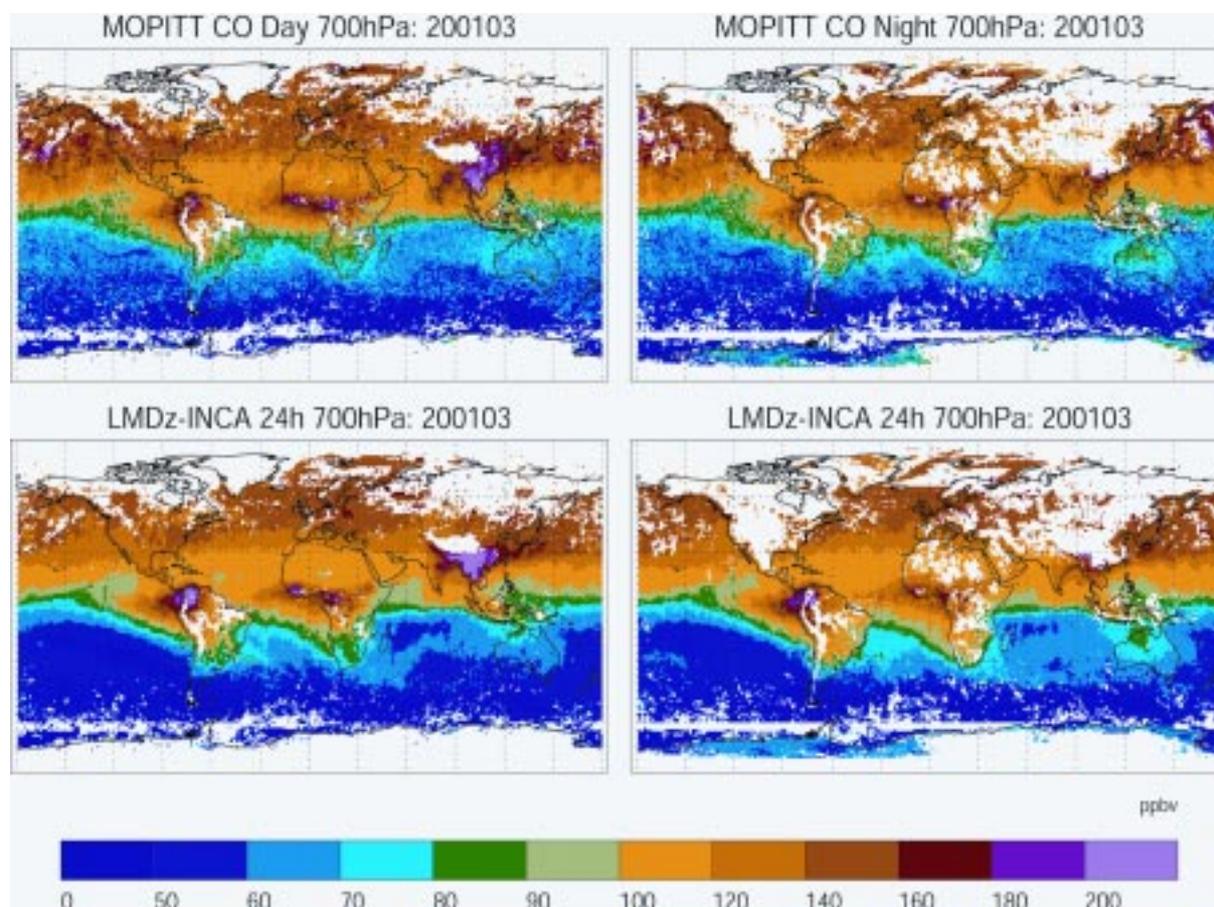
### I.1.3 - Les autres développements

a) *Le couplage chimie-climat* : Pour pouvoir quantifier les rôles respectifs des émissions anthropiques des différents gaz à effet de serre et des aérosols, il était nécessaire d'adopter une démarche incrémentale permettant le développement et l'application d'un modèle couplé atmosphère-chimie-aérosols. L'approche choisie, qui a démarré en 1999 consiste à développer un modèle modulaire dans lequel les différents composés ont été intégrés pas à pas. Ce nouveau modèle interactif de chimie atmosphérique INCA (modèle d'INteractions avec la Chimie et les Aérosols) est couplé en ligne au modèle d'atmosphère LMDZ. Le modèle INCA est appelé à chaque pas de temps physique du modèle d'atmosphère pour le calcul de la photochimie et le transport des espèces traces. Une part importante du développement du modèle LMDZ-INCA a porté sur la validation du transport atmosphérique à l'aide de traceurs, la mise au point d'une version pouvant fonctionner en mode contraint par les réanalyses du centre européen (version nudgée) et en mode zoomé, ainsi que sur les premiers développements d'une version à haute résolution verticale.

La description de LMDZ-INCA et une première évaluation globale du transport, des processus de dépôt et de l'ozone troposphérique ont donné lieu à la première publication de référence de ce modèle (*Hauglustaine et al., 2004*). La publication de la version incluant les aérosols est faite dans *Bauer et al. (2004)* et *Generoso et al. (2004)*. Nous avons maintenant mis au point une version de INCA incluant la chimie des NMHC, qui est également utilisée pour l'étude de l'impact des hydrocarbures biogéniques sur la chimie globale (*Folberth et al., 2004*). Les distributions simulées de l'ozone et de ses précurseurs troposphériques ont été évaluées par comparaison avec les mesures disponibles. La figure I.1.4 compare par exemple la distribution du monoxyde de carbone, respectivement calculée et mesurée par l'instrument MOPITT à bord de EOS/TERRA.

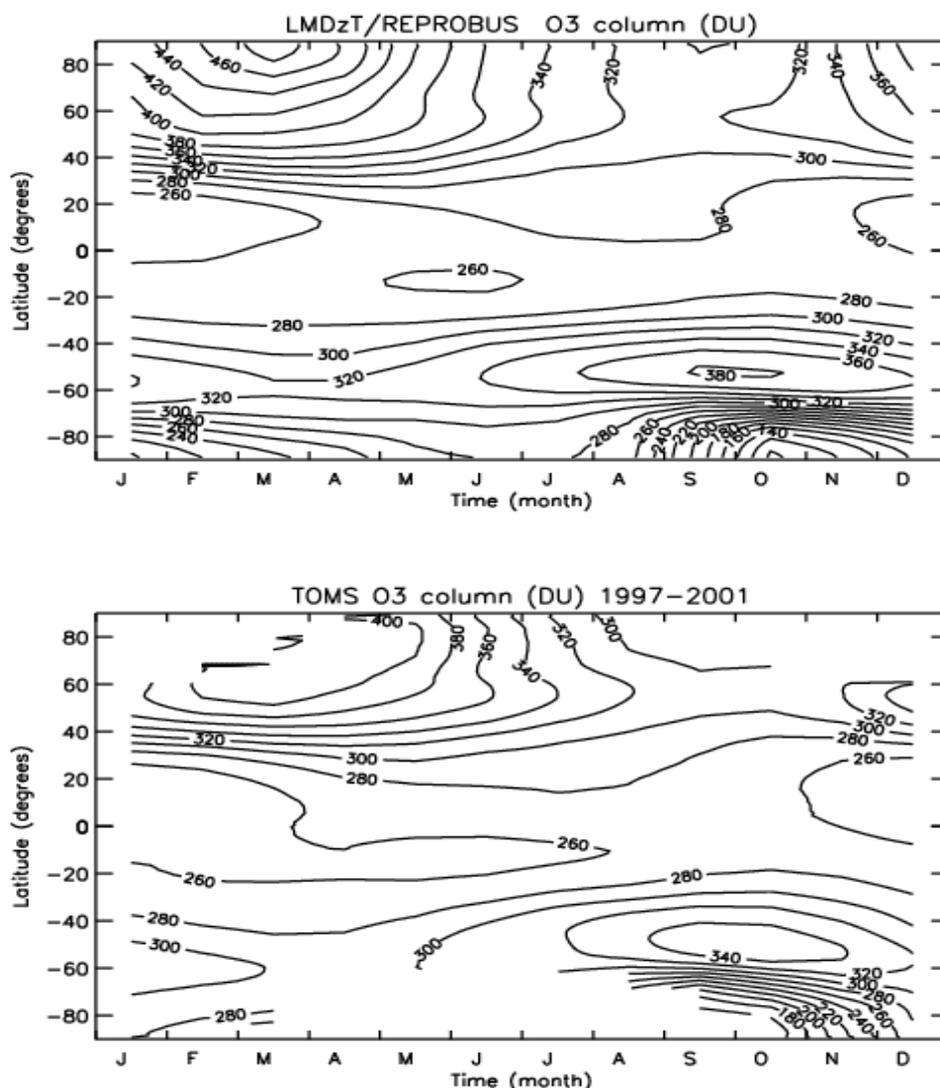
A partir des distributions des traceurs inertes introduits dans le modèle ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SF}_6$ , CFC11,  $^{85}\text{Kr}$ ) nous avons calculé un temps d'échange inter hémisphérique de 1,13-1,39 ans. Le modèle simule un brassage trop vigoureux qui tend à sous-estimer le gradient méridien des traceurs. L'évaluation des distributions de  $^{222}\text{Rn}$  calculées par comparaison avec des profils mesurés confirme ces résultats. Les nouveaux schémas de convection et de mélange dans la couche limite devraient améliorer cet aspect. Le temps de vie global du méthane dans l'atmosphère dans la version du modèle incluant la chimie des hydrocarbures non-méthanique est de 9,15 ans, une valeur en bon accord avec les estimations récentes. Les incertitudes liées à la représentation des aérosols et de leurs propriétés optiques dans les modèles sont estimées au travers d'une inter comparaison internationale, AEROCOM, regroupant 14 modèles globaux d'aérosols. Cette initiative a été prise par le LSCE dans le contexte du prochain rapport IPCC. La disponibilité de données de validation, telles que les observations spatiales, les observations photométriques (réseau Aeronet) ou par lidar (réseau EARLINET) permet de nombreux

diagnostics des différents modèles. Ces résultats sont directement accessibles via une interface web. Une synthèse des résultats montre que des modèles globaux d'aérosols ont une qualité comparable.



**Figure I.1.4** : Comparaison de la distribution du rapport de mélange de CO (ppbv) mesurée par l'instrument MOPITT au niveau approximatif 700 hPa et calculée par LMDz-INCA pour la période de mars 2001.

Une version de INCA étendue à la stratosphère est actuellement en phase de développement et d'évaluation dans le cadre d'une collaboration entre le LSCE, le LMD et le SA (cf I.1.8). L'étude des interactions chimie-climat et la simulation de l'évolution future de la capacité oxydante passent en effet par la prise en compte simultanée de la troposphère et de la stratosphère. Les premiers travaux effectués en ce sens à l'aide de LMDz-INCA sont particulièrement encourageants et monteront en puissance au sein de l'IPSL (Figure I.1.5). Ces développements se poursuivront dans le cadre du projet européen FP6/SCOUT-O3, et, par la suite, FP6/QUANTIFY.

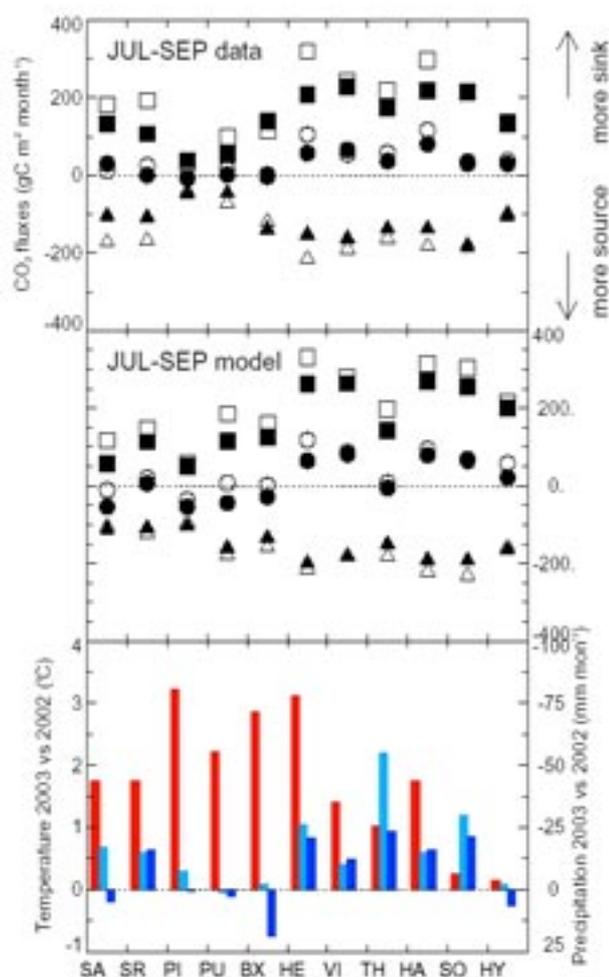


**Figure I.1.5** : Variation saisonnière de l'ozone total calculée pour la période présente à l'aide de LMDZ et comparée aux données de l'instrument TOMS

**b) Les surfaces continentales** : Les surfaces continentales constituent une composante importante du système climatique. Elles sont encore trop souvent traitées comme des interfaces 'purement' physiques entre le sol et l'atmosphère, qui transforment l'énergie solaire reçue en flux de chaleur latente et sensible. Depuis quelques années, le modèle biophysique SECHIBA s'est vu adjoindre un modèle du cycle du carbone (STOMATE), et un modèle de dynamique des écosystèmes extrait du modèle global LPJ. L'incorporation d'un cycle du carbone réaliste est la seule manière de simuler correctement le cycle foliaire saisonnier, et par conséquent tous les flux biophysiques et biogéochimiques échangés entre la surface et l'atmosphère.

Au cours de ces 4 dernières années, nous avons mis au point et stabilisé une version de référence du modèle, qui a donné lieu à la première publication (Krinner et al. in press) dans laquelle est réalisée une évaluation à l'échelle globale d'ORCHIDEE (ORGANIZING CARBON AND HYDROLOGY IN DYNAMIC ECOSYSTEMS), ainsi qu'une validation, sur un ensemble de sites du réseau FLUXNET, des flux de chaleur latente et sensible, et de la productivité primaire nette de

l'écosystème. La figure I.1.6 illustre la remarquable sensibilité de notre modèle à la sécheresse subie en 2003 en Europe (Ciais et al. soumis).



**Figure I.1.6 :** Evaluation des simulations ORCHIDEE entre les mois de Juillet et Septembre pour les années 2002 et 2003. (a) Mesures par ‘eddy-correlation’ et (b) simulations des flux bruts (carrés = photosynthèse, triangles = respiration des sols) et nets de CO<sub>2</sub> (ronds) en 2002 (sigles vides) et 2003 (sigles noirs). La photosynthèse et la productivité primaire nette de l'écosystème sont positives si le CO<sub>2</sub> est absorbé par la surface. (c) Anomalies de précipitation (estivales en bleu clair, annuelles en bleu foncé) et de température (en rouge) entre les années 2003 et 2002. Les différents sites reportés en abscisse sont, du Sud au Nord : El Saler (SA), San Rossore (SR), Pianosa (PI), Puéchabon (PU), Bray (BX), Hesse (HE), Vielsam (VI), Tharandt (TH), Hainich (HA), Soroe (SO) and Hyytiala (HY).

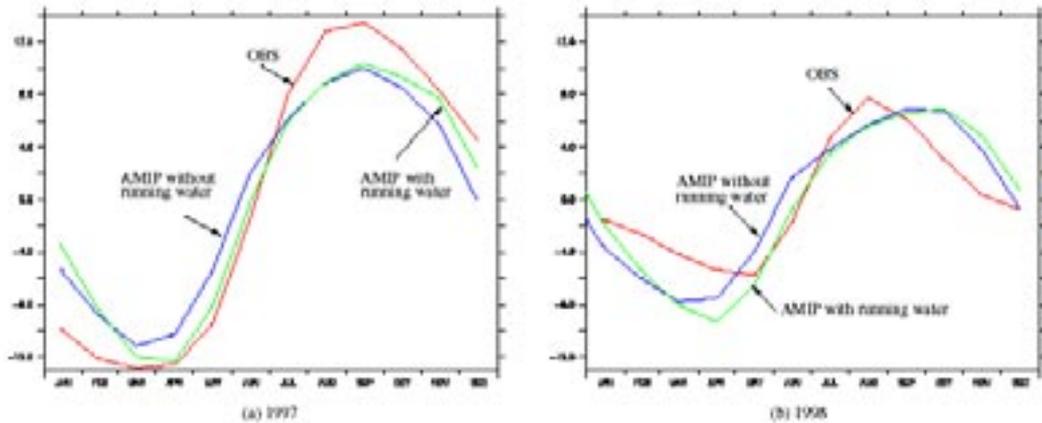
Parallèlement à ce travail, nous avons assisté à une évolution importante de la masse critique de chercheurs, étudiants et ingénieurs s'impliquant dans le développement et les applications de ce code, à diverses échelles spatiales (du site au globe), et diverses périodes climatiques (paléoclimats, climat présent et changement climatique futur). Nous avons donc mis en place une gestion d'ORCHIDEE sous CVS afin de pouvoir suivre, d'une part, la version de

référence (1.3), d'autre part, les développements multiples. Nous avons également développé, et mis à la disposition de tous, des utilitaires permettant 1) d'évaluer rapidement toute nouvelle version du code pour un ensemble de sites sur lesquels nous disposons de données de forçage et de validation, et 2) de la comparer aux versions précédentes (sur ces mêmes sites ainsi qu'à l'échelle globale à partir d'un atlas regroupant une grande partie des variables simulées. Cet atlas sert également de lien entre les simulations des bilans de surface produites par le modèle couplé IPSLCM4, et ceux issus de simulations d'ORCHIDEE forcé par une climatologie prescrite, afin d'évaluer l'impact du couplage surface-atmosphère sur ces bilans et sur les flux à l'interface.

D'autres études réalisées de façon indépendante ont aussi donné des résultats intéressants. Les développements associés seront progressivement intégrés dans la version de référence. En particulier, divers travaux réalisés sur le module hydrologique ont été utilisés pour quantifier le rôle de la résolution spatiale dans la détermination du bilan hydrologique en Espagne (Vérant et al. 2004) et dans la vallée du Rhône. Ils concernent (i) développement d'un schéma de routage de l'eau de surface et de sub-surface (J.Polcher, communication personnelle) et (ii) l'incorporation du modèle d'hydrologie multi-couches développé par de Rosnay et al. (2002). Un modèle permettant de calculer l'irrigation et son effet sur le climat a été introduit dans ORCHIDEE par de Rosnay et al. (2003) et testé en mode couplé avec l'atmosphère.

Les simulations réalisées ont montré que non seulement les zones irriguées subissaient un accroissement de précipitation mais également une région bien plus étendue aux alentours (Culson et al, 2004). Des recherches novatrices concernant la variation interannuelle du contenu en eau des continents ont été entreprises grâce à une collaboration avec A.Cazenave (LEGOS, Toulouse). Les résultats des simulations ont été comparés aux données de Topex-Poseidon. Nous avons ainsi montré l'importance de la région tropicale dans cette variabilité interannuelle (Ngo-Duc et al. 2004a, figure I.1.7). Un dernier développement majeur a été accompli grâce à la création d'une nouvelle base de données de précipitations et d'états atmosphériques sur 50 ans en vue de déterminer le bilan hydrologique sur la planète (Ngo-Duc et al., soumis). Les études en cours étudient les tendances de bilan sur les surfaces continentales et les effets sur le niveau de la mer. Cette banque de données sera très précieuse pour évaluer les bilans hydrologiques des bassins versants et les comparer aux résultats de la Mission GRACE.

Les *surfaces fortement anthropisées* (cultures céréalières et prairies gérées dans un premier temps) étaient, jusqu'à présent, traitées comme des prairies naturelles dans ORCHIDEE, alors que leur fonctionnement est assez différent compte tenu de l'ingérence de l'agriculteur dans leur cycle. Nous avons donc choisi, pour améliorer la simulation des divers flux et bilans sur ces surfaces, de faire appel à des modèles spécifiques : le modèle agronomique STICS pour les sites céréalières (Gervois et al., sous presse, de Noblet-Ducoudré et al. sous presse), et le modèle PASIM pour les prairies gérées



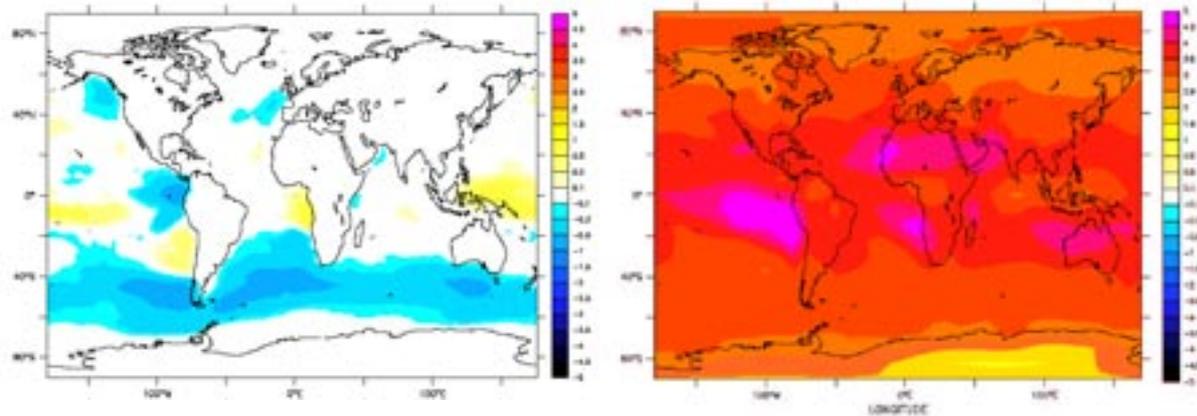
**Figure I.1.7 :** Contribution de l'eau continentale aux variations du niveau de la mer en 1997 et 1998. Les courbes rouges sont les observations dérivées 1) des mesures du satellite Topex-Poséidon, 2) des mesures in-situ de la température de l'océan et 3) des estimations de la vapeur d'eau dans l'atmosphère issues des réanalyses NCEP/NCAR. Les courbes bleues et vertes sont respectivement les sorties des simulations ORCHIDEE avec et sans routage de l'eau continentale. L'amélioration de la phase des courbes vertes comparée aux courbes bleues montre l'avantage du schéma du routage (Ngo-Duc et al., 2004a).

Enfin, pour faire le *lien avec la chimie atmosphérique* (modèle INCA), des paramétrisations d'émission de plusieurs composés organiques volatils (e.g. isoprènes, monoterpènes, méthanol) par la végétation, et d'oxyde d'azote par les sols ont été introduites dans ORCHIDEE (Lathière et al. en préparation).

**c) Le couplage océan-biogéochimie marine:** La modélisation de la biogéochimie marine à l'IPSL s'appuie sur plusieurs outils et les thématiques abordées par les chercheurs de l'Institut sont nombreuses dans ce domaine. Plusieurs des thèmes abordés ne sont pas spécifiquement reliés à l'étude de l'évolution du climat. De nombreux chercheurs, en particulier au LODyC, se sont intéressés spécifiquement à différentes régions de l'océan mondial (Pacifique Equatorial, Atlantique Nord, Atlantique Tropical, Chili-Pérou, Méditerranée...). Un chantier important concerne le rôle de la petite échelle (sub-méso et méso-échelle) sur la biogéochimie marine (Levy 2003, Levy et Klein 2004, ...). La modélisation des traceurs (CFC, Helium, radio-carbone) a aussi été utilisée pour diagnostiquer/ valider la circulation océanique simulée par le modèle océanique de l'IPSL, OPA (Dutay et al. 2004, Dutay et al. 2003, Rodgers et al. 2004).

Le couplage de la biogéochimie marine au système climatique en vue d'aborder la question des rétroactions climat-biogéochimie marine a également progressé, en partie grâce au travail fourni en amont (étude régionales, utilisation de traceurs, ...). Le modèle biogéochimique de l'océan mondial utilisé, PISCES, a bénéficié de nombreuses avancées, principalement en terme de représentation de l'écosystème avec la prise en compte de plusieurs groupes fonctionnels de phytoplancton et de la co-limitation par plusieurs éléments nutritifs (Aumont et al. 2003). Ces avancées concernent aussi la représentation de la zone aphotique (processus dans la colonne d'eau jusqu'au sédiment).

Les premières études menées à l'IPSL concernant ce couplage biogéochimie marine-climat se sont focalisées sur le cycle du carbone, pour l'anthropocène (Friedlingstein et al. 2001, Dufresne et al. 2003, Friedlingstein et al. 2003) et pour la période du Dernier Maximum Glaciaire (Bopp et al. 2003). En collaboration avec des chercheurs du LOA (Lille), nous nous sommes aussi intéressés au cycle du soufre et à l'effet du changement climatique sur les émissions marines de DMS (Bopp et al. 2003) et sur l'effet radiatif associé (Bopp et al. 2004) (cf. Figure I.1.8). Enfin, toujours en utilisant le modèle PISCES, nous avons commencé à aborder l'étude des effets biophysiques de la biologie marine sur la circulation marine et sur le climat, en particulier en ce qui concerne le Pacifique Tropical. Des modifications substantielles de l'état moyen (réchauffement des eaux de surface, refroidissement en sub-surface) et du cycle saisonnier (renforcé) ont été mises en évidence dans le Pacifique Tropical.



**Figure I.1.8** : Effet radiatif (à 2xCO<sub>2</sub>), lié aux modifications par le changement climatique des émissions marines de DMS (à gauche) et lié à l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique (à droite). Les unités sont des W/m<sup>2</sup>

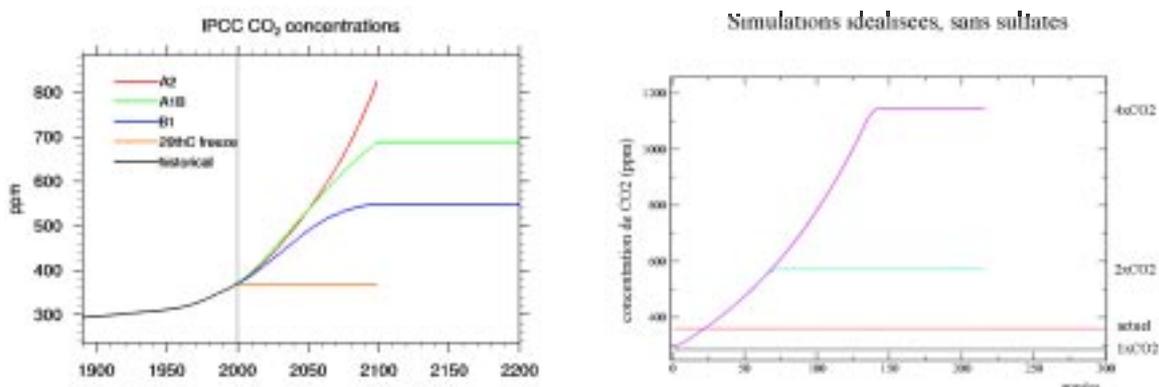
#### I.1.4 - Thématiques scientifiques coordonnées par le pôle de modélisation

Les activités scientifiques directement coordonnées par le pôle de modélisation concernent principalement deux thématiques, liées entre elles par l'analyse de scénarios climatiques, soit à l'échelle globale (groupe 20<sup>e</sup>-21<sup>e</sup>), soit à l'échelle régionale (groupe régionalisation).

*a) Simulations 20<sup>ème</sup> - 21<sup>ème</sup> siècles* : Le principal objectif du groupe 20<sup>ème</sup>-21<sup>ème</sup> siècle du Pôle de Modélisation du Climat consiste à quantifier les rôles respectifs de différentes perturbations anthropiques et à estimer la réponse du système couplé (climat-cycle) à ces perturbations, et ce pour la période historique et pour le futur. Différents axes de recherche sont privilégiés et correspondent à des configurations particulières du modèle de climat de l'IPSL. Ils concernent l'étude du changement climatique et celle des changements de variabilité et de dynamique du climat associé, ainsi que la quantification des principales rétroactions climatiques

(nuages-vapeur d'eau, cycle hydrologique-salinité, hautes latitudes) et de leurs incertitudes. Il s'agit aussi d'intégrer de nouvelles composantes dans le système climatique de manière à estimer leur rôle et, le cas échéant, leur rétroactions vis à vis du changement climatique futur. Ces études concernent l'utilisation des sols, le cycle du carbone continental et océanique, la chimie et les aérosols (BC, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, ...). Elles s'articulent autour des simulations réalisées dans le cadre du 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (IPCC-AR4). Il s'agit des simulations suivantes (figure I.1.9):

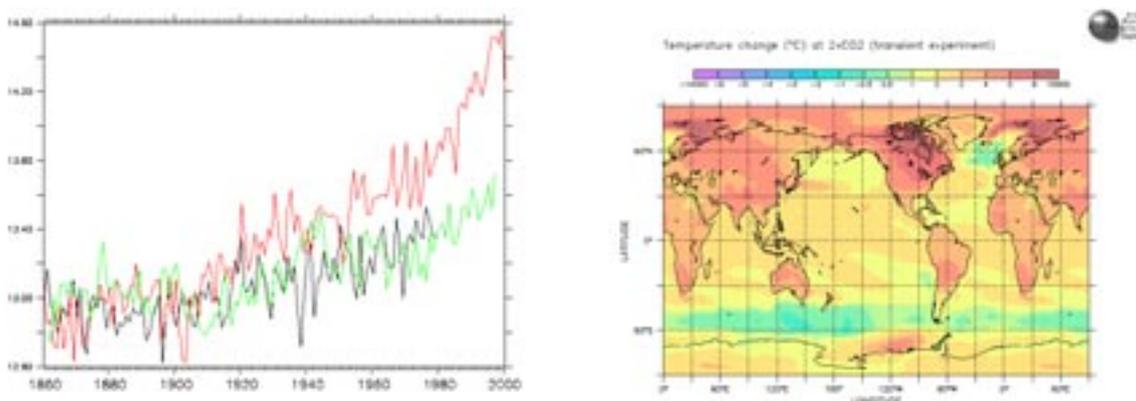
- Simulation "historique" (1860-2000), avec les aérosols sulfatés et les concentrations observées des gaz à effet de serre.
- Simulation future (2000-2100) avec stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés à la valeur 2000.
- Simulation future (2000-2100) avec évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés suivant le scénario SRES-B1
- Simulation future (2000-2100) avec évolution des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés suivant le scénario SRES-A1B
- Simulation de contrôle, avec les concentrations actuelles (1980) des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés.
- Simulation de contrôle, avec les concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés de l'époque préindustrielle (année 1860)
- Simulation type CMIP : accroissement idéalisé de CO<sub>2</sub> et stabilisation à 2xCO<sub>2</sub> et 4xCO<sub>2</sub>



**Figure I.1.9:** Représentation de l'évolution de la teneur atmosphérique en gaz carbonique associée aux différents scénarios climatiques devant être réalisés pour le GIEC. Scénarios de référence (gauche), scénarios complémentaires ou idéalisés (droite)

Des diagnostics sont effectués automatiquement « en ligne ». Ils concernent des séries temporelles, des moyennes saisonnières, annuelles, par décennie, ... ainsi que des calculs d'indices climatiques les plus utilisés par la communauté étudiant les impacts climatiques. Les sorties de ces simulations sont disponibles par DODS via la page web du projet MC<sup>2</sup> (<http://mc2.ipsl.jussieu.fr/simules.html>). En outre, ces simulations seront mises à la disposition

de la communauté scientifique internationale via IPCC (archives au PCMDI). La figure I.1.10 montre d'une part le réchauffement obtenu au moment du doublement de  $\text{CO}_2$  pour la simulation CMIP, de l'autre son évolution temporelle avec des caractéristiques classiques telle l'augmentation plus importantes des températures sur les continents de l'hémisphère nord, dans les régions enneigées. Un léger refroidissement apparaît en Atlantique nord. Il est associé à une forte réduction de la circulation thermohaline de l'océan qui tend à ralentir le réchauffement dans cette région. La simulation incluant les aérosols sulfatés reproduit bien l'augmentation de température observée au long du 20<sup>e</sup> siècle. La comparaison avec la simulation n'incluant pas l'effet des sulfates confirme le rôle important joué par les aérosols dans les dernières années.



**Figure I.1.10:** Evolution de la température de surface sur la période historique (gauche) pour la simulation avec gaz à effet de serre et aérosols (en vert) et sans aérosols (en rouge). Les observations sont en noir. Changement de température de surface pour un doublement de  $\text{CO}_2$  obtenu pour la simulation CMIP (droite).

Plusieurs analyses ont démarré. Elles concernent pour le moment les simulations de contrôle. En particulier, des comparaisons avec les observations sont effectuées pour la variabilité saisonnière à interannuelle tropicale (Atlantique et Pacifique pour l'instant). Une analyse fine des rétroactions radiatives a été effectuée en séparant les composantes thermodynamiques et radiatives pour les régions tropicales. Des analyses ont également été menées afin d'estimer les rétroactions aux hautes latitudes liées à la représentation de la surface (en particulier le rôle du gel du sol), ainsi que les rétroactions du cycle hydrologique liées à la salinité (en isolant les différents flux d'eau douce). Un modèle théorique simplifié de la circulation aux moyennes latitudes a été développé afin de comprendre son évolution sous l'impact du changement climatique.

Au niveau des cycles biogéochimiques, des simulations offline (océan) ont été réalisées afin de simuler le cycle du carbone en équilibre avec le climat de contrôle, ainsi que des simulations LMDZ-ORCHIDEE (à SST fixes) pour le carbone continental. Le rôle de l'utilisation des sols est en cours d'introduction dans le modèle couplé. Une première quantification de l'impact radiatif de l'utilisation des sols a été obtenue à partir de simulations

ORCHIDEE. Au niveau de la chimie et des aérosols, les simulations GIEC en cours de réalisation incluent l'effet direct et le 1<sup>er</sup> effet indirect des aérosols sulfatés, leur concentration étant prescrite. Les autres aérosols sont inclus dans la version LMDZ-INCA, leur introduction dans la version de référence est en cours.

L'activité de ce groupe fait l'objet d'un investissement dans différents projets. Les différentes actions font partie du projet MC<sup>2</sup> (ACI-FNS, coordinateurs P.Friedlingstein, LSCE, et J.L.Dufresne, LMD). Des analyses croisées entre les simulations réalisées par l'IPSL et par Météo-France seront réalisées dans le cadre du projet français ESCRIME (action directement suivie par le Conseil Scientifique du Pôle, cf I.1.6). Enfin, au niveau européen, ces activités rentrent dans le cadre du projet ENSEMBLES (FP6) coordonné par le Hadley Center (responsable IPSL : H. Le Treut). Ce projet intégré, dont l'objectif est de munir l'Europe d'un système de prévision climatique couvrant les échelles de temps saisonnières à multidécennales, regroupe 70 partenaires. Il intègre des simulations climatiques globales et régionales, des liens avec les modèles d'impact (agriculture, industrie), une concertation avec les économistes, et un volet formation. D'autres projets conduits dans les différentes équipes viennent renforcer des aspects scientifiques plus spécifiques.

*b) Exploitation des scénarios à l'échelle régionale :* La régionalisation de scénarios climatiques est une étape incontournable pour mener des études sur les impacts du changement climatique. L'activité, animée par le pôle autour des scénarios régionaux s'est focalisée sur l'étude des changements climatiques naturels et anthropiques en Europe et Méditerranée. La région Méditerranée est une région très peuplée et active où les incidents climatiques peuvent entraîner d'importantes conséquences économiques. C'est une zone de transition entre un climat chaud et sec au sud et un climat doux et humide au nord. Elle est très sensible et vulnérable au changement climatique. Le cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen et la façon dont il est modifié sous l'impact de différentes perturbations anthropiques (gaz à effet de serre, aérosols d'origine anthropique) est le point central dans nos études.

Dans l'état actuel de la recherche, les prévisions des différents modèles globaux sont concordantes à l'échelle continentale, mais elles divergent nettement dans leurs détails aux échelles locales, voire régionales. Néanmoins, une certaine cohérence parmi les différents modèles a été observée sur la région Europe - Méditerranée et les tendances réellement observées corroborent les résultats modélisés. Lors d'un réchauffement global, l'anticyclone des Açores semble se renforcer et s'étendre sur une zone plus large. Sous l'influence de l'anticyclone, le bassin méditerranéen connaît une diminution des pluies. Le gradient méridien de pression sur l'Atlantique du nord est aussi renforcé, tout comme le gradient méridional de température dans les hautes couches de l'atmosphère. Ceci a pour effet de renforcer la route dépressionnaire nord-atlantique et de décaler cette zone de dépression vers le nord. Ainsi des perturbations qui arrivent sur le nord du continent européen sont plus nombreuses et plus

fortes. Le nord de l'Europe voit donc une augmentation de pluie. Le contraste hydrologique entre le nord et le sud de l'Europe est ainsi accentué. Les études utilisent une série d'outils qui ont été récemment développés pour modéliser les différentes composantes du système climatique régional du bassin méditerranéen, le modèle LMDZ zoomé sur la Méditerranée à 80 ou 50 km, et une configuration du modèle d'océan OPA pour la mer Méditerranée (MED8, huitième de degré).

Les scénarios du changement climatique global A2 (nomenclature IPCC) produits par quatre modèles globaux du système climatique couplé océan-atmosphère, développés respectivement à IPSL, à Météo-France, au GFDL et au NCAR, ont été régionalisés en utilisant LMDZ avec une résolution spatiale de 80 km. L'utilisation de ces 4 scénarios permet de mieux cerner les incertitudes liées aux différents modèles physiques utilisés. Une simulation de contrôle puis des simulations représentant le milieu et la fin du 21<sup>e</sup> siècle ont été réalisées en mode climatologique avec les conditions aux limites moyennées respectivement sur 1970/1999 (climat actuel), 2030/2059 (climat futur proche) et 2070/2099 (climat futur lointain). Ce choix du mode climatologique plutôt que couplé est principalement dû aux faibles ressources informatiques disponibles.

Le modèle LMDZ qui fonctionne en mode guidé est également utilisé pour effectuer une validation par rapport aux données. Le facteur du zoom est de 3 et la résolution du modèle atteint les 50 km ce qui ouvre des perspectives de validation par rapport aux données acquises pendant les campagnes de terrain. La comparaison avec les données Météosat pleine résolution est entamée, mettant déjà en évidence des dynamiques différentes dans l'évolution temporelle de la couverture nuageuse du modèle et de celle déduite de Météosat.

*c) Journées spécifiques* : Au-delà de la coordination des activités liées au changement climatique futur, de nombreuses journées thématiques scientifiques ont été organisées dans le cadre du Pôle. Elles concernent des activités scientifiques, la formation aux outils de l'IPSL ou la diffusion d'information. Les journées thématiques ont concerné le groupe régionalisation, avec la mise en place du projet medWater sur la méditerranée, la prospective du Pôle de Modélisation du Climat, ou les premières analyses des résultats du modèle couplé. Signalons également la mise en place d'un atelier "Tropiques" (responsable J.P.Duvel, LMD) permettant de discuter les résultats obtenus par les différentes personnes de l'IPSL s'intéressant au climat des régions tropicales.

Une demande de formation sur les outils et le modèle couplé de l'IPSL a émergé lors des journées du Pôle organisées à Trouville en 2002. La première journée (avril 2003 à l'IDRIS) intitulée « Prise en main du modèle couplé de l'IPSL » a permis de mettre en place des travaux pratiques pour la visualisation. Une vingtaine de personnes y ont assisté. Les journées de formation suivantes se sont focalisées sur le modèle couplé lui-même : comment accéder aux programmes sources du couplé, comment le compiler, comment (re)exécuter la simulation de

référence, comment se repérer dans les fichiers de résultats, comment lancer les post-traitements automatiquement, ... Les supports de ces formations sont accessibles sur le serveur de l'IPSL: et une note technique détaillée permet de prendre en main facilement le modèle. De plus, de nombreux exposés techniques ont été réalisés, entre autres sur le Earth Simulator, sur l'IBM du Centre Européen et sur UNICORE.

**d) Liens avec CLIMPACT :** La société CLIMPACT est une "start up" issue de l'IPSL qui se spécialise dans le conseil en climatologie. L'accord entre l'IPSL et CLIMPACT prévoit l'exploitation par CLIMPACT des scénarios réalisés à l'IPSL. Nous illustrons cette collaboration par l'étude réalisée pour la société Nestlé Waters. Cette société est responsable de l'exploitation et de la commercialisation d'eaux minérales issues de plusieurs sources françaises et étrangères. Sur l'une de celle-ci (région de Plancoët en Bretagne) l'apport est principalement influencé par les précipitations. Or, les variations annuelles et saisonnières enregistrées dans les niveaux de l'eau souterraine sont susceptibles d'influer sur l'approvisionnement en eau de la source.

La société Climact à été chargée de l'étude de l'évolution des précipitations sur cette région pendant la période historique (1885-2003) et pour la période future (2003-2100). Entre 1885-2003, les observations sont issues de Météo-France. Sur les années 2003-2100, les prévisions sont issues de la simulation couplée climat-carbone de l'IPSL (IPSL-CCM2). Sur ces deux périodes, les principales caractéristiques des précipitations ont été analysées, en considérant la tendance, la variabilité, les évènements extrêmes ainsi que l'influence des précipitations saisonnières sur les précipitations annuelles. Les cycles de grande échelle observés au-dessus de l'Atlantique Nord sont corrélés avec l'apparition d'évènements extrêmes. Nous montrons comment les précipitations sont influencées par ces phénomènes pour la région concernée sur la période historique et comment ces résultats sont exploitables pour le futur.

## **I.1.5 - Coordination des infrastructures**

Le modèle IPSL du système climatique s'appuie sur une infrastructure logicielle, commune avec les composantes et adaptée aux calculateurs utilisés. Dans la pratique cela représente un travail lourd que chacun des groupes de travail n'a pas toujours mis en priorité. Pour pouvoir faire évoluer cette infrastructure en fonction des différents besoins et des avancées technologiques, le pôle de modélisation a assuré une veille technologique et l'investissement dans le projet européen PRISM ou la prospective sur les moyens de calcul ont été directement coordonnées par le conseil scientifique du Pôle de Modélisation du Climat.

**a) Projet PRISM :** Le projet PRISM, projet européen de 3 ans (terminé depuis le 30 novembre 2004), avait pour objectif principal de définir, développer, déployer et tester l'infrastructure logicielle nécessaire à la préparation et au lancement de simulations d'ensembles

multi-modèles du système Terre. L'infrastructure développée au cours du projet a comme objectif d'aider à standardiser le couplage des différents modèles européens. PRISM a ainsi permis de mener une réflexion sur les interfaces physiques qui a conduit à la proposition d'une interface standard. Une infrastructure logicielle autour des modèles a été développée. Elle comprend le coupleur qui permet d'échanger les champs et de faire dialoguer les différents modèles entre eux, une arborescence des différents codes source nécessaires à l'exécution d'une simulation couplée, un système de compilation des modèles, un système d'exécution, une possibilité d'implémentation de post-traitement des résultats des simulations au cours de l'exécution, une interface graphique de lancement des simulations. L'ensemble de ce système bénéficie de facilité de portage et d'optimisation des performances sur une grande variété de calculateurs. La dernière partie du projet a consisté à tester le système proposé en mettant au point différentes configurations de modèles (à partir des différents modèles développés en Europe).

Au cours du projet, l'IPSL a participé à la standardisation et aux définitions initiales des différentes actions. Ceci a permis de proposer des solutions pour l'interface physique, de participer aux spécifications de l'environnement de couplage et de promouvoir une architecture logicielle (OpenDAP/DODS) pour l'accès et le partage à distance des données. Les différents modèles ont été adaptés au système PRISM et les environnements de compilation et d'exécution nécessaires ont été mis en oeuvre sur les centres de calcul auxquels nous avons accès (IDRIS, CEA/CCRT, Earth Simulator). Les tests comparatifs du modèle de l'IPSL ont été effectués sous les environnements MODIPSL et PRISM. L'IPSL a également réalisé plusieurs développements et installations de logiciels. D'autres partenaires du projet ont également contribué à la mise en conformité PRISM des modèles de l'IPSL en ce qui concerne la glace de mer et la bio-géochimie marine.

Tous les éléments proposés par PRISM ne sont pas arrivés à état de maturité à l'issue du projet. Une action a été entreprise en vue de poursuivre des actions PRISM au niveau européen. L'IPSL participe activement à cette initiative. En parallèle, une évaluation détaillée doit déterminer les développements qui entreront en standard dans les prochaines versions de l'infrastructure IPSL.

**b) Bilan calcul :** Les activités du pôle nécessitent des ressources informatiques lourdes qui lui sont fournies par l'IDRIS et le CEA/CCRT. Outre les calculateurs, les systèmes de fichiers et les possibilités de post-traitement sont primordiaux et doivent évoluer de concert avec les moyens de calculs. Enfin le poste de travail du scientifique reste un poste individuel, habituellement sous Linux, qui doit lui permettre d'accéder aisément et rapidement aux ressources de calculs distribués et aux serveurs de fichiers. Les 2 tableaux ci-après font état des ressources attribuées à l'IPSL sur les calculateurs de l'IDRIS et du CEA/CCRT, avec, pour l'IDRIS, l'évolution sur les 5 années.

IDRIS			CEA		
Heures NEC SX-5	Heures IBM SP4	Fichiers	Heures NEC SX-6	Heures HP	Fichiers
106 790 h	23 500 h	60 To	82 920 h	12 500 h	30 To

### **Attributions de ressources 2004 IPSL**

CP1	2000	2001	2002	2003	2004
NEC SX-5 IDRIS	47 000 h	70 000 h	85 000 h	107 000 h	140 000 h

### **Historique des attributions du CP1 «environnement» à l'IDRIS incluant l'IPSL**

Lors de la présentation du Pôle au Conseil Scientifique de l'OSU, en juin 2003, nous avons attiré l'attention des tutelles de l'IPSL sur le besoin de réactualiser la prospective calcul. En effet, le NEC SX-5 de l'IDRIS a été installé en 2000 et sa saturation se présentait. La situation actuelle (fin 2004) est critique à l'IDRIS et la mise en œuvre de nouvelles configurations plus gourmandes en temps de calcul ou en mémoire devient impossible. Nous avons aussi de grandes difficultés à suivre les simulations qui restent plusieurs mois en machine. Dans le même temps, le renouvellement des calculateurs du CEA (arrivée du NEC SX-6) a permis de distribuer les simulations lourdes entre les 2 centres. Par ailleurs, la situation comparée avec les ressources calculs dont nous disposons et celles accessibles par nos partenaires anglais et allemands montre un décalage qui s'amplifie, et cela sans prendre en compte le Earth Simulator (Japon) ou les projets américains.

Nos inquiétudes et nos besoins ont été exprimés à diverses reprises, auprès du groupe Simulation de l'Académie des Technologies, aux représentants français de l'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures), à P.Mascart, président du groupe GEPCI2 (Groupe d'Etudes pour le Calcul Intensif 2, INSU) puis à ce groupe. Enfin, nous avons participé à la journée enjeux des simulations extrêmes pour les études sur le climat, organisée par J.C.André en septembre 2004. Ces différents exercices de prospective montrent que, pour atteindre les objectifs affichés par l'IPSL dans le domaine de la modélisation du climat, une puissance de calcul équivalente à celle de 100 processeurs NEC est nécessaire dès maintenant et qu'elle devra être doublée à échéance de 2 ans. Cela signifie que nous devons utiliser d'autres calculateurs et que les modèles de l'IPSL doivent avoir de bonnes performances sur tout type de machine (du PC à l'Earth Simulator). La parallélisation du modèle couplé (travail en cours) doit être effective au plus vite. Enfin, des coopérations avec le Earth Simulator sont possibles et encouragées. Ce constat est partagé par les spécialistes en calcul en France mais notre communauté doit rester mobilisée pour faire entendre ses besoins.

### **I.1.6 - La stratégie commune Météo-France/IPSL**

**a) Mise en place d'un projet commun pour la réalisation et l'exploitation des scénarios climatiques** : L'IPSL et Météo-France ont pour objectif commun d'étudier l'impact des activités humaines sur le système climatique. Bien que l'objectif général des deux groupes soit identique, chacun développe une activité de recherche sur des aspects originaux et complémentaires de l'étude de l'impact des activités humaines sur le climat. Comme l'illustre le bilan ci-dessus, l'IPSL développe un ensemble de thématiques permettant d'analyser et de quantifier le rôle des interactions entre le système climatique et les cycles biogéochimiques. Bien que s'intéressant aux rétroactions du système climatique dans son ensemble en liaison avec le cycle hydrologique et les processus de surface, le projet de Météo-France met, quant à lui, davantage l'accent sur des études aux échelles régionales. Cela concerne à la fois des études de variabilité climatique (Atlantique Nord-Europe, régions de moussons, régions polaires), le développement d'une méthodologie de régionalisation dynamique des changements climatiques, et des études de détection et d'attribution des changements climatiques aux échelles régionales en collaboration avec le CERFACS.

La stratégie commune se découpe en trois volets : (i) la mutualisation des forçages appliqués dans les simulations, (ii) l'analyse commune des résultats (iii) la mise en commun de modules numériques. Cet effort commun a été mis en place pour la réalisation, la diffusion et l'analyse des simulations réalisées pour le GIEC (cf I.1.4). Ces simulations représentent un effort sans précédent qui mobilise fortement les ressources de calcul (48000 heures monoprocesseur pour l'IPSL, 40000 heures pour Météo-France). La mise en place des simulations scénarios s'est fait en forte intégration entre les deux groupes. Un effort est en cours pour faciliter l'accès aux données des ces simulations. Un projet d'analyse des simulations a aussi été lancé pour favoriser une exploitation scientifique de haut niveau de cet ensemble de données. Cette initiative fait pendant à la démarche lancée au travers du projet CMIP pour l'analyse des scénarios climatiques et est détaillée dans la partie prospective.

**b) Le projet de physique commune** : Météo-France et l'IPSL se sont concertés en vue de développer une bibliothèque commune de paramétrisations physiques compatibles avec les deux modèles. Ce projet pluriannuel initié à la fin de l'année 2002 s'est développé au cours de l'année 2003 avec notamment l'affectation d'un ingénieur de Météo-France à l'IPSL/LMD. Les premières actions consistent à mettre en place un outil de modélisation unidimensionnel destiné à évaluer les schémas de paramétrisation à partir de différents jeux de données expérimentaux. L'inventaire des cas disponibles permettra de définir les expériences les mieux adaptées pour les études d'intérêt commun. Les développements possibles de paramétrisations communes ont été recensés. Le travail qui sera mené dans les prochaines années devrait voir une convergence entre les deux modèles pour les modules traitant le rayonnement et les ondes. Les paramétrisations de couche limite, convection et nuages continueront dans un premier temps à

être développés dans chaque groupe, en veillant à développer des interfaces rendant les paramétrisations facilement adaptables d'un modèle à l'autre. Ces développements constituent une base pour l'évolution des modèles et la préparation des jeux de scénarios suivants.

Il a été décidé de se concentrer dans un premier temps sur une version 1D commune et d'analyser les deux physiques sur un ensemble choisi de cas test. Trois blocs ont été bien identifiés, « onde », « rayonnement » et « couche limite-nuage-convection ». La modularité entre ces blocs doit être définie. Il a également été décidé de commencer un travail sur la partie radiative à travers une interface commune avec les codes radiatifs. Les résultats concrets sont les suivants:

- modification de la version 1D d'Arpège pour l'interfacer avec la physique de LMDZ ; validation des résultats.
- dans ce cadre, début de comparaison et d'analyse des résultats pour une configuration Toga COARE
- adaptation de cette version 1D pour pouvoir ne réaliser que les calculs radiatifs.
- introduction de profils atmosphériques standards et réponse en commun à l'exercice d'intercomparaison des codes radiatifs dans le cadre du prochain rapport du GIEC.

### **I.1.7 - Conclusion.**

L'ensemble des activités coordonnées par le pôle de modélisation ces dernières années a permis de mieux identifier un projet inter-laboratoire sur l'étude du changement climatique et de fédérer les développements et les besoins importants autour des différents modèles du système climatique de l'IPSL. Les études autour des cycles biogéochimiques et les développements de modèles associés sont en plein essor. La composante climatique a connu une période plus difficile avec le développement du nouveau modèle de l'IPSL, qui a démarré dans une période de sous-effectif important, tant au niveau du support en ingénierie qu'au niveau du nombre de chercheurs impliqués dans le développement. La nouvelle version du modèle a des performances très honorables et le travail de cette dernière année montre qu'une nouvelle dynamique scientifique est en train de se mettre en place.

## I.2 - Pôle de Planétologie

Le Pôle de Planétologie, créé à la fin 2000, comporte une cinquantaine de chercheurs, dont un tiers de non-permanents (thésitifs, postdocs), se répartissant dans trois des laboratoires de l'IPSL : CETP, LMD, SA. Un nombre conséquent de ces chercheurs consacrent également une partie de leur temps à des recherches sur l'environnement de la Terre, et de sa magnétosphère, et la force de travail du Pôle est plutôt de 35 chercheurs-an. Les coopérations, amplifiées ou amorcées depuis 4 ans, se font essentiellement au travers de coopérations SA-CETP (interactions plasmas-planètes, magnétosphère, techniques de la spectrométrie de masse, analyse in-situ) et SA-LMD (physicochimie des atmosphères neutres, techniques de la télédétection). Certaines thématiques, comme l'étude des comètes ou du milieu interstellaire, ou la compréhension de la dynamique magnétosphérique terrestre, relèvent plus spécifiquement d'un seul laboratoire (SA et CETP, resp.). Les actions inter-laboratoire en cours portent, d'une part sur le couplage entre modèles (par exemple circulation générale- chimie- aérosol, ou ionosphère- exosphère- vent solaire), d'autre part sur le développement de capteurs faisant appel aux compétences de différents laboratoires (SA, CETP dans l'IPSL, MAGIE, LISA hors IPSL, pour l'analyse in situ par spectrométrie de masse couplée à des techniques de séparation). Par ailleurs, nous développons, en vue d'interpréter les résultats des expériences spatiales, des simulateurs expérimentaux, pour lesquels l'IPSL a fourni un soutien financier précieux.

La dynamique de rapprochement qui a accompagné et suivi la formation du Pôle a renforcé et accéléré la mise en place d'actions de planétologie dans l'IPSL. Dans le domaine spatial, l'indéniable force de proposition du Pôle s'est traduite, dans le cadre du programme Mars Premier, puis sur d'autres missions (BepiColombo, MSL et Pasteur/Exomars vers Mars), par une vingtaine de propositions spatiales dans les quatre dernières années, dont une moitié associant au moins deux laboratoires de l'IPSL. Quatre contributions à BepiColombo, dont une expérience PI, ont été sélectionnées. Une dizaine d'actions de R&T financées par le CNES ont été menées. Une base de données « atmosphère planétaires » a été installée à l'IPSL, et accueillera bientôt les données de Spicam, et d'autres instrument en vol, et s'insérera à terme dans le dispositif national (CNES-INSU) et européen, via l'engagement du Pôle dans le réseau européen EUROPLANET. En termes de potentiel scientifique, nous avons recruté trois nouveaux chercheurs dans les domaines des hautes atmosphères, de la physicochimie des atmosphères denses, et de l'exobiologie.

Sur le plan de l'enseignement, le Pôle a été le moteur d'une nouvelle filière d'enseignement de Master : le parcours interuniversitaire de Planétologie en région Ile-de-France, qui accueille en 2004 une dizaine d'étudiants de physique et de sciences de la Terre.

Un système de Notes du Pôle a été mis en place pour améliorer la communication scientifique et technique, en interne et vers l'extérieur. La dispersion sur 4 sites (St-Maur,

Vélizy, Verrières, Jussieu) ne nous a pas permis la mise en place de séminaires réguliers. Le regroupement à terme sur 2 sites (Guyancourt, Jussieu) facilitera l'animation scientifique.

La création du Pôle Spatial et Instrumental de l'IPSL à Guyancourt constitue également un défi important, qu'il est nécessaire de relever pour éviter le risque de désagrégation de nos laboratoires par suite du départ à la retraite de nombre de nos personnels techniques (et scientifiques). Convaincus qu'un Pôle spatial bien étayé ne peut se bâtir que sur des Pôles scientifiques forts, car l'intégration des objectifs scientifiques au niveau de l'IPSL doit précéder celles des moyens techniques, nous menons une réflexion sur les articulations thématiques, géographiques, et techniques qui devront être mises en place à l'occasion du déménagement sur Guyancourt.

La réflexion scientifique a été menée à partir du découpage suivant : (1) Météorologie et climat des planètes telluriques, (2) Interactions plasmas-planètes faiblement magnétisées : échappement atmosphérique et évolution des atmosphères. (3) Magnétosphères et interactions plasmas-planètes. (4) Physicochimie de l'atmosphère de Titan et exobiologie. (5) Matière primitive dans le système solaire, agglomération des grains proto-solaires aux noyaux cométaires et diffusion lumineuse par des particules irrégulières. (6) Environnements lointains et astrophysique. Le bilan par thème, discuté lors de l'atelier de prospective du jeudi 18 novembre 2004, s'établit comme suit :

### **I.2.1 - Météorologie et climat des planètes telluriques**

*Personnels chercheurs permanents* : J.-L. Bertaux (30%), M. Cabane (20%), E. Chassefière (20%), G. Durré (Univ. Reims, 30%), F. Forget (100%), A. Hauchecorne (10%), F. Hourdin (10%), S. Lebonnois (60%), F. Lefèvre (30%), J.-P. Pommereau (10%), P. Rannou (40%), A. Sarkissian (40%).

*Personnels chercheurs non-permanents* : Y. Gabsi (20%), T. Le Barbu (100%), P.-Y. Meslin (100%), F. Montmessin (100%), S. Perrier (100%), The-Trung Tran (100%), E. Villard (100%).

Total : 10,2 hommes-an.

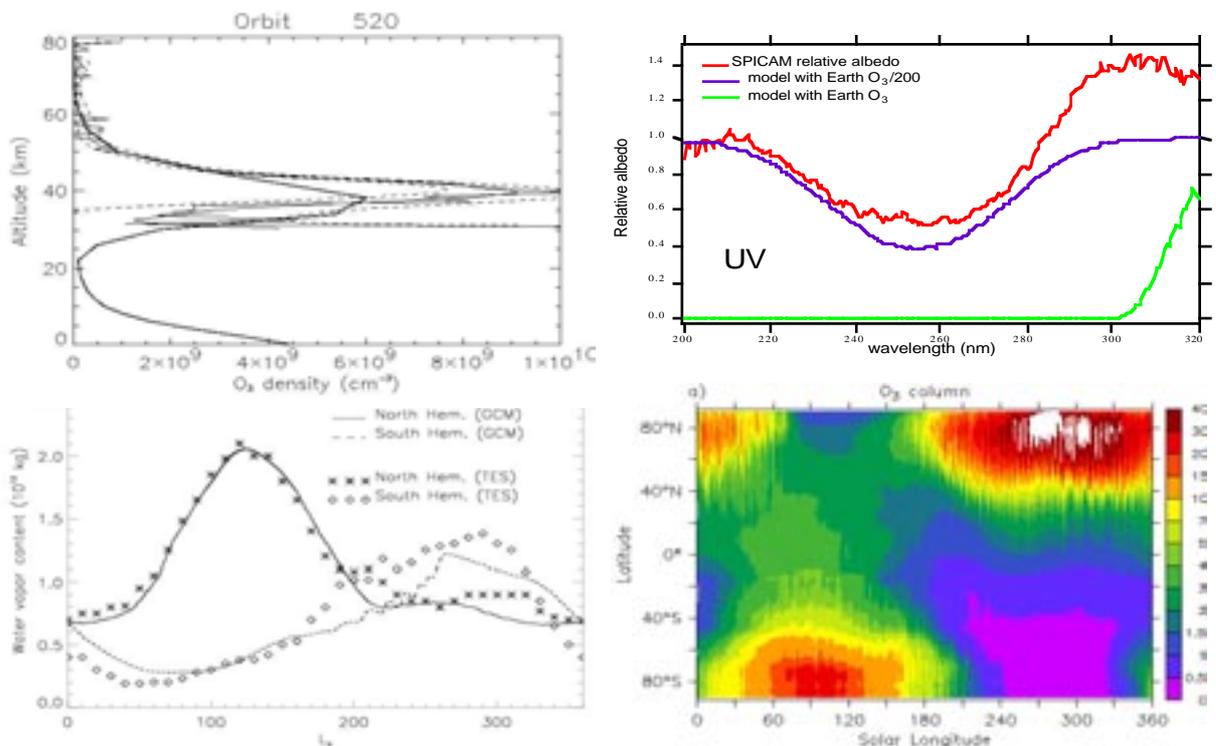
Le modèle de climat global de l'atmosphère de Mars développé au LMD avec l'appui de l'ensemble du Pôle de Planétologie de l'IPSL a fortement évolué ces quatre dernières années. Il inclut désormais l'extension à la haute atmosphère et à la thermosphère, la photochimie de l'atmosphère martienne (cycles de l'ozone et de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), les cycles de l'eau, de la poussière, et du CO<sub>2</sub>

Le modèle climatique du LMD est utilisé pour fournir une base de données sur l'environnement martien aux ingénieurs spatiaux et à la communauté scientifique. Cet outil est développé en collaboration avec l'université d'Oxford et l'IAA à Grenade, avec le soutien du CNES et de l'ESA. La version 3 (2 CD-ROMs) a été livrée à presque 60 laboratoires, agences ou industriels dans 16 pays différents, appliquée pour la préparation de toutes les missions

spatiales européennes (et souvent américaines), et utilisée par presque toutes les équipes scientifiques des instruments de Mars Express. La version 4 qui intègre la thermosphère et les variations de composition de la haute atmosphère, les observations de poussières par Mars Global Surveyor, la simulation du cycle de l'eau, des nuages et de l'ozone sera disponible à partir de janvier 2005 sur DVD-rom. Parallèlement, un nouveau site WEB largement amélioré et totalement interactif sera mis en ligne à partir de décembre 2004.

Des études ont par ailleurs été effectuées liant climats passés et géologie : évolution récente du climat (thèse de B.Levrard), application à la géomorphologie (collaboration avec Orsay-Terre), climat primitif martien (collaboration avec R.M. Haberle, NASA AMES).

Dans le domaine spatial, le Pôle de Planétologie est fortement impliqué dans la mission Mars-Express via l'instrument SPICAM (PI : J.-L. Bertaux, figure I.2.1), spectromètre UV et IR de sondage de l'atmosphère martienne travaillant principalement en mode d'occultation. F. Forget est "Interdisciplinary Scientist" en charge de l'atmosphère. Le modèle de climat martien est utilisé pour l'interprétation des données d'occultation et d'airglow de SPICAM, en cours d'inversion et de traitement, et celles d'autres instruments (notamment la cartographie de la pression à la surface de Mars par inversion de la bande du  $\text{CO}_2$  à 2 microns observée par OMEGA). Les profils verticaux d'ozone et de gaz carbonique ont été mesurés, ainsi que les émissions de la haute atmosphère, et une aurore a été détectée.



**Figure I.2.1 :** Profil d'ozone dans le cas d'une occultation stellaire SPICAM, et comparaison avec le GCM (haut gauche), observation en visée nadir de SPICAM (haut droite), cycle de l'eau sur Mars, hémisphères Nord et Sud, et comparaison GCM / TES (bas gauche), évolution saisonnière de l'abondance d'ozone dans le GCM (bas droite).

Sur le plan observationnel, des campagnes d'observation de Mars depuis la Terre sont en cours d'analyse (HST et GOMOS à l'opposition d'août 2003).

L'équipe du LMD s'est par ailleurs fortement investie dans la conception, l'organisation et la simulation des performances du *Mars Atmosphere Microwave Brightness Observer* (MAMBO), sondeur micro-onde de l'atmosphère de Mars (F.Forget, "Principal investigator", projet qui rassemblait un large consortium de laboratoires européens et américains). MAMBO a été sélectionné pour la charge utile du satellite CNES Mars PREMIER, annulé depuis pour raisons budgétaires. D'autres capteurs ont fait l'objet de développements au Pôle de Planétologie : ODS, capteur de poussières développé pour Netlander (T.-T. Tran, J.-P. Pommereau, P. Rannou), TDLAS : diodes laser à absorption pour H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et leurs isotopes (T. Le Barbu, G. Durry), PALOMA : étude des isotopes stables D/H, <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C, et de leurs variations saisonnières (E. Chassefière, J.-J. Berthelier, A. Jambon –MAGIE-), GPR : radar pénétrant développé pour Netlander (J.-J. Berthelier), dédié à la recherche de l'eau souterraine martienne, NITON : étude du radon atmosphérique, en lien avec la dynamique de la couche limite, et la recherche d'eau souterraine (proposition de J.-C. Sabroux (IRSN), E. Chassefière), DEMAI (F. Leblanc, J.-J. Berthelier) : mesure de la composition de la thermosphère.

L'instrument SPICAM/Mars-Express (PI : J.L.Bertaux) a été sélectionné pour être réutilisé, avec un canal additionnel d'occultation solaire à haute résolution spectrale (SOIR). SOIR, instrument d'un nouveau concept, utilise un AOTF comme séparateur d'ordre dans la gamme 2 à 4,4 µm. Nous sommes également impliqués sur les instruments PFS (spectromètre infrarouge haute résolution) et VIRTIS (spectro-imageur visible et infrarouge) dont S.Lebonnois est co-investigateur.

Nous avons effectué des mesures de vent sur Vénus avec le spectrographe EMILIE associé à l'Accéléromètre Astronomique Absolu développé par P.Connes (SA). Les données sont en cours d'analyse par Y.Gabsi.

Le développement d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère de Vénus a débuté au LMD, avec le développement d'un code radiatif, en collaboration avec le Laboratoire d'Energétique de Toulouse (V.Eymet, R.Fournier). Pour l'infrarouge thermique, nous développons un code radiatif bande large qui reposera sur la formulation en puissance nette échangée (PNE), qui est une alternative à la formulation en flux. Ce formalisme s'est avéré pertinent en tant qu'outil d'analyse, notamment en ce qui concerne l'effet de serre sur Terre. Sur Mars, nous avons tiré parti de cette possibilité pour réduire le temps de calcul du code radiatif tout en étant plus précis. La partie dynamique au cœur du modèle climatique existe déjà, et les premières simulations seront effectuées dès la réalisation du nouveau code radiatif.

## **I.2.2 - Interaction plasmas-planètes faiblement magnétisées : échappement atmosphérique et évolution des atmosphères**

*Personnels chercheurs permanents* : J.-L. Bertaux (30%), J.-J. Berthelier (10%), G. Chanteur (30%), E. Chassefière (30%), F. Leblanc (50%), E. Quémerais (10%)

*Personnels chercheurs non-permanents* : J.-Y. Chaufray (100%), F. Cipriani (100%), V. de la Haye (100%), R. Modolo (100%)

Total : 5,6 hommes-an.

A la suite des études préliminaires effectuées de 1998 à 2000, un modèle tridimensionnel global de l'environnement ionisé de Mars a été développé au CETP en vue d'étudier la dynamique du plasma martien et son couplage électrodynamique avec le vent solaire (Modolo et al. 2004a; Modolo, 2004; Chanteur et al., 2003). Depuis 2004 une collaboration a commencé avec le S.A. (F. Leblanc et J.Y. Chaufray) pour calculer l'effet sur l'atmosphère et l'exosphère des flux incidents simulés par le modèle du CETP (Modolo et al. 2004b).

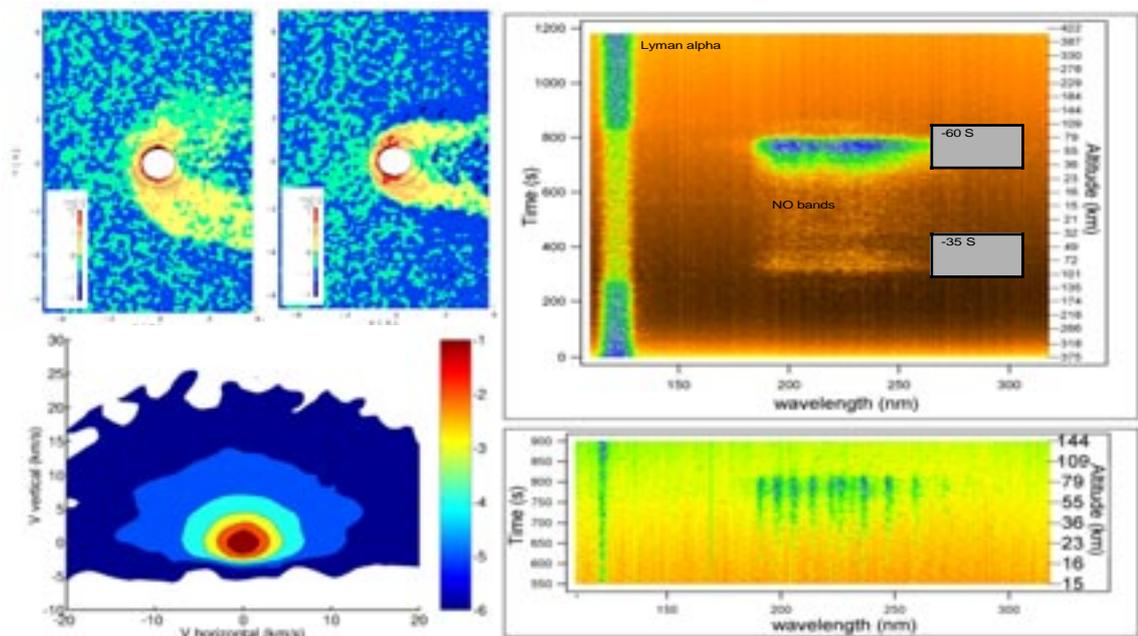
L'effet d'un flux de particules énergétiques sur l'atmosphère martienne a été simulé (Leblanc et al. 2002). Les conclusions de ce travail sont que la perte atmosphérique liée à ce type d'interaction soleil Mars est négligeable par rapport aux autres mécanismes d'échappement. Ces derniers, à peu près équivalents en terme de perte atmosphérique, donnent lieu à un échappement inférieur à la perte totale en atmosphère estimée pour Mars depuis 3.7 milliards d'années (Chassefière et Leblanc, 2004). Le couplage du modèle du vent solaire autour de Mars (Modolo, 2004) avec celui de l'exosphère martienne a été entrepris (Chaufray, DEA, 2004).

De nombreuses observations de la haute atmosphère et de l'ionosphère martiennes sont désormais disponibles notamment grâce au spectromètre UV SPICAM/Mars Express. Un travail d'exploitation des données de SPICAM a été entrepris au SA en collaboration avec le LPG et l'ESA (Chaufray thèse depuis 2004). Les premiers résultats obtenus par SPICAM nous permettent d'envisager un travail approfondi sur les sources des émissions principales de l'airglow martien. SPICAM a notamment pour la première fois observé les émissions du côté nuit (Bertaux et al. 2005a ; Bertaux et al. 2005b ; Leblanc et al. 2005) et du côté jour (Leblanc et al. 2005).

Le modèle développé pour Mars a été adapté pour décrire l'interaction de Titan avec les différents environnements de plasma avec lesquels il interagit (Chanteur et Modolo, 2004). Les premiers résultats ont été présentés lors d'une réunion du groupe de travail de l'ISSI (Figure I.2.2).

Un effort d'adaptation des modèles de formation de l'exosphère martienne au cas de l'exosphère de Titan a été réalisé à l'Université de Virginie en collaboration avec le SA (Michael et al. 2004). Une autre collaboration avec l'Université du Michigan a également lieu sur le

développement d'un modèle de la haute atmosphère de Titan en préparation des premiers passages de la sonde CASSINI (V. De La Haye, thèse).



**Figure I.2.2 :** Densité totale du plasma dans la zone d'interaction entre l'exosphère de Titan et la magnétosphère de Saturne (haut gauche), distribution des atomes d'oxygène atomique produit par criblage dans la haute atmosphère de Mars, à 300 km (bas gauche), émission nocturne de la haute atmosphère martienne observée par SPICAM (droite).

La charge utile multi-capteurs DYNAMO, proposée sur MARS PREMIER, était destinée à caractériser les processus physiques d'échappement de l'atmosphère (PI : E. Chassefière). Elle consistait à embarquer sur un orbiteur de Mars un ensemble instrumental dédié à la caractérisation des paramètres physiques et chimiques des composantes de la haute atmosphère. Un concept similaire a par la suite fait l'objet d'une recommandation dans le Decadal Report de la NASA (priorité des « petites missions » vers Mars). L'instrument DEMAI sur DYNAMO avait pour but d'étudier l'interaction de Mars avec le vent solaire (Leblanc et al. 2002). Cet instrument était constitué d'un ensemble de deux spectromètres, l'un pour la mesure des ions et neutres thermiques de la haute atmosphère et l'autre pour la mesure des neutres énergétiques. Ce dernier instrument est depuis 2002 en étude de recherche et développement au CETP (thèse F.Cipriani), notamment afin d'étudier la meilleure solution pour la source d'ion de cet instrument (étude théorique et expérience de laboratoire). Une étude théorique des flux neutres d'atomes lourds issus des mécanismes associés à l'échappement atmosphérique martien se poursuit également en collaboration avec le SA. L'instrument SOURCE sur DYNAMO était un spectromètre UV dont l'objectif était la caractérisation de la thermosphère et de l'exosphère de Mars par mesure des émissions UV. Le SA aurait fourni les optiques, et le réseau.

La mesure précise des rapports isotopiques des gaz rares et des isotopes stables de C, H, O et N dans l'atmosphère de Mars, constitue l'une des étapes essentielles pour mieux

caractériser l'histoire de l'échappement sur cette planète. L'instrument PALOMA a été proposé en réponse à l'AO MSL de la NASA. Il a fait l'objet depuis quatre ans de travaux de R&T et de préparation de programme, sous financement CNES.

Le CETP a participé à l'élaboration du spectromètre de masse CAPS à bord de la sonde CASSINI. Ce spectromètre aura notamment pour tâche de mesurer la densité, la distribution et la composition de l'exosphère de Titan, de son échappement ionique et de caractériser l'interaction de Titan avec son environnement de plasma. Le CETP participe depuis 2004 à l'exploitation des premières mesures de cet instrument dans la magnétosphère de Saturne.

### **I.2.3 - Magnétosphères et interactions plasmas-planètes**

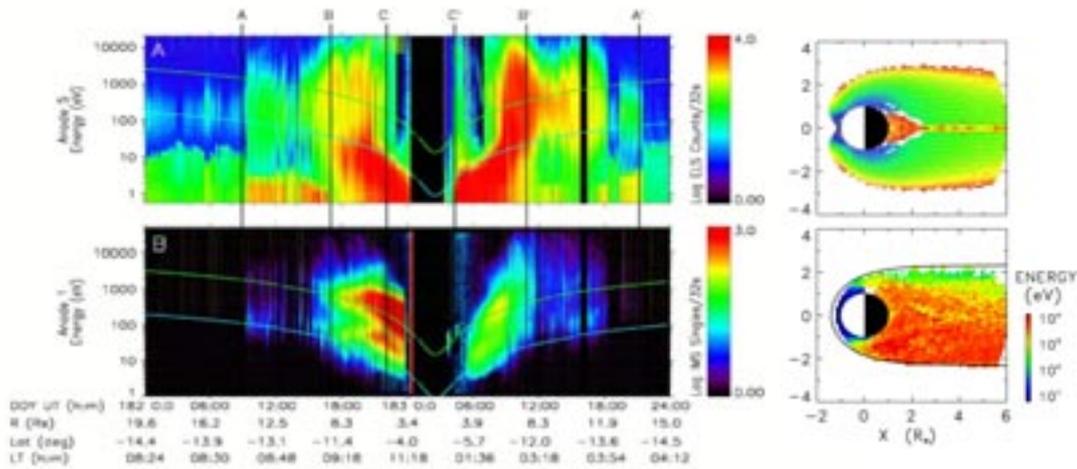
*Personnels chercheurs permanents* : J.-J. Berthelier (30%), P. Canu (40%), G. Chanteur (30%), E. Chassefière (30%), N. Cornilleau (20%), D. Delcourt (40%), D. Fontaine (20%), P. Galopeau (100%), M. Hamelin (80%), F. Leblanc (50%), O. Lecontel (10%), M. Menvielle (20%), E. Quémerais (20%), A. Roux (20%), A. Sarkissian (20%).

*Personnels chercheurs non-permanents* : M. Bouhram (100%), N. Yan (100%)

Total : 7,3 hommes-an.

Alors que la mission GALILEO (NASA) consacrée à l'exploration de la magnétosphère jovienne a pris fin en septembre 2003, la sonde CASSINI (NASA) explore la magnétosphère de Saturne depuis juillet 2004 pour une durée nominale de 4 ans (Figure I.2.3). Un des temps forts de cette mission sera la descente du module CASSINI-HUYGENS (ESA) dans l'atmosphère de Titan en janvier 2005. Le CETP participe activement à la mission CASSINI et a des responsabilités dans différents instruments (CAPS et RPWS sur CASSINI). Le CETP et le SA sont par ailleurs impliqués dans la mission BEPI COLOMBO vers Mercure identifiée comme "Pierre Angulaire" du programme scientifique de l'ESA, en coopération avec l'agence spatiale japonaise (JAXA).

L'exploitation d'instruments au sol et embarqués a permis d'aborder différentes caractéristiques de l'environnement jovien, comme les émissions radio, les satellites de Jupiter, ou encore l'onde de choc en amont de la planète. Ainsi, des variations à long terme du rayonnement synchrotron de Jupiter ont été identifiées à partir d'observations dans différents domaines de longueurs d'onde menées de façon régulière au Radiotélescope de Nançay pendant une dizaine d'années. Nous avons montré que ces variations étaient corrélées avec l'activité du vent solaire mesuré en amont de la planète à l'orbite terrestre (*Galopeau et Gérard, 2001, Galopeau et al., 2004*).



**Figure I.2.3 :** Spectrogrammes énergie / taux de comptage obtenus par l'expérience CAPS-Cassini lors de l'insertion de la sonde sur son orbite autour de Saturne (gauche), carte des ions sodium d'origine exosphérique sur la planète Mercure obtenue en couplant le modèle d'exosphère avec un modèle de transport dans la magnétosphère (droite).

L'interaction électromagnétique entre le satellite Io et Jupiter est généralement expliquée par un système de courants alfvéniques quasi continus et macroscopiques, appelés "aile d'Alfvén", qui connecterait directement leurs ionosphères respectives et serait responsable de l'émission radio-décamétrique et du « spot » auroral associés à Io. Les observations de la sonde GALILEO lors des survols de Io ont suggéré un modèle plus complexe. Avant d'interagir avec Jupiter, l'aile d'Alfvén se filamenterait au cours de son extension à travers le tore d'Io. Ceci permettrait alors d'expliquer l'accélération des électrons, responsables du rayonnement radio et spot auroral associés à Io (*Chust et al., 2004*).

Dans le cadre d'une coopération entre le SA et des chercheurs américains, les observations de l'exosphère de sodium du satellite Europe ont été comparées à des résultats de modélisation. L'objectif consiste à comprendre l'origine de cette exosphère et ses variations avec la rotation d'Europe autour de Jupiter.

Le survol de Jupiter par la sonde CASSINI au début de l'année 2001 a fourni pendant plus de 90 jours une longue série d'observations du vent solaire et du choc de la planète sur le côté soir, région qui n'avait pas été explorée par les sondes précédentes. Les résultats obtenus font apparaître un grand nombre de traversées de l'onde de choc dont l'occurrence témoigne d'une forte variabilité, due à la fois aux fluctuations rapides du vent solaire au cours de cette période et à la rotation rapide du magnéto-disque de Jupiter. Sur les quelques traversées étudiées de façon détaillée, la structure du champ magnétique apparaît beaucoup plus complexe que celle observée en général dans le choc terrestre (*Szegö et al., 2003*).

Titan, satellite de Saturne entouré d'une atmosphère dense, offre la particularité unique de se trouver tantôt dans la magnétosphère de Saturne, tantôt dans le vent solaire le long de son orbite. Lorsque le satellite est dans le vent solaire, sa situation est comparable à celle de

Mars ou de Vénus : son exosphère est soumise aux mêmes processus d'ionisation avec toutefois des importances relatives différentes. Le code numérique développé pour étudier l'environnement plasma de Mars a été adapté au cas de Titan. Les résultats de cette simulation montrent que l'échappement des ions d'origine exosphérique joue un rôle beaucoup plus important que l'échappement planétaire martien et qu'il crée une aile d'Alfvén à l'intérieur même de la magnétogaine de Titan. A l'avenir, cette étude sera étendue au régime subsonique et sub-alfvénique prévalant dans la magnétosphère de Saturne en prenant en compte les configurations qui seront rencontrées lors des premiers survols de Titan par la sonde CASSINI.

Des signatures complexes d'ondes ont été observées au voisinage de la planète, ainsi que les bruits d'impacts de poussières sur les antennes électriques, jusqu'à 700 impacts par seconde, lors de la traversée du plan des anneaux. Les mesures du sondeur à relaxation ont permis d'obtenir un profil de densité au périégée et au voisinage des anneaux (Gurnett et al. , 2004).

Pour préparer l'arrivée à Mercure de la sonde MESSENGER (NASA) puis celle des sondes planétaire (MPO) et magnétosphérique (MMO) de la mission BEPI COLOMBO issue d'une collaboration Européenne (ESA) et Japonaise (JAXA), des travaux préliminaires ont été menés sur le plan théorique et numérique pour caractériser l'environnement de Mercure.

Des codes de particules-test développés pour l'environnement terrestre ont été adaptés pour examiner la circulation à grande échelle du plasma dans l'environnement herméen. Ces travaux font apparaître plusieurs conséquences des petites échelles spatiales de cette magnétosphère. D'une part, l'accélération centrifuge qui affecte les particules au cours de leur transport convectif des hautes vers les basses latitudes est significativement plus importante que dans le cas de la magnétosphère terrestre, conduisant à des énergies caractéristiques plus élevées (de l'ordre de quelques centaines d'eV) dans les lobes (*Delcourt et al.*, 2002). Les simulations numériques suggèrent aussi une contribution significative des ions d'origine exosphérique ( $\text{Na}^+$  notamment) à l'environnement proche de Mercure (*Delcourt et al.*, 2003). Après transport et accélération dans la magnétosphère, le recyclage de ces populations d'origine planétaire par le biais de précipitations peut conduire à un enrichissement local du régolithe et un criblage accru de la surface de la planète (*Leblanc et al.*, 2003).

D'autres études ont porté sur l'exosphère de Mercure. En particulier une modélisation tri-dimensionnelle de l'exosphère de sodium neutre a été réalisée en tenant compte des principaux mécanismes de production et de leur évolution au cours de la rotation de Mercure autour du Soleil (*Leblanc et Johnson*, 2003). Elle a notamment permis d'étudier le couplage de l'exosphère avec la surface (*Yau et al.*, 2004 a,b).

## I.2.4 - Physico-chimie atmosphérique de Titan et exobiologie

*Personnels chercheurs permanents* : M. Cabane (80%), G. Cernogora (100%), E. Chassefière (20%), F. Hourdin (10%), G. Israel (100%), S. Lebonnois (40%), P. Rannou (60%), C. Szopa (100%)

Total : 5,1 hommes-an.

Les études menées à l'IPSL sur la physico-chimie atmosphérique de Titan reposent aujourd'hui sur trois approches complémentaires : l'analyse in situ, la modélisation numérique et la simulation expérimentale.

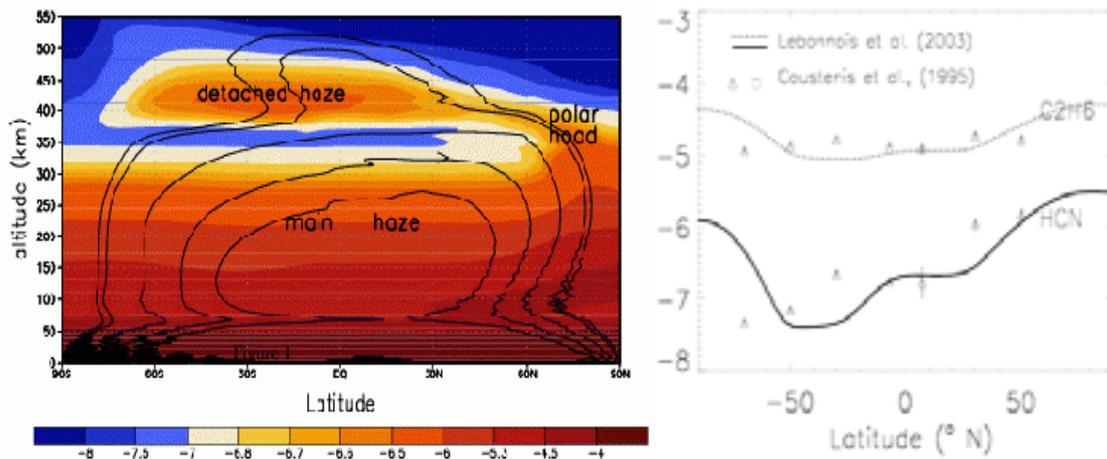
L'IPSL est impliqué dans les expériences ACP et GC-MS de la mission Cassini-Huygens, mise en orbite avec succès autour de Saturne le 1<sup>er</sup> Juillet 2004. Les deux expériences sont en parfait état de fonctionnement, et nous en attendons des données sur la composition atmosphérique de Titan mi-janvier 2005. Pour préparer l'interprétation de ces données, une campagne d'étalonnage, portant à la fois sur des standards chimiques et des produits de simulations expérimentales, a été initiée au cours de l'année 2004. Elle fait appel à des bancs de test de laboratoire qui incluent le modèle de rechange de l'expérience ACP du SA (modèle M3) et les colonnes chromatographiques de rechange de l'expérience GC-MS conservées au LISA.

La modélisation numérique du système atmosphérique de Titan effectuée entre le LMD et le SA (Figure I.2.4) vise à comprendre au mieux le système atmosphérique de Titan, et à pouvoir replacer les mesures de la mission Cassini-Huygens dans un contexte spatial et temporel étendu. Les principales avancées opérées ces dernières années ont consisté dans l'intégration du modèle photochimique de l'atmosphère de Titan dans le GCM développé par le LMD. De plus, une étude des interactions entre les aérosols et la photochimie a été menée de manière à caractériser les mécanismes de production des aérosols, ainsi que la chimie hétérogène qu'ils peuvent générer. Des collaborations sont établies aussi concernant la haute atmosphère, et ses liens avec la stratosphère. Dans ce cadre, notre équipe participe à un groupe de travail financé par l'International Space Science Institute, à Berne, et collabore aux travaux de thèse de Virginie De la Haye sur la structure de la thermosphère.

Enfin, au cours de la période 2001-2004, une expérience de simulation expérimentale de la physico-chimie atmosphérique de Titan a été mise en place pour la première fois au SA. Cette expérience, appelée Production d'Aérosols en Microgravité par Plasma Réactif (PAMPRE), a d'ores et déjà permis la production de et l'étude de tholins par analyses ex-situ. De plus, afin de pouvoir transposer les résultats de laboratoire à l'atmosphère de Titan, un travail de caractérisation de milieu réactionnel a été initié par spectroscopie optique d'émission.

L'IPSL est impliqué au travers du SA et du CETP dans le développement d'expériences d'analyse in situ de type CPG-SM de l'atmosphère et du sol martien dans le cadre des futures missions martiennes à vocation exobiologique. Ces expériences visent à déterminer la présence de composés organiques à la surface de Mars, d'évaluer la possibilité d'existence d'une vie

présente ou passée, et de caractériser l'histoire de l'atmosphère de la planète. Au travers d'actions de R&T et de développements instrumentaux du CNES, 2 types d'instrumentations ont été développés : un CPG (Sample Analysis at Mars, SAM) et un SM à temps de vol (PALOMA). Dans les deux cas, des modèles de laboratoire ont été développés, et ont montré le bon fonctionnement de tels systèmes. Ces deux sous-systèmes instrumentaux font partie de deux ensembles instrumentaux différents proposés sur la mission MSL09 : i) l'expérience MACE/PALOMA pilotée par le JPL (H.Waite) ; ii) l'expérience SAM pilotée par le NASA/GSFC (P.Mahaffy).



**Figure I.2.4 :** Sur Titan, les aérosols transportés par les vents forment la couche détachée et la capuche polaire au pôle d'hiver et présentent une asymétrie, ce qui est reproduit par le modèle (gauche). Le vent modifie la composition de l'atmosphère en enrichissant les pôles, et en appauvrissant l'hémisphère d'été sud. Cette structure a peu d'impact radiatif. En revanche, la composition des aérosols, et celle des nuages à basse altitude, doit dépendre directement de cette distribution saisonnière (droite).

En parallèle à ces développements instrumentaux, une collaboration visant à évaluer la possibilité de mise en évidence des carbonates potentiellement présents sur Mars et à déterminer leur origine (géochimique ou biologique) a été conduite entre le SA, le LISA, et le LBP. Cette étude sol, basée sur l'analyse thermique différentielle, a montré qu'il est possible de différencier nettement la nature des carbonates terrestres analysés par leurs températures de décomposition thermique (perte de  $\text{CO}_2$ ). Cette méthode pourrait être transposable à l'analyse des carbonates martiens en utilisant la pyrolyse-SM.

En janvier 2004, la mission cométaire Rosetta a été lancée avec succès. Les premiers tests en vol de fonctionnement de l'expérience COSAC (de type CPG-SM pour la caractérisation de la composition chimique du noyau et de l'atmosphère cométaire) à laquelle le SA participe activement en tant que fournisseur de hardware (réservoirs de gaz livrés en 2001-2002), ont montré la bonne santé des différents organes de l'expérience.

## **I.2.5 - Matière primitive dans le système solaire, agglomération des grains proto-solaires aux noyaux cométaires et diffusion lumineuse par des particules irrégulières**

*Personnels chercheurs permanents* : E. Hadamcik (100%), A.-C. Levasseur-Regourd, A. Sarkissian (20%).

*Personnel chercheur non-permanent* : J. Lasue (100%)

Total : 3,2 hommes-an.

L'IPSL est impliqué dans l'ambitieuse mission européenne Rosetta de rendez-vous avec une comète et d'atterrissage sur son noyau, avec une participation à une large proportion des expériences (dont CONSERT réalisée au SA, PI : W. Kofman –LPG-) embarquées sur l'orbiteur ou l'atterrisseur Philae. C'est dans le contexte d'une meilleure définition des atmosphères cométaires que s'inscrivent nos travaux relatifs aux comètes et autres petits corps du système solaire. L'accent est mis en particulier sur la détermination, à partir de leur diffusion de la lumière solaire, des propriétés physiques des particules solides qui sont les témoins des processus d'agglomération dans la nébuleuse proto-solaire.

Si nous n'avons pas directement eu accès à de nouvelles missions cométaires au cours des dernières années, il convient de mentionner les résultats relatifs aux flux de poussières rencontrés par Stardust lors du survol de 81P/Wild 2. Ils confirment des résultats de Giotto, à savoir l'extrême porosité des particules cométaires et la fragmentation des noyaux (Fulle et al., 2000 ; Levasseur-Regourd, 2004). La technique d'imagerie polarimétrique a continué à être utilisée pour caractériser les propriétés physiques des particules solides présentes dans les chevelures cométaires, en particulier pour C/2000 WM1 LINEAR et C/1999 S4 LINEAR, que nous avons pu exceptionnellement observer lors de sa fragmentation en juillet 2000. Par ailleurs, des synthèses et interprétations de l'ensemble des observations disponibles ont été effectuées (Hadamcik et Levasseur-Regourd, 2003, Kolokolova et al., 2004). Les images mettent en évidence des variations de propriétés physiques dans la chevelure (région proche du noyau, arcs ou jets, désintégration de fragments). Les courbes de phase sont caractéristiques de particules irrégulières d'une taille supérieure aux longueurs d'ondes des observations, soit plus de 2 mm, mais aussi de distributions en albedo et tailles différentes (Hadamcik et Levasseur-Regourd, 2003; Levasseur-Regourd et Hadamcik, 2003).

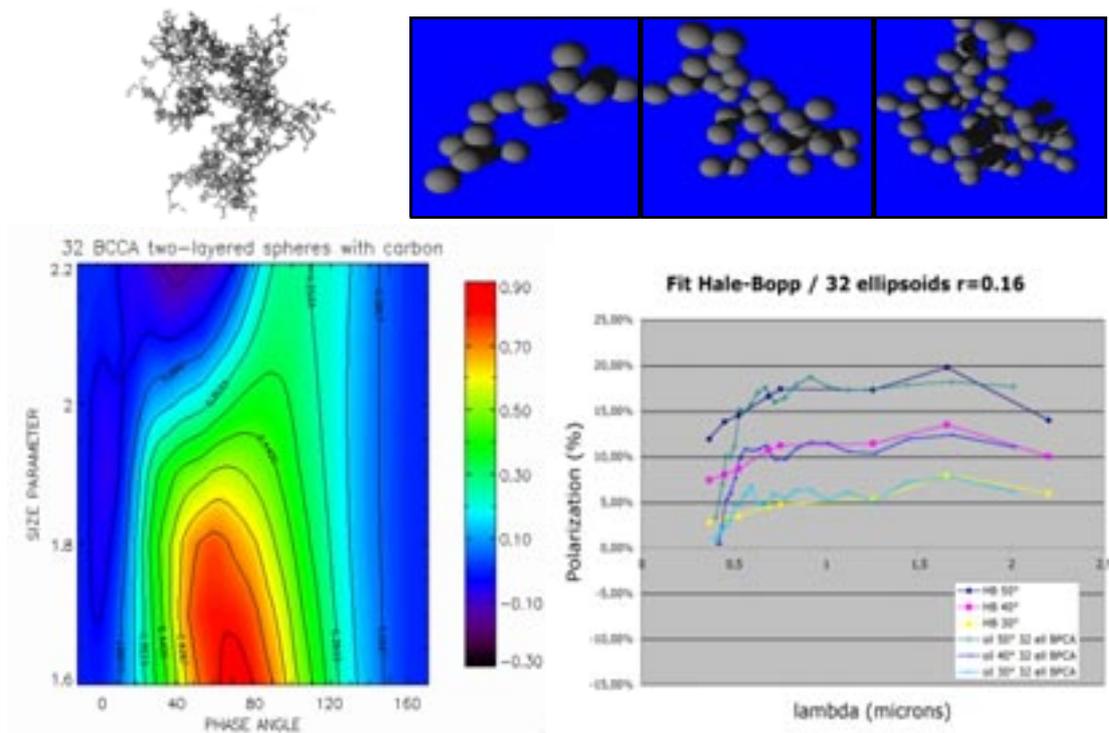
Les objets de Kuiper offrent désormais un nouveau champ d'observations aux confins du système solaire, et les observations photo-polarimétriques documentent l'interaction de la lumière, au niveau diffusions multiples et rétro-diffusion cohérente, avec des régolites constitués de roches et de glaces (Levasseur-Regourd, 2003). Nous avons commencé en 2003, en collaboration avec des collègues de l'observatoire de Besançon, à observer en polarimétrie des objets de Kuiper depuis le VLT, et ce pour la première fois en deux couleurs. La comparaison au milieu interplanétaire et aux astéroïdes a été faite. Une synthèse, conduite dans

un cadre international, nous a permis de dresser des tables de référence pour les observations de sources faibles étendues (disques circumstellaires).

Des codes efficaces existent pour le calcul de la diffusion de la lumière par des particules irrégulières, en particulier fractales (produites par collisions inélastiques dans le proto-système solaire ou par bombardement météoritique sur des astéroïdes). En collaboration avec des collègues de l'observatoire d'Helsinki, nous avons mené des modélisations numériques qui permettent en particulier de valider les simulations expérimentales menées sur des polyèdres stochastiques (Pentillä et al., 2003). Nous commençons à développer des codes permettant la simulation de la diffusion par des agrégats fractals de grains allongés et de grains présentant une structure typique des poussières interstellaires (cœur minéral et manteau de composés organiques et glaces).

Du point de vue expérimental, il convient de souligner l'importance accrue des simulations en laboratoire dans la diffusion lumineuse, aussi bien pour préparer les missions spatiales futures (Rosetta) que pour interpréter les observations passées. En effet, cette approche limite les contraintes de calcul (convergence, paramètre de taille), et certaines hypothèses sur les agrégats. L'expérience PROGRA, initialisée au SA et développée au LPCE, permet d'effectuer des mesures avec des particules de compositions, tailles et morphologies variées, soit en laboratoire (particules de porosité élevée, simulation de régolites), soit dans des conditions de pesanteur réduite (cas le plus général). L'expérience CODAG-LSU, développée au Service d'Aéronomie, avait (lors d'un vol à bord d'une fusée ESA) validé la possibilité de construire des agrégats fractals (Figure I.2.5) dans des conditions de micro-pesanteur, tout en suivant l'évolution de leurs propriétés de diffusion de la lumière. Ces expériences ont permis une première définition d'ICAPS.

La phase A d'ICAPS, instrument européen prévu sur l'ISS, a été menée entre 2001 et 2002, et la phase B est en cours. Nous avons la responsabilité du développement de l'instrument de diffusion lumineuse, réalisé par l'industrie en collaboration avec l'Université de Bruxelles. L'ESA envisage d'installer ICAPS dans une « facilité » commune avec l'expérience IMPF d'étude des plasmas poussiéreux. Ce projet nous a naturellement amené à développer une collaboration avec l'équipe responsable de l'expérience PAMPRE et avec le GREMI d'Orléans. Les réalisations en cours pour préparer ICAPS concernent: (i) la modélisation de la réponse attendue avec des particules injectées dans la, ou les, chambres d'essai avant que les processus d'agglomération ne se développent ; (ii) la détermination du nombre et des caractéristiques des diodes lasers permettant l'illumination des particules dans la chambre d'essai ; (iii) la détermination du nombre d'angles de phase à explorer ; (iv) l'étude sur table de l'instrumentation à développer pour mesurer non seulement l'intensité et la polarisation, mais aussi tout le vecteur de Stokes de la lumière diffusée.



**Figure I.2.5 :** Agrégats de différents types (fractal, allongés) (haut), variations modélisées de la polarisation avec l'angle de phase et la longueur d'onde, pour une taille et une composition des grains constitutifs en accord avec les modèles interstellaires (droite).

## I.2.6 - Environnements lointains et astrophysique

*Personnels chercheurs permanents :* J.-L.Bertaux (30%), R.Lallement (100%), E.Quémerais (70%), A. Sarkissian (20%).

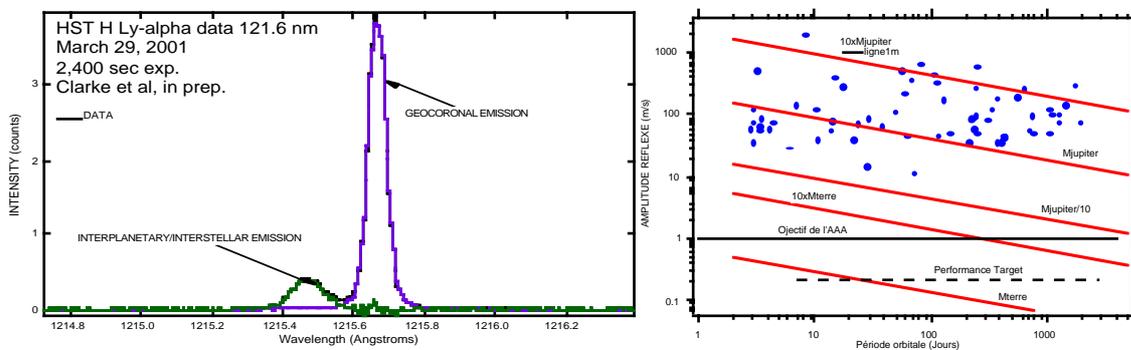
*Personnels chercheurs non-permanents :* S.Ferron (100%), D.Koutroumpa (100%),

Total : 4,2 hommes-an.

Le milieu interstellaire local, parce qu'il peut être étudié avec beaucoup plus de résolution et de sensibilité que le gaz interstellaire galactique lointain ou celui d'autres galaxies, permet d'apporter des informations sur les mécanismes de redistribution de matière et d'énergie par les étoiles, ingrédients des modèles d'évolution des galaxies. En collaboration avec des chercheurs de Berkeley et Meudon, nous avons collecté des observations spectroscopiques d'étoiles proches dans le visible et l'UV et établi en les synthétisant une cartographie du gaz dense local. Elle fait apparaître les contours de la "Bulle Locale", volume de gaz chaud (million de degrés) issu d'une ou plusieurs explosions stellaires, et de ses ouvertures vers les bulles voisines et le halo. Nous utilisons ces résultats pour étudier la dynamique, les interactions et l'évolution du milieu interstellaire multi-phases.

Nous avons participé à une étude multi-satellites de l'hélium d'origine interstellaire dans l'héliosphère, et grâce à cette synthèse avons résolu un certain nombre d'énigmes concernant l'ensemble des observations effectuées depuis deux décennies.

L'étude de la distribution de l'hydrogène dans le milieu interplanétaire (Figure I.1.6) est basée sur l'analyse des données de l'instrument SWAN qui est toujours opérationnel après près de neuf années dans l'espace. L'étude du fond interplanétaire à Lyman alpha a permis de mieux comprendre la relation entre le soleil et son environnement proche. Parmi les points établis récemment, on peut citer les suivants : (i) la distribution de flux de masse de vent solaire varie fortement avec la latitude en période de minimum solaire. Cela se traduit par l'existence d'un sillon dans la distribution du fond diffus interplanétaire. (ii) La distribution spatiale du flux solaire à Lyman alpha n'est pas isotrope, même pas en période de minimum solaire. La forme de la raie solaire n'est pas constante au cours du cycle solaire. (iii) Cette variation du flux a été utilisée pour créer un indice d'activité solaire qui permet de prédire le flux UV qui sera émis vers la Terre une dizaine de jours à l'avance. Cette prédiction d'activité est distribuée à deux groupes qui l'utilisent dans le cadre de leurs prédictions d'activité (Space Weather). (iv) La distribution de l'hydrogène neutre dans l'héliosphère externe présente un écart systématique à celle prévue par un modèle sans interface (Voyager UVS). Toutefois, aucun modèle avec interface n'a pu encore rendre compte correctement de la distribution observée (mesures de 1993 à 2004). L'existence d'une faible contribution galactique reste ouverte.



**Figure I.2.6 :** Mesure de l'émission interplanétaire et interstellaire de l'hydrogène atomique (gauche). Diagramme période orbitale /amplitude réflexe de l'étoile. Chaque point représente une étoile avec une exo-planète connue (à la date du 30 Septembre 2001). Les droites inclinées sont calculées pour différentes masses de la planète, et une masse solaire pour l'étoile. La droite horizontale représente l'objectif actuel de l'AAA, d'atteindre une précision de 1 m/s. La droite en tirets représente l'objectif à long terme poursuivi pour l'AAA (droite).

Concernant la détection des planètes extrasolaires, le système AAA (Accéléromètre Astronomique Absolu de P.Connes) est actuellement couplé au spectromètre EMILIE, lui-même à demeure dans la salle du coudé du télescope de 152 de l'OHP, relié par fibre optique au foyer coudé. Nous considérons que cette installation est un équipement de R&T, bien qu'il nous permette de faire des observations intéressantes. L'activité de l'équipe concerne à la fois les observations, et les évolutions du système rendues nécessaires à la recherche de la performance

de 1 m/s à long terme. Nous devons cependant souligner que tester un système à 1 m/s nécessite de récolter 16 fois plus de photons que pour atteindre une précision de 4 m/s. C'est pourquoi nous observons régulièrement seulement une dizaine d'étoiles.

Nous avons démontré, sur une source de laboratoire, une stabilité meilleure que 0.7 m/s sur 6 mois. Ceci valide la très bonne fiabilité du système AAA avec un Fabry-Perot accordable comme source de référence. Aucun autre groupe dans le monde n'a obtenu un tel résultat. Cependant, les problèmes sont plus nombreux avec une source stellaire dont le spectre s'étire avec le mouvement orbital terrestre, ce qui nous amène aux changements prévus en 2003, car nous n'avons pas encore obtenu la performance désirée de 1 m/s sur plusieurs mois. Au mois de Novembre 2004, le remontage est terminé, mais nous avons encore un problème de pollution sur la fenêtre du CCD (dépôt d'huile d'origine inconnue).

La perspective dans laquelle nous continuons nos efforts sur AAA est d'aboutir effectivement à une précision meilleure que 1 m/s, pour démontrer cette possibilité, et la détection future de petites planètes de type terrestre.

Nous participons par ailleurs aux projets HARPS (spectromètre réalisé pour l'ESO par un consortium franco-suisse dédié à la recherche des exo-planètes, installé au printemps 2003 au télescope de 3.6 m de l'ESO à La Silla), Sophie (spectromètre généraliste, conçu et réalisé à l'OHP, qui doit remplacer ELODIE au 193 à partir de 2005) et Super Sophie (utilisation de l'optique adaptative au VLT).

### **I.3 - Vers un pôle autour du cycle de l'eau**

Un examen des recherches conduites dans les différents laboratoires de l'IPSL montre l'importance des études liées au cycle de l'eau, de ses différentes composantes et de leurs interactions mutuelles, autour de thématiques liées à l'évaporation et au transport de la vapeur d'eau, à la formation des nuages et au rôle des aérosols, aux précipitations et à leur impact en milieu continental et océanique. Ces travaux reposent sur des stratégies différentes mais complémentaires qui vont de l'observation locale, à l'observation aux échelles régionale et globale grâce aux missions spatiales, à la modélisation à moyenne et grande échelle des processus mis en jeu, et enfin aux informations accessibles à partir de l'analyse isotopique de l'eau au cours de son cycle atmosphérique.

Les différentes équipes impliquées dans ces recherches liées au cycle de l'eau ont généralement travaillé de façon indépendante, ou en coopération bilatérale sur des aspects spécifiques (développement d'instruments, de techniques d'analyse, utilisation de modèles...). La mise en évidence de besoins d'analyse à des échelles de plus en plus fines pour une meilleure détermination des processus et des bilans (notamment des bilans d'eau), le démarrage de grands projets internationaux s'intéressant à l'échelle régionale, comme le projet AMMA sur la mousson africaine ou les projets européens autour du bassin méditerranéen, les missions spatiales comme CALIPSO-AQUA, SMOS, TROPiques et GPM notamment, la mise sur pied de la base thématique ICARE dédiée aux interactions nuages-aérosols-rayonnement-eau, ont fourni à ces équipes l'occasion de resserrer leurs liens.

La création en 2001 d'un Groupe de Travail IPSL a favorisé cette dynamique autour du cycle de l'eau avec une série de réunions dont les journées de Branville (mars 2002) qui ont permis de constater l'importance et le dynamisme de la communauté concernée au sein de l'IPSL. Cette réunion a permis de présenter les études aujourd'hui engagées. Deux journées de présentations et discussions scientifiques ont été organisées autour d'AMMA (processus de mousson et convection) et des cirrus (processus radiatifs et dynamiques, humidité dans la haute troposphère). La couche limite atmosphérique a été abordée dans le cadre des observations effectuées au SIRTa. Depuis, des groupes ont démarré sur les projets comme AMMA ou poursuivi des études dans le cadre de la préparation des missions spatiales, ou développé des moyens d'observations. Ainsi des équipes ont commencé à travailler sur la dynamique de la mousson, la caractérisation des propriétés nuageuses associée à la convection, le bilan d'eau ou le bilan énergétique, la redistribution spatiale de vapeur d'eau, les effets radiatifs, la modélisation à méso-échelle mais sont répartis entre plusieurs groupes de travail. Des besoins particuliers peuvent ainsi être identifiés dans les thèmes identifiés pour la mise en place de groupes fédérant les activités de recherche déjà partiellement développées comme l'analyse du bilan énergétique à la surface et les échanges surface-atmosphère, la convection, les interactions dynamique-rayonnement (formation de cirrus et de nuages stratiformes), les

barrières dynamiques et le transport de vapeur d'eau, l'analyse des bilans d'eau dans ces différents aspects, et le forçage radiatif lié à la vapeur d'eau à haute altitude.

De ce constat est née la proposition de créer un nouveau pôle de recherches dont l'objectif est d'offrir un contexte large de discussions et d'échanges, plus favorable à la réalisation des travaux engagés et à l'émergence de nouveaux axes de recherche. Un texte fondateur, dont le contenu est présenté dans la partie prospective de ce document (II.5) a été rédigé ; il devrait être finalisé à l'issue des journées des 24 et 25 janvier 2005 et servir de base à la création de ce Pôle "Cycle de l'Eau".

## **I.4 - Vers un Pôle Spatial et Instrumental**

La compétence en recherche spatiale est un atout majeur de l'IPSL. De nombreuses équipes, au sein de toutes les composantes de l'IPSL, analysent et interprètent des données spatiales, et mettent en œuvre des opérations de recherche conjuguées ou intégrées à des projets spatiaux. Ce constat ne fait que refléter l'importance des observations spatiales en ce qui concerne les Sciences de l'Univers. Mais une des principales spécificités de l'Institut tient à ce que 3 des laboratoires qui le composent (CETP, LMD, SA) font partie de la dizaine d'unités de recherche reconnues par le CNES comme " laboratoires spatiaux ". Ces laboratoires ont acquis des compétences techniques et scientifiques qui leur permettent de figurer sur le plan national comme dans la communauté internationale, parmi les acteurs les plus dynamiques en matière de propositions d'expériences, voire de missions spatiales, de concevoir les instruments associés, d'assurer leur maîtrise d'œuvre, leur réalisation et leurs étalonnages. Le LSCE et le LODyC consacrent également une part de leur activité au spatial. Par ailleurs, de nombreuses équipes sont, dans chacun de ces laboratoires, impliquées dans le traitement des données satellitaires, leur archivage et leur utilisation scientifique.

Dans ces conditions, l'activité spatiale constitue un des domaines majeurs de la coopération entre les laboratoires de l'IPSL, et donc l'un de ceux pour lesquels l'action fédérative, apparaît tout à fait naturelle et justifiée. La définition d'un Pôle Spatial et Instrumental, dont la mise sur pied constitue une des actions fortes prévues dans le cadre de l'implantation de l'IPSL à Saint-Quentin a été au cœur des activités de cette communauté. Cette réflexion a abouti à la rédaction d'un texte dont une première version a servi de support à une demande pluriformations centrée sur l'installation effective de ce pôle à Guyancourt. Ce texte, dont une version résumée est présentée dans la partie prospective (Cf II.6) servira de document de référence pour la mise en place effective du "Pôle Spatial et Instrumental" à l'IPSL.

## I.5 - Centre de Données

Le création du Centre de Données de l'IPSL est le résultat d'une des actions fédératives de l'Institut. Il existe dans sa forme actuelle depuis 2002 et fait suite à l'ancien «pôle de données ». Il a pour première mission de répondre aux besoins des laboratoires de l'IPSL en matière de collecte, gestion, et mise à disposition de données. C'est avant tout un centre « de » et « pour » l'IPSL mais il joue également, comme on le verra ci-dessous un rôle national ou international. Une des spécificités du Centre de Données de l'IPSL est liée au fait que l'IPSL est, à la fois, « producteur » et « consommateur » de données. Dans ce cadre, le Centre de Données met en place:

- une gestion des données proche des équipes de recherche (pour partie décentralisée dans les différents laboratoires de l'IPSL, pour partie centralisée sur le campus de Jussieu)
- une approche thématique (exemple : base de données sur la chimie atmosphérique ETHER, base de données sur la thématique nuage/rayonnement,..)
- une gestion des données proche des sorties de modèles, permettant des analyses intégrant modèles et observations
- une gestion des données proche des moyens de calculs, permettant à un utilisateur distant d'effectuer localement des calculs sur des données, sans rapatriement (pour les gros jeux de données de type satellite ou modèle)

Outre, le travail de mise en place et de gestion de base de données, le Centre de Données assure un certain nombre de services. En particulier, il gère un « métacatalogue » de données qui comporte (ou comportera à terme) l'ensemble des descriptifs des données produites par les chercheurs de l'IPSL ou auxquelles les chercheurs de l'IPSL ont eu accès. Il propose également une expertise aux chercheurs impliqués dans la mise en place de base de données (rédaction de cahiers de charges,..), y compris lorsque celles-ci sont réalisées de façon extérieure à l'IPSL. Le Centre de Données joue également un rôle national ou international pour certains aspects. A l'heure actuelle, c'est le cas avec la base de données associée au pôle thématique sur la chimie de l'atmosphère (ETHER) gérée à l'IPSL à la demande du CNES et de l'INSU. Cet aspect est amené à se développer avec le centre d'expertise du projet ICARE confié à l'IPSL (thématique nuages/rayonnement dans le cadre de nouvelles missions spatiales), et avec la gestion d'une partie des données du projet AMMA (données satellite principalement). En outre le « métacatalogue » est la vitrine extérieure de l'IPSL concernant les données.

Sur le plan des moyens humains, l'organisation repose sur i) le travail des personnels techniques affectés au Centre de Données lui-même (sur le site de Jussieu, UPMC) : deux Ingénieurs de Recherche et un Assistant Ingénieur (recruté fin 2004) du CNRS, et plusieurs CDD (3 à 4 selon les années), ii) le travail de quelques ingénieurs dans les laboratoires de l'IPSL (2 à 3 en région parisienne), iii) un comité de pilotage qui se réunit deux à trois fois par

an et qui est composé de chercheurs de l'IPSL représentant la plupart des types de besoins en matière de données. Ce comité de pilotage a pour mission de prospector les besoins de l'IPSL, de proposer au comité de direction de l'IPSL des priorités sur les travaux à mener, de rechercher des coopérations avec d'autres centres de données, et de représenter le Centre de Données à l'extérieur. En 2004, un groupe (dénommé JEDI) s'est également mis en place au sein de l'IPSL pour développer les interactions et collaborations techniques entre les personnels des laboratoires dont la tâche principale est la mise à disposition de données.

L'architecture du Centre de Données tient compte de la répartition géographique de l'IPSL. Elle repose donc sur 4 serveurs de données principaux, situés sur trois sites de l'IPSL (Campus UPMC à Jussieu, laboratoire LMD sur le site de l'Ecole Polytechnique, laboratoire CETP à Vélizy) et hébergeant chacun différentes bases de données. Le parti pris concernant la répartition des serveurs est de garder les données autant que possible près des chercheurs et de l'expertise scientifique concernant les données. Le serveur situé à l'IPSL/Université Pierre et Marie Curie, Paris, a été construit comme un portail permettant l'accès aux différentes bases de données des autres serveurs et aux diverses bases de données locales hébergées dans les laboratoires de l'IPSL. Le centre de données s'appuie également sur les moyens de calcul et d'archivage de centres extérieurs (CEA, IDRIS, CCR).

### **I.5.1 - Développement des bases thématiques**

Les activités conduites par le Pôle puis par le Centre de Données au cours des quatre dernières années portent sur le développement de bases thématiques, la poursuite ou le renforcement d'un certain nombre d'activités générales, et la participation au développement des technologies de « grille de données ».

Les deux principales bases thématiques dans lesquelles l'IPSL est impliqué sont ETHER (chimie atmosphérique) et celle concernant la thématique « Aérosols, Nuages, Rayonnement, Eau,...), qui constitue depuis 2004 le Centre d'Expertise ICARE de l'IPSL (CEXII). Par ailleurs, le centre de données s'est engagé depuis 2004 dans la mise en place d'une base de données « Atmosphères Planétaires » en collaboration avec le Pôle de Planétologie.

**a ) Base thématique ETHER** : ETHER est un pôle national thématique dédié à la chimie atmosphérique. Il a été créé comme tel en 2004 par les tutelles INSU et CNES, faisant suite à un centre de données dont les contours étaient beaucoup plus limités. Des évolutions importantes ont marqué la période 2001-2004. D'une part, le service ETHER était partagé jusqu'en 2003 entre le CNES et l'IPSL. Depuis 2004, l'IPSL est le seul distributeur des données ETHER. D'autre part, de nouvelles données sont arrivées dans la période 2001-2004, et ETHER a donc développé les outils pour la mise à disposition des données du satellite ENVISAT, le traitement et la mise à disposition des données du satellite franco-suédois ODIN, la mise à disposition de modèles et de résultats d'assimilation de ces données. Enfin depuis

2004, les contours ont été redéfinis par la communauté scientifique nationale avec l'appui du PNCA : la mission d'ETHER est étendue à la chimie de l'atmosphère en général (depuis les basses couches de la troposphère jusqu'à la stratosphère) et aux données de tout type (satellites, in situ locales, in situ par avion, télédétection depuis le sol, résultats de modèles de prévision avec assimilation de données,...). Parallèlement, un centre d'expertise sur l'assimilation a été créé dans le cadre du pôle thématique ETHER. D'autres centres d'expertise sont en cours de création et verront le jour dès 2005. Des évolutions techniques sont en cours pour prendre en compte ces nouveaux contours.

**b) Base thématique Nuages/rayonnement et Centre d'expertise ICARE-IPSL (CEXII) :** Les laboratoires de l'IPSL sont impliqués depuis longtemps dans le traitement et l'utilisation des données satellitaires relatives à l'observation des nuages, du rayonnement et des aérosols, en relation avec les thématiques de recherche liées à l'étude du cycle de l'eau. Un fait marquant des dernières années est d'avoir affiché une volonté au sein de l'IPSL de coordonner cette activité, de lui donner une dimension nationale et internationale à travers le centre d'expertise ICARE de l'IPSL (CEXII). Une étape importante a été l'ouverture d'une partie du serveur de données Climserv du LMD à l'ensemble l'IPSL. Ce serveur proposait déjà aux chercheurs du LMD, l'accès regroupé à des données liées notamment à des expériences telles que INDOEX (observations satellites, sorties de modèles). Il s'est enrichi ces dernières années, de la base de données AMMASAT (observations satellitaires liées au projet AMMA sur la mousson africaine), de jeux de données globaux concernant les mesures des capteurs tels que AIRS, MODIS,... Depuis 2003, des possibilités de calcul sur les machines couplées au stockage de données de CLIMSERV sont offertes à l'ensemble des chercheurs de l'IPSL, ce qui permet d'éviter le rapatriement de gros jeux de données. D'une manière plus générale, la valeur ajoutée par rapport à d'autres archives réside dans l'accès via Climserv à des données de sources multiples (satellites opérationnels météo de différentes agences, satellites de recherche, différents niveaux de traitement, analyses de modèles météo,...) regroupées de façon cohérente par projet (par exemple pour AMMASAT), ainsi que dans la normalisation des formats (NetCDF), la mise à disposition d'outils d'extraction et de visualisation, et la mise à disposition de ressources de calcul qui permettent des développements sans rapatriement de données. Les travaux en cours et les évolutions prochaines concernent le renforcement de cette activité à travers le Centre d'Expertise ICARE IPSL (CEXII) dont l'objectif est de participer au pôle national ICARE mis en place par le CNES et l'INSU. Les projets dans le cadre du CEXII sont décrits dans la partie prospective.

**c) Base de données Atmosphères Planétaires :** En 2003-2004, le Centre de Données a mis en place une base de données « Atmosphères planétaires », en collaboration avec le Pôle de Planétologie. La base de données contient actuellement des données de l'instrument SPICAM déployé dans le cadre de la mission MARS Express. Elle a vocation à s'enrichir d'autres

données (missions antérieures, ou futures missions vers Vénus,..) et l'IPSL se positionne ainsi comme un partenaire potentiel pour la mise en place d'un centre national de données planétaires, qui est à l'étude par nos tutelles (CNES, INSU).

## I.5.2 - Activités générales

Les activités générales du Centre de Données ont concerné principalement 3 domaines: le « métacatalogue » de données, la mise à disposition des réanalyses des modèles météorologiques, un soutien à d'autres services de l'Institut (Services d'observation, SIRTA, ...):

- *Le méta-catalogue* : celui-ci a été créé il y a plusieurs années pour regrouper l'information sur les données produites par les chercheurs de l'IPSL ou celles auxquelles ils ont accès à travers divers projets. L'objectif était de mieux partager les données au sein de l'IPSL ainsi que de donner plus de visibilité sur ces données vers l'extérieur. Il est à noter que la norme de référencement choisie (norme DIF) est une norme internationale compatible avec plusieurs systèmes d'interrogations de bases de données. En 2002-2003, ce service a été profondément remanié avec une nouvelle structuration et une interface homme-machine. De fortes incitations ont été relayées dans les laboratoires pour que les chercheurs alimentent en informations ce métacatalogue.
- *Les réanalyses des modèles météorologiques* : un effort très important a été réalisé ces trois dernières années pour mettre à disposition des chercheurs de l'IPSL, les réanalyses météorologiques des centres européens (CEPMMT) et américain (NCEP), avec des outils d'utilité générale (format normalisé NetCDF, outils d'extraction et visualisation, variables moyennées selon différentes options). Ces données sont largement utilisées au sein de l'IPSL pour la modélisation, à différentes échelles temporelles et spatiales, de l'atmosphère, de l'océan, du climat ainsi que pour des études algorithmiques en préparation aux missions spatiales.
- *Le soutien aux services et chercheurs de l'IPSL* : Le Centre de Données a participé et incité à une harmonisation des données des services d'observation de l'IPSL (OISO, RAMSES, NDSC). Il a également participé (le LMD étant le plus impliqué) à la mise en place d'une base de données pour les données systématiques du site expérimental de l'IPSL (SIRTA) et d'une campagne de mesures associée (VAPIC1). En liaison avec le pôle de modélisation, il a participé à la mise en place d'une base de données « sorties de modèles de climat ». Il participe également au maintien des bases de données des campagnes expérimentales gérées par le CETP/IPSL portant sur des données d'expériences coopératives (telles que FETCH, base de données flux, FASTEX, AIMWATER,...).

### **I.5.3 - Techniques de grille appliquées aux données**

Dans le cadre du projet Européen DATAGRID, l'IPSL a contribué depuis 2001 au développement et à la validation de "grilles numériques" visant à partager des moyens de calcul distribués pour l'analyse de grandes bases de données (pouvant aller jusqu'à plusieurs petabytes). DATAGRID était un projet de démonstration avec 25 partenaires dont le CERN, CNRS, INFN, ESA, CS, IBM,... L'objectif était de développer et tester une infrastructure pour le partage des ressources distribuées de calcul et d'archivage en utilisant un réseau à haut débit (10Gb/s). L'un des domaines d'application choisi par ce projet était l'observation de la terre.

Suite à la sollicitation du CNRS, l'IPSL s'est impliqué dans ce projet en proposant, en collaboration avec le KNMI et l'ESA, une application liée à l'inversion de données issues de capteurs satellitaires dédiés à la mesure de la composition chimique de l'atmosphère (ozone) et à leur validation. Cette participation a été pilotée par M. Petitidier (chercheur CETP/IPSL-40%), qui s'est appuyée sur des moyens techniques de l'IPSL (C. Boonne et CDD) et des chercheurs du SA/IPSL (S. Godin, S. Bekki, P. Keckhut). L'IPSL a contribué à tester les fonctionnalités de la grille avec des outils de validation des profils d'ozone produits par différents algorithmes (de l'ESA, du KNMI) appliqués aux données GOME (satellite ERS), en utilisant les données de lidars provenant de 7 sites dont les données sont archivées dans la base NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change). En 2003, l'Institut a mis également en œuvre sur la grille, avec le soutien de partenaires et des services de l'ESA, la validation « opérationnelle » du capteur GOMOS (satellite ENVISAT) que le Service d'Aéronomie a en charge.

## **I.6 - Activités liées au statut d'OSU**

Nous présentons ici le bilan des activités conduites au sein de trois services d'observation labellisés, le NDSC (changements de la stratosphère), RAMCES (service d'observation lié au réseau CO<sub>2</sub> - Chimie troposphérique) et CARAUS (CARbone AUstral), ainsi que celles du SIRTA (Site Instrumenté Régional de Télédétection Atmosphérique), de création plus récente.

### **I.6.1 - Le Service d'Observation des changements de la stratosphère NDSC**

L'IPSL est très impliqué dans le réseau international de détection des changements de la stratosphère (Network for the Detection of Stratospheric Changes) et assure la coordination de 3 stations primaires (2 formalisées et une en voie de l'être) sur 5 actuellement et plusieurs stations secondaires qui vont des pôles aux tropiques en collaboration avec d'autres laboratoires français. Les observations conduites par l'IPSL concernent l'ozone et les paramètres associés (température et particules) à partir de 3 grandes familles d'instrument (lidar, sondage ballon et spectromètre). Ces 4 dernières années, l'exploitation des données à porté sur les thèmes suivants :

- L'amélioration des techniques de mesure et la validation des instruments
- La validation satellitaire et le raccordement entre des données spatiales
- L'établissement de climatologies et l'étude des variabilités naturelle et d'origine anthropique
- La quantification de la destruction d'ozone chaque hiver en région polaire
- L'étude des processus spécifiques aux tropiques
- L'étude de la destruction de l'ozone à moyenne latitude dans la région couvrant la haute-troposphère et la basse-stratosphère.
- L'étude des nuages et des processus microphysiques associés

La validation continue des instruments par l'intermédiaire d'instruments mobiles, de comparaisons avec les données satellitaires et l'inter-comparaison des méthodes d'analyse permet de fournir des données de qualité. Une synthèse de l'ensemble de ces travaux a été réalisée pour les lidars ; elle décrit les instruments utilisés et permet de qualifier les performances de l'ensemble du réseau, notamment pour les validations satellitaires. Les spectres fournis par les spectromètres et les méthodes d'analyse ont également été analysés. De nombreuses données depuis l'espace (GOME, TONS, ENVISAT, ré-analyse d'UARS, ODIN, POAM III) ont été comparées avec celles acquises par l'IPSL ce qui a permis d'estimer les biais instrumentaux. Ce travail a été mené en parallèle avec les développements des techniques d'assimilation et de modèles climatologiques de marées atmosphériques. Ces dernières

représentent actuellement la principale limitation pour assurer le raccordement de plusieurs expériences dans le cas, par exemple, des satellites de la NOAA.

La quantification de la destruction d'ozone chaque hiver nécessite une analyse spécifique pour extraire la composante dynamique qui masque les diminutions chimiques d'ozone. Deux approches ont été utilisées. La première consiste à lancer des sondes sous ballon dans la même masse d'air sondée quelques heures auparavant par une autre station grâce à un modèle de prévision des trajectoires (MATCH). La différence entre deux points de mesures ne se trouve pas influencée par les fluctuations d'origine dynamique et permet de quantifier des destructions instantanées. Les stations de l'IPSL ont donc contribué plusieurs années à ces campagnes à partir des sondes sous ballon et par lidar. L'autre technique utilise les données des spectromètres fonctionnant en régions polaires et un modèle numérique. Les colonnes d'ozone mesurées par les spectromètres à partir de la pénombre des nuits polaires permettent d'assurer une surveillance continue dans ces régions. Un Modèle de Chimie Transport forcé par les analyses météorologiques et initialisé au début de l'hiver permet de quantifier les variations d'ozone d'origine dynamique. La différence donne directement la destruction chimique et montre des fluctuations allant en Arctique de 5 à 40 % en fonction de l'hiver considéré. Cette forte variabilité inter-annuelle est due aux fluctuations de température dont les causes ne sont pas parfaitement comprises. L'apparition de nuages de glace dans la stratosphère polaire est très dépendante de la température. Ces nuages sont accessibles par lidar et leur climatologie a été effectuée ainsi que leur caractérisation. En effet plusieurs types de nuages peuvent exister, susceptibles d'être constitués de cristaux, de gouttelettes ou d'un mélange des deux. Les différentes mesures lidar ont permis d'identifier ces différents types.

Avec les longues séries d'ozone et de température obtenues depuis l'Observatoire de Haute Provence, il a été possible de déduire des tendances significatives d'ozone et de température que l'on pourrait associer à une origine anthropique. Les méthodes d'analyses de régression multi-fonctions ont été développées et évaluées à partir de signaux artificiels. D'autres méthodes ont été évaluées lorsque la variabilité est forte et que les approximations des moindres carrés ne sont plus applicables.

Ces analyses ont fait l'objet de nombreuses citations dans des rapports internationaux (SPARC, WMO, IPCC). La destruction d'ozone en basse stratosphère n'est pas parfaitement comprise. Plusieurs hypothèses s'affrontent mettant en jeu, le forçage dynamique de la troposphère lui-même modifié par le réchauffement des gaz à effet de serre, le transport des masses d'air polaire appauvries en ozone, ou d'autres mécanismes de destruction locale et notamment à partir de cirrus. Les corrélations de l'ozone et de la température avec l'activité ondulatoire provenant de la troposphère (donnée par les flux Eliassen Palm) sont très importantes mais ne permettent pas de préjuger de l'origine première de ces fluctuations tant que les mécanismes de couplage entre la troposphère et la stratosphère ne sont pas mieux compris. Le transport des masses d'air est assuré à partir de structures de quelques kilomètres de hauteur, de quelques 100 de kilomètres de section et s'étendant sur quelques dizaine de milliers de

kilomètres de longueur. Ces filaments, générés par des mécanismes d'interaction non linéaires, ont pu être mieux étudiés, à partir des données des stations et d'un modèle d'advection pouvant inclure la chimie (MIMOSA-CHIM). Les mécanismes de formation de ces structures ont été reproduits dans un modèle global couplé ensuite à un modèle d'advection afin de quantifier le transport associé. L'analyse des données montre que ce mécanisme peut expliquer une fraction de la destruction d'ozone à moyenne latitude mais pas sa totalité et que d'autres mécanismes doivent être étudiés.

Afin d'évaluer les possibilités de destruction par des cirrus, des observations lidar spécifiques ont été initiées et les premières années de mesures ont permis d'établir les premières climatologies à partir des caractéristiques morphologiques de ces nuages à moyenne latitude et au tropique. Les cirrus apparaissent en dessous de la tropopause et sont présents toutes l'année avec une fréquence de 50 % à moyenne latitude alors qu'aux tropiques on peut noter un cycle annuel très marqué. En région tropicale, l'ozone dans la troposphère présente de forte variabilité dominée par les aérosols de feu de biomasse et les mécanismes de transport depuis la stratosphère. Ces mécanismes ont montré parfois une extension planétaire. A moyenne latitude les fluctuations sont dues aux transports d'air pollué ou aux mécanismes d'échange avec la troposphère. Des analyses préliminaires multi-paramètres ont été entreprises pour identifier leurs contributions respectives.

## **I.6.2 - Observatoire RAMCES**

En tant qu'Observatoire des Sciences de l'Univers, l'IPSL a une mission de collecte systématique, d'archivage et de distribution de données d'observation d'intérêt expérimental. C'est dans ce cadre que se placent les activités du réseau atmosphérique de mesure des constituants à effet de serre (RAMCES) dont la mise en place répond à deux grands objectifs : comprendre le cycle des principaux gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) et leur rôle au sein du système climatique, et évaluer le bilan de carbone d'une grande région et sa variabilité dans un contexte de vérification de politiques de contrôle ou de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le transport atmosphérique agit comme un intégrateur rapide, mais incomplet, de l'hétérogénéité et de la variabilité de flux de surface, de sorte que la distribution des concentrations de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère peut être utilisée pour inverser celle des flux, à l'aide de modèles numériques du transport atmosphérique. Cette approche dite de "modélisation inverse" s'applique pour déterminer la distribution des puits et sources de carbone sur de très grandes régions, à partir d'un réseau global de prélèvements d'air de 100 stations environ. Pour utiliser cette méthode aux échelles régionales, soit au mieux 50 à 200 kilomètres ce qui correspond à la maille élémentaire des modèles tridimensionnels (3D) de transport de traceurs. Il faut des observations atmosphériques spécifiques, dont la précision et la représentativité permettent de documenter les principaux processus biogéochimiques qui contrôlent les échanges

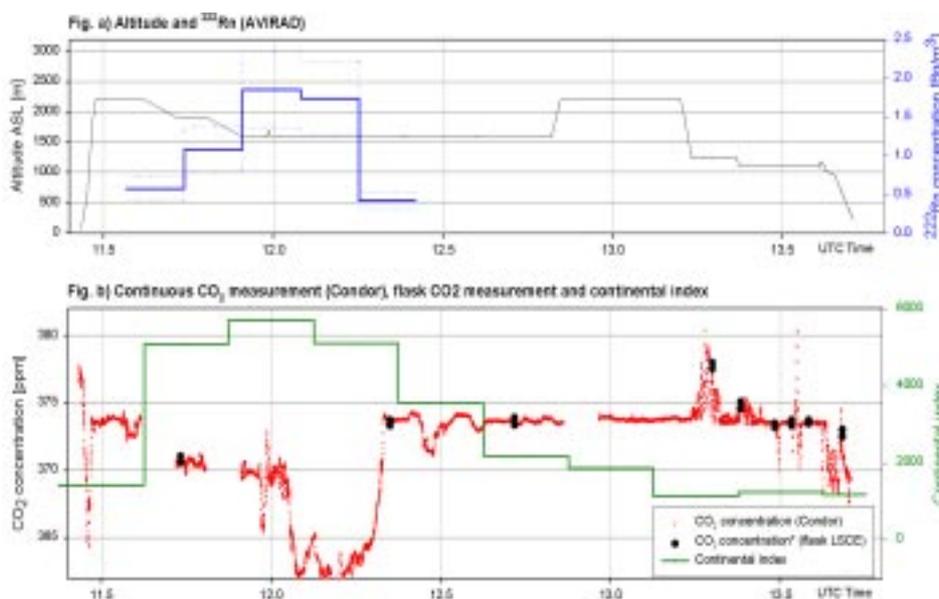
de CO<sub>2</sub> avec l'atmosphère. Les gradients des concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui contiennent l'information sur les bilans régionaux de carbone sont cependant très faibles (< 1 ppm), et donc difficiles à détecter avec un réseau de stations espacées de 2000 km comme actuellement.

Pour inverser les bilans régionaux de CO<sub>2</sub> à partir de données atmosphériques, il faut effectuer des mesures de concentration à haute précision près de la surface, avec une fréquence d'acquisition élevée, c'est à dire des mesures en continu, et surtout avec un réseau dense de stations. Comme la variance des concentrations mesurées est la quantité qui importe pour déterminer la précision des inversions conduisant à l'estimation des flux régionaux, le nombre de mesures devrait être le plus dense possible. De plus, comme la variabilité inter annuelle du climat module l'intensité des échanges de CO<sub>2</sub> entre la végétation et l'atmosphère, il nous faut disposer de séries longues.

L'ORE-RAMCES a pour but d'apporter des mesures atmosphériques pour quantifier les flux de CO<sub>2</sub> et gaz à effet de serre aux échelles régionales. Il y a quatre ans, nous avons mis l'accent sur le développement d'un réseau de prélèvement d'air pour une analyse multi-composés. Ces développements ont été tous menés à bien. Pour la période 2000-2004, le suivi à long terme du CO<sub>2</sub> et du Radon ont été poursuivis dans les observatoires de l'Ile Amsterdam et de Mace Head.

De plus, un effort important a été mis sur le développement des mesures régionales de CO<sub>2</sub> en Europe, principalement dans le cadre de programmes Européens. Le LSCE a coordonné deux projets Européens, AEROCARB et TACOS-INFRASTRUCTURE, ce dernier dans l'appel d'offre Infrastructure, pour quantifier et comprendre à l'aide de méthodes atmosphériques les flux de CO<sub>2</sub> en Europe, dans le cadre du Protocole de Kyoto. Depuis le rapport présenté dans la précédente demande quadriennale, les activités de l'observatoire RAMCES ont porté sur les aspects suivants :

- *Développements d'instrumentation in-situ pour la mesure de CO<sub>2</sub>* : Entre 2000 et 2004, nous avons entrepris des développements instrumentaux afin d'adapter les spectromètres IR non-dispersifs LICOR aux besoins de mesures à haute précision in situ au sol, et de profils verticaux aéroportés. Pour l'aéroporté, nous avons construit un analyseur compact CONDOR destiné à de petits avions non-pressurisés et qui est régulièrement utilisé à Orléans depuis 2003. Pour le programme CARIBIC et ses prédécesseurs CAATER (Figure I.6.1), un instrument aéroporté CONDOR-X automatisé et compatible aux normes aéronautiques a été construit et sera opérationnel en Juillet 2004 dans un Airbus A400-600 pour des vols transcontinentaux où un grand nombre d'autres composés seront mesurés.

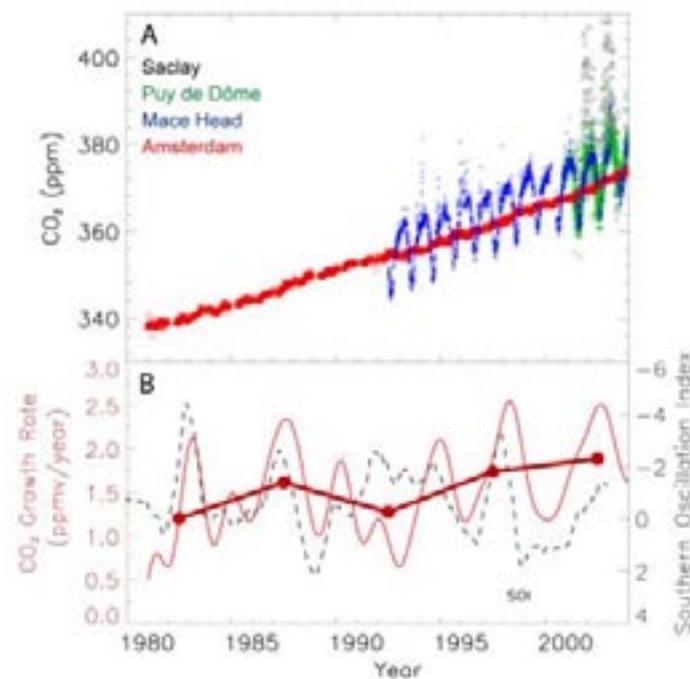


**Figure I.6.1:** (A) Altitude du vol lors de la campagne CAATER 1 en mai 2001 (transect Brest-Paderborn; trait noir) et concentration de Radon-222 (trait épais bleu). (B) Concentrations de CO<sub>2</sub> mesurées in-situ (points rouges) et à partir de prélèvements d'échantillons d'air (cercles noirs), et indice de continentalité déduit des rétro-trajectoires (trait vert, Hysplit4). La baisse de CO<sub>2</sub> entre 12 et 13hr est due à l'absorption de carbone par la biosphère continentale, alors que le pic observé après 13 h correspond aux émissions anthropogéniques de la Ruhr.

- *Laboratoire d'analyse multi-espèces* : Les capacités du laboratoire d'analyse des échantillons d'air de Gif ont été améliorées grâce à l'acquisition d'un Chromatographe Gaz. L'optimisation des instruments et l'amélioration des calibrations a permis d'augmenter d'un facteur trois la précision de la mesure de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et CO, et d'ajouter la mesure de N<sub>2</sub>O et SF<sub>6</sub> à l'aide d'un détecteur à capture électronique. Nous avons participé à des intercomparaisons fréquentes avec les meilleurs laboratoires dans le monde qui ont montré la qualité des mesures de l'ORE-RAMCES. Des travaux de jouvence sont en cours pour la mesure des isotopes par extraction cryogénique et spectrométrie de masse avec la machine MAT-Finnigan 252 installée au LSCE en 1994. Nous avons enfin acquis et installé au LSCE un analyseur LOFLO à haute précision et coordonné des exercices fréquents d'intercomparaison avec d'autres laboratoires Européens afin d'améliorer l'homogénéité des jeux de données de différents laboratoires.

- *Développement du réseau et gestion des données* : Grâce au programme CARBOEUROPE et GICC-1, et à la mise en place des ORE, deux stations de mesure in situ ont été établies en atmosphère continentale, Saclay et Puy de Dôme (Figure I.6.2). Afin de quantifier les teneurs intégrées dans la couche limite atmosphérique, nous avons aussi poursuivi la mesure de profils verticaux à Orléans et la mise en place de quelques sites de prélèvements d'air là où le réseau Européen possède des lacunes. En 2005 nous aurons deux tours de radiodiffusion de 200 m équipées pour des mesures de CO<sub>2</sub> en continu près d'Orléans et de Toulouse. Le réseau de

stations d'observations ORE-RAMCES en continu est un outil unique en Europe de par sa densité pour tester une nouvelle génération de modèles inverses. Afin de gérer efficacement le flux de données de l'ORE-RAMCES une base de données relationnelles est en cours d'installation. L'ensemble du schéma entité-relation a été réalisé sous MySQL. Des interfaces sont maintenant développées sous Python afin d'alimenter et de consulter la base de données.



**Figure I.6.2** : A/ Suivi du CO<sub>2</sub> dans les observatoires de l'ORE-RAMCES: Ile Amsterdam (37°57'S, 77°32'E), Mace Head (53°19'N, 9°53'W), Puy de Dôme (45°45'N, 3°00'E) et Saclay (48°45'N, 2°10'E). Chaque point représente une moyenne journalière calculée à partir des mesures en continu. B/ Taux de croissance du CO<sub>2</sub> à l'Ile Amsterdam (trait continu rouge fin) et indice climatique SOI. Les forts taux de croissance du CO<sub>2</sub> (1983, 1987, 1998, 2002) correspondent à des épisodes El-Nino, à l'exception de l'épisode de 1991/92. Durant cet épisode El-Nino, les puits de carbone ont été très efficaces en raison de perturbations climatiques faisant suite à l'éruption du Mont Pinatubo. Les mécanismes mis en jeu restent encore mal définis. Les cercles rouges représentent les moyennes à 5 ans du taux de croissance du CO<sub>2</sub>. On constate sur les 23 ans de mesure une accélération de la croissance du CO<sub>2</sub> atmosphérique de 1.2 à 1.8 ppm/an.

- *Campagnes de mesures aéroportées* : Les observatoires de surface ne suffisent pas pour rendre compte de la distribution du CO<sub>2</sub> au-dessus du continent eurasien. Afin de permettre des mesures aéroportées dans la moyenne troposphère nous avons développé un analyseur de CO<sub>2</sub>, baptisé CONDOR, avec lequel nous avons organisé plusieurs campagnes de mesure. Deux campagnes CAATER (mai 2001 et octobre 2002) ont permis un survol de l'Europe de l'Ouest en 3 jours, à bord du FALCON de la DLR (Filippi et al., 2001). Ces campagnes ont permis de mettre en évidence les variations très rapides de CO<sub>2</sub> dans la moyenne troposphère suivant

l'origine océanique ou continentale des masses d'air (Figure I.6.2). La mesure in-situ du Radon-222 par l'instrument AVIRAD du LSCE permet d'identifier les masses d'air en contact récent avec les surfaces continentales.

Lors de ces premières campagnes aéroportées nous avons validé l'analyseur CONDOR qui mesure le  $\text{CO}_2$  avec une précision meilleure que 0.2 ppm (Messenger, 2003). L'analyseur CONDOR est désormais utilisé tous les 15 jours à bord d'un Piper Aztec pour des profils (100-3000m) de  $\text{CO}_2$  au-dessus de la Forêt d'Orléans. En collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse des vols Paris-Toulouse ont été organisés avec des mesures in-situ de  $\text{CO}_2$ , CO et  $\text{O}_3$  (avril 2003 et mai 2004). Ces campagnes seront désormais réalisées chaque saison afin de rendre compte de la variabilité de ces gaz au-dessus de la France. Enfin nous avons réalisé plusieurs campagnes de mesures aéroportées en Russie dans le cadre du projet européen EuroSiberian Carbonflux. Ces campagnes ont permis de caractériser les cycles saisonniers du  $\text{CO}_2$  et de ses isotopes stables dans la couche limite atmosphérique ainsi que dans la troposphère libre (Ramonet et al., 2002; Levin et al., 2002; Chevillard et al. 2002). Nous avons aussi mis sur pied des campagnes intensives qui ont permis de quantifier le cycle diurne du  $\text{CO}_2$  au-dessus de différents types d'écosystèmes en Russie.

- *Inversion de la variabilité interannuelle des flux de  $\text{CO}_2$*  : Une inversion non-stationnaire a été réalisée par Ph. Bousquet et Ph. Peylin pour interpréter 20 ans de mesures atmosphériques du réseau international. Les flux sont optimisés mensuellement à partir de moyennes mensuelles des données. Les problèmes spécifiques sont l'inhomogénéité du réseau de mesure qui a beaucoup augmenté dans les années 1990, les incertitudes liées aux erreurs d'ébauche sur les flux océaniques et continentaux, et l'incertitude sur le transport. Nous avons construit un ensemble de simulations inverses pour différentes régions, et nous avons montré que 1) les anomalies interannuelles des gradients de  $\text{CO}_2$  atmosphérique sont plus robustes en termes de flux optimisés que les gradients moyens, 2) la variabilité interannuelle des flux continentaux, marquée par l'impact des événements climatiques récents (El Niño, Pinatubo) est supérieure à celle des échanges air-mer, 3) que les résultats de l'inversion pour des grandes régions se comparent assez favorablement aux prédictions de modèles biogéochimiques pour les régions où la densité d'observations atmosphériques est suffisante (Hémisphère Nord, Pacifique Est équatorial).

### **I.6.3 - Le Service CARAUS (CARbone AUstral)**

L'observation et la compréhension des variations saisonnières, interannuelles et décennales du cycle du carbone océanique sont primordiales pour estimer les bilans contemporains de carbone à l'échelle planétaire (e.g. cadre protocole de Kyoto) et paramétriser puis valider les modèles climatiques prédictifs (e.g. scénario IPCC). Jusque dans les années 80, très peu de mesures répétitives du carbone inorganique et de la pression partielle  $\text{pCO}_2$  existaient pour le

compartiment océan. Dans les années 90 les expériences WOCE et JGOFS ont permis d'accroître considérablement ces observations. Les résultats de ces expériences associées à d'autres mesures sur le terrain ont, en particulier, permis d'établir une première climatologie mondiale des flux air-mer de CO<sub>2</sub> permettant notamment de contraindre les méthodes d'inversion atmosphérique. Elles ont aussi montré que la variabilité des flux air-mer de CO<sub>2</sub> pouvait être importante notamment dans le secteur du Pacifique Equatorial en liaison avec ENSO. Elles ont enfin permis de dresser pour la première fois un inventaire de carbone anthropique dans l'océan mondial avec, il faut le noter, de grandes incertitudes dans l'océan austral.

Forte de cet élan initié durant les années 90, la communauté internationale a démontré l'intérêt de poursuivre ce type d'observations, tant sur les séries de surface (SOLAS) que sur la colonne d'eau (CLIVAR). En effet, ces observations permettent d'acquérir des informations déterminantes sur l'état du système biogéochimique dans l'océan, sa variabilité et son évolution (suivre l'accroissement du CO<sub>2</sub> dans les eaux de surface), comment l'océan régule l'accroissement du CO<sub>2</sub> atmosphérique (piégeage du CO<sub>2</sub>), voire de quelle manière il subit les impacts anthropiques (acidification et déplacement des niveaux de saturation des carbonates). Les questions sont nombreuses, d'autant que les modèles climatiques couplés parfois avec le cycle du carbone (entre autres celui de l'IPSL) suggèrent que dans un proche avenir (à l'horizon 2100) les distributions des flux de CO<sub>2</sub> océaniques pourraient être modifiées, notamment dans les hautes latitudes sud, et la capacité de l'océan à réguler l'accroissement de l'effet de serre en serait réduite. Les observations biogéochimiques (dont le CO<sub>2</sub> dans l'océan) telles que celles proposées dans l'observatoire CARAUS sont fondamentales pour accroître nos connaissances sur les mécanismes internes océaniques et, au-delà, pour valider les modèles de prédiction climatique.

Dans le cadre de l'effort international (SOLAS, CLIVAR, IGOS...) et afin de compléter les observations effectuées par d'autres équipes dans les océans Atlantique et Pacifique, le programme OISO (Océan Indien Service d'Observation, labélisé S.O./INSU depuis Juillet 97) et les campagnes MIVERVE associées dans l'ORE CARAUS depuis 2003, visent à maintenir sur une longue durée l'observation des propriétés océaniques et atmosphériques liées au cycle du carbone dans l'Océan Indien Sud et l'océan Austral. Les campagnes OISO mettent à profit les navigations du *Marion-Dufresne* (IPEV/TAAF) durant les opérations de type Observatoire pluridisciplinaire et logistiques dans le secteur des Iles Subantarctiques Françaises. Les campagnes MINERVE organisées en coopération avec le CSIRO (Hobart/Australie) utilisent les rotations de l'*Astrolabe* (IPEV/TAAF) entre la Tasmanie et La Terre Adélie. Depuis 1998, 12 campagnes OISO et 7 campagnes MINERVE ont été réalisées. Parmi les résultats majeurs obtenus depuis 2002, nous citerons :

- Les observations menées en été et hiver austral ont permis d'obtenir une première estimation directe de la variabilité saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> à l'interface air-mer en zone australe : les sources de CO<sub>2</sub> observées en hiver conduisent à réviser les

précédentes estimations, notamment celles déduites des modèles océaniques. La communauté internationale a été attentive à nos travaux qui ont également servi à apprécier la qualité du cycle saisonnier des flux air-mer de CO<sub>2</sub> déduits des modèles d'inversions atmosphériques.

- Une première analyse de la variabilité interannuelle des flux air-mer de CO<sub>2</sub> à l'échelle régionale dans l'océan indien sud et l'océan austral: en particulier, les implications sur les changements des sources et puits de CO<sub>2</sub> océaniques dans un contexte de réchauffement climatique ont été étudiées.
- L'identification du CO<sub>2</sub> anthropique en surface et sur la colonne d'eau rendu possible grâce à la continuité des observations menées depuis 1998 les données OISO qui témoignent notamment d'une augmentation de la pCO<sub>2</sub> et de carbone dissous DIC couplée à une diminution du rapport isotopique <sup>13</sup>C/ <sup>12</sup>C.

#### **I.6.4 - Site Instrumenté Régional de Télédétection Atmosphérique (SIRTA)**

Résultant d'une volonté scientifique commune de l'École Polytechnique et de l'IPSL, la réalisation du Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique (SIRTA) a été financée par moitié par chacun des organismes. L'École Polytechnique, le LMD et l'IPSL ont fourni les moyens, tant financiers qu'en personnel, pour développer et aboutir rapidement à une version opérationnelle du SIRTA. Cette initiative correspondait à des besoins scientifiques en terme d'observation clairement exprimés et à une volonté commune de renforcer l'expertise unique de l'IPSL dans le domaine des télédétections optique et micro-onde. L'infrastructure et les moyens de télédétection du SIRTA ont été progressivement développés depuis 1999 à partir d'instruments développés au LMD et au SA (lidars, radiomètres), au CETP (radars, radiomètres microondes), et dans d'autres laboratoires (LISA, LOA). En 2002, le développement d'un système de traitement, de visualisation, d'archivage et de mise à disposition des données a été initié. Il permet d'ores et déjà de diffuser ces données à un grand nombre d'utilisateurs scientifiques. Aujourd'hui, la base de données SIRTA contient plus de deux ans de données.

Le SIRTA répond aux besoins de recherche de synergies instrumentales nouvelles devenant une nécessité pour répondre aux objectifs des thèmes scientifiques. En regroupant des instruments de télédétection de pointe, le SIRTA permet à l'IPSL de conduire des recherches nouvelles et de s'inscrire dans les programmes coopératifs internationaux. Ce regroupement technologique permet également d'étudier de nouvelles charges utiles aéroportées (combinant Lidar, Radar, et radiomètres) pour couvrir de plus grandes échelles et préparer les futures missions spatiales de lidar et de radar dans l'espace : "CALIPSO" (NASA/CNES) et CLOUDSAT (NASA) avec un lancement prévu en 2005, et EarthCARE (2009). La présentation des activités du SIRTA est scindée en deux parties ; la première concerne le développement du site de télédétection, la seconde les projets scientifiques qui y sont conduits.

**a) Développement du site de télédétection** : Les thèmes de recherche, autour desquels le SIRTA s'est développé, s'inscrivent dans les axes stratégiques de l'IPSL :

- Le "Bilan radiatif" de l'atmosphère en liaison avec la couverture nuageuse et les aérosols troposphériques, en particulier les cirrus, ce dans le cadre de programmes internationaux orientés vers l'étude du climat,
- Le "Cycle de l'eau" en liaison avec le bilan radiatif et la dynamique des écoulements et échanges atmosphériques de la surface à la tropopause,
- La problématique de la "Qualité de l'air" en liaison avec la pollution urbaine ; il s'agit de la dynamique de la couche limite, du rôle des nuages et aérosols dans la photochimie atmosphérique.

<b>Instruments</b>	<b>Paramètres</b>	<b>Labo</b>
Lidar rétrodiffusion (532, 1024nm)	Propriétés macro- et microphysiques des nuages et aérosols	LMD
Télémètre (950 nm)	Altitude de base des nuages	KNMI
Radar Nuage RASTA (95 GHz)	Macro-physique des nuages	CETP
Station radiométrique (SW, LW)	Flux radiatifs solaires (direct + diffus) et telluriques	LMD
Photomètre AERONET (8 canaux)	Epaisseur optique aérosols, granulométrie	LOA
Radiomètre CLIMAT (8-13mm)	Température de brillance	LOA
Radiomètre haute-fréq. (20+30GHz)	Contenu en eau (vapeur + liquide)	CETP
Actimètre (290 nm)	Taux de photolyse du NO <sub>2</sub>	LMD
Station Météorologique	Pression, température, humidité, vent, précipitation	LMD
Radiosondages (Météo-France Trappes)	Profil vertical PTH	Météo-Fr.
Anémomètre sonique	Flux d'énergie turbulente	SA

**Tableau I.6.4.1** : Instruments utilisés sur le site

Ces travaux s'appuient très largement sur l'expérimentation qui elle-même repose sur une instrumentation de pointe en télédétection. Les liens avec les équipes de modélisation de l'IPSL ont été développés par des projets de recherches communs et par le développement de méthodes d'exploitation des données adaptées aux besoins des modèles.

Instruments	Paramètres	Labo	Campagne
Lidar Doppler IR 10.6 mm (LVT)	Profil de vent 3D	LMD	ECLAP, ESQUIF, VAPIC
Lidar Raman UV	Profil vapeur d'eau	SA	VAPIC
Lidar DIAL UV ALTO	Profil d'ozone, aérosols	SA	ESQUIF
Radar Doppler 5Ghz (RONCARD)	Précipitations et vent 3D	CETP	VAPIC

**Tableau I.6.4.2** : Instruments utilisés lors de campagnes de mesures

Le site de télédétection est composé de quatre éléments distincts : 1) un ensemble de six plates - formes accueillant les gros instruments de télédétection ; 2) un mât de 30 m équipé d'une station météo et de mesures de flux d'énergie ; 3) un local fermé dédié au Lidar Nuages-Aérosols qui est en opération sur le site de l'Ecole Polytechnique depuis 1993 ; 4) une surface de 100 m<sup>2</sup> sur le toit de laboratoires, où sont déployés des radiomètres optiques et micro ondes et des instruments de mesures météorologiques. Les laboratoires de l'IPSL ont développé des lidars et des radars météorologiques qui fonctionnent de manière routinière (Tableau 1) ou dans le cadre de campagne de mesures (Tableau 2) sur le site de l'IPSL.

**b) Projets scientifiques du SIRTA** : Les activités scientifiques sont focalisées autour des projets suivants :

- *Processus nuageux (CLOUDNET, 5<sup>ème</sup> PCRD)* : L'objectif de ce programme est d'étudier les propriétés macrophysiques, microphysiques, dynamiques, et radiatives des nuages à partir d'observations radar et lidar afin d'améliorer les représentations paramétriques des processus nuageux sous maille dans les modèles de prévision numérique (ARPEGE, UKMO, ECMWF). Ces études sont effectuées à partir d'observations de trois sites européens : Palaiseau (F), Chilbolton (GB), Cabauw (NL). Le cycle de vie des nuages est fortement lié aux dynamiques internes des nuages (sédimentation), à la dynamique de l'air environnant, et aux interactions entre la micro-physique et la dynamique des nuages. La représentation des nuages dans les modèles de prévision météorologique et les modèles climatiques nécessite le développement de représentations paramétriques de ces processus. Ces interactions complexes sont étudiées par l'exploitation combinée des mesures du radar nuage doppler et des signaux de dépolarisation du lidar. Ces études ont mis en évidence des relations entre les conditions dynamiques internes des nuages et les propriétés micro-physiques. (Protat et al, 2004).

- *Dynamique de la couche limite* : Plusieurs études, réalisées à partir de données des campagnes de mesures (ECLAP, ESQUIF) ont porté sur l'observation de processus dynamiques par télédétection lidar rétro-diffusion et doppler. Plus récemment, les études se sont focalisées sur la représentation de ces processus dans les modèles de prévision météorologique et de modèles climatiques. Les observations de couches limites sèches et nuageuses (par lidar) sont confrontées aux prévisions des modèles atmosphériques ARPEGE (Météo-France) et IFS (ECMWF). Une approche utilisant des paramètres diagnostiqués à partir des champs du modèle a été développée pour évaluer la contribution des circulations à meso-échelle sur la structure verticale de la CLA et sur la formation nuageuse. Grâce à cette approche, on accède, dans certains cas, aux sources de désaccord éventuel entre modèles et observations. Elle permet en effet « d'isoler » les processus physiques liés à la couche limite pour les confronter aux observations. L'importance d'une bonne prévision des champs atmosphériques au voisinage de la surface et des évènements précipitants pour le développement de la couche limite convective et l'occurrence de nuages associés a été mise en évidence (Mathieu et al., 2004).

- *Qualité de l'air (ESQUIF, CHIMERE)* : La Qualité de l'air prend de plus en plus d'importance dans les grandes métropoles. C'est pour répondre à cette problématique que le programme ESQUIF a été mis en place. La phase expérimentale s'est déroulée en 3 étapes en 1998, 1999 et 2000. L'instrumentation lidar "Nuages/Aérosols" et radiomètres déjà disponible sur le SIRTA a été mise en œuvre pour étudier les épisodes de pollution d'ozone qui ont lieu l'été. Un des thèmes étudié a été le couplage entre la couche limite convective et la couche résiduelle pendant la période de transition de la journée ce qui a conduit à des résultats nouveaux quant aux processus mis en jeu (Vautard et al, 2003).

Les données du lidar sont une source importante d'informations sur la structure verticale de l'atmosphère, nous permettant de déterminer la présence de couches d'aérosols, leur altitude et leurs évolutions temporelle et spatiale. Cependant, l'utilisation de ces données dans le cadre de la validation systématique des modèles de chimie transport des aérosols reste marginale. Dans cette étude, nous avons mis en place une méthode permettant la comparaison directe entre les données lidar du SIRTA et les simulations du modèle tridimensionnel CHIMERE de l'IPSL. Une trentaine de situations ont été analysées sur la période octobre 2002 - septembre 2003, mettant en évidence la capacité du modèle à simuler correctement la répartition verticale des aérosols dans la basse troposphère. En moyenne le modèle a tendance à sous-estimer la rétro-diffusion lidar ainsi que l'épaisseur optique totale à 0,5 microns. Cette tendance peut être due à la sous-estimation des aérosols organiques secondaires (Hodzic et al, 2004).

- *Transport des aérosols (EARLINET, 5<sup>e</sup> PCRD)* : L'étude du transport d'aérosols à l'échelle régionale est une composante importante des recherches sur la Qualité de l'air. Un réseau lidar d'une vingtaine de stations a été mis en place sur le continent européen dans le cadre du programme EARLINET. Des observations routinières par lidar rétrodiffusion (Lidar Nuage

Aérosol) ont débuté au SIRTa en 2001 et elles se poursuivent. Ces observations à l'échelle européenne ont permis en outre de mettre en évidence la diversité de routes de transport de poussières désertiques en provenance du Sahara. Ce programme a permis également d'étudier en détail l'ensemble des processus intervenant dans le transport régional des aérosols à partir des zones sources africaines jusqu'aux moyennes latitudes (Sauvage et al, 2003).

- *Préparation de missions spatiales (CALIPSO, CLOUDSAT, EarthCARE)* : Les missions spatiales CALIPSO et CLOUDSAT (lancement au premier trimestre 2005) vont être intégrées au train de satellites Aqua-Train. CALIPSO et CLOUDSAT sont les premières missions spatiales exploitant les synergies instrumentales (radar, lidar et radiométrie infrarouge) pour observer les propriétés des nuages et aérosols à l'échelle de la planète. Les observations par radar et lidar du SIRTa ont été exploitées pour développer des algorithmes de restitution des propriétés microphysiques des nuages de glace (Noel et al, 2002 ; Tinel et al, 2004 ; Chiriaco et al, 2004). La bonne connaissance de ces propriétés sur l'ensemble du globe est fondamentale pour étudier l'évolution de l'impact radiatif des nuages de glace. L'exploitation en synergie des profils radar, lidar et des luminances infrarouge à plusieurs longueurs d'ondes permet de contraindre les restitutions de la taille et de la forme des particules de glace formant les nuages.

- *Validation d'observations spatiales (POLDER, MISR/MODIS)* : Les observations lidar et radar du SIRTa ont été utilisées dans le cadre de plusieurs projets de validation d'observations spatiales. Il s'agit de la validation des produits nuages de la mission *POLDER-1* sur la plateforme ADEOS-1 (Chepfer et al, 1999, 2000), des missions MISR et MODIS sur le satellite Terra (Naud et al, 2004), et *POLDER-2* sur ADEOS-2 (en cours). Les observations par lidar et radar au sol sont indispensables pour valider les restitutions satellitales de nuages semi-transparents ou de situations multi-couches, très fréquentes aux moyennes latitudes.

## I.7 - Les Groupes de Travail

Un des moyens d'action fédératifs privilégié de l'IPSL est la mise en place de groupes de travail et de réflexion sur des thématiques communes à l'ensemble de l'Institut. Ouverts sur l'extérieur, ces groupes se réunissent régulièrement sous forme de séminaires et de journées scientifiques qui conduisent in fine à la définition de projets communs au sein de l'Institut, portés ensuite soit par la structure fédérative, soit par les laboratoires eux-mêmes. Quatre groupes fonctionnent ainsi régulièrement au sein de l'Institut :

- GAPI (assimilation de données et problèmes inverses)
- CLIMSTAT (climat et statistiques)
- Dynamique des fluides géophysiques
- Neuratel (inversion de données satellitaires par réseau de neurones)

Un cinquième groupe de travail dédié au cycle de l'eau s'est mis en place en 2002 avec l'objectif de promouvoir l'émergence d'un nouveau pôle scientifique autour de cette thématique (cf I.3).

### I.7.1 - Assimilation de données et problèmes inverses

Le GAPI (Groupe pour l'Assimilation et les Problèmes Inverses) a été constitué au début de 2000. Animé par un conseil scientifique constitué de S. Bekki (secrétaire), Ph. Ciais, M. Crépon, A. Hauchecorne, C. Ottlé et O. Talagrand., il a pour but de stimuler la coopération au sein de l'IPSL sur toutes les questions portant sur les liens entre la modélisation numérique et l'utilisation d'observations. De telles questions sont par exemple:

- La reconstitution de champs physiques à partir d'observations, et particulièrement, l'"assimilation" d'observations, qui met en jeu un modèle dynamique d'écoulement.
- L'identification de paramètres (paramètres 'physiques' de modèles numériques, identification de sources de traceurs, ...).
- L'évaluation de la qualité de modèles dynamiques.
- La définition et l'optimisation de systèmes d'observation.

Le GAPI se veut d'abord un organe d'échange d'informations et de coordination des travaux menés dans les différents laboratoires de l'Institut. Il ne cherche pas, au moins pour le présent, à développer des recherches nouvelles, dont le choix dépend des laboratoires et des équipes concernés. Son action s'est concentrée autour des points suivants.

- Le développement de l'enseignement sur les méthodes d'assimilation et les problèmes inverses.

- La mise en commun et l'échange de logiciels entre les différents Laboratoires de l'IPSL afin d'éviter la répétition, trop fréquente, de tâches de programmation similaires.
- L'organisation de séminaires réguliers et de Journées IPSL sur l'Assimilation et les Problèmes Inverses, destinées à faire le bilan des recherches menées ou en projet au sein de l'Institut, et plus généralement à servir de lieu de rencontre et d'échanges pour l'ensemble de l'IPSL.

## **I.7.2 - Climat et statistiques**

Le groupe de travail "Climat et Statistiques" (CLIMSTAT) a fédéré autour de ce thème les compétences internes de l'IPSL et des compétences externes. Durant les trois dernières années, CLIMSTAT a mené à bien les actions suivantes :

- La conception et la mise en service d'un site Web au sein du site IPSL qui contient (1) des pointeurs vers des nouvelles méthodes statistiques et vers d'autres sites statistiques existants dans le monde (2) une bibliographie commentée (livres, articles de revue, etc.) (3) une liste d'enseignements (buts, programmes, dates, etc.) (4) une liste de sujets de stages, thèses, post-doc proposés, en France et à l'étranger (5) une liste d'annonces de séminaires, conférences, ateliers de travail.
- L'organisation de journées scientifiques " Climat et Statistiques " avec la participation de spécialistes français et étrangers. Ces journées dont l'objectif était de développer une forte collaboration entre des experts statisticiens et les chercheurs de l'IPSL ont été un succès, tant par la qualité des présentations et que par l'intérêt d'un public nombreux (plus de 50 personnes). En outre, quelques séminaires spécialisés ont été organisés.
- Plusieurs initiations à un logiciel de statistique (disponible gratuitement sur le Web et développé par des chercheurs en statistiques), conduites dans certains laboratoires de l'IPSL (SA, LSCE).
- L'organisation d'une rencontre "climat, environnement et statistique", sous l'égide du CLIMSTAT et du groupe « Environnement » de la Société Française de Statistique afin de mettre en regard les développements méthodologiques de la statistique spatiale avec des applications récentes dans divers domaines des sciences de l'Environnement.

## **I.7.3 - Dynamique des fluides géophysiques**

Les travaux du Groupe de travail "Dynamique des fluides géophysiques" sont organisés sous forme de séminaires réguliers (un ou deux séminaires par mois, pour la plupart avec les conférenciers externes de haut niveau) et de discussions les accompagnant. La communauté "dynamique" de l'IPSL s'est montrée capable d'apporter des réponses aux questions sur

l'identification et la meilleure compréhension des mécanismes de base en dynamique de l'atmosphère et de l'océan. Il y a, au stade actuel de modélisation du climat, une forte demande dans ce sens due à la croissance constante de la puissance des moyens de calcul et à la nécessité de modéliser les processus qui ont été cachés auparavant dans les paramétrisations "sous-maille". La modélisation "opérationnelle" (modèles pour la prévision synoptique) et les zooms régionaux à haute résolution dans l'atmosphère et de l'océan sont aussi très demandeurs d'une meilleure compréhension des mécanismes dynamiques de base. La nouvelle génération des modèles atmosphériques méso-échelle fournit des nouveaux outils pour une simulation numérique de tels phénomènes. Cependant, nous manquons de modèles numériques à haute résolution permettant de simuler, de manière fiable, les phénomènes non-linéaires dans un milieu continûment stratifié. En outre, l'amélioration des techniques d'observation in situ et de la télédétection permet désormais la détection des structures dynamiques individuelles telles que vortex cohérents, bouffées turbulentes, ondes d'inertie-gravité etc...

Les dynamiciens de l'IPSL ont leur propre individualité scientifique qui est caractérisée par une combinaison des outils analytiques avancés, utilisation intensive et *quantitative* des expériences de laboratoire et des expériences numériques de haute résolution. Les projets en cours montrent la capacité de synergie importante, surtout compte tenu du fait qu'avant tout des éléments et des approches communs pour l'atmosphère et l'océan sont recherchés.

Les sujets importants et fédérateurs qui ont émergé suite à des réunions du GdT concernent le stade non-linéaire des instabilités des courants atmosphériques et océaniques et, au premier lieu, l'instabilité inertielle/symétrique, surtout dans le contexte équatorial, où cette instabilité conditionne fortement la modélisation de la circulation générale atmosphérique et océanique.

- La quantification des sources d'ondes et le rôle de l'ajustement cyclo- géostrophique dans la génération d'ondes.
- La frontogenèse spontanée.
- L'Interaction ondes – écoulement moyen, le déferlement des ondes (aux niveaux critiques et sans).
- Les interactions ondes -turbulence et la dynamique de la couche limite stable.

#### **I.7.4 - Neuratel**

Le groupe Neuratel a deux activités complémentaires: une activité de recherche en statistique appliquée à l'environnement et une de formation des chercheurs en environnement. Sur le plan recherche, l'objectif principal est d'apporter des solutions algorithmiques à certains problèmes mathématiques inhérents à l'analyse des phénomènes géophysiques. Les problèmes abordés durant la période 2000-2003, ont concerné la résolution de problèmes inverses, l'assimilation des données, la caractérisation des incertitudes liées aux phénomènes non observés et aux

mesures, l'analyse exploratoire des données. Les résultats obtenus durant cette période 2000-2003 sont donc de nature différente selon :

- qu'ils concernent le domaine de la statistique : les thèses encadrées ont été soutenues en informatique et les résultats publiés dans des congrès de statistiques ou de modélisation neuronale.
- qu'il s'agisse de l'application des résultats des modélisations statistiques proposées par l'équipe sur des problèmes de géophysique et plus particulièrement d'océanographie dans le présent document. Les thèses ont alors été soutenues en télédétection et les résultats publiés dans des revues de géophysique.

Au titre de la formation à la recherche Neuratel anime un groupe de travail pluri disciplinaire qui permet de diffuser au sein de l'IPSL les différentes avancées de la recherche dans le domaine de la modélisation statistique pour la géophysique, cette diffusion a été réalisée à travers:

- L'organisation et l'animation de séminaires d'une journée sur le thème «La modélisation neuronale et ses applications au domaine de l'environnement »
- Des cours de formation aux méthodes statistiques pour les doctorants et les chercheurs de l'école doctorale de l'environnement
- En tant qu'expert pour la modélisation statistique pour analyser les problèmes auxquels se trouvent confrontés les groupes de recherche en environnement.
- A travers la création, à l'UVSQ, d'une partie des enseignements d'une formation de troisième cycle (DESS « Traitement de l'information et Exploitation des Données »). Cette formation aborde des domaines différents qui tous sont importants si l'on considère l'évolution actuelle de la recherche dans le domaine de l'environnement: modélisation statistique, statistiques non linéaires, bases de données, simulation, analyse d'image, résolution de problèmes inverses. Ce DESS a donc un impact important sur les recherches menées à l'IPSL puisqu'il initie et dirige chaque année des « projets longs » d'un mois et des stages de 6 mois dans les différentes équipes de l'IPSL. Ces stages dirigés par des membres de Neuratel permettent aux chercheurs de l'IPSL de profiter des avancés méthodologiques qui existent au niveau des différents domaines enseignés dans le DESS. Chaque année, au moins un étudiant de cette formation poursuit son cursus par une thèse dans le domaine de la géophysique.

## I.8 - Les projets scientifiques

Les projets scientifiques proposés pour une période limitée conjointement par des équipes rattachées à plusieurs laboratoires de l'IPSL (et éventuellement des participants extérieurs à l'Institut) sont soutenus sur avis du CS. Nous présentons ici le bilan des 9 projets qui, au cours des 3 dernières années, ont bénéficié d'un soutien de ce type.

<b>Titre du projet</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Laboratoires</b>	<b>Financement</b>
Modèle couplé de l'atmosphère de Titan	P.Rannou	SA et LMD	4 574 €
PAMPRE	G.Cernogora	SA et CETP	12 958 €
Variabilité et prévisibilité climatique en Amérique du sud	JP.Boullanger	LODyC et LMD	9 147 €
SAMBAO	L.Eymard	CETP, LMD LSCE, SA et LODyC	15 244 €
Projet océan indien	J.Viallard J.Ph Duvel	LODyC et LMD	12 196 €
Influence de la stratosphère sur le climat	F.Lott	LMD, SA et LSCE	3000 €
Observation globale de la concentration de CO <sub>2</sub> dans la troposphère moyenne.	A.Chedin	LMD- MPI	14000 €
Comparaison Observation-Modèles PERmanentE au SIRTa (COMPERES)	R.Vautard	LMD-LSCE-SA- CETP-LISA	15000 €
Réalisation d'une base de données de l'atmosphère de Titan	P.Rannou	SA-LMD	5000 €

**Tableau I.8.1** - Projets soutenus dans le cadre des appels d'offre IPSL 2002 et 2003

### **I.8.1 - Modèle couplé de l'atmosphère de Titan**

Dans l'optique de l'arrivée de Cassini et Huygens autour de Saturne, le projet soumis à l'IPSL en 2002 puis en 2003 était de poursuivre le développement d'un modèle couplé de l'atmosphère de Titan. Le développement d'une paramétrisation de la dissipation par les ondes (non explicite dans le modèle 2D développé antérieurement) a permis d'améliorer significativement les prédictions en particulier pour la période charnière (1 an après l'équinoxe de printemps nord) observée par Voyager. Alors que les champs de température posaient problème, la nouvelle paramétrisation permet de reproduire les gradients en méridien de façon satisfaisante.

Cette version a aussi permis une étude fine du couplage entre dynamique et brume d'une part, et dynamique et la chimie d'autre part, aussi bien au niveau des structures (opacité de la brume, composition chimique) induites par la circulation que sur le plan des mécanismes de rétroaction. De nombreuses observations (couche détachée, capuche polaire, asymétrie nord/sud de l'albédo, composition chimique en latitude) ont été reproduites et les mécanismes mis en jeu ont été décrits. Nous avons vu (et étudié) également que la brume produisait une rétroaction positive forte, d'une amplitude comparable à l'effet du cycle saisonnier. En revanche, la rétroaction liée à la variation de la composition atmosphérique est mineure et représente 10% de l'effet rétroactif total. D'autres aspects restent cependant mal compris, et ne pourront être abordés qu'après une évolution du modèle (interaction aérosols-nuages en troposphère, couplage chimie-aérosols).

### **I.8.2 - Projet PAMPRE**

Le projet PAMPRE "Production d'Aérosols en Microgravité par Plasma Réactifs" a bénéficié du soutien de l'IPSL, d'un BQR de l'UVSQ, et d'aides du CNES et du Programme National de Planétologie. Ceci a permis de réaliser le dispositif expérimental qui est maintenant opérationnel.

La faisabilité de la production d'aérosols solides par plasma radiofréquence a d'abord été testée au GREMI (Orléans). Dans ce type de plasma à basse pression, les particules solides se forment directement à partir de la phase gazeuse, elles se chargent électriquement et se trouvent ainsi en lévitation électrostatique, leur poids étant compensé par une force électrostatique. En utilisant cette technologie dans un mélange azote méthane caractéristique de l'atmosphère de Titan, se forment, en phase gazeuse et sans interaction avec les parois du réacteur, des particules solides équivalentes à celles de l'atmosphère de Titan.

Le dispositif a ensuite été conçu comme une plate-forme expérimentale avec des accès dédiés à des « expériences » invitées. C'est ainsi qu'un accès est dédié à la mise au point d'un spectromètre de masse à temps de vol pour la détection de particules solides chargées électriquement. Nous avons obtenu le premier plasma au Service d'Aéronomie en décembre

2002. Un certain nombre d'échantillons de forme quasi sphérique ont été produits et leur analyse en éléments simples (C, N et H) ainsi que leur étude par absorption Infra Rouge ont été réalisées en 2004.

### **I.8.3 - Variabilité et prévisibilité des impacts climatiques en Amérique du Sud**

Ce projet s'inscrivait sur deux thématiques nouvelles et complémentaires qui concernent la prise en compte des impacts locaux des changements climatiques dans deux domaines (i) les relations environnement-épidémie (e.g. Dengue) avec l'objectif de modéliser et prévoir les risques d'épidémies de Dengue sous l'influence particulière d'ENSO, (ii) les précipitations sur le bassin de La Plata et la mise en place d'un système de prévision aux échelles saisonnière à interannuelle en vue de prévoir les sources de variation des conditions climatiques sur cette région située à la limite entre les zones climatiques tropicales et subtropicales à l'aide d'observations (stations, données satellite), du modèle LMDZ, d'un modèle régional (MM5), de leur emboîtement et également du modèle couplé de l'IPSL (importance de l'océan sur la variabilité climatique régionale).

Le projet a été conduit en 2002 et 2003 en collaboration avec les climatologues du CIMA (Argentine) qui ont d'abord réalisé des simulations GCM en mode forcé et validé le modèle régional sur le continent sud-américain. Une étude des modes de variabilité climatique dominants sur le bassin du Parana-Plata a ensuite été réalisée en étroite collaboration avec une équipe de l'Université de Buenos-Aires (UBA) et a débouché sur la rédaction d'un article commun. Sur les aspects épidémiologiques, des liens forts ont été tissés avec des partenaires spécialistes de la Dengue et des maladies à vecteurs ayant une expertise du modèle de Focks, et avec une équipe de l'IRD basée au Brésil ayant à sa disposition une base de données très fournie sur les épidémies de Dengue et de Fièvre Jaune.

Le soutien de l'IPSL a permis de financer deux voyages sur l'Argentine qui ont été cruciaux dans le développement de la collaboration avec les partenaires du CIMA et de l'UBA et la rédaction d'un article commun soumis à Climate Dynamics sur les modes de variabilité interannuelle à interdécennale de la précipitation sur le bassin du Parana-Plata. De plus, ce soutien a contribué au rapprochement de plusieurs scientifiques français au sein d'un projet financé par le CNRS sur des thèmes semblables ainsi qu'au sein d'un projet PNEDC (non soutenu financièrement en 2003). Cette démarche est aujourd'hui prolongée par un projet européen (Specific Support Action) visant à rapprocher les activités de coopération scientifique entre l'Europe et l'Amérique du Sud. Enfin les recherches portant sur les impacts climatiques en Amérique du Sud, se sont étendus à l'agriculture avec pour objectif d'étudier le potentiel de l'information climatique (prévision saisonnière, scénario de changement climatique) pour l'aide

à la décision agricole. Ce projet regroupe désormais des climatologues de l'IPSL, des agronomes, des économistes et une association d'agriculteurs argentins.

#### **I.8.4 - projet SAMBAO**

La demande SAMBAO visait à démarrer la construction de la base de données satellites pour le projet AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), projet au départ national, devenu international et soutenu par l'OMM et par les programmes CLIVAR et GEWEX. Le soutien IPSL a contribué à la structuration du projet, en particulier dans le cadre du groupe de travail "Satellites" dont l'ambition est de fournir aux utilisateurs scientifiques non seulement les mesures spatiales récentes concomitantes à la réalisation des expériences de terrain, mais aussi de contribuer aux études à grande échelle temporelle en étendant au maximum la fenêtre temporelle des mesures satellites (idéalement 1980 – 2009).

Compte tenu du volume potentiel de la base totale, et de sa durée de vie, il est apparu déraisonnable de la construire complètement à l'IPSL, et celle-ci s'est insérée dans les activités du centre thématique de données Nuages, Aérosols, Rayonnement, cycle de l'eau (ICARE) avec une stratégie générale fondée sur un découpage en échelles pertinentes, sans séparation thématique. Les données récentes seront traitées en priorité, avec pour premier objectif d'arriver à étudier la période 1997–2000 (d'Adeos1 à Jet2000), et d'exploiter rapidement les données des nouveaux satellites (Envisat, Adeos2, Aqua) puis MSG. La base AMMA-SAT s'appuie sur les moyens techniques de ClimServ à l'IPSL. Outre les moyens classiques d'accès aux données (Web, ftp, DODS), ClimServ offre des moyens de calcul aux utilisateurs inscrits (login, espace disque de travail). C'est bien souvent une méthode plus économique que la recopie des données chez l'utilisateur, en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer des calculs sur des jeux de données multiples et volumineux. Concernant l'archivage, un premier ensemble de disques de 2 To a été acheté en 2002 sur crédits IPSL pour démarrer les activités. Le dimensionnement actuel des données susceptibles d'entrer à court terme dans la base est de l'ordre de 1 To. La capacité d'archivage de 2 To disponible à l'IPSL est suffisante pour traiter et archiver les données déjà identifiées de la période 1997-2000.

En 2002, les travaux préparatoires à cette construction ont démarré, et l'année 2000 a été choisie comme année pilote pour AMMA (satellites, modèles). Un certain nombre d'actions scientifiques prioritaires ont été conduites en parallèle dans les domaines (i) de l'étude et l'intercomparaison des différentes mesures de vapeur d'eau, (ii) de la mise en place de méthodes de caractérisation de la surface (classification des surfaces, humidité des sols, entre autres) à différentes échelles, (iii) de l'analyse des méthodes de restitution des précipitations, (iv) de l'étude des sources d'aérosols et (v) du développement de méthodes de caractérisation des nuages. Ces travaux, ainsi que les besoins exprimés par les différents groupes de travail AMMA ont contribué à la spécification de la base de données, et à la définition d'un plan de développement préliminaire début 2003.

### **I.8.5 - Projet océan indien**

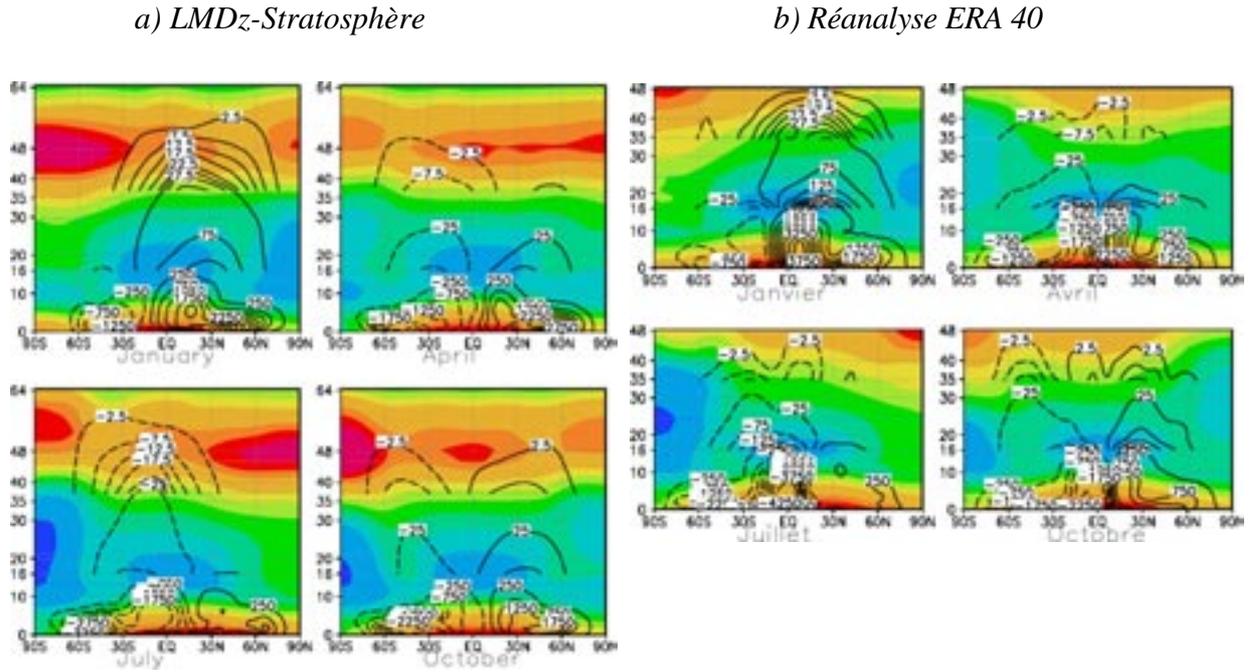
Dans ce projet, l'objectif était de mettre en place des mesures de thermosalinographes (TSG) et de XBT le long de lignes de navires marchand dans l'océan Indien. En effet, ce type de ligne n'est plus assuré depuis des années et pourrait cependant donner des informations précieuses sur la variabilité interannuelle de l'océan Indien. Deux TSG ont été achetés en utilisant des crédits IPSL et PNEDC et sont stockés au Centre IRD de Brest. L'IRD s'est engagé à fournir les XBT. Les deux points suivants à résoudre étaient l'identification d'une compagnie maritime acceptant de faire les mesures, et l'obtention d'un soutien technique à la Réunion (approvisionnement des bateaux en XBT, entretien). Ces deux points n'ont pas pu encore entièrement être résolus, même si des contacts ont été pris et si certaines pistes existent. L'installation des TSG reste donc en suspens.

### **I.8.6 - Influence de la stratosphère sur le climat**

Le soutien de l'IPSL à ce projet en Juin 2003 et 2004, a permis l'organisation de 4 1/2 journées de travail qui, largement diffusées, ont attiré un public important (minimum 20 personnes). Cette série de réunions a joué un rôle moteur dans l'extension de LMDZ à la stratosphère.

Cette version stratosphérique a une climatologie en moyenne zonale correcte, en ce qui concerne les vents zonaux dans la troposphère et dans la stratosphère et ses performances se comparent assez bien à celles d'autres modèles. Son comportement est satisfaisant pour ce qui concerne la variabilité basse fréquence avec un mode de variabilité proche de l'oscillation Arctique dans la basse atmosphère. Les ondes planétaires stationnaires aux latitudes moyennes sont correctement simulées aussi bien en amplitude qu'en phase mais elles sont légèrement moins importantes que celles déduites des réanalyses du CEPPMT. Il en est de même de leur variabilité intrasaisonnière. De ce fait, les flux d'Eliaassen-Palm sont un peu sous-estimés dans le modèle par rapport à ceux des réanalyses.

Un comportement intéressant concerne les réchauffements stratosphériques soudains. Le modèle en produit un certain nombre (1 par hiver) mais leur amplitude est aussi un peu faible par rapport à ceux observés dans les réanalyses (NCEP et ECMWF), en cohérence avec le fait que les ondes planétaires sont un petit peu faibles. Il est notable cependant que les réchauffements stratosphériques soudains dans le modèle ont une structure spatiale impliquant surtout des modes planétaires de nombre d'onde 2 et 3, ce qui est assez occasionnel dans les observations et ne se produit en général que lors de la destruction du vortex polaire au printemps. Il s'agit d'une erreur systématique qui va être assez difficile à corriger. De façon assez prometteuse, le modèle a une circulation méridienne de Brewer Dobson assez raisonnable.



**Figure I.8.1:** Moyennes zonales simulées par la version stratosphérique de LMDz. a) Température en couleur et fonction de courant de la circulation de Brewer Dobson en noir pour le modèle b) Comme a) mais pour la réanalyse ERA40. Sur toutes ces cartes, les lignes de contour sont inchangées entre le modèle et l'analyse, les couleurs chaudes correspondent aux valeurs élevées, les couleurs froides aux valeurs basses.

Les températures en moyenne zonale aux quatre mois cardinaux, issues de LMDZ-stratosphère, sont comparées à celles de la réanalyse ERA40 dans la figure 1.8.1, qui montre aussi la fonction de courant de la circulation méridienne. Cette comparaison témoigne d'une variabilité correcte du modèle, en particulier les ondes planétaires.

Un module chimique stratosphérique, celui du modèle de chimie-transport REPROBUS, a également été inséré. Ce module contient une description détaillée de la chimie stratosphérique en phase gazeuse ainsi qu'un schéma de chimie hétérogène des aérosols stratosphériques et des nuages stratosphériques polaires. Plusieurs simulations en mode guidé et en mode libre ont été comparées à des observations d'ozone à l'échelle globale avec des résultats satisfaisants. Une première simulation de 5 ans en mode interactif a été réalisée, les calculs de transfert radiatif étant alors effectués sur les champs ( $O_3$ ,  $H_2O$  ou  $CH_4$ ) prédits par le modèle de chimie-climat. Cette simulation a montré que le modèle de chimie-climat en mode interactif ne semblait pas dériver. La variabilité interannuelle de la composition chimique de la stratosphère est en général assez bien reproduite. Une illustration en est donnée sur la figure I.1.5, qui présente le cycle annuel de la colonne d'Ozone et la compare aux données TOMS. En parallèle, la chimie du module INCA est en cours d'extension en vue de décrire la chimie de l'ozone stratosphérique. Ce module chimique devrait à l'avenir être le module de référence pour LMDZ, sa partie troposphérique étant bien validée. Pour l'extension à la stratosphère, la chimie des composés chlorés et bromés a déjà été ajoutée au module. Un module de chimie hétérogène

stratosphérique a aussi été couplé mais il n'est pas encore inséré dans le module INCA. Les premiers tests ont révélé des instabilités numériques liées à la chimie des composés bromés.

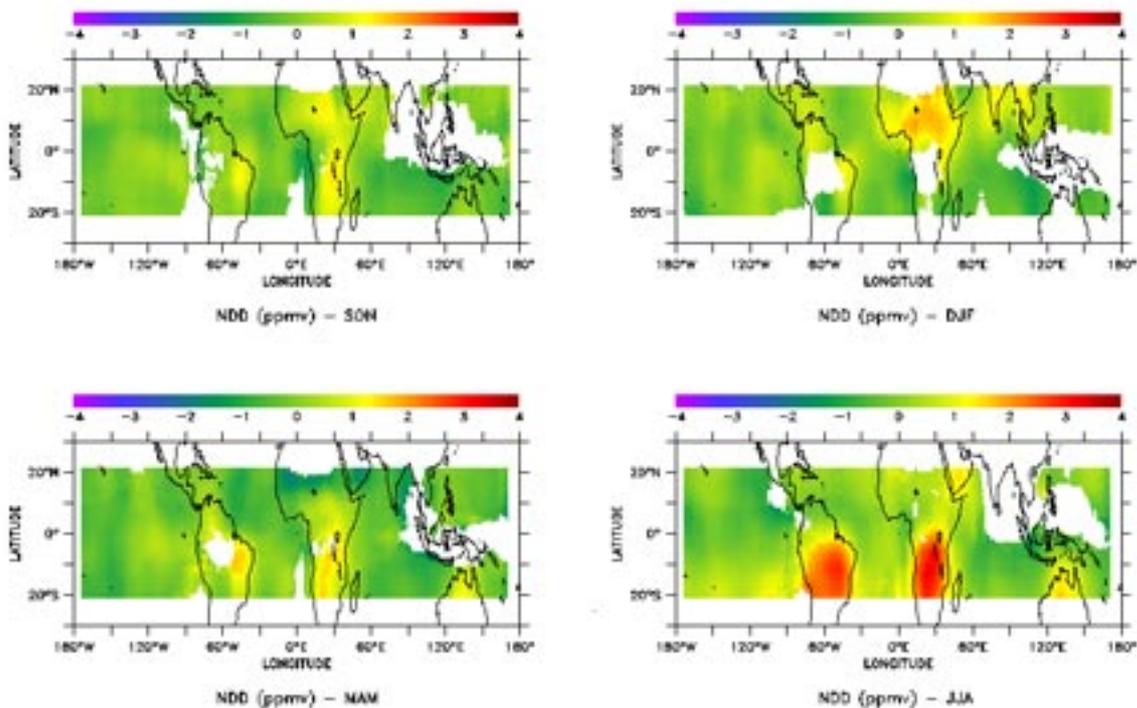
### **I.8.7 - Observation globale de la concentration de CO<sub>2</sub> dans la troposphère moyenne**

La localisation et la compréhension approfondie de la variabilité, de l'évolution et du fonctionnement des sources et des puits de CO<sub>2</sub> à la surface de la Terre s'appuie sur des méthodes d'inversion pour lesquelles il est nécessaire de disposer, à la fois d'un modèle de transport fiable et de mesures in situ précises du CO<sub>2</sub> atmosphérique (et, éventuellement, d'autres gaz comme le méthane, l'oxyde nitreux, etc). Or, les inversions globales réalisées jusqu'à présent reposent sur la mesure du rapport de mélange du CO<sub>2</sub> sur une petite centaine de sites terrestres ou océaniques, plutôt mal, voire très mal, répartis à la surface de la Terre, en particulier aux tropiques et sur les continents de l'hémisphère Sud. Outre cette mauvaise couverture spatiale, le réseau d'observation en surface actuel possède une mauvaise couverture temporelle : dans plusieurs sites, les mesures ne sont effectuées qu'une fois par mois, voire uniquement à certaines périodes de l'année. Ces limitations rendent difficiles l'évaluation précise de la localisation et de l'intensité des sources et des puits de CO<sub>2</sub> à la surface. Sous réserve de disposer d'une bonne modélisation des phénomènes de transport atmosphérique, l'observation du CO<sub>2</sub> depuis l'espace, caractérisée par sa couverture globale et continue, devrait permettre d'apporter une réponse satisfaisante à ces problèmes.

L'estimation du CO<sub>2</sub> depuis l'espace est déjà accessible à un certain nombre d'instruments actuellement en vol (TOVS/NOAA, AIRS/Aqua, SCIAMACHY/ENVISAT), programmés (IASI/MetOp en 2006, OCO en 2007) ou à l'étude (e.g. méthodes actives par lidar). Leurs techniques d'observations peuvent être séparées en deux groupes : les techniques dites passives, dont le principe peut être grossièrement ramené à la simple mesure d'un signal, et les mesures actives, qui nécessitent l'émission puis la réception d'un signal. A l'heure actuelle, seules des techniques passives sont disponibles. Les travaux réalisés, avec le soutien partiel de l'IPSL, par l'équipe dirigée par A.Chedin au LMD (en collaboration avec le LSCE sur les aspects transport), ont porté sur l'exploitation des observations des sondes TOVS et AIRS en vue d'estimer la concentration en CO<sub>2</sub> de la moyenne à haute troposphère et sur une préparation à l'utilisation des données IASI. Nous nous limitons à présenter deux aspects de ces recherches liés respectivement à l'étude de l'impact des émissions des feux de biomasses sur le cycle diurne de la concentration en gaz carbonique de la moyenne à haute troposphère observée à partir des sondes verticales TOVS/NOAA-10, et à l'inversion des données.

Les feux de biomasse sont une source importante de CO<sub>2</sub>, d'aérosols et de gaz chimiquement importants, relâchant entre 1.8 et 2.6 milliards de tonnes dans l'atmosphère chaque année, la plupart (environ 90%) étant émis sous la forme de dioxyde de carbone ; ils se

produisent en Afrique et en Amérique du Sud pendant la saison sèche de chaque hémisphère et sont marqués par un fort cycle diurne, maximum au début ou au milieu de l'après midi. Synchrones du soleil, le satellite NOAA-10 observe les tropiques à 7h30 et 19h30, heure locale, ouvrant la voie à l'étude des variations diurnes de  $\text{CO}_2$  dans la moyenne à haute troposphère. Pour cela, l'approche décrite dans Chédin et al. [2003], limitée au traitement des observations de nuit, a été étendue et améliorée pour permettre le traitement de celles de jour. Trois modifications importantes ont ainsi été apportées à la méthode originale: (i) élimination de la liste des prédictors de la régression du canal HIRS-18 à  $4 \mu\text{m}$  en raison de sa sensibilité au flux solaire ; (ii) meilleure détermination des biais affectant le modèle de transfert radiatif direct par l'ajout, aux collocations satellite-radiosondages déjà prises en compte, de collocations satellite-réanalyses ERA-40 ; (iii) révision des bruits affectant les radiances simulées par le modèle de transfert radiatif qui avaient été sous estimées. Ces modifications ont permis, pour la première fois, la détermination et l'étude de la différence entre les concentrations en  $\text{CO}_2$  à 19h30 (nuit) et à 7h30 (jour). Cette différence a fait apparaître, sur les continents, pendant l'hiver de chaque hémisphère, un signal fort d'environ 2-3 ppm en moyenne (Figure I.8.2), qu'il a été possible de relier directement aux très importants feux de biomasse affectant essentiellement l'Afrique et l'Amérique tropicales.



**Figure I.8.2:** Saisonnalité de la différence entre la concentration en  $\text{CO}_2$  de la moyenne à haute troposphère retrouvée à 19h30 et à 7h30 (heure locale), moyennée sur la période Juillet 1987-Juin 1991.

Utiliser les résultats de l'inversion des observations spatiales des sondeurs TOVS en concentration de CO<sub>2</sub> dans la moyenne à haute troposphère pour contraindre l'inversion des sources et des puits de CO<sub>2</sub> à la surface apparaît alors comme un défi particulièrement important compte tenu de la longueur de l'archive déjà accumulée par ces instruments. Au LSCE, une méthode inverse variationnelle basée sur le modèle LMDZT est utilisée pour contraindre la détermination des flux de surface. Les caractéristiques d'erreur des inversions en concentration de CO<sub>2</sub> sont estimées grâce à des comparaisons entre des mesures in situ et les données du modèle. Ce travail est en cours.

Les cartes du CO<sub>2</sub> estimé à partir de TOVS et AIRS ont mis en évidence des comportements latitudinaux et longitudinaux du CO<sub>2</sub> assez marqués. Plusieurs de ces variations ont pu être reliées soit à des phénomènes naturels connus du CO<sub>2</sub> atmosphérique (photosynthèse, ENSO, etc.), soit au transport de la pollution continentale ou des émissions de feux de biomasse. Plusieurs campagnes de mesure par avion des gaz traces, et particulièrement du CO<sub>2</sub>, ont concerné l'Océan Pacifique, l'Afrique, ou encore l'Océan Atlantique mais n'ont que rarement excédé une durée de deux mois. Notre connaissance des évolutions du CO<sub>2</sub> dans la troposphère est donc encore relativement incomplète et nombre de phénomènes observés sur les cartes de sa distribution restent encore à identifier et à expliquer. Dans le cadre du projet européen COCO, la comparaison entre les estimations et des simulations effectuées grâce à des modèles de transport atmosphérique (LMDZ, LSCE, Saclay, et TM3, MPI, Jena) a fait apparaître quelques accords et un certain nombre de divergences, parfois importantes, entre les distributions de CO<sub>2</sub> ainsi obtenues. Notre connaissance, actuellement limitée, des variations du CO<sub>2</sub> dans la troposphère nous empêche d'attribuer ces différences aux imprécisions de l'une ou l'autre méthode.

L'exploitation des données TOVS et AIRS, puis IASI, sera poursuivie, en particulier dans le cadre du projet européen GEMS, et les estimations affinées. Notons que plus de 25 années de données TOVS sont disponibles ; leur exploitation devrait apporter des informations précieuses sur le fonctionnement et l'évolution du cycle du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

## **I.8.8 - COMPERES**

Le projet COMPERES (COMparaison PERmanente au SIRTA) est un projet transversal qui vise à accompagner le système de mesures routinières effectuées au SIRTA par une plate-forme de modélisation/prévision ouverte. Les simulations routinières en découlant permettent à la fois de mieux interpréter les observations météorologiques et de « voir » les modèles fonctionner en temps quasi-réel, afin de mieux comprendre leurs incertitudes. Par ailleurs COMPERES a pour objectif de fournir une plateforme de simulation de la météorologie à méso-échelle sur l'île de France. Des bases de données y sont disponibles, mais surtout le cadre est prêt pour effectuer à la demande, pour des équipes de l'IPSL, des simulations spécifiques dans la mesure

où elles ne nécessitent pas un développement supplémentaire trop lourd. Les thématiques abordées comme applications du système sont les suivantes :

- Etude de la couche limite atmosphérique
- Etude des nuages et du cycle de l'eau
- Etude de la pollution régionale, notamment par les aérosols

Ces thèmes sont parmi ceux qui aujourd'hui comportent les plus grandes lacunes dans nos connaissances de l'atmosphère, dans leur représentation dans les modèles, et dans la connaissance de leurs impacts sur le changement climatique. Ces thèmes se déclinent ensuite en études plus ciblées. Il faut considérer que ce projet, dont le coût marginal a été partiellement financé par l'IPSL (dont la contribution a permis l'acquisition de moyens de stockage des sorties de modèle) est venu en « soutien » scientifique et technique à un certain nombre d'études effectuées à l'IPSL. Le gain pour l'IPSL et pour la communauté scientifique ne se limite pas à une meilleure compréhension des processus physiques impliqués dans ces thématiques. COMPERES produit également une base de données de modélisation sur l'Ile-de-France, avec plusieurs modèles, sur plusieurs années. Les modèles utilisés sont, par exemple, LMD-Z, MM5 (pour les variables physiques), ou CHIMERE (pour la chimie de la pollution).

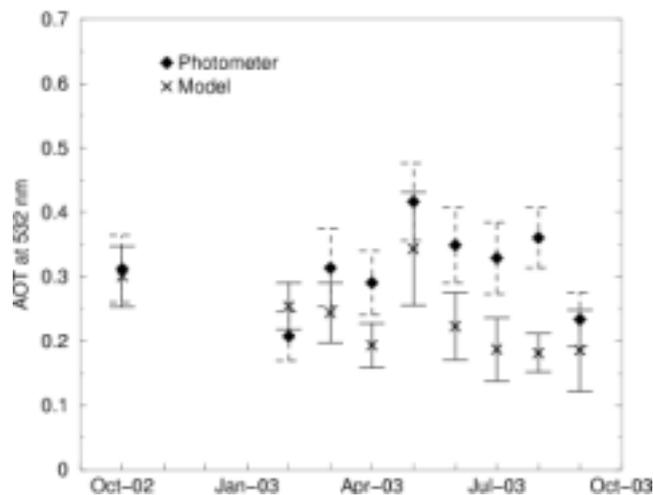
Depuis plusieurs années maintenant, l'équipe « pollution » de l'IPSL utilise la prévision quotidienne comme méthodologie de travail pour évaluer les développements effectués sur le modèle CHIMERE de chimie-transport. Cette méthodologie permet de vivre « en direct » les erreurs occasionnées par le modèle, en général associées à des incertitudes dans les connaissances. Grâce à cette méthodologie, CHIMERE se situe aujourd'hui dans les modèles les plus précis de prévision et la simulation de la pollution photochimique ou particulaire en Europe.

L'une des motivations de COMPERES était d'étendre l'application de cette méthodologie à la simulation météorologique à l'échelle d'une région comme l'Ile-de-France, avec aussi bien des modèles globaux zoomés comme LMD-Z ou bien des modèles de méso-échelle comme MM5. Le site du SIRTA se prête particulièrement à ce type d'applications puisqu'il dispose, au sein de l'IPSL, de mesures permanentes originales auxquelles peuvent être confrontées les sorties de ces modèles. COMPERES propose donc une plateforme de simulation, avec plusieurs modèles, ainsi qu'une plate-forme de comparaisons avec les données du SIRTA. Les « services » actuellement proposés sont :

- Une prévision quotidienne J-1 → J+2 avec une version de référence du modèle MM5
- La possibilité de faire tourner en parallèle plusieurs versions contenant des paramétrisations nouvelles, ou des éléments d'amélioration de MM5.
- Des simulations sur plusieurs années passées sur l'Ile-de-France mais aussi l'Europe, avec des sorties au pas de temps horaire de la plupart des paramètres météorologiques standards.

- La possibilité de refaire, en quelques jours, une simulation sur une période assez longue (1 an ou plusieurs années), à la demande venant d'une équipe IPSL, sous réserve que le travail de développement ne soit pas trop lourd.
- Un site internet <http://euler.lmd.polytechnique.fr/comperes> où sont disposés plusieurs types d'informations, résultats des prévisions quotidiennes, comparaisons aux observations du SIRTA, résultats scientifiques, informations diverses.

Aujourd'hui la plate - forme COMPERES a permis de réaliser plusieurs projets scientifiques dans différents domaines touchant, à la représentation de la couche limite convective dans LMDZ, à la simulation des nuages de glace, à l'estimation de la vapeur d'eau (campagne VAPIC qui s'est déroulée du 15 mai au 17 Juin 2004) et aux aérosols. Nous nous limitons ici à illustrer ce dernier volet qui concerne la validation du modèle d'aérosols CHIMERE, dans la basse troposphère (entre le sol et 500 hPa), en utilisant les profils de rétro diffusion du laser LNA à 532 nm disponibles en continu au SIRTA.



**Figure I.8.3** - Moyennes mensuelles de l'épaisseur optique intégrée sur la colonne d'air à 532 nm, observées par le photomètre CIMEL et simulées par le modèle CHIMERE sur le site de Palaiseau, entre Octobre 2002 et Septembre 2003.

La réflectivité lidar étant dépendante de la concentration et de la nature des aérosols, les profils lidar permettent de déterminer avec précision la présence des couches d'aérosols, leur altitude et leur évolution spatio-temporelle, fournissant ainsi une validation continue de la structure verticale des aérosols. De plus, les mesures de l'indice de réfraction, fonction de la composition des aérosols et de l'humidité relative, effectuées par le photomètre CIMEL, apportent des informations complémentaires sur la nature des aérosols.

Ce travail (publication acceptée dans le *Journal of Geophysical Research*), qui s'appuie sur une comparaison systématique lidar/modèle sur le site de Palaiseau entre Octobre 2002 et Septembre 2003, montre des résultats encourageants pour la modélisation des aérosols. Toutefois, le modèle a tendance à sous-estimer les concentrations des aérosols, notamment dans

la couche limite et dans l'après-midi. La sous-estimation est visible également sur les comparaisons de l'épaisseur optique produite par le traitement des sorties de CHIMERE avec les données photométriques acquises au SIRTA par le photomètre (figure I.8.2) surtout en été.

### **I.8.9 - Base de données Titan**

Un modèle de circulation générale couplant la brume et la dynamique de Titan a été développé à l'IPSL depuis 1997. Ce travail a été complété par un couplage photochimie- dynamique. Arrivé à maturité dans la période 2001-2004 (7 publications associées émanant de chercheurs de l'IPSL), le modèle a permis d'expliquer de nombreux phénomènes observés (concernant la brume, la composition chimique et l'état de l'atmosphère) mais jamais reproduits auparavant. Ces résultats ont également permis de mettre à jour des rétroactions importantes (en particulier entre la brume et la circulation). Enfin, le modèle permet de prédire l'état de l'atmosphère - par exemple durant la période de la mission Cassini-Huygens.

Afin de rendre les résultats disponibles et utilisables par la communauté impliquée dans la compréhension du système atmosphérique de Titan, une base des données issues de ce modèle a été développée depuis 2002. Les variables disponibles concernent l'état de l'atmosphère (pression, température, vent), l'état de la brume (concentration, granulométrie, opacité) et la composition chimique. Cette base de données a été présentée à différents congrès depuis janvier 2004 et la version finalisée a fait l'objet d'une publication dans le cadre des publications associées au COSPAR 2004 de Paris.

## I.9 - L'enseignement

Fort de la tutelle de deux universités, l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et l'Université de Versailles Saint - Quentin (UVSQ), et de celle de deux Établissements d'enseignement supérieur, Ecole Polytechnique et ENS Paris, l'IPSL, qui compte près de 60 Enseignants Chercheurs (EC) dans ses laboratoires (cf fiches), se doit d'être très présent dans le domaine de l'enseignement.

Dans chacune des deux écoles, des EC et des chercheurs de l'IPSL participent aux formations dispensées dans nos disciplines (avec des liens bien établis entre l'UPMC et l'ENS, cf ci-dessous), mais la plus large part du potentiel enseignement de l'IPSL se concentre sur des activités conduites au sein de l'UPMC et de l'UVSQ.

Trois laboratoires de l'IPSL (SA, LODYC, LMD), rattachés à l'UFR 924 dirigée par P.Encrenaz, ont une forte implantation sur le site de l'UPMC à Jussieu. Les chercheurs et EC de ces laboratoires interviennent à tous les niveaux dans les enseignements de cette Université. Compte tenu de la proximité de l'ENS, les enseignements de spécialité sont pour partie partagés entre l'UPMC et cette Ecole. A l'occasion de la réforme Licence-Master-Doctorat, un rapprochement s'est aussi opéré entre l'UPMC et l'UVSQ. Compte tenu de la complexité de la mise en oeuvre de cette réforme, ce processus n'a pas entièrement abouti à ce jour. Mais, d'ores et déjà, des EC du CETP sont rattachés à l'UPMC et des chercheurs du LSCE sont associés aux enseignements de cette Université.

Une quarantaine d'EC des laboratoires de l'IPSL sont statutairement rattachés à l'UPMC. Au niveau de la licence, ils interviennent principalement dans les enseignements de physique. Ils sont très fortement impliqués et dirigent le parcours de la Licence de Physique appliquée aux Sciences de la Vie et de la Planète, qui a vu le jour à la rentrée 2003 et a bénéficié du soutien de l'IPSL. L'Institut a en particulier financé des travaux pratiques de dynamique des fluides géophysiques et de transfert radiatif. Ce parcours permet également aux étudiants physiciens de l'ENS qui suivent la licence de Sciences de la Planète de s'inscrire à l'Université, dans le cadre d'une convention signée entre les deux établissements. Ces deux formations partagent ainsi enseignants et enseignements.

Au niveau du Master de Sciences de l'UPMC, les EC et les chercheurs des laboratoires de l'IPSL interviennent principalement dans deux mentions : "Physique et Applications" et "Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie". Une spécialité, commune aux deux mentions, est en prise directe avec les thèmes de recherche de l'IPSL. Il s'agit de la spécialité "Océan, Atmosphère, Climat, Télédétection (OACT)", prise en charge dans sa quasi intégralité par des personnels rattachés à des laboratoires de l'IPSL. Cette spécialité a pris la relève de deux DEA qui avaient fait leurs preuves ("Océanologie, Météorologie et Environnement" ; "Méthodes Physiques en Télédétection"), mais il faut aussi noter le nouveau parcours de Planétologie qui, à cheval sur plusieurs spécialités, a vu le jour à la rentrée 2004.

Conscient de la nécessité d'attirer en plus grand nombre des étudiants de qualité dans le domaine des Sciences de l'Environnement, L'IPSL soutient fortement ces formations et ses laboratoires accueillent de nombreux stagiaires qui suivent des enseignements à l'UPMC. Compte tenu de l'attrait des étudiants pour les approches expérimentales, l'IPSL facilite ainsi leur accès au site de mesures géophysiques du SIRTÀ. Sur le site de Jussieu, une salle IPSL du cinquième étage de la barre 45-46 a également été aménagée grâce au soutien financier conjoint de l'UFR 924 de l'IPSL. Cet aménagement a permis d'équiper les toîts de cette barre d'instruments de recherche (un SAOZ et un spectrophotomètre à ce jour). Il s'agit là de l'embryon d'un site d'observation de l'atmosphère en milieu urbain, ce qui sera utile non seulement pour la recherche mais aussi pour l'enseignement. Des travaux pratiques s'appuyant sur ces instruments sont actuellement en cours de développement.

La situation géographique est moins favorable pour ce qui concerne l'UVSQ puisqu'aucun des trois laboratoires directement impliqués (CETP, SA et LSCE) n'est implanté à l'UFR de Sciences (Versailles) où sont dispensés les enseignements. Treize EC du Département de Physique de l'UFR de Sciences (soit environ un tiers) sont rattachés à des Laboratoires IPSL (SA, CETP, LSCE, LODyC). Ces enseignants interviennent à tous les niveaux des cursus aussi bien dans les disciplines fondamentales (physique) que dans les enseignements touchant directement les activités de l'IPSL (Climat, environnement, modélisation, traitement du signal...). De nombreux chercheurs (CNRS, CEA) de l'IPSL sont, en outre impliqués dans les enseignements de l'UVSQ. C'est notamment le cas pour les Master 2 « Interaction Climat-Environnement » et « Modélisation et Simulation », mais également en Master 1 et en Licence (Module « Introduction à l'environnement »).

Les laboratoires de l'IPSL accueillent de nombreux stagiaires de licence et master de l'UVSQ. Ils mettent également à la disposition des étudiants des équipements de recherches pour certains TP de master. Avec la contractualisation en préparation entre le LSCE et l'UVSQ pour le prochain quadriennal, l'implication de l'IPSL dans les enseignements de l'UVSQ va aller en augmentant dans les années à venir

En Licence de Sciences et Technologie, L'IPSL est impliqué traditionnellement dans les enseignements de physique » (la mention « Physique comporte 4 spécialités : Physique, Physique-Chimie, Physique et applications, Physique-Mathématiques) Par le biais des modules mutualisés de physique et d'environnement ainsi que de certains modules spécifiques, elle intervient dans la formation des étudiants suivant les autres mentions traditionnelles « Chimie », « Mathématiques », « Informatique » et « Biologie ».

Le passage au LMD a été l'occasion de mettre en place à l'UVSQ de nouvelles formations appuyées sur le potentiel de recherche de l'IPSL. Au niveau Licence, la mention « Physique, Chimie, Environnement » propose aux étudiants un parcours axés sur les disciplines fondamentales (Math, Physique, Chimie) et ouvrant sur les sciences de l'environnement et du climat. Dans le contexte actuel de baisse des effectifs dans les filières scientifiques, un des objectifs de cette mention est d'attirer les étudiants vers les sciences

"dures" en leur montrant les possibilités d'utiliser l'étude du climat et de l'environnement comme champ d'application des disciplines fondamentales. L'IPSL intervient également dans la mention « Sciences de la vie et de la Terre » par les biais de modules mutualisés avec la mention « Physique, Chimie, Environnement » sur les climat et l'environnement et en géosciences.

En Master, l'IPSL intervient dans les domaines *Sciences et Technologie, Santé et Sciences de l'Environnement, du Territoire et de l'Économie*. Dans le premier, les Masters recherche « Modélisation et Simulation » (ex DEA M2SAP) et « Traitement de l'Information et Exploitation des Données » (ex DESS TRIED) ainsi que les Masters Professionnels « Réseau de Radiocommunication avec les Mobiles » (ex DESS R2M) et « Traitement de l'Information et Exploitation des Données » (ex DESS TRIED) bénéficient de la participation de l'IPSL. Dans le second, la mention « Sciences de l'environnement » regroupe 3 spécialités de Masters appuyées sur les pôles de compétences de l'IPSL : Master Pro « Qualité de l'Air et Lutte contre le Bruit » (ex DESS Qualub) et Masters Recherches « Interaction Climat-Environnement » (ICE, création 2004) et « Planétologie » (création 2004, premier sceau : UPMC). L'originalité du master ICE est, en collaboration avec le C3ED, d'associer à l'étude du climat et de l'environnement une ouverture vers les problèmes socio-économiques liés aux changements environnementaux et climatiques.

Un effort de mutualisation des enseignements a été fait en Master 1 comme en Master 2 au sein de l'UVSQ et avec les formations extérieures. Par exemple, 2 modules de M2 du Master « Interaction Climat-Environnement » sont communs avec le Master Modélisation et Simulation et avec le cursus de L'ENSTA. En M2, l'enseignement de Paléoclimatologie est communs aux Master ICE, OACT (UPMC) et OEM (UPMC).

Une partie notable des EC de l'IPSL participent à l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement de l'île de France (dirigée par K.Laval, LMD) dans laquelle sont partie prenante, l'UPMC, l'UVSQ, Paris VII et Paris XII. Les potentiels de recherche étant à peu près équivalents sur les deux Universités de tutelle de l'IPSL, l'UVSQ a demandé a garder la co-accréditation dont elle bénéficiait jusqu'ici avec l'UPMC, dans le cadre de cette Ecole Doctorale. Cette demande qui s'inscrit clairement dans la stratégie de développement de l'Institut est soutenue par le Directeur de l'IPSL.

Enfin, la participation à ces différents enseignements et plus particulièrement la création de nouvelles filières, justifie un financement spécifique auquel l'Institut contribue, après examen des dossiers par le Conseil de l'OSU IPSL et consultation d'une commission mixte d'enseignants-chercheurs des deux Universités. Depuis deux années, ceux-ci se sont élevés à environ 30 KEuros (somme importante en comparaison des crédits disponibles au sein des UFR).

## I.10 - La communication

Le service de communication de l'IPSL a été créé en avril 2001 à l'arrivée d'une chercheuse d'un des laboratoires de l'IPSL. Ses missions sont de développer la communication interne et la communication externe vers les divers publics.

La mise en place du site web de l'IPSL a été sa première réalisation. Elle a nécessité un gros travail de rassemblement des textes, de mise en forme, et d'organisation pour la mise à jour. Plusieurs sous-sites, utilisant la même chartre graphique que le site principal, ont aussi été développés pour des activités fédératrices de l'IPSL (Pôles existants – modélisation du climat et planétologie, Services d'observation, SIRTA, Centre de données). Aujourd'hui, la plus grosse partie des mises à jour du site principal est à la charge du service de communication et est très consommatrice de temps, tandis que celle des sous-sites est faite par les personnes impliquées dans les structures concernées.

Plusieurs rubriques ont fait l'objet d'un travail plus continu. Il en est ainsi de la rubrique interne qui permet à l'IPSL de partager les informations utiles et ainsi que des ressources. Toutes les informations et documents concernant l'IPSL sont diffusés à partir de l'intranet du site, des outils sont mis à disposition des chercheurs, ainsi que des ressources permettant de partager le matériel de communication développé dans les laboratoires ou par le service de communication (posters, transparents en particulier). Une rubrique « Europe » de l'intranet a aussi été développée au moment de la sortie des premiers appels à propositions du 6<sup>ème</sup> PCRD. Elle a permis aux chercheurs concernés de disposer de toutes les informations nécessaires pour répondre à ces appels et pour participer aux formations organisées par le ministère.

Pour pallier le manque de temps pour construire un site IPSL « Science pour tous », mais pour néanmoins permettre au public un accès aux nombreuses ressources de diffusion des connaissances de la toile, la rubrique « Liens » de la partie du site ouverte au public a fait l'objet d'une attention particulière.

Après plusieurs années d'utilisation et de développement, un regard critique sur le site de l'IPSL est aujourd'hui nécessaire pour pouvoir aller de l'avant et améliorer son audience. Il semble en effet que ce site ne réponde pas bien aux objectifs de la communication externe. D'une part, il est difficile d'y trouver les informations que l'on recherche car sa structure est basée sur l'organisation de l'IPSL (en pôles, services, et projets) que le lecteur ne comprend pas forcément, au lieu d'être déclinée suivant les missions de l'IPSL (recherche, observations et enseignement). Ensuite, il ne présente pas plusieurs niveaux de lecture adressés à des publics différents : les scientifiques partenaires ne recherchent pas la même chose que le grand public ! Par ailleurs, il n'a pas de version anglaise ce qui est particulièrement pénalisant pour un site scientifique. Enfin, malgré sa mise à jour régulière, il n'est pas assez vivant pour afficher les informations scientifiques intéressantes que le public recherche (une rubrique « Actualités »). Le prolongement du travail accompli devra faire l'objet, dans le futur, de discussions au Conseil

scientifique et au Comité de direction pour trouver les moyens humains et financiers d'améliorer le site.

Dans le domaine de la communication interne, un journal électronique mensuel a été lancé au début de l'année 2002. Ce journal rassemble des informations sur l'IPSL, sur les postes à pourvoir, les appels d'offres, les congrès, l'Europe, les informations administratives, les articles de presse concernant les recherches de l'IPSL, ... En résumé, tout ce qui peut potentiellement intéresser les divers personnels de l'IPSL. Ce journal interne est, semble-t-il, très apprécié des personnels et constitue à l'heure actuelle une des sources principales (avec la liste de diffusion) de connaissance de l'IPSL par ses personnels. Il est clair aujourd'hui que ceci n'est pas suffisant, et d'autres actions seront proposées dans la prospective.

L'IPSL a participé à plusieurs journées « Portes ouvertes » à l'occasion de la Fête de la science annuelle. A cette occasion, des posters ont été réalisés sur les thèmes les plus questionnés par la société (climat et ozone), en collaboration avec des référents scientifiques. Leur réutilisation dans d'autres occasions permettra, dans le futur, d'organiser plus volontiers d'autres manifestations de ce type puisqu'elles ne demanderont alors que peu d'investissements nouveaux. Ces posters sont à la disposition de tous sur l'intranet du site web de l'IPSL.

Enfin, aux côtés de l'IDDRI, de l'ENS et du CIRED, s'est engagé dans l'organisation d'un séminaire régulier (mis sur pied par P.Ambrosi du CIRED) sur les Risques des Changements Climatiques. Les séances (5 par année universitaire dans l'amphithéâtre Dussane à l'ENS) réunissent, sur cette thématique pluridisciplinaire, un nombre important de participants.

## **I.11 - La valorisation**

L'arrivée en 1998 de E.Wilmart, ingénieur valorisation à mi-temps, avait permis de donner un essor à la politique de valorisation de l'IPSL aussi bien au niveau de la structure fédérative que des laboratoires, et son départ (en 2002) a été très préjudiciable dans ce domaine.

Au niveau des réalisations dans lesquelles l'IPSL est impliqué, nous citerons la mise sur pied, par H.Loukos, de l'entreprise CLIMPACT, société qui vise à développer des activités dans des domaines relevant du service et la diffusion de prévisions climatiques dans une optique de gestion du risque climatique, de la réalisation d'études dans ce même domaine et de la valorisation de la recherche fondamentale en climatologie. L'IPSL et CLIMPACT ont signé une convention de partenariat et d'accueil qui prévoit en particulier une participation de 4 personnes nommées par le Directeur de l'IPSL au Conseil Scientifique de CLIMPACT.

Dans le domaine des lidars, la société Gordien-Strato a été créée pour la valorisation du savoir-faire du SA en matière de conception de systèmes et d'expertise scientifique pour l'étude de la haute atmosphère. Un contrat de licence d'exploitation de brevet et de savoir-faire a été signé avec la société. D'autres initiatives de création d'entreprises pourraient voir le jour, dans ce domaine ou dans d'autres, sur des thèmes liés aux activités de l'IPSL.

## I. 12 - Les activités de support

L'initiative et le pilotage scientifique des moyens informatiques de l'IPSL est la règle de fonctionnement primordiale. Ainsi, sur Jussieu a été mis en place depuis 1996 un service informatique IPSL en soutien aux structures fédératives (Pôle de Modélisation et Centre de Données) et aux services purement IPSL (Communication, Services d'Observations, Valorisation). Ce service travaille en synergie avec les services informatiques des laboratoires selon un principe de subsidiarité. Il y a également eu une volonté croissante de mettre en place certains services au niveau IPSL et de bénéficier du déménagement pour installer une salle machine commune. Les années écoulées ont, par ailleurs, vu un fort accroissement du personnel rattaché à l'IPSL et donc des besoins de moyens informatiques. L'ensemble des activités est ici présenté suivant quatre rubriques, Informatique fédérative, Centre de Données, Pôle de Modélisation et Services IPSL.

**a) - Informatique fédérative :** L'informatique fédérative représente l'ensemble des services mis en place en commun pour l'IPSL et ses laboratoires. Depuis plusieurs années, les interlocuteurs techniques des laboratoires et de l'IPSL se sont regroupés et travaillent en commun autour de ces services dans le cadre du groupe d'informaticiens JIJJ dont la légitimité est reconnue par le comité de direction de l'IPSL (il regroupe les administrateurs système et réseau des laboratoires IPSL implantés à Jussieu, à l'ENS et au Muséum). Le déménagement des laboratoires IPSL et de l'institut sur le site de Jussieu a constitué le point fort des activités. A cette occasion, ce groupe a mis en oeuvre le regroupement dans une même salle informatique, gérée de façon collégiale, des serveurs de calculs, des éléments actifs du réseau et d'autres services communs. S'y ajoute une infrastructure réseau IPSL qui permet des liaisons fiables et au meilleur débit entre les utilisateurs répartis dans les 7 ailes, les serveurs des laboratoires et avec l'extérieur. L'installation d'une salle machine commune a permis de démarrer la mise en commun de certains services système : serveur de sauvegarde système et serveur d'annuaires (DNS, LDAP). La poursuite de la mutualisation des services se fera au fur et à mesure des prochaines évolutions prévues par le groupe des informaticiens (JIJJ).

Depuis janvier 2003, un important effort a été réalisé dans le domaine de la sécurité informatique au niveau du paramétrage du matériel actif réseau, de la mise en place de moyens, et de l'expertise en sécurité. La sécurisation des systèmes est une activité menée à l'IPSL au bénéfice de tous les laboratoires grâce à la compétence spécifique d'un des membres du groupe JIJJ qu'il met au service de tout le groupe.

Toutes les licences nécessaires au bon fonctionnement des logiciels commerciaux sur toutes les machines des laboratoires implantés à Jussieu, à l'ENS et à Polytechnique, sont centralisées au niveau d'un serveur géré par l'IPSL. Le serveur Bureautique a été entièrement revu en 2001 puis en 2003 pour suivre l'accroissement de la demande et les services liés à la communication sont également pris en charge au niveau fédératif.

Le déménagement a eu comme effet positif d'induire le rapprochement effectif, en termes techniques et humains, des laboratoires IPSL implantés à Jussieu et d'établir les bases d'une vision commune de l'informatique IPSL. La mise en œuvre de la salle machine commune permet une économie d'échelle importante. Le partage d'expertise au niveau du groupe des informaticiens des laboratoires se concrétise lors de la mise en œuvre des actions de sécurité, lors des choix de nouveaux matériels. D'autres domaines d'expertise existent : les systèmes MAC, les moyens de calcul locaux et extérieurs, les grappes de PC, les applications en calcul scientifique, la vidéo-conférence, les postes de travail légers, la PAO, ...

**b) Centre de Données :** Le Centre de Données s'appuie pour partie de ses activités (cf I.5) sur l'informatique IPSL à Jussieu. L'aide apportée par le service informatique IPSL-Jussieu concerne l'hébergement des serveurs de données, une aide à la mise à niveau des logiciels système tenant compte des impératifs de sécurité, les sauvegardes des données essentielles, la mise en œuvre de logiciels spécifiques (outils XML), la possibilité de lancer des calculs en local (conversion de format, statistiques), la mise à disposition de postes de travail sous Linux avec des logiciels standards (Matlab, IDL, compilateurs, ...), l'accès au serveur bureautique, ainsi qu'une assistance système et logicielle.

**c) Pôle de Modélisation du Climat :** Les activités du Pôle de Modélisation (cf I.1) s'appuient également pour partie sur l'informatique IPSL à Jussieu. En effet, les simulations lourdes se font, sauf exception, dans les centres de calcul nationaux (IDRIS, CEA) et les simulations de mise au point, dans les laboratoires sur les postes de travail individuels ou sur des serveurs de calcul. Les principes, permettant de retenir l'IPSL comme centre de ressources informatique s'articulent sur la nécessité de rendre accessibles à tous les membres de ce Pôle des services répartis sur plusieurs sites, de simplifier les accès aux résultats produits dans les divers centres de calcul, et de bénéficier des outils mis en place par le centre de données. Les services mis en place par l'IPSL pour le Pôle de Modélisation incluent : un serveur de gestion des versions des sources des modèles, un serveur d'accès aux résultats, le stockage et l'accès aux documentations, le stockage des résultats de référence et celui des données pour les projets scientifiques, les postes de travail pour les ingénieurs du pôle et pour les visiteurs IPSL (libre-service), le serveur de calcul pour mise au point locale des modèles ou simulations de petite taille en relais des centres de calcul nationaux CEA ou IDRIS et, enfin, l'expertise technique.

**d) Services IPSL :** Les Services d'Observation, la communication, la direction et l'administration de l'IPSL ont également besoin d'informatique. Ces besoins sont apparus au fur et à mesure de la mise en place de ces services à l'IPSL dans les quatre dernières années. Rappelons que le personnel IPSI est désormais d'une vingtaine de personnes (permanents ou CDD). Toutes ont besoin de moyens techniques souvent différents. Les moyens et le soutien informatique sont bien évidemment demandés à l'IPSL.

## **I.13 - Le renforcement des collaborations**

Bénéficiant d'une couverture thématique assez large, l'IPSL est un interlocuteur privilégié vis à vis de certains laboratoires ou instituts. Sans vouloir se substituer à ses laboratoires, l'Institut a donc une politique active dans le domaine des collaborations aussi bien en France qu'à l'étranger. Ceux-ci se traduisent généralement par l'organisation de journées scientifiques autour autour des centres d'intérêt communs. Trois journées de ce type ont été organisées :

- le 24 mars 2003 avec l'IFR EGER « Environnement et Gestion de l'Espace régional » implantée sur le site INRA de Grignon. Thèmes abordés : Isotopie carbone et eau, Cycle du carbone et carbone organique du sol, Pollution de l'air, Modélisation à l'échelle régionale, Systèmes d'observation, modélisation SVAT et transferts en conditions hétérogènes, Organisation de l'espace et bilans environnementaux, Erosion et isotopes cosmogéniques, et enseignement.
- le 9 janvier 2004 avec le CNRM (Centre National de la Recherche Météorologique, Toulouse). Thèmes abordés : Modélisation et assimilation à méso-échelle, Prévisibilité des phénomènes atmosphériques, Modélisation climatique, Echanges océan-atmosphères, Chimie atmosphérique, et projets expérimentaux.
- le 4 février 2004 avec l'UMR Sisyphe implantée sur le site de Jussieu. Thèmes abordés : Hydrogéologie et hydrodynamique, isotopes de l'eau et glaciologie, Interfaces continentales, Cycle de l'eau et précipitations, Projet AMMA, Transferts de matière par les rivières vers les océans).

Sur le plan national, nous noterons également des contacts récents avec le laboratoire CEREAS, laboratoire commun ENPC EDF, avec lequel la signature d'une convention de partenariat dans les domaines d'intérêt commun (observation atmosphérique, pollution urbaine, modélisation régionale) pourrait être envisagée.

Sur le plan international, nous avons poursuivi les échanges, amorcés en 2001, avec le MPI Hambourg, à travers une réunion qui s'est tenue à Paris les 23 et 24 mai 2002. Réunissant une quarantaine de participants des deux instituts, elle était centrée sur les aspects liés à la modélisation océanique et au développement d'un modèle "Système terre".

Par ailleurs, la présence de l'IPSL sur le plan international se traduit par une forte participation des chercheurs de l'Institut au prochain rapport du GIEC (à paraître en 2007) : 11

chercheurs sélectionnés pour la rédaction du rapport du groupe 1 qui traite des aspects scientifiques du changement climatique (ce qui place l'IPSL au tout premier plan international).

Enfin nous présentons ci-dessous le bilan d'une action internationale plus formelle, le Programme Franco-Indien de Recherche en Météorologie et Climatologie (ProFIRMeC ex CEFIRE) dans lequel des chercheurs de l'IPSL sont très actifs.

**Le projet franco-indien ProFIRMeC :** Cette collaboration, initiée il y a quelques années par R.Sadourny (LMD) a été officialisée par un accord entre le CNRS et le CSIR (Conseil de la Recherche Scientifique et Industrielle) signé en septembre 2004. Cet accord fixe la base d'une coopération entre la France et l'Inde dans le domaine de l'environnement et du Climat. Cette coopération concerne un réseau de laboratoires dans les deux pays, l'IPSL étant le nœud Français de ce réseau et le C-MMACS le nœud Indien. Pour l'instant, ce réseau comprend sept laboratoires Indiens (CAOS-IISc Bangalore, C-MMACS, CUSAT, IIA, IIT Bombay, IIT Delhi, NIO) et cinq laboratoires Français (Legos, LMD, LOA, LodyC, LSCE).

Les projets scientifiques (au nombre de 8, cf ci-dessous) sont très focalisés sur la variabilité et la prévisibilité de la mousson Indienne. Le cycle hydrologique régional de l'Inde continentale est en effet fortement dépendant de la mousson. Durant une saison, celle-ci présente des phases actives et des pauses des précipitations qui se succèdent à des intervalles allant de quelques jours à quelques dizaines de jours. La distribution et la durée de ces phases déterminent la qualité de la mousson pour une année donnée. Pendant les phases actives, les précipitations se distribuent spatialement suivant le développement local de systèmes convectifs organisés à méso-échelle. Pour interpréter et prévoir la variabilité spatio-temporelle de la mousson, il est donc essentiel de considérer un large spectre d'échelles. Il existe de fait des interactions entre les systèmes convectifs à méso-échelles et les échelles plus grandes de la variabilité synoptique et de la variabilité à grande échelle (comme les oscillations intra-saisonnières à 20-40 jours) qui influent sur les pauses de la mousson.

Un autre aspect fondamental est le rôle des interactions entre l'atmosphère et les processus à la surface. Ceci comprend les échanges avec les surfaces continentales, modifiées en particulier par l'activité humaine (agriculture, urbanisme, déboisement). Ceci comprend également les échanges avec les océans qui sont d'extraordinaires réservoirs d'énergie et des systèmes à évolution plus lente, donnant potentiellement de la prévisibilité à l'échelle intra-saisonnière et saisonnière. Pour ces analyses, il faut également considérer les interactions entre le système dynamique de la mousson et la biosphère (marine et terrestre) ainsi que la chimie atmosphérique (rôle des aérosols sur le rayonnement).

Les phénomènes étudiés dans le cadre de ce programme sont au cœur des préoccupations scientifiques actuelles concernant le rôle des interactions entre processus physiques, chimiques et biologiques sur l'évolution du climat à différentes échelles spatio-temporelles. Ceci comprend par exemple le rôle des interactions océan-atmosphère sur les pauses de mousson, le rôle de la chimie des aérosols sur le rayonnement, le rôle de la

dynamique océanique sur la productivité marine. Ces phénomènes interagissent entre eux (rayonnement <-> dynamique atmosphérique <-> forçage de l'Océan) et il est donc nécessaire d'avoir une approche intégrée de l'étude de ces processus. En se concentrant sur une région donnée (l'Inde) et un phénomène spécifique (la mousson), ce programme permettra une approche cohérente de l'ensemble de ces interactions.

Il est important de noter que les phénomènes tropicaux étudiés dans le cadre de ce programme ont des répercussions sur les prévisions de l'évolution du temps aux échelles saisonnières et interannuelles. Les phénomènes étudiés, comme la mousson, sont susceptibles d'évoluer et d'interagir avec l'évolution du climat à l'échelle globale, y compris donc en Europe.

Ce réseau apporte une structure de coopération exceptionnelle entre les laboratoires Français, en particulier de l'IPSL, et Indiens pour la recherche sur l'environnement et le Climat. Les projets scientifiques de ce réseau apportent une grande richesse d'échange de connaissances et de moyens entre la France et l'Inde. Des complémentarités extrêmement utiles ont en particulier été trouvées entre l'expertise dans le domaine de la modélisation du climat du côté Français et l'expertise sur la connaissance et les capacités d'observation du climat et du milieu régional du côté Indien.

Ce réseau bénéficiera en outre des bases de données élaborées conjointement à partir de mesures historiques Indiennes et de mesures de nouvelles expériences (campagnes Vasco-cirene 2005 et 2006) et permettra d'organiser l'activité scientifique Franco-Indienne pour l'élaboration du traitement scientifique des mesures de l'expérience spatiale Megha-Tropiques. Les étapes clés du programme ont été :

- La réunion annuelle du Cefire (ancien nom du ProFIRMeC) en décembre 2002 à Paris
- La conférence sur les Interactions d'échelles et la variabilité de la mousson (Sivom) en octobre 2003 à Munnar (Kerala)
- La signature de l'accord du ProFIRMeC entre le CNRS et le CSIR (Conseil de la Recherche Scientifique et Industrielle) en septembre 2004 à Bangalore.

Les huit projets et leurs principales réalisations sont :

- AIM (Aerosols and the Indian Monsoons) : inventaire précis des émissions d'aérosols et inclusion dans un modèle de circulation générale comprenant une chimie du soufre pour l'étude des transports.
- CAFICA (CArbon Fluxes in India and Central Asia): suivi de la concentration de CO<sub>2</sub> par l'instrumentation d'une station à l'Indian Astrophysical Observatory d'Hanle dans le nord de l'Inde. Assimilation des séries de CO<sub>2</sub> dans le modèle LMDZ.

- FOXES (Forecasting eXtreme Events): Simulation de l'évolution de cyclones dans la mer d'Arabie et dans la Baie du Bengale à l'aide de LMDZ avec un fort zoom sur les régions concernées.
- HYDISC (Hydrology of the Indian Sub-Continent) : élaboration du projet en 2004. Le but de ce nouveau projet sera l'étude de l'origine des flux d'eau douce dans la mer d'Arabie à partir d'observations satellitaires et de modèles numériques.
- LICOS (Life Cycle of Convective Systems): préparation des traitements scientifiques de l'expérience Megha-Tropiques.
- MOTIV (Monsoons and the Tropical Intraseasonal and Interannual Variations) : étude du budget de chaleur et de sel dans le nord de l'Océan Indien avec le modèle OPA ; étude de la prévisibilité de la mousson Indienne avec LMDZ ; étude des interactions océan-atmosphère aux échelles de temps intrasaisonnières et préparation de la campagne Vasco-Cirene.
- RIO (Resource in the Indian Ocean): modélisation de la structure thermohaline dans la mer d'Arabie et modélisation simplifiée de la productivité marine.
- VAMOS (Variational Assimilation of Meteorological and Oceanographic Systems): Utilisation d'un modèle numérique simple pour identifier les erreurs du modèle assimilateur. Diagnostics sur le système d'assimilation opérationnel du National Centre for Medium Range Weather Forecasting (NCMRWF).

De nombreux échanges de chercheurs entre la France et l'Inde ont permis de démarrer ces projets et de rédiger les premières publications. De plus, des doctorants et des jeunes chercheurs français et indiens sont déjà très impliqués dans les projets scientifiques du ProFIRMeC. La politique d'échange a aussi été étendue à des stages de fin d'étude de l'Ecole Polytechnique et à des stages de maîtrise et de maîtrise. Cette politique d'échange et l'implication des étudiants sera renforcée tout au cours du programme.

## I.14 - Liste des publications (parues en 2002, 2003 et 2004 et sous-presse)

**a) Publications liées aux activités du Pôle de Modélisation du Climat :** Liste non exhaustive, restreinte aux études majeures répertoriées dans ce bilan. Les informations complémentaires figures dans les documents bilan et prospective des différents laboratoires.

- Aumont O, Maier-Reimer E, Blain S, et al. An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations *Global Biogeochemical Cycles*, 17 (2): Art. No. 1060 JUN 4 2003
- Bauer, S., Y. Balkanski, M. Schulz, D. A. Hauglustaine, et F. Dentener, Heterogeneous chemistry on mineral aerosol surfaces : a global modelling study on the influence on tropospheric ozone chemistry and comparison to observations, *J. Geophys. Res.*, 109, D02304, doi:10.1029/2003JD003868, 2004.
- Bonasoni, P., P. Cristofanelli, F. Calzolari, U. Bonafè, F. Evangelisti, A. Stohl, R. van Dingenen, T. Colombo, Y. Balkanski, Aerosol-ozone correlations during dust transport episodes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, Vol. 4, pp 1201-1215, 2004.
- Bony, S., and K. A. Emmanuel, 2001: A parameterization of the cloudiness associated with cumulus convection; evaluation using TOGA COARE data, *J. Atmos. Sci.*, 58, 3158-3183.
- Bony, S., J. L. Dufresne, H. Le Treut, J. J. Morcrette, and C. Senior, 2004: On dynamic and thermodynamic components of cloud changes. *Climate Dynamics*, 22, 71-86.
- Bopp L, Aumont O, Belviso S, et al. Potential impact of climate change on marine dimethyl sulfide emissions *Tellus, Series B-* 55 (1), 2003
- Bopp L, Boucher O, Aumont O, et al. Will marine dimethylsulfide emissions amplify or alleviate global warming? A model study *Canadian Journal of Fisheries and aquatic sciences* 61 (5), 826-835, 2004
- Bopp L, Kohfeld KE, Le Quere C, et al. Dust impact on marine biota and atmospheric CO<sub>2</sub> during glacial periods, *Paleoceanography*, 18 (2): Art. No. 1046 JUN 7 2003
- Braconnot, P. and O. Marti, 2003: Impact of precession on monsoon characteristics from coupled ocean atmosphere experiments: changes in Indian monsoon and Indian ocean climatology. *Marine Geology*, 201, 23-34.
- Braconnot, P., 2003: La modélisation du climat. *Clefs CEA*, 47, 16-22.
- Braconnot, P., M. F. Loutre, B. Dong, S. Joussaume, and P. Valdes, 2002: How the simulated change in monsoon at 6 ka BP is related to the simulation of the modern climate: results from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project. *Climate Dynamics*, 19, 107-121.
- Braconnot, P., P. Friedlingstein, and J. L. Dufresne, 2003: Le climat de demain: inquiétudes face à l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre. *Flux*, 223, 49-55.
- Brunner, D., J. Staehelin, H. L. Rogers, M. O. Köhler, J. A. Pyle, D. A. Hauglustaine, L. Jourdain, T. K. Berntsen, M. Gauss, I. S. A. Isaksen, E. Meijer, P. van Velthoven, G. Pitari, E. Mancini, V. Grewe, et R. Sausen, An evaluation of the performance of chemistry transport models by comparison with research aircraft observations. Part 1: concepts and overall model performance, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1606-1631, 2003.
- Cadule P., and M.A Foujols 2004 : technical note on MODIPSL
- Ciais P, Viovy N, Reichstein M, Granier A, Ogée J, Rambal S, Ourcival J-M, Bernhofer C, Grunwald T, Pilegaard K, Berbigier P, Vesala T, Aubinet M, Heinesch B, Loustau D, Seufert G, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Soussana J-F, Knohl A, Sanz M-J, Carrara A, Friend A, Chevallier F, Schulze E-D, Valentini R (submitted) An Unprecedented Reduction in the Primary Productivity of Europe during 2003 caused by Heat and Drought.
- Davey, M. K., M. Huddleston, K. R. S)perber, P. Braconnot, F. Bryan, D. Chen, A. Colman, C. Cooper, U. Cubasch, P. Delecluse, D. De Witt, L. Fairhead, G. Flato, C. Gordon, T. Hogan, M. Ji, M. Kimoto, A. Kitoh, T. Knutson, M. Latif, H. Le Treut, T. Li, S. Manabe, C. Mechoso, G. A. Meehl, J. Oberhuber, S. Power, E. Roeckner, L. Terray, A. Vintzileos, R. Voss, B. Wang, W. M. Washington, I. Yoshikawa, J.-Y. Yu, S. Yukimoto, and S. Zebiak, 2002: STOIC : a study of coupled model climatology and variability in tropical ocean regions. *Climate Dynamics*, 18, 403-420.
- de Noblet-Ducoudré N, Gervois S, Ciais P, Viovy N, Brisson N, Seguin B, Perrier A (in press) Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*
- de Rosnay P, Polcher J, Bruen M, Laval K (2002) Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large scale land surface processes. *Journal of Geophysical Research* 107 (D11) doi:10.1029/2001JD
- de Rosnay P, Polcher J, Laval K, Sabre M (2003) Integrated parameterization of irrigation in the land surface model ORCHIDEE. Validation over Indian Peninsula. *Geophysical Research Letters* 30 (19) doi: 10.1029/2003GL018024

- Dufresne JL, Friedlingstein P, Berthelot M, et al. On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 29 (10): Art. No. 1405 MAY 15 2002
- Dutay JC, Jean-Baptiste P, Campin JM, et al. Evaluation of OCMIP-2 ocean models' deep circulation with mantle helium-3 *Journal of Marine Systems*, 48 (1-4): 2004
- Edwards D. P., L. K. Emmons, D. A. Hauglustaine, A. Chu, J. C. Gille, Y. J. Kaufman, G. Pétron, L. N. Yurganov, L. Giglio, M. N. Deeter, V. Yudin, D. C. Ziskin, J. Warner, J.-F. Lamarque, G. L. Francis, S. P. Ho, D. Mao, J. Chen, E. I. Grechko, et J. Drummon, Observations of carbon monoxide from the Terra satellite : northern hemisphere variability, *J. Geophys. Res.*, sous presse, 2004.
- Folberth, G., D. A. Hauglustaine, P. Ciais, et J. Lathière, On the role of atmospheric chemistry in the global CO<sub>2</sub> budget, soumis à *Geophys. Res. Lett.*, 2004
- Foujols M.A, Lévy M., Aumont O. and Madec G., 2000: OPA 8.1 Tracer Model reference manual. Note du Pole de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No, 45pp.
- Friedlingstein P, Dufresne JL, Cox PM, et al How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus, Series B*, 55 (2): 692-700, 2003
- Gauss, M., G. Myhre, G. Pitari, M. J. Prather, I. S. A. Isaksen, G. P. Brasseur, F. Dentener, R. G. Derwent, D. A. Hauglustaine, L. W. Horowitz, D. J. Jacob, M. Johnson, K. Law, L. J. Mickley, J.-F. Muller, P.-H. Plantevin, J. A. Pyle, H. L. Rodgers, D. S. Stevenson, J. Sundet, M. van Weele, et O. Wild, Radiative forcing in the 21st century due to ozone changes in the troposphere and lower stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 108, D9, 10.10029, 2003.
- Generoso, S., Bréon, F.M. , Balkanski, Y. , Boucher, O., et Schulz, M, Improving the seasonal cycle and interannual variations of biomass burning aerosol sources, *Atmos. Chem. Physics*, 3, 1211-1222, 2003.
- Gervois S, de Noblet-Ducoudré N, Viovy N, Ciais P, Brisson N, Seguin B, Perrier A (in press) Including croplands in a global biosphere model: methodology and evaluation at specific sites. *Earth Interactions*
- Goosse, H., and T. Fichefet, 1999: Importance of ice-ocean interactions for the global ocean circulation: A model study. *J. Geophys. Res.*, 104, 23,33723,355.
- Grandpeix, J.-Y., V. Phillips, and R. Tailleux: Improved mixing representation in emanuel's convection scheme, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, in press.
- Guibert, S., V. Matthias, M. Schulz, J. Bösenberg, R. Eixmann, I. Mattis, G. Pappalardo, M. R. Perrone, N. Spinelli, and G. Vaughan, The vertical distribution of aerosol over Europe - Synthesis of one year of EARLINET aerosol lidar measurements and aerosol transport modeling with LMDzT-INCA, submitted to *Atmospheric Environment*, 2004
- Hauglustaine, D. A., F. Hourdin, S. Walters, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, J.-F. Lamarque, et E. A. Holland, Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.*, 109, D04314, doi: 10.1029/ 2003JD003957, 2004.
- Hauglustaine, D. A., F. Hourdin, S. Walters, L. Jourdain, M.-A. Filiberti, J.-F. Lamarque, et E. A. Holland, Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model : description and background tropospheric chemistry evaluation, *J. Geophys. Res.*, 109, D04314, doi: 10.1029/2003JD003957, 2004.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Polcher J, Prentice IC (in press) A dynamical global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*
- Latif, M., K. Sperber, J. Arblaster, P. Braconnot, D. Chen, A. Colman, U. Cubasch, C. Cooper, P. Delecluse, D. DeWitt, L. Fairhead, G. Flato, T. Hogan, M. Ji, M. Kimoto, A. Kitoh, T. Knutson, H. Le Treut, T. Li, S. Manabe, O. Marti, C. Mechozo, G. Meehl, S. Power, E. Roeckner, J. Sirven, L. Terray, A. Vintzileos, R. Voss, B. Wang, W. Washington, I. Yoshikawa, J. Yu, and S. Zebiak, 2001: ENSIP: the El Nino simulation intercomparison project. *Climate Dynamics*, 18, 255-276.
- Levy, M (2003) Mesoscale variability of phytoplankton and of new production : Impact of the large scale nutrient distribution, *J. Geophys. Res.* , Vol 108, C11, 3358 10.1029/2002JC001577
- Levy, M. and P. Klein (2004) Does the low frequency variability of mesoscale dynamics explain a part of the phytoplankton and zooplankton spectral variability ? *Proc. Royal Soc. Lon*, vol 460, Issue 2046, pp 1673-1683, DOI : 10.1098/rspa.2003.1219
- Loustau, D, A. Bosc , A. Colin, H. Davi , C. François , E. Dufrière, M. Déqué , E. Cloppet D. Arrouays, C. Le Bas Christine, N. Saby Nicolas, G. Pignard , N. Hamza A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy N, J. Ogée, F. Delage (sous presse): Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree Physiology*.
- Lunt D, de Noblet-Ducoudré N, Charbit S (on-line first) Effects of a melted greenland ice sheet on climate, vegetation, and the cryosphere. *Climate Dynamics*
- Morales P., M. T. Sykes, I. C. Prentice, P. Smith, B. Smith, H. Bugmann, B. Zierl, P. Friedlingstein, N. Viovy, S. Sabaté, A. Sánchez, E. Pla, C. A. Gracia, S. Sitch., A. Arneth, J. Ogee (soumis): Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes *Global change biology*

- Ngo-duc T, Laval K, Polcher J, Cazenave A (2004a, soumis) Contribution of continental water to sea level variations during the 1997-1998 ENSO event: comparison between AMIP simulations and Topex-Poséidon satellite data. *Journal of Geophysical Research*.
- Ngo-duc T, Polcher J, Laval K (2004b, soumis) A 53 year forcing data set for land-surface models. *Journal of Geophysical Research*.
- PRISM : Report Series: The IPSL\_CM4 coupled model adaptation guide. Number 9 Marie-Estelle Demory <http://www.ipsl.jussieu.fr/~prisipl/Docs/PRISM-IPSLCM4.pdf>
- Quaas, J., O. Boucher, and F.-M. Bréon : Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and in the Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model *J. Geophys. Res.*, 109, D08205, doi :10.1029/2003JD004317, 2004
- Rodgers KB, Aumont O, Madec G, et al. Radiocarbon as a thermocline proxy for the eastern equatorial Pacific *Geophys. Res. Lett.* 31 (14): Art. No. L143, 2004
- Roelofs, G. J., A. S. Kentarchos, T. Trickl, A. Stohl, W. J. Collins, R. A. Crowther, D. A. Hauglustaine, A. Klonecki, K. S. Law, M. G. Lawrence, R. von Kuhlmann, et M. van Weele, Intercomparaison of tropospheric ozone models: ozone transports in a complex tropopause folding event, *J. Geophys. Res.*, 108, D12, 10.1029, 2003.
- Santaren D, Peylin P, Viovy N, Ciais P (submitted) Optimizing a process based ecosystem model with eddy-covariance measurements of carbon dioxide, water and energy fluxes: a case study for a pine forest in southern France.
- Vérant S, Laval K, Polcher J, Castro M (2004) Sensitivity of the continental hydrological cycle to the spatial resolution over the Iberian Peninsula. *Journal of Hydrometeorology* 5 265-283.

## b) Publications liées aux activités du Pôle de Planétologie : classées par thème

### Thème 1

- Angelats i Coll M. , Forget, F., M. A. Lopez Valverde and F. Gonzalez Galindo. The LMD Mars Thermospheric GCM: the Martian atmosphere from the ground to 240 km. *Geophys. Res. Letter*, in press, 2004.
- Angelats i Coll M. , Forget, F., M. A. Lopez Valverde, S. R. Lewis and P. L. Read. Upper atmosphere of Mars up to 120 km: Mars Global Surveyor accelerometer data analysis with the LMD general circulation model *J. Geophys. Res.* 109, E01011, 2004
- Berthelier, J.J., et al., ground-penetrating radar for the Netlander mission, *J. Geophys. Res. Planets*, 108, 8027, doi:10.109/2002JE001866, à paraître.
- Capderou, M. and Forget, F.. Optimal orbits for Mars atmosphere remote sensing. *Planetary and Space Science* 52, 789-798, 2004.
- Ciarletti, V., et al., Numerical simulation of the operation of the GPR radar on Netlander, *J. Geophys. Res. Planet*, doi : 2002JE001867, Vol. 108, n°E4, 8028, 2003.
- Costard, C. F. Forget, N. Mangold, and J. P. Peulvast. Formation of Recent Martian Debris Flows by Melting of Near-Surface Ground Ice at High Obliquity. *Science*, 295: 110–113, 2002.
- Chassefière, E., et al. The Lavoisier Mission : a system of descent probe and balloon flotilla for geochemical investigation of the deep atmosphere and surface of Venus, *Adv. Space Res.*, Vol. 29, N°2, 255, 2002.
- Encrenaz T., Bézard B., Greathouse T. K., Richter M. J., Lacy J. H., Atreya S. K., Wong A. S., Lebonnois S., Lefèvre F. et Forget F. : "Hydrogen peroxide on Mars: evidence for spatial and seasonal variations", *Icarus*, vol. 170, pp. 424-429, 2004.
- Forget, F. Alien weather at the Poles of Mars, perspective. *Science*, in press (2004)
- Forget, F., M. Angelats i Coll, F. Hourdin, Y. Wanherdrick M. A. Lopez Valverde, M. Lopez-Puertas, S. R. Lewis and P. L. Read. The upper atmosphere of Mars up to 120 km: 1. numerical simulation with a general circulation model *J. Geophys. Res.* en cours
- Hamelin, M., et al., Electrostatic interaction between Interball-2 and the ambient plasma. 2. Influence on the low energy ion measurements with Hyperboloid, *Ann. Geophys.*, 20, 377-390, 2002.
- Hamelin, M., et al., Detection of near-surface ice on Mars with electromagnetic methods onboard future surface vehicles, *J. Geophys. Res. Planets*, 108(E4), 8045, doi:10.1029/2002JE001893, 2003.
- Lefèvre F., Lebonnois S., Montmessin, F. et Forget F. : "Three-dimensional modeling of ozone on Mars", *J. Geophys. Res.*, vol. 109, E07004, 2004.
- Levrard, B., Forget, F., Montmessin, F. and Laskar, J. Recent ice-rich deposits formed at high latitudes on Mars by sublimation of unstable equatorial ice during low obliquity *Nature*, 431, 1072-1075, 2004.
- Mangold, N.; Maurice, S.; Feldman, W. C.; Costard, F.; Forget, F. Spatial relationships between patterned ground and ground ice detected by the Neutron Spectrometer on Mars *J. Geophys. Res.* 109, E08001, 2004.

- Mangold N., F. Costard and F. Forget, Debris flows over sand dunes on Mars: Evidence for liquid water *J. Geophys. Res.* 108, E4, 10.1029/2002JE001958 (2003)
- Montmessin F., Forget F., Rannou P., Cabane M. et Haberle, R. M.: "Origin and role of water ice clouds in the Martian water cycle as inferred from a General Circulation Model", *J. Geophys. Res.*, vol. 109, E10004, 2004.
- Montmessin F., Fouchet T and Forget F. Modeling the HDO cycle in the Martian atmosphere, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2004.
- Newman, C. E., S. R. Lewis, P. L. Read, and F. Forget Modelling the Martian dust cycle. 1: Representation of dust transport processes, *J. Geophys. Res.* 107, E10, 2002a
- Newman, C. E., S. R. Lewis, P. L. Read, and F. Forget Modelling the Martian dust cycle. 2: Multi-annual radiatively active dust transport simulations processes, *J. Geophys. Res.* 107, E10, 2002b
- Tobie, G., F. Forget, and F. Lott, Numerical simulation of the winter polar wave clouds observed by MGS Mars Orbiter Laser Altimeter, *Icarus* 164, 33–49, 2003.
- Trauner, R., R. Grard, and M. Hamelin, Detection of subsurface ice and water deposits on Mars with a mutual impedance probe, *J. Geophys. Res. Planets*, 2002JE002008, à paraître, 2003
- Urban, J., Dassas, K., Forget, F. and Ricaud, P. Retrieval of vertical constituent and temperature profiles from passive sub-millimeter wave limb observations of the Martian atmosphere: a feasibility study. *Applied Optics*, in press, 2004.

## Thème 2

- Berthelier J.J., et al., High resolution focal plane detector for a space born magnetic mass spectrometer, *Int. J. Mass Spectr.*, 215, 89 – 100, 2002.
- Bougher, S.W., E. Chassefière, J.-J. Berthelier, and P. Touboul : TERMOPAC/ADIP : a generic package for long-term monitoring of the Martian thermosphere, *Adv. Space Res.*, Vol. 29, N°2, 203-208, 2002.
- Bertaux, J.-L., F. Leblanc, S. Perrier, E. Quemerais, O. Korablev, E. Dimarellis, A. Reberac, F. Forget, P.C. Simon, A.S. Stern, and B. Sandel, First observation of nightglow in the upper atmosphere of Mars: the NO bands in UV and implications for atmospheric transport, *Science*, Soumis, 2005a.
- Bertaux, J.-L., F. Leblanc, S. Perrier, E. Quemerais, O. Korablev, E. Dimarellis, A. Reberac, F. Forget, P.C. Simon, A.S. Stern, and B. Sandel, First observation of aurora in the upper atmosphere of Mars: the role of the crustal magnetic field, *Nature*, Soumis, 2005b.
- Chassefière E. and F. Leblanc, Atmospheric escape and evolution ; interaction with the solar wind, *Planet. Space Sci.*, 52, 11, 1039-1058, 2004.
- E. Chassefière, et al, DYNAMO : A Mars upper atmosphere package for investigating solar wind interaction and escape processes, and mapping martian fields, *Adv. Space Res.*, 33, 12, 2228-2235, 2004.
- E. Dubinin, K. Sauer, J.F. McKenzie and G.M. Chanteur. Nonlinear waves and solitons propagating perpendicular to the magnetic field in bi-ion plasma with finite plasma pressure, *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 9 (2), pp87-99, 2002.
- E. Dubinin, K. Sauer, J.F. McKenzie and G. Chanteur. Solitons, oscillitons and stationary waves in a cold protons-alphas plasma. *Journal of Geophysical Research*, 107, A7, 13. 0148-0227, 2003a.
- E. Dubinin, K. Sauer, J.F. McKenzie, and G.M. Chanteur G.. Solitons, oscillitons and stationary waves in a warm protons-alphas plasma. *Journal of Geophysical Research*, 108, A7, 15. 0148-0227, 2003b.
- Leblanc F., J.G. Luhmann, Johnson R.E., and E. Chassefière, Some expected impacts of a Solar Energetic Particle event at Mars, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JA90178, 2002.
- Leblanc F., Berthelier J.-J., Waite J.-H., Godefroy M., Bolton S.J., Bougher S.W., Cerisier J.-C., Chanteur G., Chassefière E., Dominique D., Di Lellis A.M., Hamelin M., Hodges R. R., Illiano J.M., Johnson R.E., Lebreton J.P., Luhmann J.G., Menvielle M., Milillo A., Nagy A.F., Nevejans D., Orsini S., Smets R., Szegö K., Trotignon J.G., Vaisberg O., Witasse O., and Young D., A Neutral and Ion Mass Spectrometer to Study the Dynamics and Escape of the Martian Atmosphere and Ionosphere, Answer to the Call of Opportunity for Mars PREMIER, 2002.
- Michael, M., Johnson R.E, Leblanc F., Liu M., Luhmann J.G., and V. Shematovich, Ejection of Nitrogen from Titan's atmosphere by magnetospheric ions and pick-up ions, *Planet. Space Sci.*, Accepté, 2004.
- Modolo, R., Chanteur G.M., Dubinin E., and A.P. Matthews, Influence of the solar activity on the Martian plasma environment. Soumis à *Annales Geophysicae* le 13/09/2004, actuellement en cours de révision mineure, 2004.
- R. Modolo, Modélisation de l'interaction du vent solaire et du plasma kronien avec les environnements neutres de Mars et de Titan. Mémoire soumis à l'Université de Versailles-Saint Quentin le 12 octobre 2004.

### Thème 3

- Barbieri C., Cremonese G., Verani S., Cosentino R., Leblanc F., Mendillo M., Sprague A., Hunten D. (2004) **Observations** of Mercury's Na-D emission spectrum with the TNG in August 2003. *Icarus*, soumis.
- Chust T., Roux A., Kurth W. S., Gurnett D. A., Kivelson M. G., Khurana K. K. (2004) Are the Io's Alfvén wings filamented ; Galileo observations. *Planetary and Space Science*. ISSN : 0032-0633. , accepté.
- Delcourt D., Moore T.E., Orsini S., Millilo A., Sauvaud J.-A. (2002) Centrifugal acceleration of ions near Mercury. *Geophysical Research Letters*. ISSN : 0094-8276. vol. 29, n.12, 4 p., Doi: 10.1029/2001GL013829.
- Delcourt D. , Grimald S. , Leblanc F. , Berthelier J.-J. , Millilo A. , Mura A. , Orsini S. , Moore T. E. (2003) A quantitative model of planetary Na<sup>+</sup> contribution to Mercury's magnetosphere. *Annales Geophysicae*. ISSN : 0992-7689. , vol. 21, n. 8, 14 p. , pp. 1723-1736.
- Galopeau P.H.M., Boudjada M.Y., Rucjker H.O. (2004) Evidence of jovian active longitude 1: Efficiency of cyclotron maser instability. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227.
- Gurnett D.A., Kurth W.S., Kirchner D.L., Hospodarsky G.B., Averkamp T.F., Zarka P., Lecacheux A.;Manning R., Roux A., Canu P., Cornillelau-Werhlin N., Galopeau P.H.M., Meyer A., Bostr&Ouml;M R., Gustafsson G., Wahlund J-E.;Ahlen L., Rucker H.O., Ladreiter H.P., Macher W., Woolliscroft L.J.C.Alleyne H., Kaiser M.L., Desch M.D., Farrell W.M., Harvey C.C., Louarn P., Kellog P.J., Goetz K., Pedersen A (2004) The Cassini radio and plasma wave investigation. *Space Science Reviews*. ISSN : 0038-6308.
- Kurth W.S., Gurnett D.A., Hospodarsky G. B., Farell W. M., Roux A, Dougherty M. K., Joy P., Kivelson M. G. Walker R. J., Crary F. J., Alexander C.J. (2002) Galileo and Cassini Wave Observations of the Dusk Flank of Jupiter's Magnetosphere, *Nature*, 415, Feb. 2002.
- Leblanc F., Johnson R.E. (2003), Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, 164, 261-281.
- Leblanc F., Luhmann J.G., Johnson R.E., Liu M. (2003a), Solar Energetic Particles event at Mercury. *Planet. Space Sci.*, 51, 339-352.
- Leblanc F. , Delcourt D. , Johnson R. E. , Liu M. (2003b) Mercury's sodium exosphere : Magnetospheric ion recycling. *Journal of Geophysical Research (Planets)*. ISSN : 0148-0227. , vol. 108, doi: 10.1029/2003JE002151.
- Leblanc, F., Potter A., Killen R., Johnson, R.E. (2004) Europa's sodium cloud : new insights. *Icarus*, soumis.
- Mc Comas D.J., Schwadron N.A., Crary F.J., Elliot H.A.;Young D.T., Gosling M.F., Thomsen E.;Sittler E., Berthelier J-J., Szego K., Coates A.J. (2004) The interstellar hydrogen shadow: Observations of interstellar pick-up ions beyond Jupiter. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 109, n. A2, A02104, doi: 10.1029/2003JA010217.
- Szego K., Young D.T., Barraclough B.;Berthelier J-J., Coates A.J., Mc Comas D.J., Crary F.J., Dougherty M.K., Erdos G., Gurnett D.J., Kurth W.S., Thomsen M. (2003) Cassini plasma spectrometer measurements of Jovian bow shock structure. *Journal of Geophysical Research*. ISSN : 0148-0227. , vol. 108, n. A7, 1287, doi: 10.1029/2002JA009517, 2003.
- Yan N., Sarkissian A., Chassefiere E., Leblanc F. (2004a) Thermal modelling of Mercury's surface and subsurface: impact of subsurface physical heterogeneities on surface temperature. *Advances in Space Research*, soumis.
- Yan N., Leblanc F., Chassefiere E. (2004b) Role of Caloris basin in producing short time variation of Na Mercury's exosphere. *Icarus*, soumis.

### Thème 4

- Bakes E., S. Lebonnois, C. W. Bauschlicher et C. P. McKay, The role of submicron aerosols and macromolecules in H<sub>2</sub> formation in the Titan haze, *Icarus*, 161, 468-473, (2003).
- Cabane, M. et al., Organic and inorganic signatures in Mars ground and underground, one of the goals for "SAM" (Sample Analysis at Mars), *ESA SP*, 518, 323-326 (2002).
- Cabane, M. et al., Did life exist on Mars ? Search for organic and inorganic signatures, one of the goals for "SAM" (Sample Analysis at Mars). *Advances in Space Research*, 33, 2240-2245 (2004).
- Cernogora, G., Szopa, C., Coll, P. & Boufendi, L., Simulation en laboratoire de la production d'analogues d'aérosols de l'atmosphère de Titan par plasma RF, dans *Congrès de la division Plasma de la Société Française de Physique* (ed. Mottin, S.) 43-61 (Publications de l'Université de Saint-Etienne, Cadarache (France) (2003).
- Chassefière, E., et al, 2004, MEP (Mars Environment Package): toward a package for studying environmental conditions at the surface of Mars from future lander/rover missions, *Adv. Space Res.*, 34(8), 1702-1709.
- Hourdin F., S. Lebonnois, D. Luz et P. Rannou, Titan's stratospheric composition driven by condensation and dynamics, *Journal of Geophysical Research*, (sous presse).
- Israel, G. et al., Huygens Probe Aerosol Collector Pyrolyser Experiment. *Space Science Review*, 104, 435-466 (2002).

- Lebonnois S., D. Toubanc D., F. Hourdin et P. Rannou, Seasonal variation of Titan's atmospheric composition, *Icarus*, 152, 384-306 (2001).
- Lebonnois S., E. Bakes et C. P. McKay, Transition from gaseous compounds to aerosols in Titan's atmosphere, *Icarus*, 159, 505-519, (2002).
- Lebonnois S., E. Bakes et C. P. McKay, Atomic and molecular hydrogen budget of Titan's atmosphere, *Icarus*, 161, 474-485 (2003).
- Lebonnois S., F. Hourdin, P. Rannou, D. Luz et D. Toubanc, Impact of the seasonal variations of composition on the temperature field of Titan's stratosphere, *Icarus*, 163, 164-174, (2003).
- Lebonnois S., Benzene and aerosol production in Titan and Jupiter's atmospheres: a sensitivity study, *Planetary and Space Science* (sous presse).
- Luz D. et F. Hourdin, Latitudinal transport by barotropic waves in Titan's stratosphere: I. General properties from a horizontal shallow-water model, *Icarus*, 166, 328-342, (2003).
- Luz D., F. Hourdin, P. Rannou et S. Lebonnois, Latitudinal transport by barotropic waves in Titan's stratosphere: II. Results from a coupled dynamics-microphysics-photochemistry GCM, *Icarus*, 166, 343-358 (2003).
- Niemann, H. et al., The Gas Chromatograph Mass Spectrometer for the Huygens Probe, *Space Science Review*, 104, 551-590 (2002).
- Rannou P., Hourdin F. et McKay C.P., A wind origin for Titan's haze structure, *Nature*, 418, 453-456 (2002).
- Rannou P., McKay C.P. et Lorenz R.D., A model of Titan's haze of fractal aerosols constrained by multiple observations, *Planetary and Space Science*, 51, 953-967 (2003).
- Rannou P., Hourdin F., McKay C.P. et Luz D., A coupled dynamics-microphysics model of Titan's atmosphere, *Icarus*, 170, 443-462 (2004)
- Rosenbauer, H. et al., The COSAC experiment, ESA-SP 1165 (In press).
- Stalport, F. et al., *Advances in Space Research* (soumis).
- Szopa, C. et al., The sample analysis at Mars (SAM) experiment and the search for organic molecules at the martian surface, *ESA SP*, 545, 105-108 (2004).
- Szopa, C. et al., Gas chromatography for in situ analysis of a cometary nucleus. IV. Study of capillary gas chromatographic columns robustness for space application. *Journal of Chromatography A*, 982, 303-312 (2002).
- Szopa, C., Cernogora G., Boufendi L., Correia J.J. et Coll P., PAMPRE : a new laboratory experiment to better understand the physico-chemical processes of Titan aerosols formation and growth, *Planetary and Space Science* (Soumis).

## Thème 5

- Levasseur-Regourd, A.C. , Cometary dust unveiled, *Science*, 304, 1762-1763, 2004
- Levasseur-Regourd, A.C. , E. Hadamcik, J. Lasue, Light scattering as a clue to cometary dust structure, *Highlights of astronomy*, 13, *PASP*, 526-528 (2004)
- Penttilä, A., K. Lumme, E. Hadamcik, A.C. Levasseur-Regourd, Statistical analysis of asteroidal et cometary phase curves, *Astron. Astrophys.* (soumis 2004)
- Levasseur-Regourd, A.C. , E. Hadamcik, J. Lasue, Interior structure and surface properties of NEOs: What is known and what should be understood to mitigate potential impacts, *Adv. Space Res.* (soumis 2004)
- Hadamcik, E. , J.B. Renard, A.C. Levasseur-Regourd, J.C. Worms, PROGRA<sup>2</sup> Experiment: New Results for Dust Clouds and Regoliths analogs, *Adv. Space Res.* (soumis 2004)
- Lasue, J. , A.C. Levasseur-Regourd, Cosmic dust optical properties numerical simulations and future laboratory measurements in microgravity, *Adv. Space Res.* (soumis 2004)
- Levasseur-Regourd, A.C. , E. Hadamcik, Light scattering by irregular dust particles in the solar system: observations and interpretation by laboratory measurements, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 79-80, 903-910, 2003
- Penttilä, A. , K. Lumme, J.C. Worms, E. Hadamcik, J.B. Renard, A.C. Levasseur-Regourd, Theoretical analysis of the particle properties and polarization measurements made in microgravity, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 79-80, 1043-1049, 2003
- Hadamcik, E. , A.C. Levasseur-Regourd, Imaging polarimetry of cometary dust: different comets and phase angles, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 79-80, 661-678, 2003
- Hadamcik, E. , J.B. Renard, A.C. Levasseur-Regourd, J.C. Worms, Relevance of laboratory light scattering measurements on natural particles with the PROGRA<sup>2</sup> experiment, *J. Quant. Spectros. Radiat. Transfer*, 79-80, 679-693, 2003
- Hadamcik, E. , A.C. Levasseur-Regourd, Dust evolution of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) by imaging polarimetric observations, *Astron. Astrophys.*, 403, 757-768, 2003
- Ehrenfreund, P. , H.J. Fraser, J. Blum, J.H.E. Cartwright, J. M. Garcia-Ruiz, E. Hadamcik, A.C. Levasseur-Regourd, S. Price, F. Prodi, A. Sarkissian, Physics and chemistry of icy particles in the universe: answers from microgravity, *Planet. Space Sci.*, 51, 473-494, 2003

- Levasseur-Regourd, A.C. , Cosmic dust physical properties and the ICAPS facility on board the ISS, *Adv. Space Res.*, 31/12, 2599-2606, 2003
- Renard, J.B., E. Hadamcik, T. Lemaire, J.C. Worms, A.C. Levasseur-Regourd, Polarization imaging of dust cloud particles: improvement and applications of the PROGRA<sup>2</sup> instrument, *Adv. Space Res.*, 31, 2511-2518, 2003
- Hadamcik, E., A.C. Levasseur-Regourd, Dust coma of Comet C/1999 S4 (LINEAR): Imaging polarimetry during the nucleus disruption, *Icarus*, 166, 188-194, 2003
- Levasseur-Regourd, A.C., Laboratory studies of icy regoliths, in relation to observations of minor bodies in the outer solar system, *Earth, Moon, Planets*, 92 (1-4), 337-343, 2003
- Hadamcik, E., J.B. Renard, J.C. Worms, A.C. Levasseur-Regourd, M. Masson, Polarization of light scattered by fluffy particles (PROGRA2 experiment), *Icarus*, 155, 497-508, 2002
- Hadamcik, E., J.B. Renard, A.C. Levasseur-Regourd, J.C. Worms, Polarimetric study of levitating dust aggregates with the PROGRA<sup>2</sup> experiment, *Plan. Space Sci.*, 50, 895-901, 2002
- Renard, J.B. ,J.-C. Worms, T. Lemaire, E. Hadamcik, and N. Huret, Light scattering by dust particles in microgravity: polarization and brightness imaging with the new version of the PROGRA2 instrument, *Applied Optics*, 41(4), 609- 618, 2002.
- Levasseur-Regourd, A.C. ,Polarimetry of dust in the solar system: remote observations, in-situ measurements and experimental simulations, *Photopolarimetry in remote sensing*, G. Videen et al. eds. NATO Series, Kluwer, p. 393-410, 2004
- Kolokolova, L. , M.S. Hanner, A.C. Levasseur-Regourd, B. Gustafson, Physical properties of cometary dust, obtained using their light scattering and emission, *Comets II*, M. Festou & H.U. Keller eds. (sous presse)

## Thème 6

- Michels, J. G. , J. C. Raymond, J. L. Bertaux, E. Quemerais, R. Lallement, Y.-K. Ko, D. Spadaro, L. D. Gardner, S. Giordano, R. O'Neal, S. Fineschi, J. L. Kohl, C. Benna, A. Ciaravella, M. Romoli, and D. Judge, The Helium Focusing Cone of the Local Interstellar Medium Close to The Sun, *Astrophysical Journal*, 568 385-395. (2002)
- Quémérais, E., Izmodenov V., Effects of the heliospheric interface on the interplanetary Lyman alpha glow seen at 1 AU from the Sun, 2002, *Astronomy and Astrophysics*, v.396, p.269-281.
- Quémérais, E., Bertaux, J.L., 14-day forecast of solar indices using interplanetary Lyman a background data.; 2002, *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 2, 10.1929, p. 5-1.
- Izmodenov V., Wood B., Lallement R. , Hydrogen wall and heliosheath Lyman-alpha absorption toward nearby stars : possible constraints on the heliospheric interface plasma flow, *Journal of Geophys. Res.*, 107, A10, 1308 JA009394R, (2002).
- Welsh, B.Y., Sallmen, S., Sfeir, S. and Lallement, R., Interstellar NaI and CaII absorption observed towards the Cygnus loop SNR, *Astron. Astrophys.*, 392, 705-711., 2002,
- Crawford I.A, Lallement R., Price R.J., Sfeir D., Wakker B.P., Welsh B.Y. , High-resolution observations of interstellar NaI and CaII towards the southern opening of the "Local Interstellar Chimney": probing the disk-halo connection, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 337, 720,(2002)
- Welsh B.Y., Sallmen S., Sfeir D., Shelton R.L., Lallement R., Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE) observations of emitting and absorbing gas in the Local Interstellar Chimney, *Astron. Astrophys.* , 394, 691 (2002)
- Summanen, T.; Mäkinen, J. T. T.; Kyrölä, E.; Schmidt, W.; Pulkkinen, T. I.; Bertaux, J.-L.; Lallement, R.; Quémérais, E., Interplanetary lyman alpha observations of SWAN during the rising phase of the 23rd solar cycle, *Advances in Space Research*, Volume 29, Issue 3, p. 457-462, (2002)
- Welsh B., Sallmen S., Jelinsky P., Lallement R., The RCW114 nebula: an old supernova remnant or a WR wind-blown bubble ?, *Astron. Astrophys.* , 403, 605-611 (2002)
- Lallement R., Bertaux J.L., Szegö K., Nemeth S, The Shadow of Hale-Bopp in Lyman-alpha, *Earth, Moon & Planets* 90, 67-76. (2002) ,
- Nakagawa, H.; Fukunishi, H.; Takahashi, Y.; Watanabe, S.; Taguchi, M.; Bertaux, J.L.; Lallement, R. ; Quémérais, E., Solar cycle dependence of interplanetary Lyman-alpha emission and solar wind anisotropies derived from NOZOMI/UVS and SOHO/SWAN observations, *Journal of Geophys. Res.* Volume 108, Issue A10, LIS 10-1, CiteID 8035, DOI 10.1029/2003JA009882 (2003)
- Lallement R., Welsh B., Vergely J.L., Crifo F., Sfeir D., 3D Mapping of the Dense Interstellar Gas around the Local Bubble, *Astron. Astrophys.*, *Astron. Astrophys.*, 411, 447 (2003)
- Quémérais E., Bertaux J.L., Lallement R., Sandel W., Izmodenov V., Voyager UVS Lyman-alpha glow data from 1993 to 2003: the hydrogen distribution in the upwind outer heliosphere, *Journal of Geophys. Res.*, Volume 108, Issue A10, pp. LIS 4-1 (2003)
- Welsh B., Sallmen S., Lallement R., Probing the inner halo and IVC gas through the Local Interstellar Chimney, *Astron. Astrophys.*, 414, 261 (2004)

- Lallement R. , The Heliospheric Soft X-ray emission Pattern during the ROSAT survey : inferences on Local Bubble Hot gas, *Astron. Astrophys.*, 418, 143-150 (2004).
- Diagnostics of the Local Interstellar Medium using Particles and UV radiation, , *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 1, p. 46-52. , Lallement R. , Raymond J., Vallergera, J. (2004)
- Lallement R., On the contribution of charge-exchange induced X-ray emission in ther ISM and ICM, *Astron. Astrophys.*, v.422, p.391-400 (2004)
- Lallement R, Raymond J.C., Vallergera J., Bertaux J.L., Quémerais E., McMullin D., Solar Cycle Dependence of the Helium Focusing Cone from SOHO/UVCS Observations: Electron Impact Rates and Associated Pickup Ions : *Astron. Astrophys.*, sous presse, (2004)
- Vallergera J., Lallement R., Lemoine M., Dalaudier F., McMullin D., EUVE observations of the helium glow: interstellar and solar parameters, *Astron. Astrophys.*, sous presse (2004)
- Möbius E., M. Bzowski, S. Chalov, H.-J. Fahr, G. Gloeckler, V. Izmodenov, R. Kallenbach, R. Lallement, D. McMullin, H. Noda, M. Oka, A. Pauluhn, J. Raymond, D. Rucinski, R. Skoug, T. Terasawa, W. Thompson, J. Vallergera, R. von Steiger, M. Witte, Synopsis of the Interstellar He Parameters from Combined Neutral Gas, Pickup Ion and UV Scattering Observations and Related Consequences: *Astron. Astrophys.*, sous presse (2004)
- Lallement R., Raymond, J.C., Vallergera J., Bertaux J.L., Dalaudier F., Lemoine M., Modelling the Interstellar-Interplanetary Helium 58.4 nm Resonance Glow : towards a Reconciliation with Particle Measurements, *Astron. Astrophys.*, sous presse (2004)
- McMullin D. R., M. Bzowski, E. Moebius, A. Pauluhn, R. Skoug, W. T. Thompson, M. Witte, R. von Steiger, R. Lallement, D. Rucinski, Heliospheric conditions that affect the interstellar gas inside the heliosphere *Astron. Astrophys.*, sous presse (2004)
- Izmodenov, V.; Wood, B.; Lallement, R., Hydrogen wall and heliosheath Ly-alpha absorption toward nearby stars : 2004, , *Advances in Space Research*, sous presse (2004)
- Pepino, R., V. Kharchenko, A. Dalgarno, and R. Lallement, Spectra of the X-Ray Emission Induced in the Interaction between the Solar Wind and the Heliospheric Gas, *Astroph. J.*, sous presse (2004-05)

### c) Publications issues des activités liées au statut d'OSU

#### Publications NDSC

- Beig, G., Keckhut, P., Lowe, R.P., Roble, R.G., Mlynczak, M.G., Scheer, J., Fomichev, V.I., Offermann, D., French, W.J.R., Shepherd, M.G., Semenov, A.I., Remsberg, E.E., She, C.Y., Lübken, F.J., Bremer, J., Clemesha, B.R., Stegman, J., Sigernes, F. and Fadnavis, S., 2003, Review of mesospheric temperature trends, *Rev. Geophys.*, 41(4), 1015, doi: 10.1029/2002RG000121.
- Braathen G.O., S. Godin, P. Keckhut, T.J. McGee, M.R. Gross, C. Vialle, and A. Hauchecorne, Intercomparaison of stratospheric ozone and temperature measurements at the observatoire de Haute Provence during an NDSC validation campaign from 1-18 july 1997, Submitted to *Geophys. Res. Lett.*, 2004
- Cadet, B., Goldfarb, L., Faduilhe, D., Baldy, S., Giraud, V., Keckhut, P. and Réchou, A., 2003, A sub-tropical cirrus clouds climatology from Réunion Island (21°S, 55°E) lidar data set, *Geophys. Res. Lett.*, 30(3), 1130, doi : 10.1029/2002GL016342.
- Chourdakis, G., Papayannis, A. and Porteneuve, J., 2002, Analysis of the receiver response for a noncoaxial lidar system with fiber-optic output, *Appl. Opt.*, 41, 2715-2723.
- Faivre, M., Moreels, G., Keckhut, P. and Hauchecorne, A., 2003, Correlated measurements of mesospheric density and near infrared airglow, *Adv. space Res.*, 32, 777-782.
- Fierli, F., Hauchecorne, A., Bekki, S., Theodore, B. and Fanton d'andon, O., 2002, Data assimilation of stratospheric ozone using a high-resolution transport model, *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), doi: 10.1029/2001GL014272.
- Godin, S., Marchand, M., Hauchecorne, A. and Lefèvre, F., 2002, Influence of Arctic polar ozone depletion on lower stratospheric ozone amounts at Haute-Provence Observatory (43.92°N, 5.71°E), *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8272, doi: 10.1029/2001JD000516.
- Godin-Beekmann, S., Porteneuve, J. and Garnier, A., 2003, Systematic DIAL lidar monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution at Observatoire de Haute provence (43.92°N, 5.71°E), *J. Environ. Monit.*, 5, 57-67.
- Hauchecorne, A., Godin, S., Marchand, M., Heese, B. and Souprayen, C., 2002, Quantification of the transport of chemical constituents from the polar vortex to midlatitudes in the lower stratosphere using the high-resolution advection model MIMOSA and effective diffusivity, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8289, doi: 10.1029/2001JD000491.
- Harris, N.R.P., Rex, M., Goutail, F., Knudsen, B.M., Manney, G.L., Muller, R. and Von der Gathen, P., 2002, Comparison of empirically derived ozone losses in the arctic vortex, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8264, doi: 10.1029/2001JD000482
- Keckhut P., S. McDermid, D. Swart, T. McGee, S. Godin-Beekmann,

- A. Adriani, J. Barnes, J-L. Baray, H. Bencherif, H. Claude, G. Fiocco, G. Hansen, A. Hauchecorne, T. Leblanc, C.H. Lee, S. Pal, G. Megie, H. Nakane, R. Neuber, W. Steinbrecht, and J. Thayer, Review of ozone and temperature lidar validations performed within the framework of the Network for the Detection of Stratospheric Change, *J. Env. Mon.*, 2004 (in press).
- Keckhut P, C. Cagnazzo, M-L. Chanin, C. Claud, and A. Hauchecorne, The 11-year solar-cycle in the temperature in the upper-stratosphere and mesosphere: part I assessment of observations, submitted to *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, 2004
- Lait, L.R., Schoeberl, M.R., Newman, P.A., McGee, T., Burris, J., Browell, E.V., Richard, E., Braathen, G.O., Bojkov, B.R., Goutail, F., Von der Gathen, P., Kyro, E., Vaughan, G., Kelder, H., Kirkwood, S., Woods, P., Dorokhov, V., Zaitcev, I., Litynska, Z., Kois, B., Benesova, A., Skrivankova, P., De Backer, H., Davies, J., Jorgensen, T. and Mikkelsen, I.S., 2002, Ozone loss from quasi-conservative coordinate mapping during the 1999-2000 SOLVE/THESEO 2000 campaigns, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), doi: 10.1029/2001JD000998.
- Leblanc, T., McDerimid, I. S. and Hauchecorne, A., 2004, A study of ozone variability and its connection with meridional transport in the northern Pacific lower stratosphere during summer 2002, *J. Geophys. Res.*, 109 (D11), D11105, doi: 10.1029/2003JD004027.
- Lumpe, J.D., Fromm, M., Hoppel, K., Bevilacqua, R.M., Randall, C.E., Browell, E.V., Grant, W.B., McGee, T., Burris, J., Twigg, L., Richard, E.C., Toon, G.C., Margitan, J.J., Sen, B., Pfeilsticker, K., Boesch, H., Fitzenberger, R., Goutail, F. and Pommereau, J.P., 2003, Comparison of POAM III ozone measurements with correlative aircraft and balloon data during SOLVE, *J. Geophys. Res.*, 108(D5), 8316, doi: 10.1029/2001JD000472.
- Marchand, M., Godin, S., Hauchecorne, A., Lefèvre, F., Bekki, S. and Chipperfield, M., 2003, Influence of polar ozone loss on northern midlatitude regions estimated by a high-resolution chemistry transport model during winter 1999-2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D5), 8326, doi: 10.1029/2001JD00906.
- Marchand, M., Bekki, S., Denis, L., Pommereau, J.P. and Khattatov, B.V., 2003, Test of the night-time polar stratospheric NO<sub>2</sub> decay using wintertime SAOZ measurements and chemical data assimilation, *Geophys. res. Lett.*, 30(18), 1920, doi: 10.1029/2003GL017582.
- Marchand, M., Bekki, S., Lefèvre, F., Hauchecorne, A., Godin-Beekmann, S. and Chipperfield, M.P., 2004, Model simulations of the northern extratropics ozone column: Influence of past changes in chemical composition, *J. Geophys. Res.*, 109 (D2), D2310, doi : 10.1029/2003JD003634.
- Meijer Y.J., D.P.J. Stuart, R. Koelemeijer, M. Allart, S. Andersen, G. Bodeker, I. Boyd, G. Braathen, Y. Calisesi, H. Claude, V. Dorokhov, P. von der Gathen, M. Gil, S. Godin-Beekmann, F. Goutail, G. Hansen, A. Karpetchko, P. Keckhut, H. Kelder, B. Kois, R. Koopman, J-C. Lambert, T. Leblanc, I.S. McDerimid, S. Pal, U. Raffalski, H. Schets, R. Stubi, T. Suortti, G. Visconti, and M. Yela, Pole-to-pole validation of ENVISAT/GOMOS ozone profiles using data from ground-based and balloon-sonde measurements, Submitted to *J. Geophys. Res.*, 2004.
- Morel, B., Bencherif, H., Keckhut, P., Baldy, S. and Hauchecorne, A., 2002, Evidence of tidal perturbations in the middle atmosphere over Southern Tropics as deduced from LIDAR data analyses, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1979-1988.
- Morel, B., Keckhut, P., Bencherif, H., Hauchecorne, A., Mégie, G. and Baldy, S., 2004, Investigation of the tidal variations in a 3-D dynamics-chemistry-transport model of the middle atmosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 66, 251-265.
- Naveau P., P. Keckhut, A. Hauchecorne, L. Goldfarb, A statistique analysis of the influence of the vortex breakpoint on arctic total column ozone time series, Submitted to *J. Atmos. Sci.*, 2004.
- Portafaix, T., Morel, B., Bencherif, H., Baldy, S., Godin-Beekmann, S. and Hauchecorne, A., 2003, Fine-scale study of a thick stratospheric ozone lamina at the edge of the southern subtropical barrier, *J. Geophys. Res.*, 108(D6), 4196, doi: 10.1029/2002JD002741.
- Randel, W., Udelhofen, P., Fleming, E., Geller, M., Gelman, M., Hamilton, K., Karoly, D., Ortland, D., Pawson, S., Swinbank, R., Wu, F., Baldwin, M., Chanin, M.L., Keckhut, P., Labitzke, K., Remsberg, E., Simmons, A. and Wu, D., 2004, The SPARC Intercomparison of Middle-Atmosphere Climatologies, *J. Clim.*, 17(5), 986-1003.
- Randriambelo, T., Baray, J.L., Baldy, S., Thompson, A.M., Oltmans, S. and Keckhut, P., 2003, Investigation of the short-time variability of tropical tropospheric ozone, *Ann. Geophys.*, 21, 2095-2106.
- Remsberg, E., Deaver, L., Wells, J., Lingenfelser, G., Bhatt, P., Gordley, L., Thompson, R., Mchugh, M., Russell, J.M., Keckhut, P. and Schmidlin, F., 2002, An assessment of the quality of Halogen Occultation Experiment temperature profiles in the mesosphere based on comparisons with Rayleigh backscatter lidar and inflatable falling sphere measurements, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 4447, doi: 10.1029/2001JD001521.
- Roscoe, H.K., Hill, J.G.T., Jones, A.E. and Sarkissian, A., 2001, Improvements to the accuracy of zenith-sky measurements of total ozone by visible spectrometers. II. use of daily air-mass factors, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 68, 327-336.

- Salby, M., Sassi, F., Callaghan, P., Wu, D., Keckhut, P. and Hauchecorne, A., 2002, Mesospheric inversions and their relationship to planetary wave structure, *J. Geophys. Res.*, 107(D4), doi: 10.1029/2001JD000756.
- Salby, M.L., Callaghan, P., Keckhut, P., Godin, S. and Guirlet, M., 2002, Interannual changes of temperature and ozone: relationship between the lower and the upper stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 107(D18), 4342, doi: 10.1029/2001JD000421.
- Shepherd, M.G., Espy, P.J., She, C.Y., Hocking, W., Keckhut, P., Gavriilyeva, G., Shepherd, G.G. and Naujokat, B., 2002, Springtime transition in upper mesospheric temperature in the northern hemisphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1183-1199.
- Schulz, A., Rex, M., Harris, N.R.P., Braathen, G.O., Reimer, E., Alfier, R., Kilbane-Dawe, I., Eckermann, S., Allaart, M., Alpers, M., Bojkov, B.R., Cisneros, J., Claude, H., Cuevas, E., Davies, J., de Backer, H., Dier, H., Dorokhov, V., Fast, H., Godin, S., Johnson, B., Kois, B., Kondo, Y., Kosmidis, E., Kyro, E., Litynska, Z., Mikkelsen, I.S., Molyneux, M.J., Murphy, G., Nagai, T., Nakane, H., O'Connor, F., Parrondo, C., Schmidlin, F.J., Skrivankova, P., Varotsos, C., Vialle, C., Viatte, P., Yushkov, V., Zerefos, C. and Von der Gathen, P., 2001, Arctic ozone loss in threshold conditions: Match observations in 1997/98 and 1998/99, *J. Geophys. Res.*, 106, 7495-7503.
- Taupin, F.G., Beekmann, M., Bremaud, P.J. and Randriambelo, T., 2002, Ozone generation over the Indian Ocean during the South African biomass-burning period: case study of october 1992, *Ann. Geophys.*, 20, 547-557.
- Wu, D.L., Read, W.G., Shippony, Z., Leblanc, T., Duck, T.J., Orland, D.A., Sica, R.J., Argall, P.S., Oberheide, J., Hauchecorne, A., Keckhut, P., She, C.Y. and Krueger, D.A., 2003, Mesospheric temperature from UARS MLS: retrieval and validation, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 65, 245-267.
- Zagury, F. and Goutail, F., 2003, Spectral analysis of extinguished sunlight, *New Astronomy*, (in press).

### Publications RAMCES

- Biraud, S., P. Ciais, M. Ramonet, P. Simmonds, V. Kazan, P. Monfray, S. O'Doherty, T.G. Spain, and S.J. Jennings, 2002. Quantification of Carbon Dioxide, Methane, Nitrous Oxide, and Chloroform emissions over Ireland from atmospheric observations at Mace Head. *Tellus* 54(1), 41-60.
- Chevillard, A., P. Ciais, U. Karstens, M. Heimann, M. Schmidt, I. Levin, D. Jacob, R. Podzun, V. Kazan, and E. Weingartner, 2002. Transport of <sup>222</sup>Rn using the on-line regional scale model REMO: A detailed comparison with measurements over Europe. *Tellus*, 54B, 850-871.
- Chevillard, A., U. Karstens, P. Ciais, S. Lafont, and M. Heimann, 2002. Simulation of Atmospheric CO<sub>2</sub> Transport in Europe and Siberia, using the Regional Scale Model REMO. *Tellus*, 54B.
- Derwent R., Ryall D., Manning A., Simmonds P., O'Doherty S., Biraud S., Ciais P., Ramonet M. and Jennings S., 2002. Continuous observations of carbon dioxide at Mace Head, Ireland from 1995 to 1999 and its net European ecosystem exchange, *Atmospheric Environment*, 36, 2799-2807.
- Gurney, K.R., et al., 2002. Towards robust regional estimates of CO<sub>2</sub> sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature* 415, 626-630.
- Levin, I., P. Ciais, M. Gloor, R. Langenfelds, M. Ramonet, K. Sidorov, M. Schmidt, E.D. Schulze, O. Shibistova, N. Tschepakova, N.N. Vygodskaya, and J. Lloyd, 2002. Two years of trace gas observations over the EURO-Siberian domain derived from aircraft sampling a concerted action. *Tellus*, 54B, 696-712.
- Peylin, P., D. Baker, J. Sarmiento, P. Ciais and P. Bousquet, 2002. Influence of transport uncertainty on annual mean and seasonal inversions of atmospheric CO<sub>2</sub> data. *J. of Geophys. Res.*, 107, D19.
- Ramonet, M., P. Ciais, I. Nepomniachii, K. Sidorov, R. Neubert, D. Picard, V. Kazan, S. Biraud, O. Kolle, E.-D. Schulze, and J. Lloyd, 2002. Three years of aircraft CO<sub>2</sub> and isotope measurements over Fyodorovskoye in European Russia. *Tellus*, 54B, 713-734.
- Xueref, I., C. Gerbig, A. Fridlind, A. Ackerman, B. Daube, E. Weinstock, J. Smith, D. Sayres, J. Anderson, S. Wofsy, A. Andrews, M. Loewenstein, H. Jost, J. Podolske, J. Lopez, B. Ridley, A. Weinheimer, D. Knapp, D. Montzka and E. Richard, 2004. Coupling a receptor-oriented framework for tracer distributions with a cloud resolving model to study transport in deep convective clouds: application to the NASA CRYSTAL-FACE campaign. *Geophys. Res. Lett.*, 31.
- Ciais, P. and I. Xueref, 2004. Stratégie de mesure des gaz atmosphériques à longue durée de vie, Belin ed., Sous presse.
- Bergamaschi P., M. Krol, F. Dentener, A. Vermeulen, F. Meinhardt, R. Graul, M. Ramonet, W. Peters, and E.J. Dlugokencky, 2004. Inverse modelling of national and European CH<sub>4</sub> emissions using the atmospheric zoom model TM5. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Sous presse.

## Publications du SIRTA

- Chiriaco M., H. Chepfer, V. Noel, A. Delaval, P. Dubuisson, M. Haeffelin, P. Yang, 2004: 'Effective size retrieval using lidar and infrared radiometer observations', *Monthly Weather Review* vol. 132 issue 7, 1684 - 1700
- Chiriaco M., H. Chepfer, V. Noel, M. Haeffelin, A. Delaval, P. Drobinski : "Dual lidar observations at 10.6 $\mu$ m and 532nm for retrieving semi-transparent cirrus cloud properties". Soumis à *Journal of Applied Meteorology* en décembre 2003.
- Delanoe, J., A. Protat, D. Bouniol, and J. Testud (2004) : Statistical properties of normalized ice particle size distributions from in-situ microphysical measurements. Soumis à *J. of Atmospheric Science* en décembre 2003.
- Haeffelin, M., C. Boitel, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, A. Delaval, P. Drobinski, C. Goukenleuque, M. Grall, A. Hodzic, F. Hourdin, F. Lapouge, A. Mathieu, Y. Morille, C. Naud, V. Noël, J. Pelon, A. Protat, B. Romand, R. Vautard, 2004: "SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for clouds, aerosols and water vapor." Soumis à *Annales Geophysicae*, en révision.
- Hodzic A., Chepfer H., Vautard R., Chazette P., Beekmann M., Bessagnet B., Chatenet B., Drobinski P., Goloub P., Haeffelin M., Morille Y., 2004: Comparison of aerosol chemistry-transport model simulations with lidar and sun-photometer observations at a site near Paris. *Journal of Geophysical Research*, in press
- Naud, C., M. Haeffelin, P. Muller, Y. Morille, A. Delaval, (2004): "Assessment of MISR and MODIS cloud top heights through comparison with a back-scattering lidar at SIRTA". *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04114, doi:10.1029/2003GL018976.
- Noel V., H. Chepfer, G. Ledanois, A. Delaval, P.H. Flamant, 2002 ' Classification of effective shape ratios in cirrus clouds based on lidar depolarization ratio' *Appl. Opt.*, 41 (2), 4245-4257.
- Protat, A., D. Bouniol, J. Delanoe, V. Noel, H. Chepfer, M. Haeffelin: Retrieval of dynamic properties of clouds from 94 GHz Doppler cloud radar and depolarization lidar measurements. Soumis à *J. Atmos. and Oceanic Tech.* 2004.
- Tinel, J. Testud, J. Pelon, R. Hogan, J. Delanoe et D. Bouniol, 2004: The retrieval of ice cloud properties from cloud radar and lidar synergy. *Journal of Applied Meteorology*, en revision.

## **d) Publications liées aux projets scientifiques**

- Projet PAMPRE : cf liste pôle de planétologie

- Observation globale de la concentration de CO<sub>2</sub> dans la troposphère moyenne

- A. Chedin, S. Serrar, R. Armante, N.A. Scott, A. Hollingsworth, Signatures of annual and seasonal variations of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases from comparisons between NOAA/TOVS observations and model simulations. *J. Climate*, 15, 95-116 (2002)
- A. Chedin, A. Hollingsworth, N.A. Scott, S. Serrar, C. Crevoisier, R. Armante. Annual and seasonal variations of atmospheric CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CO concentrations retrieved from NOAA/TOVS satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 110-114 (2002)
- A. Chedin, R. Saunders, A. Hollingsworth, N.A. Scott, M. Matricardi, J. Etcheto, C. Clerbaux, R. Armante, C. Crevoisier. The feasibility of monitoring CO<sub>2</sub> from high resolution infrared sounders *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2001JD001443 (2003)
- A. Chedin, S. Serrar, N.A. Scott, C. Crevoisier, R. Armante. First global measurement of mid-tropospheric CO<sub>2</sub>. Chedin, A. Chedin, N.A. Scott. AIRS channels selection for CO<sub>2</sub> and other trace gases retrieval. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 2719-2740 (2003)
- C. Crevoisier, S. Heillette, A. Chedin, S. Serrar, R. Armante, N.A. Scott. First mid tropospheric CO<sub>2</sub> concentration retrieval from AIRS observations in the tropics. *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2004GL020141 (2004)
- A. Chedin, S. Serrar, N.A. Scott, C. Pierangelo, P. Ciaï, Impact of tropical biomass burning emissions on the diurnal cycle of upper tropospheric CO<sub>2</sub> retrieved from NOAA-10, *J. Geophys. Res.*, submitted (2004)

COMPERES : publications liées ou ayant utilisé la plate-forme COMPERES

- Chiriaco M., H. Chepfer, P. Minnis, M. Haeffelin, S. Platnick, V. Noel, S. Sun-Mack, G. Wind : **E** Evaluation of Calipso method against Ceres and Modis ones to retrieve ice cloud particle size over 2 areas: Sirta in France and Florida during Crystal-face, to be submitted to *J. Appl. Meteo.*, 2004.
- Coindreau O., F. Hourdin, A. Mathieu, M. Haeffelin, and co-authors, Impact of model physics in the LMDZ general circulation model: A new evaluation method., to be submitted to *Journal of Climate*, December 2004.
- Haeffelin, M., L. Barthès, O. Bock, C. Boitel, S. Bony, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, J. Cuesta, J. Delanoë, P. Drobinski, J-L. Dufresne, C. Flamant, M. Grall, A. Hodzic, F. Hourdin, F. Lapouge, Y. Lemaître, A. Mathieu, Y. Morille, C. Naud, V. Noël, B. O'Hirok, J. Pelon, C. Pietras, A. Protat, B. Romand, G. Scialom, R. Vautard, SIRTa, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research." *Annales Geophysicae, in press 2005*
- Hodzic A., Chepfer H., Chazette P., Beekmann M., Bessagnet B., Drobinski P., Goloub P., Haeffelin M., Morille Y., Vautard R., Comparison of aerosol chemistry-transport model simulations with lidar and sun-photometer observations at a site near Paris. *Journal of Geophysical Research, in press, 2004.*
- Hodzic, A., Vautard, R., Bessagnet, B., Lattuati, M., Moreto, F., 2004. Long-term urban aerosol simulation versus routine particulate matter observations. Submitted to *Atmos. Environ.* 2004.
- Mathieu A., J.-M. Piriou, M. Haeffelin, P. Drobinski, F. Vinit, F. Bouyssel, Identification of error sources in planetary boundary layer cloud forecast using SIRTa observations, *Geophysical Research Letters, submitted august 2004*
- Mathieu, A., F. Hourdin, A. Lahellec, M. Haeffelin, P. Drobinski, C.Rio, Convective cloudy boundary layer using a mass flux approach, ICCP Bologne 2004