

# **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**

**PROSPECTIVE**



<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>1</b>
<b>II - PROSPECTIVE 2006-2009.....</b>	<b>3</b>
<b>II.1 - Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>II.2 - Les axes stratégiques de l'IPSL .....</b>	<b>7</b>
II.2.1 - Sciences du climat.....	7
II.2.2 - Grands cycles à l'échelle planétaire.....	10
II.2.3 - Impacts des activités humaines sur l'environnement.....	11
II.2.4 - Planétologie et milieux ionisés.....	13
<b>II.3 - Pôle de Modélisation du Climat.....</b>	<b>17</b>
II.3.1 - Introduction.....	17
II.3.2 - Analyses de changements climatiques.....	18
II.3.3 - Nouveaux enjeux pour les interactions chimie-climat .....	22
II.3.4 - Nouveaux enjeux pour les interactions climat-cycles bio-géochimiques.....	25
II.3.5 - Enjeux et évolutions pour le système physique .....	27
II.3.6 - Evolution du modèle du système climatique de l'IPSL, des outils et de l'infrastructure.....	31
II.3.7 - Actions communes entre le Pôle, le CNRM et le CERFACS.....	36
II.3.8 - Organisation du Pôle et moyens humains.....	37
<b>II.4 - Pôle de Planétologie .....</b>	<b>40</b>
II.4.1 - Météorologie et climat des planètes telluriques.....	40
II.4.2 - Interaction plasma-planète faiblement magnétisée: Echappement atmosphérique évolution des atmosphères.....	42
II.4.3 - Magnétosphères et interactions plasma-planète.....	43
II.4.4 - Physico-chimie atmosphérique de Titan et exobiologie .....	45
II.4.5 - Matière primitive dans le système solaire, agglomération des grains proto-solaires aux noyaux.....	47
cométaires et diffusion lumineuse par des particules irrégulières.....	
II.4.6 - Environnements lointains et astrophysique.....	48
II-4.7 – Perspectives.....	49
<b>II.5 - Mise en place et prospective du Pôle "Cycle de l'Eau" .....</b>	<b>51</b>
II.5.1 - Objectifs du Pôle.....	52
II.5.2 - Stratégie.....	53
II.5.3 - Moyens.....	54
II.5.4 - Mise en place du Pôle .....	55
<b>II.6 - Mise en place et prospective du Pôle Spatial et Instrumental.....</b>	<b>58</b>
II.6.1 - Introduction.....	58
II.6.2 - Atouts et forces de l'IPSL dans le domaine spatial et instrumental .....	59
II.6.3 - Projets en cours et Perspectives.....	61
II.6.4 - Le rôle du pôle Spatial et Instrumental .....	74
II.6.5 - Demandes de l'Institut .....	80

<b>II.7 - Services d'Observation et Outils Nationaux .....</b>	<b>83</b>
II.7.1 - NDSC.....	85
II.7.2 - RAMCES.....	86
II.7.3 - CARAUS.....	88
II.7.4 - Site Instrumental et observatoire SIRUS :.....	90
II.7.5 - L'outil national OPA .....	92
<b>II.8 - Centre de Données.....</b>	<b>96</b>
II.8.1 - Base thématique ETHER.....	96
II.8.2 - Base thématique Nuages/rayonnement : Centre d'expertise ICARE-IPSL.....	97
II.8.3 - Activités générales.....	99
II.8.4 - Moyens techniques .....	101
<b>II.9 - Groupes de travail .....</b>	<b>102</b>
II.9.1 - Dynamique des Fluides Géophysiques.....	102
II.9.2 - Neuratel.....	103
II.9.3 - GAPI (assimilation de données et problèmes inverses).....	104
II.9.4 - CLIMSTAT.....	104
<b>II.10 - Projets structurants et collaborations .....</b>	<b>106</b>
<b>II.11 - Communication.....</b>	<b>110</b>
*****	
<b>III - DOCUMENTS ANNEXES.....</b>	<b>114</b>
<b>III.1 - Fonctionnement de l'IPSL.....</b>	<b>115</b>
<b>III.2 - Personnels.....</b>	<b>115</b>
<b>III.3 - Bilan financier.....</b>	<b>117</b>
<b>III.4 - Organigramme de l'IPSL.....</b>	<b>119</b>
<b>III.5 - Fiches de présentation des laboratoires.....</b>	<b>120</b>
<b>III.6 – Bilan de l'analyse thématique de l'IPSL (mars 2004).....</b>	<b>125</b>
III.6.1 - Objectifs, contexte et méthodologie de l'analyse.....	125
III.6.2 - Analyse globale .....	125
III.6.3 - Analyse par thématiques scientifiques.....	129
III.6.4 - Les outils, méthodes et approches.....	131
III.6.5 - Conclusions.....	132
<b>III.7- Glossaire des sigles, acronymes et abréviations .....</b>	<b>134</b>

## **II - Prospective 2006-2009**

## II.1 - Introduction

En préambule à cette prospective de l'IPSL pour les quatre années à venir, il est important de rappeler que l'activité de recherche au sein de l'Institut est essentiellement fondée sur les orientations scientifiques des cinq laboratoires qui composent la Fédération de Recherches (cf fiches en annexe). De son côté, la fédération met en place des structures conjointes permettant une rationalisation des moyens et une meilleure efficacité, en favorisant notamment les collaborations entre les équipes. Ces recherches fédératives sont organisées autour d'axes stratégiques définis en prenant en compte les domaines prioritaires au niveau national et dans lesquels la mise en commun de l'expertise et des moyens des laboratoires pourrait soutenir un saut quantitatif dans la dynamique de recherche. Pour atteindre cet objectif, l'IPSL s'est progressivement organisé autour de Pôles Fédératifs, d'un Service d'Observation et Outils Nationaux, d'un Centre de Données et de Groupes de Travail. La stratégie de développement de l'IPSL exposée dans ce document, s'appuie directement sur les prospectives conduites au sein de ces différentes structures fédératives dont nous rappelons, de façon succincte, les objectifs.

- **Le Pôle de Modélisation du Climat** s'est constitué en 1995 autour d'un projet multidisciplinaire de modélisation du système climatique, nécessitant de développer un ensemble de codes, cohérent et modulaire, traitant à la fois tous les milieux (océan, atmosphère, glace, surfaces continentales) et tous les processus (physiques, chimiques, biologiques). C'est un élément fédérateur de recherche et d'expertise sur le climat. Il a pour missions de fédérer 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 de Planétologie** a été fondé en 2000 sur la base de liens déjà établis entre trois des laboratoires de l'Institut, notamment dans le domaine de la modélisation des atmosphères planétaires. Il fédère actuellement un ensemble de programmes qui s'articulent autour de deux grands volets complémentaires: observation et description, modélisation et simulation numériques. Comprendre la formation, la dynamique et l'évolution à long terme des atmosphères neutres et ionisées de la Terre et des planètes ainsi que leur interaction avec le vent solaire, en constitue les objectifs essentiels.
- La proposition de création d'un nouveau **Pôle "Cycle de l'eau"** est née d'une réflexion collective conduite depuis 2002 (cf I.3). Ce Pôle aura pour objectifs de regrouper les efforts engagés sur ces thèmes, d'offrir un contexte large de discussion et d'échange favorable à la réalisation de ces travaux, et de permettre l'émergence de nouveaux axes de recherche en articulation avec le Pôle de Modélisation du Climat.

- **Le Pôle Spatial et Instrumental** est également en cours de mise en place. L'activité spatiale constitue, en effet, un des domaines majeurs de la coopération entre les laboratoires de l'IPSL au sein desquels de nombreuses équipes analysent et interprètent des données spatiales, et mettent en œuvre des opérations de recherche conjuguées ou intégrées à des projets spatiaux relevant de la physique des plasmas terrestres, de la planétologie et de l'observation de la terre. L'objectif est de fédérer ces différentes activités aussi bien sur les plans technique et instrumental que sur les aspects scientifiques.
- **Les missions d'observation** de l'IPSL s'appuient sur trois services d'observation labellisés, NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change), dédié à l'ozone stratosphérique et aux variables associées, RAMCES (Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre), et CARAUS (CARbone AUstral) qui concerne la mesure des échanges de gaz carbonique entre l'océan et l'atmosphère. S'y ajoutent les activités du Site de Télédétection Atmosphérique qui a permis de regrouper une instrumentation de pointe (lidars, radars, radiomètres) pour conduire des études coordonnées sur le cycle de l'eau, la dynamique atmosphérique, la pollution urbaine et le bilan radiatif ; dans ce cadre, l'observatoire SIRUS, dédié à l'étude du rôle des nuages et de leur impact radiatif sur le changement climatique, et dont la labellisation est en cours d'évaluation, est également sous la responsabilité de l'IPSL. Dans un registre différent, nous noterons la labellisation récente, au titre d'Outil national du service OPA dédié à la modélisation numérique de l'océan (dynamique et biogéochimie). Au sein de l'IPSL ces différentes missions de service (ensemble des Services d'Observation mentionnés et outil national OPA) sont désormais coordonnées au sein d'un comité des **Services d'Observation et Outils Nationaux (SOON)**.
- **Le Centre de Données** 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. Il a également pour objectifs de valoriser l'ensemble des données acquises à l'IPSL et leur analyse, auprès de la communauté nationale et internationale, et de jouer un rôle actif dans la mise en place et la gestion des centres thématiques tels ceux dédiés à la chimie atmosphérique (ETHER) et aux interactions nuages, eau, aérosols, rayonnement (ICARE).
- Les **Groupes de Travail** constituent un des moyens privilégiés d'animation et de réflexion au sein de l'IPSL. 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 portés ensuite soit par la structure fédérative, soit par les laboratoires eux-mêmes.

Avant de présenter, à partir de celles de ces différentes composantes, la prospective de l'IPSL, nous avons jugé important de rappeler les grands axes de recherche autour desquels se définit la stratégie de l'Institut (II.2). Nous présentons ensuite les prospectives des quatre pôles communs (II.3 à II.6) et poursuivons par celle du Service d'Observation et Outils Nationaux (II.7), du Centre de Données (II.8) et des Groupes de Travail (II.9). S'y ajoutent deux chapitres consacrés aux collaborations et projets internationaux structurants pour l'IPSL, projets européens en particulier (II.10), et à la communication (II.11).

L'implantation à Guyancourt programmée sur le site de la ferme de Trous, dans le périmètre du campus universitaire de l'UVSQ, devrait être effective au cours de l'année 2007. Cette opération qui impliquera la structure fédérative et deux laboratoires, le CETP et le SA, constitue l'enjeu majeur pour l'IPSL à cette échéance. En accord avec l'UVSQ, le CNRS, et le CNES, les dépenses nécessaires d'infrastructure et d'équipement font l'objet d'une demande spécifique, présentée dans le projet quadriennal 2006-2009 de l'UVSQ. Début 2005, ce dossier sera transmis à l'ensemble des tutelles concernées ainsi qu'à la région Ile de France également sollicitée. Le soutien de cette demande financière est une des clés du succès de l'implantation à Guyancourt, mais tout autant, sinon plus, ce succès se joue sur la mise en place d'une stratégie scientifique, ambitieuse, construite avec les équipes concernées et qui emporte leur adhésion. La réflexion actuellement conduite autour de la mise en place du futur Pôle spatial et Instrumental est un des éléments de cette stratégie. Elle fait l'objet d'un document séparé dont nous présentons en II.6 une version condensée.

Les aspects liés à l'enseignement et la valorisation, qui font l'objet d'un état des lieux dans la partie bilan ne sont pas repris dans cette prospective. Il en est de même pour les projets scientifiques qui sont des projets novateurs proposés pour une période limitée conjointement par des équipes rattachées à plusieurs laboratoires de l'IPSL (et éventuellement des participants extérieurs à l'Institut). Ces projets (cf I.8 pour le bilan de ceux qui se sont achevés en 2002, 2003 et 2004) font l'objet d'un appel d'offres interne préparé chaque année par le Conseil Scientifique de l'Institut. Il est donc difficile d'établir une liste de ceux qui émergeront sur la période 2006-2009. Cependant, nous pensons intéressant d'indiquer les projets en cours sur l'année 2005. Ils concernent, la mesure du CO<sub>2</sub> par méthodes optiques actives, le bilan hydrologique du bassin de la Donga, le transport de l'ozone et de ses précurseurs, l'influence du climat sur la stratosphère, l'utilisation de "l'Earth Simulator" pour les projets de recherche sur le climat, la détection des exoplanètes, une campagne d'intercomparaison de mesures de la vapeur d'eau atmosphérique, l'application de nanotechnologies à la mesure de flux turbulents à l'interface océan-atmosphère, l'amélioration des capacités instrumentales du SIRTA, la création d'un Groupe de Travail sur le climat en Méditerranée et le soutien de celui préparant la mise en place d'un Pôle dédié au cycle de l'eau.



## II.2 - Les axes stratégiques de l'IPSL

Une analyse thématique récemment conduite par le Conseil Scientifique de l'Institut (cf version résumée en annexe), met bien en valeur la complémentarité des recherches conduites dans les différents laboratoires de l'IPSL pour les trois compartiments principaux du système climatique, atmosphère, océan et surfaces continentales, mais aussi pour des disciplines telles que la planétologie et l'étude des milieux ionisés. Cette complémentarité est à la base d'une organisation des recherches menées au sein de l'Institut autour d'axes stratégiques, définis en prenant en compte les domaines prioritaires au niveau national dans lesquels la mise en commun de l'expertise et des moyens des laboratoires de l'IPSL pouvait conduire à un saut quantitatif dans la dynamique de recherche. Ils correspondent aux quatre domaines suivants :

- Sciences du climat
- Grands cycles à l'échelle planétaire
- Impacts des activités humaines sur l'environnement
- Planétologie et milieux ionisés

### II.2.1 - Sciences du climat

Il s'agit d'un des axes fondateurs de l'IPSL. Prises au sens large et dans une perspective globale, les Sciences du Climat concernent l'étude des mécanismes de l'évolution du climat et celles du cycle de l'eau et des substances qui interagissent fortement avec celui-ci (gaz carbonique et autres composés radiativement actifs). Ces deux derniers aspects (cycle de l'eau, cycles biogéochimiques) forment d'ailleurs les composantes du second axe stratégique de l'Institut.

Deux préoccupations fondamentales guident les recherches sur l'évolution du climat : l'effet de la pression anthropique qu'il subit, et les conditions de sa prévision. Ces recherches sont marquées par une forte complémentarité entre acquisition de données et modélisation. Les observations visent à une meilleure connaissance de la variabilité naturelle du climat et à une description de mieux en mieux documentée de son état ; elles comprennent des campagnes de terrain dédiées, la participation aux opérations spatiales, la mise en place de services d'observation. La modélisation, conduite au sein du Pôle de Modélisation du Climat, permet d'interpréter les observations en terme de mécanismes, d'y distinguer la part de la variabilité naturelle et des impacts de l'activité humaine, et de se projeter dans le futur. L'accent est mis sur les interactions entre l'atmosphère, l'océan, la glace de mer, la biosphère, dont les rôles ne peuvent être dissociés dans l'étude des fluctuations naturelles du climat. Les dimensions physique, chimique, biogéochimique du problème sont prises en compte.

Une vision à long terme des modifications qui ont affecté le climat dans le passé est, par ailleurs, essentielle pour évaluer l'impact climatique des activités humaines. Les mécanismes détectés dans les études de scénario sont interprétés à l'aide de l'histoire passée. L'analyse des derniers siècles documente l'évolution des conditions climatiques sous l'impact de l'industrialisation ; l'analyse des climats plus anciens aide à conforter les liens fonctionnels entre océan, atmosphère, biosphère et

biogéochimie. Enfin, l'exploration des climats passés permet d'expliciter la variabilité des conditions climatiques par rapport à un état moyen, de comprendre les variations brutales d'un équilibre climatique et d'en évaluer les risques. L'étude de la variabilité à long terme est centrée sur les derniers cycles climatiques archivés dans les sédiments marins et les glaces polaires ; les méthodes de datation, la caractérisation des variations climatiques rapides en constituent des éléments essentiels. L'importance d'une meilleure connaissance de la variabilité récente du climat (derniers siècles et millénaires) est également largement prise en compte.

La capacité à comprendre et prévoir l'évolution du climat tient aussi à une compréhension fine des mécanismes qui la contrôlent. A titre d'exemples, le rôle de la variabilité en zone Pacifique Tropicale sur les fluctuations climatiques à l'échelle du globe, celui des nuages sur l'amplitude des variations climatiques ou des conditions de surface continentales dans la longévité de certaines sécheresses, ne peuvent s'étudier de manière précise qu'au travers d'une observation qui combine campagnes à la mer, mesures in situ, mesures aéroportées et satellitaires. Ainsi les campagnes de terrain constituent une activité importante des laboratoires de l'IPSL. Les données satellitaires et l'effort d'archivage sont indispensables pour la description globale du système climatique et de son évolution. Enfin, l'observation systématique tient au sein de l'IPSL une place privilégiée, qui bénéficie du statut d'Observatoire. L'Institut contribue activement à des réseaux d'observation à vocation internationale pour la stratosphère (ozone et variables associées), l'atmosphère (gaz carbonique et autres gaz à effet de serre) et l'océan (gaz carbonique dans les couches de surface). Ces données, indispensables pour assurer la surveillance des conditions climatiques et la validation des modèles, permettent également d'éclairer quantitativement les débats sur l'effet de serre.

Comment peut-on anticiper les conditions climatiques dans un mois, un an, dix ans ou un siècle ? La vision actuelle est que, si la prévision de l'état instantané de l'écoulement atmosphérique ou océanique dépend de façon critique de l'état initial de l'écoulement, le climat, défini comme une moyenne temporelle, en dépend beaucoup moins : plus la période de temps sur laquelle on veut définir le climat est longue, moins les conditions initiales sont importantes. L'interaction entre les conditions initiales et les différentes échéances est néanmoins complexe. La connaissance de l'état de l'océan est inutile pour la prévision météorologique à échéance de quelques heures. Mais la connaissance de l'état actuel de la circulation profonde océanique l'est très probablement pour la prévision climatique à échéance séculaire ou multi-séculaire. La même remarque vaut pour la dynamique sous-jacente, dont la connaissance est indispensable à toute prévision. A mesure que l'échéance de prévision augmente, les processus physiques pertinents changent, et les modèles de prévision, ainsi que les outils d'analyse et de validation, doivent être adaptés en conséquence.

La prévision saisonnière, pour laquelle la couche de surface de l'océan joue un rôle critique, est maintenant devenue quasi-opérationnelle. La prévision pluri-annuelle, si elle est aujourd'hui moins développée, semble se poser en des termes scientifiques et techniques assez similaires. L'identification des sources d'incertitude, et particulièrement des instabilités internes au système, reste une question centrale. De ce point de vue, les techniques développées pour l'assimilation des observations ainsi que pour la prévisibilité météorologique à courte et moyenne échéances, semblent potentiellement très utiles. Il en est de même pour les techniques de prévision statistique de transitions de l'état de l'écoulement, construites, elles, sur des archives appropriées. Il reste en outre un travail

important de compréhension à effectuer sur les erreurs des modèles et les systèmes de mesure, ainsi que sur l'identification, et la description de plus en plus précise, des mécanismes physiques déterminant la prévisibilité du système (El Niño, Oscillation Nord-Atlantique, ...).

La prévision climatique à plus long terme, et particulièrement la prévision des conséquences de l'intensification de l'effet de serre, soulèvent des difficultés spécifiques. On ne peut aujourd'hui, pour déterminer le climat, éviter la simulation numérique explicite (et coûteuse) de tous les détails de l'écoulement atmosphérique et océanique. Le climat ne peut en outre être considéré comme résultant à ces échelles des seules interactions entre l'atmosphère et l'océan. D'autres processus sont à prendre en compte, comme les interactions avec la biosphère terrestre et marine, la chimie et les effets des aérosols, processus tous plus ou moins affectés par les activités humaines. Ajoutons que la seule méthode qui permette d'évaluer l'incertitude sur la prévision est la prévision d'ensemble, dans laquelle un ou plusieurs modèles sont intégrés sous des conditions initiales ou latérales différentes, la dispersion des prévisions individuelles fournissant une évaluation de l'incertitude de la prévision globale.

Dans ce contexte, le projet du Pôle de Modélisation du Climat consiste à mettre en place un projet d'étude du changement climatique s'appuyant sur le couplage des modèles individuels conçus dans les différents laboratoires. Dans une première étape, un modèle couplé océan/glace de mer/atmosphère a été intégré pour des simulations multiséculaires dans des conditions climatiques variées. Ce modèle est complété par des modules chimiques et biogéochimiques. Des simulations de plusieurs siècles couplant système climatique et cycle du carbone sont réalisées ; d'autres expériences explorent les interactions entre la circulation océanique et la productivité en biomasse marine, les conditions de développement des instabilités tropicales, le couplage entre le cycle de la végétation et les modifications du climat. Pour améliorer la fiabilité et accroître la capacité prédictive de ce modèle, l'effort de développement est constant. Des progrès rapides sont attendus du développement des techniques d'assimilation qui permettent d'utiliser les observations pour améliorer les paramétrisations, optimiser le choix de paramètres, contraindre les états initiaux des modèles couplés, et leurs trajectoires.

L'IPSL se dote ainsi d'un système expert, couvrant à la fois la maîtrise des observations et la modélisation du système global. L'objectif n'est pas de fournir une série limitée de scénarios mais de dégager des réponses utiles pour l'action, en développant un partenariat efficace entre les scientifiques et le monde socio-économique. Les études de nature fondamentale réalisées à l'IPSL visent à apporter des éléments de réponse importants au questionnement social sur les changements climatiques. Comment l'incertitude actuelle sur l'amplitude des changements climatiques affecte-t-elle les mécanismes de décision ? Cette incertitude va-t-elle se réduire, sous l'effet d'une meilleure représentation des processus critiques dans les modèles, ou du fait d'un début d'évolution déjà sensible ? Peut-on comparer l'action des différents gaz à effet de serre ? Peut-on évaluer la contribution des divers acteurs économiques ou diverses nations à l'évolution en cours ? L'outil numérique développé à l'IPSL a, par exemple, déjà permis d'initier une collaboration avec des économistes de l'environnement et il se prête, par ailleurs, à des usages plus appliqués.

## II.2.2 - Grands cycles à l'échelle planétaire

Ce volet comporte deux larges domaines, le cycle de l'eau et les cycles biogéochimiques qui, pour la plupart, interagissent fortement avec le climat. Les recherches, centrées sur des études souvent fondamentales de processus à différentes échelles, sont caractérisées par une complémentarité forte entre les acquisitions de données, in situ et satellitales, et diverses approches de modélisation. Dans ce champ nécessairement très pluridisciplinaire, l'IPSL apporte essentiellement ses compétences relatives à la dynamique des fluides géophysiques (atmosphère, océan), à la géochimie et à la modélisation, et s'insère dans des réseaux denses de collaborations avec des spécialistes d'autres domaines.

*a) Etudes liées au cycle de l'eau* : L'étude de ce cycle, de ses différentes composantes et de leurs interactions mutuelles, est au cœur des problématiques climatiques à travers ses nombreuses implications pour les échanges d'énergie et la dynamique atmosphérique. En outre, les fluctuations et les modifications qui l'affectent ont des répercussions pratiques majeures pour la société. Il en est ainsi des forts impacts sur l'hydrologie, la végétation, les ressources en eau, d'événements comme les sécheresses ou les précipitations exceptionnelles.

Les recherches conduites à l'IPSL concernent de nombreux aspects depuis l'évaporation à la surface, le transport de vapeur d'eau et sa transformation dans l'atmosphère conduisant à la formation de nuages en interaction avec les particules d'aérosols, jusqu'à son retour sous forme liquide dans les précipitations, et leur impact sur le milieu sous-jacent, continental ou océanique. Ces recherches reposent sur des approches complémentaires qui vont de l'observation à l'échelle locale jusqu'à l'échelle régionale et globale grâce aux missions spatiales. Elles impliquent également la modélisation des processus dynamiques et radiatifs à différentes échelles. L'amélioration des modèles de plus grande échelle est en effet un besoin critique en particulier pour la convection (initialisation, développement et alimentation, forçage radiatif), la formation des couches nuageuses stratifiées, les couches d'interface (couche limite atmosphérique et tropopause), et les processus de surface. Les modèles à méso-échelle peuvent notablement contribuer à cette amélioration.

Enfin, l'observation, en particulier satellitale, joue ici un rôle de plus en plus important s'appuyant sur un couplage entre observations d'expériences spatiales, données de satellites opérationnels et observations au sol. L'importance des bases de données et de systèmes de traitement et d'assimilation de ces données adaptés est ici primordiale. La mise sur pied récente d'un centre thématique dédié, eau, nuages, aérosols, rayonnement (ICARE) constitue un puissant atout pour l'avenir.

*b) Cycles biogéochimiques* : La plupart des composés présents dans l'atmosphère, en dehors de l'oxygène, de l'azote et des gaz rares, participent au forçage radiatif de la planète. C'est le cas des gaz à effet de serre, (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote, hydrocarbures non-méthaniques, composés halocarbonés et nombreux autres éléments trace d'origine essentiellement anthropique, ozone, ...). De nombreux aérosols (sulfatés, carbonés, poussières désertiques, ...) dont certains cumulent effet radiatif direct et indirect participent également à ce forçage. Beaucoup de ces composés

sont chimiquement réactifs dans l'atmosphère et jouent à ce titre un rôle central dans sa capacité oxydante et/ou dans la composition chimique de la stratosphère dont un élément clé est l'évolution de la couche d'ozone. Même s'il est chimiquement inerte, le gaz carbonique, principal gaz à effet de serre d'origine anthropique, a un cycle très complexe au niveau des émissions dans l'atmosphère et de son absorption par la biosphère et par l'océan.

C'est sur l'ensemble de ces cycles et de leurs interactions mutuelles que portent les recherches conduites à l'IPSL, et ce dans les trois compartiments principaux que sont l'atmosphère, la biosphère et l'océan, à travers une approche combinant systématiquement observation et modélisation. Ainsi ces différents cycles biogéochimiques sont au cœur des activités des services d'observation, RAMCES (gaz à effet de serre et composés radiativement actifs), OISO (cycle du carbone dans l'océan) et NDSC (ozone et chimie stratosphérique). Par ailleurs, l'effort de modélisation conduit au sein de l'Institut fait une large place aux interactions chimie-climat et cycle du carbone-climat. La compréhension des grands cycles est indispensable pour que soient appréhendés correctement les impacts des activités humaines (chimie troposphérique et pollution, chimie stratosphérique et trou d'ozone...). Elle l'est également en vue des négociations internationales, qu'elles soient liées au cycle du carbone (rôles et évolutions respectifs des puits biosphérique et océanique) ou à l'évolution de la couche d'ozone.

### **II.2.3 - Impacts des activités humaines sur l'environnement**

A côté de recherches à caractère fondamental, l'IPSL joue un rôle de plus en plus affirmé sur les problèmes liés aux impacts des activités humaines sur l'environnement. Trois axes principaux sont concernés :

- l'impact des changements climatiques dans divers domaines (agriculture, santé, ..) avec des aspects liés à la gestion des ressources pris en compte via des collaborations interdisciplinaire,
- l'évolution de la couche d'ozone,
- la pollution atmosphérique, pour laquelle l'expertise de l'IPSL en modélisation, transport et chimie atmosphériques, chimie et biogéochimie marines, ainsi qu'en méthodes d'observation, s'avère extrêmement fructueuse.

*a) L'impact des changements climatiques sur nos sociétés* : cette question émerge depuis quelques années dans la mesure où un changement global et significatif du climat, lié à l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, devient inéluctable. Les incertitudes associées au rythme de ce changement, à ses caractéristiques régionales, et à l'augmentation de la fréquence de phénomènes climatiques extrêmes, sont considérables. Cette complexité résulte de la différence entre les échelles mises en jeu, et du fait que le climat ne représente pas toujours le facteur dominant. Avant même de pouvoir estimer les impacts socio-économiques du changement global, il est donc nécessaire de définir des concepts permettant une approche correcte des liens entre climat et société, et d'évaluer les modèles utilisables à cette fin à l'aide des données disponibles sur les dernières décennies.

Les études d'impact, par essence à caractère régional, sont particulièrement appelées à se développer dans les pays a priori les plus vulnérables aux changements climatiques tels ceux de la zone tropicale. Ceux-ci sont particulièrement menacés à cause de la faiblesse des sociétés face au renforcement des épidémies, aux fluctuations des rendements agricoles, à l'accès aux ressources en eau, et, éventuellement, à l'élévation du niveau moyen des mers. Un exemple concerne la sensibilité de la croissance des cultures à la mise en place de la mousson en Afrique. L'Amérique du Sud sera l'objet de recherches dans ces mêmes domaines, climat-agriculture (activité céréalière) et climat-santé (développement de la dengue et de la fièvre jaune).

Dans l'océan, les perturbations induites par les activités humaines modifient des propriétés physiques tels que la température et l'éclairement et risquent donc d'avoir un impact potentiel sur les ressources marines. C'est le cas en particulier en mer Méditerranée, soumise en outre à de fortes perturbations locales, d'où l'intérêt des études visant à évaluer l'impact de l'augmentation des apports nutritifs sur la concentration en oxygène et sur l'écosystème méditerranéen.

Les études d'impact s'appuient sur la réalisation, par les équipes de l'IPSL, de simulations climatiques, suivant notamment les scénarios proposés par le GIEC, couvrant l'ensemble du XXI<sup>ème</sup> siècle.

*b) Evolution de la couche d'ozone* : Le contenu en composés halogénés dans la stratosphère est amené à baisser dans les prochaines années du fait de la réduction drastique des émissions de chloro-fluorocarbones, suite à l'entrée en vigueur du protocole de Montréal et de ses amendements. Les estimations montrent que le contenu en chlore a déjà atteint son maximum ; on peut s'attendre au cours des prochaines décennies à un rétablissement progressif de la couche d'ozone stratosphérique qui nous protège du rayonnement ultraviolet solaire. Cependant, les changements climatiques attendus dans la troposphère du fait de l'augmentation des gaz à effet de serre peuvent induire des modifications dans la stratosphère susceptibles de retarder ou bien d'accélérer le rétablissement de la couche d'ozone selon les processus mis en jeu. Ces processus sont complexes et font intervenir des interactions non-linéaires entre dynamique, chimie et rayonnement.

Il est donc particulièrement important de suivre l'évolution de la couche d'ozone, et d'en comprendre les mécanismes aussi bien en régions polaires (Antarctique et Arctique) que dans les moyennes et basses latitudes. La poursuite de cet objectif repose sur des études fondamentales visant à améliorer la connaissance encore incomplète de la chimie stratosphérique, sur la modélisation des interactions avec la dynamique et le rayonnement et sur un ensemble d'observations conduites dans le cadre du réseau NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change) et à l'aide d'instruments spatiaux.

*c) Pollution à échelle régionale et locale* : il s'agit d'un problème majeur d'environnement et de santé publique. De nombreux processus fondamentaux (dynamiques, thermodynamiques, chimiques, photochimiques, ...) interagissent, souvent de façon non linéaire ; les échelles de variabilité associées recouvrent plusieurs ordres de grandeur dans le temps et l'espace, ce qui présente un défi au niveau de l'observation et des protocoles instrumentaux, des études de processus et de la modélisation.

L'IPSL est largement impliqué dans cette thématique qu'il entend continuer à développer autour d'axes de recherche centrés, d'une part, sur l'étude de processus physiques et physico-chimiques dont la description et la compréhension sont aujourd'hui critiques, d'autre part sur de nouvelles avancées dans le domaine de la modélisation numérique.

Concernant la *pollution atmosphérique, urbaine*, plusieurs questions aujourd'hui mal résolues devraient être traitées dans les années à venir. Parmi celles-ci, l'IPSL s'attachera en priorité à l'étude de la thermodynamique de la couche limite urbaine, des émissions et de l'effet radiatif des aérosols, et de l'effet radiatif des nuages. L'étude de la pollution régionale dépasse largement l'échelle spatiale urbaine et il est important de s'intéresser à ces échelles de variabilité plus larges, qui permettent de jeter un pont entre recherches dédiées à la pollution et au climat. Dans le domaine de la modélisation, il s'agit d'améliorer ou de développer un certain nombre de paramétrisations dans les modèles de chimie-transport, notamment celle de l'effet radiatif des aérosols et des nuages, celle des échanges turbulents sur une canopée urbaine ou encore celle des processus sous-maille, notamment concernant la ségrégation des espèces chimiques.

Les compétences développées à l'IPSL en assimilation des données permettent par ailleurs d'envisager l'utilisation de ces techniques pour la modélisation inverse des sources de pollution. Ce sujet est crucial, car les données in situ ne fournissent aujourd'hui que des inventaires très incomplets des sources d'émissions polluantes. En outre, l'IPSL s'est doté d'un système de modélisation intégré du transport et de la chimie des principaux polluants allant de l'échelle d'une agglomération urbaine à l'échelle globale. Cet effort vers une modélisation emboîtée performante permet d'améliorer les capacités de prédiction à échelle locale et régionale ainsi que la compréhension du couplage entre changements climatiques et pollution à l'échelle régionale.

Un second volet traite des apports, du transport et de l'accumulation des *polluants dans l'océan*. Il concerne, en particulier, les polluants organiques anthropiques semi-volatils qui se partitionnent entre les phases atmosphériques (aérosols et gaz) et océaniques. Une fois qu'ils sont dissous dans l'eau de mer, leurs propriétés physico-chimiques tendent à favoriser leur adsorption et leur absorption sur les particules organiques de la couche éclairée ; ils sont donc susceptibles d'être exportés vers les couches profondes par la sédimentation des particules. En conséquence, pour déterminer les compartiments océaniques dans lesquels ils vont s'accumuler (incluant les organismes vivants) il faut à fois comprendre l'échange air-mer et la dynamique au sein de l'océan, qui est très liée au flux vertical de carbone organique. Une approche multi-compartiments est donc requise pour établir la sensibilité d'un écosystème vis-à-vis des apports en polluants atmosphériques ou par les rivières.

#### **II.2.4 - Planétologie et milieux ionisés**

Les recherches sur les atmosphères planétaires et les plasmas du système solaire visent à comprendre la formation, la dynamique et l'évolution à long terme des atmosphères neutres et ionisées des planètes, en référence à la Terre, ainsi que leur interaction avec le vent solaire. Elles traitent de processus physiques et chimiques fondamentaux qui jouent un rôle important dans le cas de notre planète mais ont aussi une portée plus générale au sein du Système Solaire. Grâce à son accessibilité

aux observations effectuées tant à partir du sol que par les moyens spatiaux, l'environnement terrestre permet en effet d'étudier de façon détaillée des processus que l'on retrouve, dans des conditions ou à des échelles diverses, dans les environnements d'autres corps du système solaire, voire dans certains objets astrophysiques. La planétologie comparée est ainsi la démarche sur laquelle se fonde l'exploration des systèmes lointains. L'étude et la compréhension des atmosphères et des environnements ionisés des corps du système solaire, qui constituent de véritables laboratoires naturels d'étude des processus à l'œuvre sur la Terre, avec leurs conditions aux limites spécifiques, et ceci à partir d'outils de modélisation complexes adaptés des outils d'étude de la Terre, sont devenues une composante à part entière de l'étude de notre propre environnement.

Les programmes de l'Institut s'articulent selon deux volets complémentaires : d'une part, l'observation et la description quantitative des milieux explorés au moyen d'instruments performants, le plus souvent embarqués sur des missions spatiales ; d'autre part un effort important de modélisation et de simulation numériques qui, seul, permet l'interprétation des données et la compréhension globale des systèmes étudiés. Un troisième volet, qui sera amené à prendre de l'importance dans l'avenir, consiste en l'utilisation de simulateurs expérimentaux, lorsque la modélisation numérique s'avère trop compliquée, ou insuffisamment contrainte. Ces programmes, qui couvrent l'ensemble de la chaîne (conception et réalisation d'instruments au sol ou embarqués sur des sondes spatiales ; inversion, traitement et analyse de données- interprétation scientifique des données via la comparaison à des modèles numériques ou expérimentaux ; archivages des données et des sorties de modèle) nécessitent la mise en œuvre, dans une approche fortement coordonnée, de moyens et de compétences variées, tant au plan technique que scientifique. D'un point de vue thématique, ces programmes s'organisent autour de deux axes :

- *La physicochimie et le climat des atmosphères denses des planètes de type terrestre (Mars, Vénus, Titan), via le couplage de modèles de circulation générale, de microphysique des nuages et des aérosols, de chimie atmosphérique. Cet axe inclut les aspects liés à l'interaction sol-atmosphère, en terme notamment de cycles des condensables (eau sur Mars, méthane sur Titan, ...) et des gaz à effet de serre, y compris aux échelles paléoclimatiques, d'altération chimique du matériau de surface par l'atmosphère (formation de carbonates, sulfates etc...), d'apports atmosphériques par dégazage (et/ou bombardement météoritique). Il est par nature interdisciplinaire (environnement/ sciences de la Terre).*

Un fil conducteur essentiel de ces développements est l'exploration de Mars, dont on espère l'avenir au diapason de l'immense succès scientifique et médiatique de la mission Mars-Express. Si le programme AURORA de l'ESA est décidé, et donne lieu à l'envoi de charges utiles instrumentales de mesure in-situ au sol de Mars, les aspects couplage sol-atmosphère seront amenés à prendre de l'essor au Pôle de Planétologie. L'étude du contenu en glace et éventuellement en eau liquide du sous-sol par sondage radar, la mesure de la composition chimique et isotopique du matériau de surface et de l'atmosphère, et dans ce dernier cas de sa variation saisonnière, la mesure des paramètres météorologiques et des flux de vapeur d'eau



échangés entre le régolithe et l'atmosphère, sont autant d'éléments conduisant à la caractérisation fine du système couplé surface-atmosphère martien.

- *Les interactions plasmas-planètes au sens large*, qu'il s'agisse d'interaction avec une surface solide (par exemple Mercure) ou avec une atmosphère (Mars, Vénus, Titan). Les mécanismes d'érosion atmosphérique de planètes non magnétisées comme Mars sont susceptibles d'avoir contribué à la désertification de la planète par « évaporation » vers l'espace des gaz à effet de serre et d'une partie de l'eau. Des surfaces solides en contact direct avec le rayonnement et le flux particulaire du soleil, comme celles de Mercure, offrent l'opportunité de comprendre la physique de l'interaction entre les émissions solaires et un corps faiblement magnétisé, donnant lieu à une physique complexe où atomes neutres, ions et électrons planétaires et solaires, champs magnétiques planétaire et solaire, interagissent de façon complexe. L'axe Interaction plasmas-planètes est également très interdisciplinaire (environnement/ milieux ionisés). Ces études, dans leur dimension la plus générale, passent par la caractérisation de l'interaction du vent solaire avec les divers objets du Système Solaire, et les conséquences sur leur environnement lointain. Pour les planètes magnétisées, Terre, Jupiter et Saturne, le champ magnétique planétaire joue un rôle primordial puisqu'il représente l'obstacle autour duquel s'écoule le vent solaire. Dans le cas de Vénus et Mars, qui sont dépourvues d'un champ magnétique interne, le vent solaire interagit directement avec la haute atmosphère et l'ionosphère de la planète et son couplage avec la haute atmosphère est, de ce fait, beaucoup plus direct. Le cas de Titan est plus complexe puisque, le long de son orbite, il interagit successivement avec le vent solaire et le plasma de la magnétosphère de Saturne.

Ces deux axes fédérateurs peuvent être déclinés suivant deux thématiques transversales :

- *Vie et conditions d'habitabilité dans le Système Solaire et au delà*, domaine recouvrant la science appelée exobiologie (ou astrobiologie). Ainsi, l'étude physicochimique de l'atmosphère de Titan, et notamment de la composition chimique des aérosols photochimiques d'azote et d'hydrocarbures qui s'y forment, est d'un grand intérêt exobiologique car elle peut apporter des indications sur les processus de synthèse des molécules prébiotiques dans l'atmosphère primitive de la Terre. De la même façon, l'étude de la composition moléculaire et isotopique de l'atmosphère de Mars (où le méthane vient d'être détecté par Mars-Express), et du matériau constituant sa surface (par exemple les carbonates et autres sels), peut apporter des indices sur une vie passée ou présente. La recherche de planètes extrasolaires de la taille de la Terre, et d'éventuelles signatures spectroscopiques de leurs atmosphères (et de la vie), est un autre exemple d'étude intéressante sur le plan géophysique et astrophysique, mais également en exobiologie.

- *Origine et évolution du système solaire.* Les noyaux et atmosphères cométaires, par exemple, témoignent des conditions de formation du Système Solaire. La constitution et la structure du noyau, la composition chimique et isotopique des gaz cométaires et la formation puis l'évolution de la coma lorsque la comète se rapproche du Soleil constituent des objectifs essentiels. Les processus d'agglomération des grains en constituent une sous-thématique importante. La surface d'une planète comme Mars, qui a peu évolué depuis trois milliards d'années, ou celle de Mercure, renferment aussi des « archives » de nature physique, chimique et stratigraphique, susceptibles de nous livrer des informations sur leur formation et leur évolution (différenciation, bombardement météoritique, dégazage). L'étude et la compréhension fine des processus à l'interface atmosphère-vent solaire (cas de Mars, Vénus, Titan), et l'estimation de l'impact de ces processus à l'échelle géologique sur la masse et la composition atmosphérique, qui laissent des traces mesurables dans les atmosphères (composition isotopique des gaz rares et isotopes stables) s'inscrit également dans cette perspective.

Ces deux thématiques transversales, qui charpentent la réflexion en cours à l'ESA pour la définition de la composante Exploration du Système Solaire du programme Cosmic Vision, doivent être augmentées d'une troisième, également identifiée dans Cosmic Vision, à savoir :

- *Relations soleil-planètes et plasmas du système solaire.* Les études des milieux ionisés au Pôle de Planétologie se regroupent autour de 3 sujets principaux : la physique des interfaces (en particulier turbulence et phénomènes de transport à travers les régions frontières), la dynamique globale des plasmas des environnements planétaires, notamment leur échappement, et, enfin, pour les planètes magnétisées, l'accélération des particules aurorales et la génération des émissions radioélectriques. L'exploration de l'héliosphère, zone d'expansion du vent solaire au sein du plasma interstellaire, constitue une approche indispensable à la compréhension du fonctionnement de notre étoile, le Soleil, et de l'échappement des régions externes de son atmosphère dans l'espace. Elle fournit en outre des informations originales sur les propriétés du milieu interstellaire local et sur les mécanismes qui régissent son interaction avec le vent solaire. Dans l'avenir, cette thématique bénéficiera aussi de l'intérêt international pour l'exploration de la haute couronne du Soleil et des régions sources du vent solaire afin d'en comprendre les mécanismes de formation.

## II.3 - Pôle de Modélisation du Climat

### II.3.1 - Introduction

Plus que jamais, il est nécessaire de comprendre les mécanismes essentiels qui gouverneront l'évolution du climat et notamment le lien entre les émissions anthropiques, la dynamique des surfaces continentales, l'utilisation des sols et le changement de climat. Seule une approche multidisciplinaire et intégrée du Système Terre peut permettre de relever ce défi. Cette approche doit faire intervenir à la fois les interactions entre l'océan, l'atmosphère, la biosphère et la cryosphère sous l'ensemble de leurs aspects physiques, chimiques et biologiques.

Notre objectif est de réduire l'incertitude des projections climatiques futures grâce à une meilleure compréhension des interactions mises en jeu et de la façon dont elles affectent l'état moyen du climat et sa variabilité. Ainsi la trame du projet fédérateur du Pôle concerne le changement climatique. Elle s'appuie sur l'ensemble des activités de modélisation, sachant qu'une bonne analyse des changements climatiques futurs repose en amont sur une connaissance approfondie du système climatique actuel et sur l'amélioration de la compréhension des processus de petites échelles. Notre démarche doit aussi associer simulations à l'échelle globale et simulations aux échelles régionales. Ces études nécessitent la poursuite du développement des composantes du système Terre de l'IPSL, par l'intégration successive de nouveaux couplages avec les cycles biogéochimiques. Elles requièrent aussi une amélioration continue des processus physiques représentés dans les modèles en fonction des questions scientifiques majeures et de la mise en oeuvre d'un ensemble d'études permettant de lever les "verrous scientifiques" et de comprendre la réponse du système climatique à différentes échelles de temps. Dans ce contexte, les objectifs du Pôle de Modélisation du Climat pour les années à venir sont :

- de mener à bien un projet fédérateur d'étude du changement climatique, au travers des projets nationaux (PNEDC et ACI CLIMAT) et internationaux (projet européen ENSEMBLES, regroupant les grands centres de modélisation qui réalisent des scénarios de changement climatique) en forte interaction avec les autres équipes françaises travaillant sur le sujet,
- de renforcer son rôle fédérateur en produisant des simulations qui serviront de référence aux études individuelles menées dans les laboratoires,
- de continuer l'effort technique de veille technologique et de développements propres permettant de pérenniser les outils de modélisation et à anticiper les évolutions nécessaires,
- de renforcer le rôle d'animateur scientifique en organisant régulièrement des journées de travail et de formation.

Comme par le passé, le travail se fera en forte interaction avec de nombreux partenaires à l'échelle nationale et internationale. De plus en plus de groupes sont intéressés à utiliser nos modèles ou à analyser certaines simulations. Il devient donc aussi important d'harmoniser et favoriser ces échanges. De même, les moyens nécessaires à la réalisation de certaines simulations demandent de renforcer la coordination des besoins, comme nous l'avons fait pour la prospective calcul. Les enjeux actuels dépassent les possibilités des chercheurs individuels (études multidisciplinaires, complexité

des systèmes, interactions multiples). Il est donc important que, dans les prochaines années l'IPSL, via son Pôle de Modélisation du Climat, soit pleinement reconnu comme un interlocuteur privilégié dans ce domaine, tant au niveau national, qu'international.

### **II.3.2 - Analyses de changements climatiques**

L'ensemble de simulations cohérentes réalisées pour le GIEC, qui couvrent les périodes du 20<sup>ème</sup> et du 21<sup>ème</sup> siècles, permettent de mieux caractériser le changement climatique. Nos principaux objectifs pour les années à venir sont les suivants:

- caractériser le changement climatique (état moyen, variabilité, évènements extrêmes),
- quantifier les incertitudes liées à la représentation des processus physiques,
- quantifier les incertitudes liées au couplage avec les grands cycles biogéochimiques,
- évaluer les prévisions des changements climatiques futurs à partir des changements climatiques observés sur différentes échelles de temps,
- comprendre et attribuer les variations climatiques à l'échelle du dernier siècle et du dernier millénaire,
- mettre les résultats de ces simulations à la disposition de la communauté scientifique.

Un premier volet de la prospective consiste donc à fédérer les différentes analyses des simulations existantes et à réaliser des simulations complémentaires pour comprendre les mécanismes mis en jeu. Nous espérons ainsi bénéficier des projets de chacun pour améliorer notre connaissance du système climatique et, lorsque les résultats obtenus le permettent, suggérer des améliorations pour les prochaines versions du modèle (ajustements, insertion de nouveaux processus). Cet effort s'inscrit dans la poursuite du travail engagé au cours deux dernières années. Il s'appuie sur les analyses qui seront réalisées pour le projet ENSEMBLES, sur le projet d'analyse des scénarios réalisés par l'IPSL et Météo-France (ESCRIME) au niveau national, et sur les résultats de l'atelier tropical, qui s'est mis en place en 2004.

*II.3.2.1- Analyses des changements du climat moyen* : Une première étape des analyses consistera à caractériser le changement de climat dans les différents scénarios du GIEC, de façon à identifier les régions les plus sensibles et les phénomènes répondant le plus fortement à l'augmentation des gaz à effet de serre. Des études plus poussées seront réalisées pour étudier la sensibilité climatique globale et quantifier les contributions des différentes rétroactions à l'amplitude de cette sensibilité. Parmi les principales rétroactions considérées (nuage-vapeur d'eau, glace de mer, neige, transport et stockage de chaleur océanique), une attention particulière sera portée aux rétroactions vapeur d'eau / nuages. Une méthodologie, dont les premiers résultats montrent qu'elle permet d'évaluer la réponse des modèles dans les régions de subsidence dans les tropiques, sera développée pour évaluer le réalisme des processus et rétroactions mis en jeu, à partir de comparaisons modèles-données sur la période actuelle.

Les modifications des différents flux d'eau douce (précipitation moins évaporation, glace de mer, ruissellement continental) et la façon dont elles affectent les zones de plongées d'eau profonde en

Atlantique nord et la circulation thermohaline de l'océan constituent également une trame permettant de mieux comprendre le rôle de l'océan dans le changement climatique. Ces analyses seront complétées par des analyses du flux d'eau douce des calottes polaires, en lien avec le LGGE. De même, le climat des hautes latitudes et le rôle de la glace de mer seront analysés en collaboration avec l'UCL afin d'évaluer l'aptitude du modèle de l'IPSL (et ceux de l'IPCC) à reproduire les concentrations et étendues de glace de mer sur le 20<sup>ème</sup> siècle et de préciser le rôle de la glace de mer dans l'amplification du réchauffement climatique dans ces régions. Il est prévu en particulier d'estimer l'apport d'eau douce dans l'océan associé à la fonte des glaces durant le 21<sup>ème</sup> siècle. Ces changements de flux d'eau douce seront comparés aux changements d'autres composantes (précipitations, advection) dans les hautes latitudes, afin de dégager leur impact sur la salinité de surface.

*II.3.2.2 - Analyse des changements de variabilités climatiques* : Les études qui seront menées pour comprendre la variabilité naturelle du climat et la façon dont cette variabilité est affectée par le changement climatique ont comme double but de déterminer la contribution de la variabilité naturelle dans les changements climatiques récents et d'estimer et comprendre les changements futurs de variabilité. Pour cela nous considérerons principalement les simulations stabilisées sur des périodes assez longues (quelques centaines d'années) pour mener à bien des études statistiques significatives à partir de différents états moyens (préindustriel, actuel, 2xCO<sub>2</sub>...) . Ces simulations seront analysées grâce à la variété des compétences de l'IPSL.

**a) Régions tropicales**: La rapide propagation de toute anomalie locale de la troposphère dans le reste de la ceinture tropicale crée une inter-dépendance (des téléconnexions) très forte entre les différentes régions tropicales. Une partie de notre travail consistera donc à étudier la ceinture tropicale comme un tout. Nous étudierons également certains modes de variabilité de façon plus approfondie. Les principaux phénomènes considérés concernent :

- *ENSO*: C'est le mode de variabilité naturel le plus important au niveau global. On pense maintenant que sa typologie (extension spatiale, phasage saisonnier, durée...) peut être très différente d'un événement à l'autre, et la version actuelle du modèle couplé semble reproduire cette variété.
- *Moussons*: Les moussons indiennes et africaines sont des variations saisonnières dont les changements prédits par les modèles varient fortement d'un modèle à l'autre. Nous voulons comprendre les mécanismes qui contrôlent le déclenchement des moussons, leur extension et leur phasage. De plus, la communauté française est fortement impliquée dans AMMA dont l'objectif est d'étudier, sous des facettes très variées, la mousson africaine dans le climat actuel. Une première prolongation de ce travail sera une meilleure simulation et une meilleure compréhension des variations observées de la mousson africaine. Ce travail s'appuiera aussi sur les simulations de changement climatiques et sur celles du climat d'il y a 6000 ans pour lequel il est possible de confronter les résultats aux données disponibles.
- *Oscillations intra-saisonnières*: plusieurs systèmes d'oscillations de quelques jours à quelques dizaines de jours sont observés dans la ceinture tropicale, sur le continent (onde à 6 jours en Afrique équatoriale) ou sur les océans (notamment les ondes de 30-40 jours). Ces systèmes

d'onde semblent dépendre (voire être le résultat) de l'interaction des différents milieux (surface ou océan, et atmosphère). Ils seront étudiés dans le modèle de l'IPSL, dans les observations et à l'aide de modèles théoriques. Nous étudierons également leurs interactions avec les moussons et a avec l'ENSO.

**b) Moyennes latitudes** : Dans les moyennes latitudes, les principales études prévues concernent l'analyse des événements extrêmes. Dans un premier temps, l'étude des extrêmes sur l'Europe pour les 100 dernières années sera réalisée à partir de l'analyse des pressions de surface sur l'Atlantique nord et sur l'Europe au pas de temps journalier. Ces observations météorologiques seront peut-être complétées par des archives d'assurances chiffrant les dégâts matériels recensés. Ensuite, les variations de ces événements extrêmes avec le changement climatique seront considérées. Pour comprendre les mécanismes mis en jeu, on se basera à la fois sur le modèle de l'IPSL et sur des modèles théoriques. En effet, d'un côté la réduction de gradient méridien de température se traduit par un courant jet moins instable barocliniquement, et de l'autre, l'humidité modifie la dynamique des dépressions à travers le dégagement de chaleur latente qui creuse les dépressions. Il est donc intéressant de déterminer les mécanismes dominants dans les simulations et d'évaluer si le modèle les représente correctement pour la période actuelle.

*II.3.2.3 - Rôle de variations d'ensoleillement et du volcanisme au cours du 20<sup>ème</sup> siècle et des mille dernières années* : Les variations du climat observées pendant la période instrumentale (140 dernières années) résultent d'une imbrication entre la variabilité interne du système et sa réponse à différents types de perturbations qu'elles soient naturelles (éruptions volcaniques, variations de l'intensité solaire...) ou anthropiques (gaz à effet de serre, aérosols, utilisation des sols...). Simuler de façon réaliste le climat du 20<sup>ème</sup> siècle, pour lequel les perturbations anthropiques deviennent progressivement dominantes, et du dernier millénaire, pour lequel les perturbations sont avant tout naturelles, permettra de comprendre comment le système répond aux différents types de forçages. Ces simulations, par ailleurs nécessaires pour évaluer la façon dont les modèles reproduisent le climat des périodes récentes, viennent en complément des simulations réalisées pour le GIEC. Elles requièrent la réalisation d'ensembles de simulations afin de dégager l'impact des forçages par rapport à la variabilité interne. De légères modifications du modèle actuel sont nécessaires pour les réaliser, puis comparer les résultats aux scénarios de référence en cours. Les étapes à franchir seront les suivantes :

- introduction des aérosols volcaniques dans le modèle atmosphérique (d'abord en prescrivant les concentrations puis en transportant directement les aérosols émis),
- estimation des forçages naturels. Pour le 20<sup>ème</sup> siècle, nous commencerons par utiliser des forçages recommandés par le projet européen ENSEMBLES. Il faudra également développer une compétence dans l'analyse critique de ces forçages, voire les modifier ou les compléter. De la même façon, les forçages utilisés pour réaliser des simulations de variations climatiques observées dans les périodes récentes (petit âge glaciaire, optimum médiéval...) s'inspireront des simulations déjà réalisées par d'autres groupes.

- modélisation des effets des variations d'intensité du soleil. Seul l'aspect énergétique direct sera considéré dans un premier temps. Nous aborderons ensuite le couplage avec la chimie pour prendre en compte l'effet d'une variation du rayonnement UV sur la composition de la stratosphère, et donc sur ses propriétés radiatives.

*II.3.2.4 - Simulations idéalisées pour étudier la sensibilité climatique* : Les différences entre les résultats des modèles de climat peuvent être reliées à leur sensibilité (changement de température simulé pour un doublement de CO<sub>2</sub>). Plusieurs facteurs affectent cette "sensibilité climatique" aux échelles globale et régionale. Dans les 4 prochaines années nous réaliserons plusieurs tests afin de mieux comprendre le rôle de la vapeur d'eau et des nuages sur ce paramètre.

**a) Sensibilité du climat global** : Un de nos objectifs est d'étudier la sensibilité climatique globale et de confronter la sensibilité du modèle aux observations disponibles. Pour cela nous avons déjà tiré parti de développements récents pour avoir deux versions du modèle climatique ne se différenciant que par la représentation de la convection et des nuages hauts : la version de référence avec un schéma d'Emanuel pour la convection, et une autre avec un schéma de Tiedke et une représentation légèrement différente des nuages hauts. Ce premier jeu de simulations permettra d'analyser des réponses à priori assez différentes de deux versions de modèles. L'analyse des différents types de nuages sera réalisée suivant la méthode proposée dans le projet de comparaison CFMIP qui bénéficie du simulateur ISCCP permettant de représenter les nuages tels qu'ils sont mesurés par les satellites.

**b) Sensibilité du climat à l'échelle régionale**: En Afrique de l'ouest et dans le cadre du projet AMMA, nous réaliserons quelques études de sensibilité idéalisées pour étudier l'influence de la topographie sur la mousson, la rétroaction de la vapeur d'eau (en modifiant le profil de température vu par la convection), et le rôle des hétérogénéités de surface sur la persistance locale de la convection (les systèmes convectifs ont tendance à se former au même endroit pendant des périodes assez longues). Ces analyses auront aussi comme objectif d'identifier les raisons des défaillances de la version actuelle du modèle dans cette région.

*II.3.2.5 - Les simulations des paléoclimats* : Les simulations des climats passés permettent de placer la période actuelle et le changement climatique en cours dans un contexte plus large. Réalisées principalement au LSCE, elles offrent à toute la communauté un ensemble de données permettant de mieux comprendre la sensibilité climatique et les facteurs qui la gouvernent. Le rôle des différentes rétroactions entre l'océan, l'atmosphère, la glace de mer et les surfaces continentales, y est examiné avec une attention particulière. Les paléoclimats offrent aussi une possibilité d'évaluation des modèles grâce aux données disponibles. Ces études de changements climatiques s'appuyant sur des climats différents, seront renforcées.

Au delà du démarrage des simulations des derniers 1000 ans, les principales périodes qui seront étudiées sont celles recommandées par le projet international PMIP "Paléoclimat Modeling Intercomparison Project". Elles concernent principalement l'Holocène et plus particulièrement l'Holocène moyen, il y a 6000 ans, et le début de cette période, il y a 10000 ans, époques marquées

par un cycle saisonnier plus important de l'ensoleillement dans l'hémisphère nord (ce qui renforce le phénomène de mousson). Le refroidissement du Dernier Maximum Glaciaire, il y a 21000 ans, est particulièrement bien adaptée à l'étude de la sensibilité climatique et de la réponse du climat à la présence de larges calottes de glace dans l'hémisphère nord. Enfin l'entrée en glaciation nécessite de comprendre les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, et la mise en place de calottes de glace. Les climats plus anciens comme le Crétacé posent de nombreuses questions sur le fonctionnement du système climatique. Au Crétacé par exemple, les gradients de température entre l'équateur et les pôles étaient plus faibles tandis que les températures de l'océan profond étaient de l'ordre de 6 à 8 °C.

Les principales thématiques développées autour de ces simulations concernent les liens entre le changement de mousson, le cycle saisonnier moyen et les changements de variabilité interannuelle, l'analyse des changements de circulation océanique et les rôles respectifs de l'océan et de l'atmosphère dans les redistributions d'énergie entre l'équateur et les pôles, l'estimation et l'évaluation de la sensibilité climatique en climat glaciaire au regard des données disponibles, ainsi que les rôles respectifs des changements de circulation océanique et de couvert végétal sur le changement d'état moyen et de variabilité.

### **II.3.3 - Nouveaux enjeux pour les interactions chimie-climat**

Au cours des 5 dernières années, le modèle de chimie-aérosols INCA couplé au modèle de circulation générale LMDZ s'est progressivement avéré être un outil d'étude des interactions chimie-aérosols-climat permettant de fédérer les efforts de plusieurs laboratoires au sein de l'IPSL. La phase de développement intensive s'achèvera en 2005 avec la mise en ligne des versions de référence pour la chimie troposphérique et les aérosols, la réalisation et la documentation de simulations de référence et la migration vers LMDZ4 et IPSLCM4. Le passage sous MODIPSL et la refonte du site web permettant un accès rapide au modèle et à ses résultats, seront réalisés dans la foulée. Les efforts se sont essentiellement concentrés jusqu'à présent sur l'étude de la capacité oxydante de la troposphère et sur celle des aérosols troposphériques et de leur impact sur le climat à partir de simulations avec le modèle LMDZ-INCA. Ces efforts seront poursuivis et même renforcés en ce qui concerne les simulations couplées chimie-climat-aérosols.

De nombreuses avancées ont été réalisées dans le traitement de la stratosphère grâce à des développements démarrés via un projet IPSL "impact de la stratosphère sur le climat". Cette approche s'inscrit pleinement dans la prospective du Pôle. La stratosphère influence le climat dans la troposphère de deux façons principales. D'une part, elle a un impact radiatif, essentiellement du à l'ozone, gaz à effet de serre qui, en outre, absorbe les UV solaires mais aussi à la vapeur d'eau en quantité suffisante (quoique infime) pour avoir un effet de serre. D'autre part, elle a un impact dynamique, provenant du fait que les changements de la circulation stratosphérique ayant une dynamique spécifique (comme l'Oscillation Quasi Biennale ou les Réchauffements Stratosphériques Soudains) peuvent se propager vers le bas et créer des changements significatifs dans la circulation troposphérique et le climat. Les modèles de la circulation générale couplant dynamique et chimie et incluant la stratosphère sont nécessaires pour simuler le climat, sa variabilité et sa dérive future. A



l'heure actuelle, le modèle LMDZ étendu à la stratosphère a une climatologie et une variabilité réalistes, dans les tropiques et aux moyennes latitudes, mais de nombreux développements sont encore nécessaires pour appréhender les différentes facettes des changements climatiques. Trois directions dans lesquelles la modélisation de la circulation générale du système climatique devait se développer ont été identifiées : (i) les échanges de constituants mineurs à travers la tropopause tropicale, (ii) l'influence de la dynamique stratosphérique sur la variabilité naturelle et sur la dérive climatique dans la troposphère, et (iii) l'influence des ondes de gravité sur le climat. Ces développements qui requièrent de fortes interactions entre spécialistes du rayonnement, de la dynamique et de la chimie atmosphérique, sont conduits dans le cadre d'un effort qui fédère LMD, SA et LSCE.

*II.3.3.1 - Simulations fédératives* : Trois simulations phares sont proposées à l'échelle de 3 à 5 ans. Celles-ci s'inscrivent dans le cadre de projets européens en cours ou de thèses récemment débutées avec pour but d'aller au-delà des objectifs de ces projets. Elles permettront de fédérer davantage les efforts des trois laboratoires principaux impliqués dans le développement et l'utilisation de LMDZ-INCA et, surtout, de susciter de nouveaux projets de recherche et d'impliquer d'autres groupes ou laboratoires au travers de la mise à disposition des résultats de ces simulations longues sur les sites dédiés, à l'IPSL ou au niveau national. Bien que reposant sur les outils et modèles déjà mis au point, ces simulations demanderont de nouveaux développements, du modèle INCA lui-même ou du modèle de climat. Elles permettront donc de participer directement à l'évolution et à l'évaluation du modèle climatique mais aussi à la compréhension du système climatique couplé aux cycles biogéochimiques.

*Simulation couplée chimie troposphérique-aérosols-climat* : A l'échelle de 3 ans, il s'agira de simuler, sur les XX<sup>ème</sup> et XXI<sup>ème</sup> siècles, l'évolution de la composition en espèces réactives et en aérosols, de calculer les forçages radiatifs associés et d'évaluer l'impact sur le climat. Différents scénarios d'évolution future seront considérés afin de comparer le forçage radiatif du méthane, de l'ozone troposphérique et des aérosols carbonés à celui du CO<sub>2</sub>. Les forçages radiatifs des aérosols et des gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> nous offrent-ils un bras de levier suffisant pour lutter contre le changement climatique futur en étant moins contraignant en termes d'émissions fossiles de CO<sub>2</sub> ? Ce travail s'inscrira dans le cadre entre autres du projet européen GEMS et concernera surtout le LSCE, le LMD, le LOA et le LGGE.

*Simulation couplée de l'ozone troposphérique et stratosphérique* : Au terme du projet « Impact de la stratosphère sur le climat », nous réaliserons une simulation couplée 1850-2050 prenant en compte la chimie de l'ozone de la surface à 80-90 km. Cette simulation sera utilisée pour évaluer le rôle de la stratosphère sur la tendance de l'ozone dans la troposphère et pour analyser celui de l'ozone dans le système climatique. Elle permettra surtout d'étudier comment l'ozone stratosphérique retourne progressivement à des valeurs pré-1980 (avant l'apparition du trou d'ozone) sous l'effet de la diminution du contenu en Cl et Br dans la stratosphère et des changements climatiques. La mise au point de cette simulation soulève le problème de la parallélisation du modèle couplé, de l'évaluation du code de rayonnement aux courtes longueurs d'onde, et de la prise en compte de la mésosphère.

L'analyse des résultats dépasse le cadre du Pôle. Elle permettra d'impliquer une plus large communauté stratosphérique pour l'analyse des tendances ou l'évaluation des résultats mais également les chercheurs s'intéressant à l'impact de la variabilité de la luminosité solaire sur le climat. Un groupe de travail « Impact de la stratosphère sur le climat », émanant du projet IPSL du même nom et fédérant cette large communauté, sera proposé. La réalisation et le suivi de la simulation longue en seront les premiers objectifs.

*Simulation couplée CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-climat* : Cette simulation concerne directement les interactions climat-cycles biogéochimiques mais aussi la chimie atmosphérique à travers la simulation de la capacité oxydante de l'atmosphère. Ce projet, qui reste à définir plus précisément, pourrait viser une simulation de l'évolution future du méthane en prenant en compte le rôle joué par les changements climatiques sur les émissions naturelles de méthane par les zones inondées et les permafrosts. Ce travail nécessite de finaliser les modules d'émission de méthane dans ORCHIDEE (collaboration avec le LGGE).

Ces trois simulations seront réalisées en parallèle avec l'effort constant d'évaluation de LMDZ-INCA. Cette évaluation bénéficiera directement des nouveaux développements de LMDZ (schéma convectif, couche limite, version zoomée, parallélisation, ...). C'est en particulier dans le cadre de campagnes de grande échelle comme AMMA qu'une analyse détaillée des processus affectant les espèces chimiques (transport convectif, lessivage, émissions par les éclairs) peut être réalisée. D'autres projets, comme l'application de LMDZ-INCA aux études paléoclimatiques ou à celle de la pollution oxydante, sont également en gestation.

*II.3.3.2 - Implications pour le système physique et les traceurs* : La représentation du transport atmosphérique des constituants chimiques et des aérosols est extrêmement sensible à celle du transport convectif (l'importance du transport convectif a été confirmée récemment en comparant les concentrations chimiques obtenues à l'aide de LMDZ-INCA avec les schémas de convection de Tiedtke et d'Emanuel). Le nouveau bloc couche-limite/convection/nuages sera validé en termes de transport des traceurs, principalement dans le cadre du projet AMMA. On étendra à la représentation du transport des traceurs, la stratégie mise en place par le passé dans le cadre des projets EUCREM et EUROCS pour le développement et la validation des paramétrisations climatiques : les paramétrisations utilisées dans une version unicolonne du modèle de climat sont comparées à des sorties de modèles méso-échelle, que ce soit sur des cas académiques ou pour essayer de simuler des cas observés lors de campagnes de terrain (campagnes passées dans un premier temps puis périodes d'observations intensives - SOPs - de AMMA). La comparaison des sorties de modèles méso-échelles et de paramétrisations de modèles de grande échelle en termes de matrices d'échange de traceurs devrait permettre d'apporter de nouvelles contraintes sur les paramétrisations elles-mêmes (collaboration avec l'équipe de J.P.Lafore au CNRM). A l'issue de la campagne, les concentrations prédites par le modèle LMDZ-INCA seront comparées directement aux observations in-situ. Au-delà du transport lui-même, le travail sera étendu au lessivage des espèces solubles et si possible au

soulèvement de poussières par les bourrasques de vent associées à la convection de couche limite et par les fronts de rafales des lignes de grain.

D'un point de vue dynamique, l'accent sera mis sur les processus physiques qui influent sur le transport des espèces chimiques dans la stratosphère et les échanges troposphère-stratosphère. Les études et développements concerneront notamment : (i) la paramétrisation des ondes de gravité dont certaines études ont montré qu'elles contrôlaient en grande partie la circulation méridienne moyenne (circulation de Brewer-Dobson), (ii) l'analyse et la réduction d'un biais froid endémique du modèle (et de beaucoup d'autres) dans les hautes latitudes au voisinage de la tropopause et (iii) la paramétrisation de la convection profonde et des "overshoots" qui contrôlent pour une bonne part les échanges troposphère-stratosphère de constituants.

### **II.3.4 - Nouveaux enjeux pour les interactions climat-cycles bio-géochimiques**

Le couplage entre le système climatique et les cycles biogéochimiques est une activité déjà en cours au sein du Pôle (cf. I.1) mais ces études qui ont mis en évidence la rétroaction positive entre le changement climatique et le cycle du carbone biosphérique s'appuyaient sur des modèles relativement simples des cycles du carbone océanique et biosphérique. Outre l'IPSL, le Hadley Center et du LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) ont réalisé de telles simulations à l'aide de modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère et obtiennent des résultats comparables (rétroaction positive entre le climat et le cycle du carbone continental). Néanmoins, ces modèles sont plus sophistiqués en terme de représentation des processus que ne l'étaient les modèles de carbone utilisés par l'IPSL il y a 5 ans. Il faut également noter qu'aucun de ces groupes ne prend en compte l'influence, potentiellement importante, du changement d'utilisation des sols sur le climat (effets physiques et biophysiques) et sur le cycle du carbone. A terme, nous visons à l'IPSL un modèle climat-carbone qui simule de manière réaliste le changement d'utilisation des sols de façon à étudier son rôle direct sur le climat, mais également son rôle indirect, lié par exemple aux émissions fossiles, via l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Au-delà des aspects de couplage, le suivi des différents développements dans les modèles de biogéochimie marine (PISCES) et de surfaces continentales, permettra d'améliorer la complexité du modèle et de réaliser des études aux échelles régionales.

*II.3.4.1 - Couplage climat-cycle du carbone et rôle de l'utilisation des sols* : L'intégration du cycle du carbone dans le modèle de l'IPSL (modèle LOOP) sera réalisée dès 2005. Elle comprendra les modèles ORCHIDEE (continent) et PISCES (océan) couplés au modèle physique IPSLCM4. Il s'agira d'abord d'étudier l'importance d'un cycle du carbone interactif dans l'estimation du changement climatique du 21<sup>ème</sup> siècle. Nous évaluerons également l'impact du changement climatique sur la dynamique de la végétation et, en retour, sa rétroaction sur le système climatique. Les simulations seront réalisées autour du scénario IPCC SRES-A2. Les résultats des premières simulations seront inclus dans le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC.

Les développements en cours autour du changement d'utilisation des sols permettront, dans un premier temps, d'étudier l'impact du changement d'utilisation des sols sur le climat via les

changement de la surface (albédo, rugosité) et des flux d'énergie (chaleur latente, chaleur sensible) mais également via le cycle du carbone (émissions de CO<sub>2</sub> liées à la déforestation). Ces études seront centrées sur le siècle passé et le 21<sup>ème</sup> siècle. Ensuite, il faudra intégrer les développements mis en oeuvre dans les domaines du changement d'utilisation des sols et dans celui des interactions climat-carbone afin de pouvoir réaliser une simulation (SRES A2 par exemple) où seuls sont imposées les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine fossile et les cartes spatiales d'étendues de la déforestation. Le modèle couplé climat-carbone-land-use calculera les flux de carbone océaniques et continentaux naturels (fonctions du climat), ainsi que les flux associés à la déforestation, afin de calculer l'évolution du CO<sub>2</sub> et le changement climatique correspondant.

*II.3.4.2 - Nouveaux développements* : Les développements en cours autour de la biogéochimie marine et de la biosphère continentale seront ensuite étendus à l'échelle globale puis validés et introduits dans le modèle couplé.

Pour la biogéochimie marine, il s'agit de prendre en compte de nombreux aspects : biogéochimie des zones d'upwelling (en particulier, les émissions de N<sub>2</sub>O), modèle en quotas (au lieu de l'approche redfieldienne classique) pour le carbone et l'azote, représentation des chaînes trophiques supérieures, paramétrisation des processus méso-échelle pour le modèle global, rôle des zones côtières dans les processus biogéochimiques, émissions d'autres composés tels que DMS, CO,...

Pour le continent, il s'agira d'intégrer dans le modèle « Système Terre » des développements en cours dans ORCHIDEE autour des écosystèmes anthropisés (cultures, prairies, forêts gérées), des modules d'émission de composés chimiquement actifs tels que l'isoprène, le terpène, les composés azotés émis par les sols, les modèles de permafrost et d'émissions de méthane... Il est également prévu d'inclure dans ORCHIDEE un cycle de l'azote réaliste afin de contrôler les flux de carbone et de simuler de manière plus réaliste les flux de composés azotés chimiquement actifs.

Ces développements parallèles et leur intégration dans une structure commune et pérenne nécessitent un effort continu de convergence des modèles. Par exemple, un lien plus fort, en terme d'architecture numérique, sera réalisé entre les deux modèles de biogéochimie marine LOBSTER et PISCES.

*II.3.4.3 - Intégration de l'ensemble des rétroactions* : Ces différentes activités permettront, en parallèle à celles réalisées pour la composante chimie atmosphérique, de construire les briques essentielles du modèle prenant en compte le système physique, le cycle du carbone, l'utilisation des sols et la chimie atmosphérique. Afin de fermer les cycles, d'autres développements concernant la déposition d'azote sur les continents et les océans, la fertilisation océanique par le fer issu des aérosols désertiques, la prise en compte des émissions de gaz lors de feux (naturels et d'origine humaine), les émissions naturelles de méthane..., seront également nécessaires. Outre les simulations phares présentées dans la partie « enjeux chimie-climat », il deviendra possible à l'aide de ce modèle d'étudier, par exemple, le couplage entre le changement climatique futur, les émissions biogéniques, la chimie de l'ozone et du méthane et le bilan radiatif atmosphérique.

Au-delà de celui qui consiste à simuler le climat des 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles en prenant en compte le cycle du carbone et le changement d'utilisation des sols, nous proposons, à l'échelle de quatre ans, deux autres défis qui permettront de fédérer les différents développements. En lien avec la proposition de la section chimie-climat, il s'agira, d'une part, d'étudier le bilan actuel et futur du méthane dont la stabilisation depuis le début des années 1990 reste une question scientifique non résolue. Pour y répondre, et être en mesure de simuler l'évolution future du méthane, il faut fermer le cycle du méthane en prenant en compte ses sources et puits anthropiques et naturels, en particulier les zones de permafrost qui, en cas de fonte, peuvent libérer des quantités énormes de carbone sous forme de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>. En outre, nous proposons d'étudier, à l'aide de ce modèle, les changements importants qui affectent ces deux composés lors des transitions glaciaires-interglaciaires. Ceci requiert de disposer d'un modèle « système Terre » suffisamment complet, qui, par exemple, inclut une représentation des sédiments, et de tester si ce modèle peut rentrer ou sortir de glaciation en terme de climat, mais également en terme de variations de CO<sub>2</sub>, de méthane et de poussières,...

### **II.3.5 - Enjeux et évolutions pour le système physique**

Dans les prochaines années, la partie physique du modèle du système climatique de l'IPSL doit évoluer de façon à réduire les biais de la version actuelle et à introduire de nouveaux processus dont la prise en compte n'en est actuellement qu'au stade développement (et en test dans les composantes individuelles). De plus, les couplages entre les modèles apportent aussi une réflexion sur les interfaces physiques ou la continuité de certaines paramétrisations, comme les paramétrisation des flux à l'interface air-mer entre les différents milieux. L'amélioration de la climatologie (II.3.5.1) passe par la réalisation de nombreux tests de sensibilité qui seront suggérés par les résultats des analyses proposées dans la section suivante. Les autres thématiques (II.3.5.2) serviront de base pour démarrer de nouvelles versions du modèle de climat.

*II.3.5.1 - Amélioration de la climatologie moyenne et des caractéristiques de la variabilité court terme :*  
L'amélioration de la représentation du climat moyen continue à sous-tendre une partie des développements effectués sur les modèles. Comme la prospective du pôle est centrée autour des changements climatiques, cette amélioration doit se faire sur la base d'améliorations physiques plutôt que de corrections ad-hoc. Si le modèle IPSLCM4 représente un progrès considérable en termes de représentation du climat moyen (variations saisonnières des SSTs dans les tropiques, structure des précipitations, climat polaire, forçage radiatif des nuages) des défauts importants persistent. Ils concernent notamment un biais froid dans les moyennes latitudes, une mauvaise représentation des moussons indienne et africaine, ainsi qu'une circulation thermo-haline trop faible. Une résolution plus fine du modèle d'atmosphère pourrait améliorer les biais froids des moyennes latitudes mais des problèmes dans la représentation des nuages ou des échanges turbulents à l'interface océan/atmosphère ne sont pas à exclure. La représentation de la densité foliaire (LAI), qui conditionne à la fois les bilans radiatifs, thermiques et hydriques des régions continentales sera analysée en détail. Une phase préalable sera l'évaluation de la capacité du modèle couplé à représenter correctement les variations spatio-temporelles du LAI, sachant que le comportement du modèle n'a pour le moment été

testé que dans des configurations forcées. Il s'agira également de comprendre comment améliorer la représentation des flux d'eau douce dans la région du Labrador, qui semble être à l'origine du défaut de formation d'eau profonde dans cette région. Une autre piste fait intervenir les interactions entre la dynamique de la glace de mer et l'océan. Pour les précipitations de moussons, qui ont un maximum trop proche de l'équateur avec une circulation de basse couche trop zonale et un continent surchauffé, plusieurs pistes sont envisagées (processus continentaux, cycle diurne de la convection, mélange vertical de moment horizontal, biais chaud océanique sur le Golfe de Guinée, résolution spatiale, etc.). La campagne AMMA devrait permettre de combler un certain nombre de manques au niveau des données, concernant notamment les processus de couplage avec la surface.

La bonne représentation de la **variabilité climatique** à différentes échelles de temps est également essentielle pour l'étude du changement climatique. De nombreux développements et études seront dévolus à ces aspects. Du fait de son poids dans la variabilité climatique, ils viseront, notamment, à améliorer la représentation de l'ENSO dans le modèle. La simulation de l'ENSO avec IPSLCM4 est relativement réaliste à la fois en termes d'amplitude et de structures avec comme aspect très positif, le fait que le comportement de l'ENSO semble changer au cours des décennies. En revanche, comme dans beaucoup de modèles, le poids des périodes courtes (2-3 ans) est surestimé. Sur ce point, l'amélioration pourrait, entre autres, passer par un accroissement significatif de la résolution du modèle.

Un autre sujet privilégié sera l'étude des échelles intra-saisonnières et celle du lien entre variabilité intra-saisonnière (oscillations de Madden et Julian) et variabilité (Moussons, El Niño). Le couplage avec l'océan, qui à ces échelles de temps requiert une bonne résolution verticale de la couche de mélange océanique et la prise en compte du cycle diurne de l'ensoleillement (formation de « warm layers »), est un facteur important de cette variabilité intrasaisonnière qui doit être correctement décrite par le modèle. Les données de l'expérience Vasco-Cirene permettront d'évaluer la représentation de ce couplage aux échelles intrasaisonnières dans l'Océan Indien. Les moussons Indienne et Africaine se caractérisent aussi par des ruptures intrasaisonnières (démarrage des différentes saisons des pluies, occurrence de séquences sèches importantes au sein des saisons des pluies) dont on s'attachera à améliorer la représentation. En effet, leur variabilité interannuelle qui ont un impact important sur les ressources en eau, les rendements agricoles et la vie des populations locales. Différentes études ont mis en évidence l'existence d'une oscillation bisannuelle (TBO : Tropospheric Biennial Oscillation) dans les variations de nombreuses variables climatiques troposphériques observées dans la zone tropicale. Des phénomènes climatiques majeurs tels que l'Oscillation australe (et sa conséquence El Niño), ou encore la mousson asiatique, possèdent un rythme bi-annuel plus ou moins marqué selon les périodes historiques. Il semble que ce signal soit en partie lié à l'Oscillation Quasi-Biennale. Nous proposons d'étudier ces liens, ce qui demande d'améliorer la représentation de la dynamique équatoriale et la représentation de la QBO dans la version stratosphérique de LMDZ. Des études similaires sont aussi entreprises aux moyennes latitudes pour comprendre et mieux représenter les oscillations à l'échelle décennale. Des études récentes suggèrent en effet qu'un déplacement vertical comparable à celui de la QBO intervient dans la propagation vers le bas de modes annulaires sur une échelle de quelques jours. Dans la troposphère, ces modes ressemblent beaucoup à l'Oscillation Arctique et/ou à l'oscillation Nord Atlantique.

### II.3.5.2 - Nouveaux développements

**a) Rétroactions nuageuses, couche limite et cycle diurne :** La modification des nuages et du forçage radiatif associé reste une des plus grosses sources d'incertitude concernant la réponse du climat à une perturbation naturelle ou anthropique. Des développements amont ont été entrepris ces dernières années sur la représentation de la convection et des nuages dans la composante atmosphérique du modèle (Modèle du thermique, Hourdin et al., 2002, modification de la représentation de l'entraînement dans le schéma d'Emanuel, Grandpeix et al., 2004, développement d'un modèle de nuages couplé à la convection, Bony et Emanuel, 2001, développement d'un modèle des courants de densité sous les orages).

Ces développements seront à la base du nouveau bloc de paramétrisations couche-limite/convection/nuages du modèle de climat. Ils devraient permettre de franchir un cap dans la représentation des nuages et de s'attaquer à un biais endémique des modèles de climat : la mauvaise représentation du cycle diurne de la convection continentale (avec un maximum vers midi dans les modèles et en fin de journée dans la réalité). Ce biais est problématique pour l'étude de la variabilité aux courtes échelles de temps, pour les mécanismes de changement à long terme du climat (rétroaction radiative des nuages) et pour le lien entre modèles et observations.

L'utilisation d'un océan résolvant le cycle diurne de la couche mélangée océanique (haute résolution verticale et paramétrisations adaptées) devrait également permettre d'étendre cette étude du cycle diurne de la convection aux régions océaniques. Le modèle ORCA a été testé dans des versions à très haute résolution verticale afin de représenter correctement les premiers mètres d'océan. Ce raffinement est important à la fois pour le cycle diurne et pour la représentation de couche stables de quelques mètres qui peuvent se créer sur les océans tropicaux et jouer un rôle important dans certains modes de variabilité.

L'étude du cycle diurne de la nébulosité s'appuiera notamment sur les observations du SIRTa pour les moyennes latitudes et des campagnes AMMA et Vasco-Cirene pour les tropiques. Avec ces nouvelles paramétrisations, une attention particulière sera également apportée aux nuages de couche limite sur les océans. L'analyse des séries satellites sur les dernières décennies, l'arrivée de satellites de nouvelle génération (e.g. Calipso) et le développement de nombreuses études théoriques, numériques et diagnostiques centrées sur la compréhension de la physique des nuages bas permettra de mieux représenter et de mieux évaluer le comportement de ces nuages dans le modèle.

Le développement d'une version du modèle couplé incluant ces différents développements est une des priorités à l'échelle de 4 ans. Il est également prévu de réaliser une version spécifique pour étudier les régions tropicales. Les modèles de l'IPSL ont été développés sur des grilles paramétrables, qui permettent de raffiner la résolution sur une région du globe. Dans le cadre de AMMA et VASCO, des versions du modèle LMDZOR (atmosphère-surfaces continentales) zoomé, avec une résolution d'une cinquantaine de kilomètres sur les région d'intérêt seront développées. Un couplage avec un océan régionalisé à haute résolution est envisagé.

**b) Couplage avec les modèles de calotte et de glace de mer :** Plusieurs processus spécifiques aux régions polaires jouent potentiellement un rôle important dans la sensibilité climatique. Pour ces régions, les études sont conduites en forte interaction avec le LGGE, pour les aspects climatique et pour le couplage avec le modèle de calotte (développé par C. Ritz), et avec l'UCL pour le modèle de glace de mer incorporé dans IPSLCM4.

Le couplage du modèle de calotte de glace du LGGE dans le modèle de climat de l'IPSL a démarré avec le projet ENSEMBLES. Cette étape est importante pour évaluer l'impact des flux d'eau douce des calottes ainsi que la stabilité des calottes et les risques potentiels de débâcle sous l'impact du réchauffement climatique. Les régions de formation d'eau profonde sont localisées près du Groenland et de l'Antarctique et sont donc fortement influencées par le bilan de masse des calottes de glace (ruissellement de surface et vélage d'icebergs). L'évaluation du comportement de la calotte se fera à travers des simulations paléoclimatiques permettant d'analyser sa stabilité en période glaciaire.

Il est également prévu d'introduire la nouvelle version du modèle de glace de mer développée à l'UCL. Plusieurs améliorations en cours permettront de représenter la banquise de façon plus fine en vue de simulations à plus grande résolution spatiale. Des diagnostics supplémentaires sont également introduits grâce à la prise en compte de l'ensemble des interactions entre salinité et température dans la composante thermodynamique, et à l'amélioration de la représentation des structures sous-maille de l'épaisseur et des différents types de glace classifiés selon l'âge et le niveau de déformation de la glace.

**c) Hydrologie des surfaces continentales :** L'hydrologie des surfaces continentales est au cœur des questions de société en rapport avec le changement climatique. Les rétroactions liées à l'albédo de la neige sont à l'origine d'incertitudes importantes des projections climatiques. La bonne représentation de l'hydrologie et du routage de l'eau vers les océans est également importante pour le couplage océan/atmosphère. Un enjeu pour le système couplé est de prendre en compte un certain nombre de raffinements du modèle ORCHIDEE qui n'ont été jusque là testés qu'en mode forcé. On inclura en particulier (i) un modèle hydrologique multi-couches (de Rosnay et al., 2002) qui, associé à un modèle de routage de l'eau avec gestion de l'irrigation (de Rosnay et al., 2003), permet de simuler de façon réaliste le cycle de l'eau continental (Ngo-Duc et al., soumis), (ii) une représentation interactive du cycle foliaire (Krinner et al., in press) conduisant à une bonne variabilité saisonnière et interannuelle des flux d'eau, de chaleur et de carbone échangés avec l'atmosphère (Ciais et al., soumis), (iii) une meilleure formulation de l'albédo de la neige, tenant compte à la fois de la présence de végétation, du métamorphisme du manteau neigeux (taille des grains), et de la pollution (carbone suie), (iv) une paramétrisation du gel du sol, selon une formulation qui affecte les bilans hydrologiques et thermiques des sols (Poutou et al., 2004), et par voie de conséquence le cycle du carbone et (v) une paramétrisation des lacs, dérivée de celle développée par Krinner (2004).

**d) Couplages et interfaces :** La représentation du couplage entre systèmes physiques en général, et entre l'atmosphère et les surfaces océaniques ou continentales n'est pas une question close. Nous continuerons à envisager des approches originales pour ces différents sujets. Notons en particulier la possibilité de réactiver l'approche dite de la « physique délocalisée » dans laquelle le changement de



grille s'effectue non pas entre l'océan et l'atmosphère mais entre les composantes "physique" et "dynamique", au sein du modèle d'atmosphère. Cette approche permettrait d'éviter les problèmes provenant de l'existence de mailles mixtes, océan/continent, au niveau des côtes. On étudiera également l'importance de la résolution spatiale du modèle atmosphérique et le développement possible de paramétrisations permettant de coupler un modèle d'atmosphère à un modèle d'océan résolvant les tourbillons.

Pour la prise en compte du cycle diurne dans le modèle couplé, il sera nécessaire d'envisager un couplage avec une fréquence temporelle suffisamment fine. Les nouvelles paramétrisations atmosphériques, avec des représentations explicites des structures méso-échelles de la couche limite convective et des rafales de vent sous les orages, devraient également pouvoir être utilisées pour prédire l'état de la mer et contribuer aux développements de nouvelle paramétrisation de flux entre l'océan et l'atmosphère. Une première étape en ce sens sera réalisée par des études de sensibilité aux incertitudes des paramétrisations des flux.

### **II.3.6 - Evolution du modèle du système climatique de l'IPSL, des outils et de l'infrastructure.**

*II.3.6.1 - Evolutions majeures du modèle système terre :* Pour atteindre les objectifs scientifiques décrits ci-dessus, il est nécessaire de faire évoluer le modèle de l'IPSL dans plusieurs directions complémentaires.

A partir de la version de référence utilisée actuellement pour les scénarios du GIEC, plusieurs développements conduits en parallèle nous permettront dans les 2 à 4 ans à venir de considérer les principales rétroactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. Nous avancerons ainsi vers l'intégration dans le modèle système Terre de l'ensemble des composantes. Ces configurations comprennent l'intégration du cycle du carbone (configuration IPSLCM4 LOOP), la prise en compte de l'utilisation des sols (extension de IPSLCM4 LOOP) et l'intégration du modèle INCA (configuration IPSLCM4 INCA). Pour réaliser cette intégration des cycles biogéochimiques, il faut être en mesure d'échanger les différents constituants entre les différents modèles, ce qui requiert de modifier les interfaces, éventuellement de transporter les espèces dans l'océan ou l'atmosphère. Ces modifications apportent aussi de nombreux changements dans la gestion des simulations.

Parallèlement, des modifications de la partie physique du modèle sont en cours en vue de réaliser le scénario A2 du GIEC à plus haute résolution (facteur 4 pour l'atmosphère) et pour coupler le modèle de climat avec celui de calotte de glace, de façon asynchrone dans un premier temps puis de façon synchrone.

Dans un second temps, l'objectif est de disposer, à 4 ans, d'une nouvelle version du modèle résolvant le cycle diurne et prenant en compte les améliorations des différentes composantes. Cette nouvelle version aura une plus grande résolution horizontale et verticale. La version minimale envisagée doit permettre de représenter de façon satisfaisante les passages dépressionnaires des moyennes latitudes, ce qui amène à une résolution de l'ordre de 2 degrés pour l'atmosphère et de 0,5 degrés pour l'océan. De même, la résolution minimale sur la verticale comprendra 50 niveaux

verticaux dans l'atmosphère pour représenter correctement la stratosphère, et 70 niveaux verticaux pour l'océan (à comparer aux 30 niveaux actuels) ce qui semble nécessaire pour représenter correctement le cycle diurne et l'évolution des couches de mélanges fines. Cette version sera mise au point par étapes en notant que, dans la période intermédiaire, nous devons prévoir une version avec une plus haute résolution verticale dans l'atmosphère pour de nombreuses études faisant intervenir les interactions entre la chimie et le climat. Selon les moyens de calcul disponibles et l'avancée des projets sur le Earth Simulator une version à très haute résolution horizontale et verticale sera développée.

Pour rationaliser les développements et effectuer facilement des tests de sensibilité au fur et à mesure des améliorations des différents modèles, le travail de réflexion sur la modularité de nos couplages sera poursuivi. En effet, chaque composante du modèle évoluera, que ce soit pour améliorer ses performances, ou pour être adaptée à de nouvelles questions scientifiques. Le modèle système Terre devra intégrer ces améliorations et s'assurer en permanence de la compatibilité des composantes et de la cohérence du système complet, tant du point de vue de la physique que de la 'tuyauterie' informatique. Les évolutions prévues de la couche limite atmosphérique peuvent, par exemple, conduire à une révision en profondeur de la modélisation de l'interface entre l'atmosphère et la surface (océan, végétation ou glace). Notons que seules quelques versions seront reconnues comme versions de référence de l'IPSL. Une des difficultés est d'assurer pour chaque nouvelle version de référence, la compatibilité des différents niveaux de complexité dans les couplages.

Enfin, des configurations spécifiques de grille seront développées. Pour des études régionales, la version zoomée (résolution raffinée sur une partie du globe) sera utilisée. Il est envisagé d'utiliser des modèles emboîtés pour l'océan. Pour la paléoclimatologie, des configurations avec des répartitions anciennes des continents, et avec des grilles océaniques adaptées, seront développées. Pour les climats très anciens, le schéma de rayonnement sera adapté à des concentrations très élevées de CO<sub>2</sub>.

*II.3.6.2 - Parallélisation* : Un effort important porte actuellement sur la parallélisation du modèle de climat. Le premier objectif est de disposer courant 2005 d'une version parallèle du modèle afin de tirer pleinement parti des calculateurs actuels et futurs, et d'être en mesure d'utiliser des résolutions plus élevées. Le code d'océan et de glace de mer OPA-LIM est utilisable sur toutes les architectures existantes, qu'il s'agisse de machines à quelques dizaines de processeurs vectoriels ou de machines avec des centaines de processeurs scalaires. L'architecture du modèle d'atmosphère LMDZ sépare totalement la partie dynamique, dont la parallélisation est complexe, de la partie physique qui est naturellement parallèle. Deux versions parallèles de la dynamique ont été développées, et ont de bonnes performances. L'étape suivante est la parallélisation du modèle de sol ORCHIDEE. L'intégration d'une dynamique parallèle à la version standard de LMDZ-ORCHIDEE et son utilisation en mode recherche se fera dans le courant 2005.

Bénéficiant de l'expérience acquise sur le Earth Simulator ou avec d'autres modèles, nous ferons ensuite l'assemblage des versions parallèles des composantes du modèle de l'IPSL avec le coupleur parallèle OASIS. Cette étape franchie, l'intégration de la modélisation du cycle du carbone, de la chimie atmosphérique ou des aérosols demandera encore du temps mais ne posera pas de problème spécifique. Du fait des résolutions relativement faibles utilisées, nos codes sont efficaces

pour un nombre réduit de processeurs (quelques dizaines) ce qui conduit aujourd'hui encore à privilégier des architectures vectorielles/parallèles dont le processeur unitaire est très puissant. Dans le futur, il faudra évoluer vers une version capable de tirer pleinement profit des architectures à plusieurs centaines, voire plusieurs milliers, de processeurs. Cela impliquera probablement une modification profonde de la résolution de la dynamique atmosphérique.

*II.3.6.3 - Evolution de l'infrastructure* : L'infrastructure doit permettre de maintenir en état de fonctionnement les configurations de base des simulations de référence et d'intégrer pas à pas les évolutions scientifiques et techniques. L'infrastructure du modèle couplé et des modèles utilisés en forcé doit être souple, modulaire, évolutive, portable et pérenne. En particulier, il doit être très facile d'utiliser comme champs de forçage d'une composante les champs créés par une simulation couplée. Pouvoir supprimer ou modifier une rétroaction du système de façon simple est un élément indispensable de l'infrastructure du système couplé. Tous les changements dans les environnements de calcul s'accumulent et le travail d'anticipation des évolutions et de vérification régulière pour maintenir opérationnelle les configurations de référence est important. De plus, il faut pouvoir intégrer régulièrement les nouveautés scientifiques dans le système pour mener les différentes études scientifiques. Ceci doit se faire de façon itérative par étapes identifiées tout en gardant opérationnelles les configurations de référence.

**Distribution des résultats de simulations longues et évolution du post-traitement** : Compte tenu de l'intérêt naturel, tant de la communauté « études climatiques » que de celle des « études d'impacts », pour les résultats des simulations longues effectuées au pôle de modélisation, un effort important doit être mené pour rendre l'accès aux résultats le plus facile possible. La première étape de cette mise à disposition consiste en une mise en forme standard et bien documentée des résultats et par le développement d'utilitaires génériques permettant de transformer les sorties brutes des modèles. Cette étape est déjà bien avancée, en se basant sur le standard adopté et les outils développés par le PCMDI (Lawrence Livermore, USA) pour sa collecte de données pour le GIEC.

La deuxième étape consiste en la mise à disposition des jeux de données ainsi transformés. Si un certain nombre de ces jeux seront disponibles par le biais du PCMDI, le Pôle de Modélisation du Climat se propose de mettre à disposition un plus large choix de variables et de simulations par le biais d'un serveur OPeNDAP/DODS (mécanisme permettant l'accès à des fichiers de données locaux par des sites extérieurs) et d'un serveur Web/LAS permettant de récupérer figures et jeux de données spécifiques (choisis sur une région ou un intervalle de temps donnés) par une interface conviviale. Cette mise à disposition se fera en collaboration avec Météo-France dans le cadre du programme ESCRIME (cf II.3.7). Sous réserve de moyens supplémentaires, des pré-analyses spécifiques, des synthèses de résultats et l'accès aux données brutes pourraient aussi être mis à disposition.

La mise en place du suivi en ligne des simulations et de la création d'atlas de figures des résultats a montré l'utilité du développement d'outils de post-traitement communs. Les efforts de développement dans le domaine du post-traitement et de la visualisation continueront dans cette voie en adaptant les outils utilisés actuellement pour des systèmes plus performants (CDMS/python/VTK). Ces évolutions permettront un meilleur partage d'outils avec nos partenaires étrangers et le

développement d'analyses et de visualisation « haute gamme », tout en maintenant à niveau le travail déjà effectué.

*II.3.6.4 - Evolution de l'outil intégré de compilation, exécution et de post-traitement (modipsl) :* Du point de vue de l'évolution de l'outil intégré de compilation, d'exécution et de post-traitement, les évolutions prévues concernent :

- L'environnement d'accès et de compilation du modèle pour qu'il reste facile à utiliser et à modifier, que l'on travaille sur une composante ou sur plusieurs, en activant ou en supprimant des rétroactions,
- Le portage et l'optimisation de l'environnement sur tous les calculateurs accessibles ou prochainement accessibles;
- L'environnement des configurations pour faciliter les branchements/débranchements de couplage existants ou non, ou pour intégrer de nouvelles paramétrisations;
- L'environnement d'exécution pour faciliter le suivi des simulations y compris les simulations d'ensemble, en automatisant leur suivi graphique, les pages WWW descriptives, ...
- L'accès aux résultats pour faciliter les analyses spécifiques.

Ces évolutions s'articulent avec la suite du projet PRISM. En particulier, nous adopterons les outils PRISM au fur et à mesure de leur maturité. Nous avons déjà prévu d'incorporer l'environnement de compilation ainsi que le coupleur OASIS3 dès la prochaine version du modèle. La nouvelle version du coupleur OASIS4 sera implémentée après une étude préalable des nouvelles fonctionnalités. Nous sommes beaucoup plus réservés sur les environnements d'exécution, et sur les outils graphiques tels qu'ils existent à ce jour. Cependant, nous agirons pour décrire nos besoins dans le groupe d'experts PRISM pour que les futurs développements prennent en compte nos besoins.

*II.3.6.5 - Besoins en moyen de calcul :* Les études menées à l'IPSL ont besoin de ressources en calcul importantes. A l'heure actuelle, un an de couplé coûte 7 h de CPU vectoriel et 3 Go de mémoire pour 5 Go de fichiers de sorties. Ajoutons la chimie (100 traceurs, 200 réactions) et la stratosphère (50 niveaux), et une année simulée nécessite alors 100 h de CPU, 14 Go de mémoire et 10 Go de fichiers. Comme en témoigne la prospective, les projets scientifiques conduits à l'IPSL demandent un accroissement simultané de nos systèmes dans plusieurs directions qui vont toutes accroître les ressources nécessaires (calcul, mémoire, espace fichiers, outils d'analyse, ...).

Les évolutions les plus contraignantes vis à vis des ressources de calcul concernent l'augmentation de la résolution horizontale et verticale, l'augmentation des longueurs des simulations, la généralisation des simulations d'ensemble et l'augmentation du nombre de membres de ces ensembles, la complexification des composantes (plus d'espèces chimiques, plus de processus physiques, ...). Nous souhaitons rester actifs dans la définition des besoins en calcul intensif de notre communauté (cf rapport du groupe GEPCI2). Nous soulignons simplement ici les besoins en ressources de calcul nécessaires pour les différentes études demandent de bénéficier dès maintenant de l'équivalent de 100 processeurs NEC, et du double dans 2 ans. Il est également indispensable de

retrouver puis de préserver un juste équilibre entre les ressources calcul et les ressources de stockage et de post-traitement des résultats.

Il faut aussi garder à l'esprit que plusieurs des composantes sont utilisées aussi bien sur les super-calculateurs de l'IDRIS ou du CEA que, dans des configurations plus légères, sur des stations de travail ou PC-Linux. Ceci doit être maintenu notamment pour des collaborations avec des pays qui n'ont pas les moyens de calcul équivalents.

*II.3.6.6 - Coopérations internationales liées aux moyens en calcul intensif* : Les études que nous menons et certaines avancées scientifiques qui en découlent sont extrêmement dépendantes des moyens en calcul. Les machines de type Earth Simulator au Japon ouvrent de nouvelles possibilités, en particulier pour étudier les interactions d'échelles et représenter explicitement des phénomènes actuellement paramétrés. Plusieurs actions sont engagées pour que nous soyons prêts à faire tourner nos modèles sur ces machines et pouvoir, si besoin, pallier le manque de ressources en calcul en France ou en Europe.

**a) Earth Simulator** : Afin de maintenir à jour notre expertise sur les différents calculateurs, nous avons engagé une coopération avec les Japonais pour porter et faire tourner sur le Earth Simulator nos codes prêts pour ce type d'architecture (vectoriel et parallèle à deux niveaux). Le travail s'est engagé au travers du Memorandum Of Understanding franco-japonais qui fait suite aux collaborations initiées par P.Deléglise (couplage océan atmosphère dans les régions tropicales).

En particulier, la configuration du modèle d'océan ORCA05\_LIM\_300L (1/2° et 300 niveaux) a été implémentée sur le Earth Simulator. Elle tourne sur 20 nœuds soit 160 processeurs en 2 h de temps CPU pour une année simulée alors qu'elle était impossible à tester et valider sur l'IDRIS ou le CEA. Une maquette du modèle LMDZ parallèle a également été testée. Trois délégations, soutenues par l'IPSL, se sont ainsi rendues au Japon pour travailler sur le Earth Simulator et identifier les points à améliorer sur les modèles et leur optimisation. Cette action doit se poursuivre et de nouveaux projets de collaboration sont à l'étude.

**b) Oak Ridge National Laboratory (ORNL)** : En novembre 2004, une délégation de l'IPSL s'est rendu à Oak Ridge National Laboratory, où elle a rencontré D.Erickson, Directeur du Climate and Carbon Research Institute (CCRI). Ce laboratoire a une activité de modélisation du système Terre très proche de celle de l'IPSL. L'ORNL dispose de calculateurs vectoriels de classe internationale. L'évolution prévue des calculateurs est impressionnante, puisque l'objectif est de dépasser le Earth Simulator et de disposer de 100 Tflops (crête) en 2006. L'IPSL et l'ORNL ont convenu de signer un 'Memorandum of Agreement' qui permettra à l'IPSL d'utiliser les calculateurs d'Oak Ridge, et sera un cadre pour de futures collaborations scientifiques.

L'ensemble de ces actions nous permettra d'être le plus prêt possible pour l'utilisation de la nouvelle machine vectorielle, parallèle de l'IDRIS dès 2005.

### II.3.7 - Actions communes entre le Pôle, le CNRM et le CERFACS

Le projet de rapprochement entre les activités menées à Météo-France (CNRM), au CERFACS et à l'IPSL s'est concrétisé sous l'acronyme ESCRIME (Etude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL et Météo-France). Ce rapprochement constitue une étape importante dans l'élaboration d'un projet français de modélisation du climat. Dans les quatre prochaines années ces collaborations doivent se poursuivre dans plusieurs directions :

*II.3.7.1 - Les scénarios climatiques* : L'étude du changement climatique et le développement d'activités de recherche dédiées à la compréhension de ses changements ou à leur traduction aux échelles régionales se fait dans les deux groupes en forte interaction avec les projets nationaux ou internationaux. L'effort de coordination doit permettre de :

- Mutualiser les forçages nécessaires à la réalisation des scénarios climatiques. Ces forçages incluent les différents gaz à effet de serre, mais aussi les scénarios d'évolution de l'utilisation des sols, ou le traitement du volcanisme et des variations de l'irradiance solaire pour les simulations réalistes.
- Renforcer le projet d'analyse commune des scénarios climatiques. Actuellement 15 projets d'analyses scientifiques doivent permettre d'analyser les résultats des scénarios réalisés à l'IPSL et Météo-France pour le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC. Nous comptons sur ces analyses pour lancer une dynamique scientifique durable autour des scénarios.
- Offrir un ensemble de scénarios globaux et régionaux aux communautés d'impact. Une action en ce sens est en cours, avec le soutien de l'ONERC et du GICC. Il est souhaitable qu'un véritable réseau de distribution des simulations et d'analyses et pré-traitement en direction des autres communautés soit établi pour tirer profit de l'énorme source d'information que représentent ces scénarios.
- Disposer d'un forum de discussion sur les scénarios pertinents à réaliser et d'une bonne articulation autour des scénarios globaux et régionaux entre les organismes français.

*II.3.7.2 - Vers des outils de modélisation communs* : Différentes actions sont également en cours pour partager des modules numériques ou mettre en place une physique commune pour les modèles d'atmosphère. Dans les quatre prochaines années, nous souhaitons favoriser les échanges de modules, comme, par exemple, celui décrivant le carbone du sol pour le modèle de surfaces continentales. L'effort le plus important reste l'effort autour de la mise en place de la physique commune. Le travail pour les années à venir concerne :

- La mise en place d'une meilleure modularité dans la physique des deux modèles pour permettre un échange des différents "blocs" : onde, rayonnement, CLNC (Couche Limite, Nuage, Convection). Le travail commencera par l'écriture d'une interface commune pour les codes radiatifs, le test et le choix de nouveaux codes radiatifs.

- L'introduction de nouveaux cas adaptés au projet AMMA dans le modèle unicolonne commun. Etude conjointe de ces cas. Analyse critique des différentes paramétrisations de couche limite, nuage et convection.

Actuellement les développements et les comparaisons sont effectués sur des cas unicolonne. L'étape suivante consistera à introduire les éléments dans les versions tri-dimensionnelles des modèles. La poursuite du rapprochement des outils de modélisation est souhaitable et un projet en ce sens devrait être établi dans les 4 ans.

## **II.3.8 - Organisation du Pôle et moyens humains**

*II.3.8.1- Contours du pôle pour les quatre prochaines années :* Au cours des dernières années le Pôle de Modélisation du Climat s'était recentré autour du modèle couplé et de sa mise en œuvre scientifique et technique pour les exercices type GIEC et les études dérivées. Les journées de prospective de Trouville des 16 et 17 novembre 2004 ont montré la richesse scientifique et la volonté de monter une véritable dynamique scientifique. On peut en particulier signaler l'émergence (au travers d'un projet IPSL) du groupe stratosphère et de la mise en place d'un atelier tropical.

Le Pôle n'a donc pas simplement vocation à fournir un service de développement de modèles. Il doit pouvoir faire évoluer ces outils en fonction des priorités scientifiques, et ce, en forte interaction avec les personnes des différents laboratoires. A l'issue de cette prospective, il est possible de réaffirmer que les activités du Pôle de Modélisation du Climat concernent toutes les personnes qui développent les différentes composantes du modèle du système climatique de l'IPSL (océan, glace de mer, atmosphère, surfaces continentales, cycle du carbone, chimie et aérosols, biogéochimie marine), réalisent et analysent des simulations avec l'une ou plusieurs composantes du système climatique de l'IPSL, ou, encore, analysent des simulations de référence mises à disposition d'une large communauté

Le cœur du Pôle est ainsi composé des principaux développeurs et applicateurs des modèles. Un deuxième cercle est composé des personnes qui, pour leurs applications, utilisent ces modèles dans des configurations standard. Un troisième cercle est composé des personnes analysant les résultats des simulations à des fins de validation, de comparaison avec d'autres modèles et les données, ou d'étude de mécanisme. Les personnes actives évoluent dans le temps en fonction des besoins et des priorités. Il est donc important d'assurer un bon relais d'information sur les activités du pôle.

Pour que l'organisation du pôle de modélisation pour les quatre ans à venir reflète les nouvelles attentes, nous avons retenu de travailler plus particulièrement sur :

- Une refonte du Conseil Scientifique du Pôle dès le début 2005;
- Une meilleure définition des missions des différents groupes de travail;
- La diffusion de l'information sous forme de lettre d'information;

- Un accès facile via le serveur web à l'ensemble de l'activité;
- Une utilisation plus systématique des notes de l'IPSL pour faire connaître l'activité et partager l'expertise (études particulières, nouveaux développements, rapports de stages);
- Une meilleure organisation du travail des ingénieurs participant aux activités de développement, évolution, mise en œuvre et pérennisation des modèles, des outils associés et de l'infrastructure;
- Une meilleure visibilité des travaux effectués à l'IPSL vis-à-vis de l'extérieur.

*II.3.8.2 - Moyens humains* : Une partie des difficultés rencontrées dans les dernières années provient d'un sous-dimensionnement des moyens humains par rapport aux objectifs affichés. La force de l'IPSL est de regrouper dans une même structure de nombreux spécialistes. La faiblesse est que chaque thématique est traitée avec un nombre limité de personnes.

<b>Localisation</b>	<b>Intitulé</b>
<b>IPSL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- support aux simulations de référence et mise en place de diagnostics</li> <li>- couplages et implémentation infrastructure PRISM</li> </ul> <p><u>En lien avec les autres besoins de l'IPSL</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- web et diffusion de l'information</li> <li>- gestion et distribution des données</li> </ul>
<b>LOCEAN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- IE Ingénieur en développement d'application : développement des interfaces entre les composantes du système OPA.</li> <li>- AI développeur d'application : tests de validation sur les configurations standards</li> </ul>
<b>LMD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- développement et support aux configurations du modèle d'atmosphère</li> <li>- support aux développements de paramétrisations et à leur insertion dans les versions de référence</li> <li>- développement modèle de la génération suivante</li> </ul>
<b>LSCE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- évaluation systématique et analyse critique des différentes versions du modèle de climat</li> <li>- support aux modèles biogéochimiques (surface continentale)</li> <li>- support aux développements de biogéochimie marine</li> <li>- support assimilation inversion traceurs</li> </ul>

**Tableau II.3.1** : Besoins en ingénieurs identifiés par le Pôle de Modélisation du Climat



Il devient donc prioritaire de bien renforcer dans les différents laboratoires de l'IPSL les activités de recherche pour lesquels les couplages et l'évolution des modèles sont au cœur des préoccupations. Nous avons, en particulier, un sous - potentiel au niveau des chercheurs impliqués dans le développement, l'application et les études du système physique.

Au niveau des ingénieurs, les différents organismes ont répondu à notre appel, et plusieurs personnes ont rejoint les effectifs dans les différents laboratoires et à l'IPSL.

Les systèmes que nous utilisons sont de plus en plus complexes et il faut absolument continuer cet effort si l'on veut mener de front dans les années à venir : (i) l'exploitation d'une version de modèle, (ii) la possibilité d'utiliser les différentes composantes dans des configurations très variées, (iii) le développement de nouvelles paramétrisations ou la refonte des modèles, (iv) la construction d'un modèle système terre, (v) la diffusion des modèles et des résultats des simulations, et (vi) la veille technologie pour anticiper le futur et développer les outils adaptés. L'équipe d'ingénieurs IPSL n'a pas vocation à grossir indéfiniment et l'organisation actuelle demande un bon équilibre entre les ingénieurs répartis dans les laboratoires et les ingénieurs IPSL rattachés au pôle de modélisation. Les besoins en ingénieurs identifiés pour les 4 prochaines années sont indiqués (sans ordre de priorité) dans le tableau II.3.1.

## II.4 - Pôle de Planétologie

Le futur du Pôle de Planétologie est étroitement lié aux programmes spatiaux en cours et à venir. En matière d'exploration martienne, le programme AURORA de l'ESA, s'il voit le jour, devrait permettre l'emport de charges utiles orbitales et in-situ vers Mars à partir de 2011. Après la mission MSL de la NASA (2009), deux missions NASA/Scout sont prévues en 2011, pour lesquelles les idées proposées par la communauté française pour le programme Mars PREMIER (par ex. Netlander, Dynamo, Mambo) figurent en bonne position. Une mission de retour d'échantillons d'astéroïdes géocroiseurs (NEOs), en bilatéral CNES-autre agence nationale (Italie, Chine), va rentrer prochainement en phase préliminaire, et la mission Phobos-Grunt de retour d'échantillons de Phobos est à l'étude à l'IKI.

Ces perspectives spatiales, qui offrent de nombreuses opportunités pour des instruments en phase d'étude, ou développés, dans les laboratoires de l'IPSL impliqués dans le Pôle de Planétologie, sont très prometteuses, à la condition cependant que nos laboratoires sachent préserver leur potentiel technique. La création du Pôle Spatial et Instrumental sur le site de Guyancourt est de ce point de vue une étape essentielle. L'exploitation scientifique des données des expériences en cours, et la préparation des expériences futures, nécessite de stabiliser de jeunes chercheurs modélisateurs et instrumentalistes pour assurer la relève des nombreux chercheurs seniors qui ont fait la réputation de nos laboratoires et vont partir à la retraite prochainement. L'activité de R&T devra être poursuivie, à un niveau à définir en fonction des engagements spatiaux. Les réflexions prospectives des groupes thématiques sont présentées ci-dessous.

### II.4.1 - Météorologie et climat des planètes telluriques

L'étude de la planète Mars est actuellement en pleine révolution grâce à la moisson de données des missions de la NASA et de la sonde européenne Mars Express. Ce point fort de l'activité du Pôle de Planétologie va se poursuivre à l'avenir avec une grande importance accordée à ces nouvelles observations.

Les missions spatiales et les instruments sur lesquelles le Pôle de Planétologie va s'appuyer sont multiples. Il faut citer en premier lieu Mars Express. Les équipes du Pôle sont fortement impliquées dans l'exploitation des résultats de cette mission, avec le traitement et l'analyse des données SPICAM, les traitements d'observations d'autres instruments (OMEGA, PFS), et les comparaisons entre observations et modèles. De très nombreuses publications sont prévues dans le cadre de l'équipe SPICAM. Le sondeur micro-ondes MAMBO (Mars Atmosphère Microwave Brightness Observer) est un nouveau type d'instrument pour Mars dont le concept (phase B) a été développé en collaboration avec d'autres laboratoires pour l'ex-mission « Mars Premier » du CNES. (PI : F.Forget). Cet instrument va être proposé comme charge utile dans le cadre d'une mission du programme NASA « Scout » pour un lancement en 2011. Enfin, d'autres capteurs, déjà mentionnés dans la partie bilan (ODS, TDLAS, PALOMA, GPR, NITON, DEMAI, ...) sont en développement.

Le modèle de climat global martien développé au LMD comprend à présent la simulation détaillée des principaux cycles climatiques martiens (cycle de l'eau, soulèvement et transport des

poussières, condensation et sublimation du CO<sub>2</sub>) et la modélisation de la composition de l'atmosphère et de sa photochimie ; il s'étend jusqu'à la thermosphère vers 250 km. Dans les prochaines années, une part très importante de l'activité va être consacrée à l'interprétation des données spatiales par le modèle et ses dérivés afin de faire progresser notre compréhension du système climatique martien et de valider ces modèles. Les projets envisagés concernent différents aspects : (i) Cycles climatiques martiens : couplage des différents cycles entre eux, (ii) Méso-échelles : exploitation de la capacité de « zoom » du modèle, (iii) Chimie et composition atmosphérique : exploitation des données spatiales et observations télescopiques depuis la Terre (collaborations avec le LESIA, et le GSFC, USA), introduction de l'impact de la chimie hétérogène (poussières, particules de glace) sur la composition atmosphérique, échanges avec la surface, introduction de la photochimie du méthane (composé récemment observé dans l'atmosphère de Mars par plusieurs équipes), (iv) Climat passé sur Mars : changements climatiques récents engendrés par les variations des paramètres orbitaux martiennes ; simulation du climat sur Mars, il y a plus de trois milliards d'années, (v) Simulation des champs radon martien : le modèle d'exhalaison de radon de l'IRSN sera couplé avec le MCG, de manière à simuler le champ de radon atmosphérique, en vue de préparer la mesure du radon (capteur NITON). Celle-ci apportera des informations sur la dynamique de la couche limite et sur la présence possible de glace d'eau dans les vingt premiers mètres sous la surface.

La mission Venus-Express est engagée et sera lancée fin 2005. Le SA a la charge de l'instrument SPICAV (PI : J.L.Bertaux). Un travail important sera donc fourni dans les années à venir pour préparer les séquences d'observations, pour mettre au point les outils d'étalonnage, puis pour traiter les données qui seront reçues de Vénus à partir d'avril 2006. S.Lebonnois, en tant que co-investigateur, participera aussi à la préparation des observations, puis à l'analyse des données pour les instruments PFS et VIRTIS.

Au LMD, le développement d'un modèle de circulation générale de l'atmosphère de Vénus a débuté. L'objectif est de développer pour Vénus un modèle de climat comparable aux modèles de Mars et Titan, à savoir : (i) Intégration dans le cœur dynamique d'un nouveau code radiatif, (collaboration avec Vincent Eymet et Richard Fournier, Laboratoire d'Energétique, Toulouse). (ii) Remise à jour du cœur dynamique, intégration des traceurs gérant la composition atmosphérique et les particules microphysiques. (iii) Développement en parallèle des modules photochimiques (LMD) et microphysiques (SA). Dans le cadre de la préparation des observations pour VIRTIS et PFS/Vénus-Express, nous effectuerons les premières simulations dynamiques (venue souhaitée de R.Melchiorri en post-doc). (iv) Comme pour l'atmosphère de Titan, on prévoit un rôle très important des couplages au sein du modèle : liens forts entre dynamique, composition atmosphérique, formation et évolution des nuages. La poursuite du développement du modèle se fera en interaction avec l'analyse des données de Vénus-Express, analyse à laquelle nous participerons directement.

Le projet LAVOISIER (E. Chassefière: ballons de basse altitude, avec sondage in-situ et par télédétection de l'atmosphère profonde de Vénus) a été proposé à l'ESA, mais non sélectionné. Une mission in-situ vers Vénus pourrait néanmoins voir le jour dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA.

## **II.4.2 - Interaction plasma-planète faiblement magnétisée : Echappement atmosphérique et évolution des atmosphères**

Les travaux présentés dans le rapport d'activité seront poursuivis au cours des prochaines années. Le développement simultané d'instruments de modélisation de Mars, Titan et Vénus permettra notamment une approche de planétologie comparative essentielle pour bien appréhender la complexité de l'interaction de ces planètes avec leur environnement interplanétaire.

Une partie du travail envisagé dans le cadre de l'étude de Mars, Vénus et Titan consistera dans le développement de modèles globaux couplant la description de l'exosphère avec celle de l'ionosphère et de la magnétosphère en étroite collaboration avec le CETP (G. Chanteur) pour la magnétosphère, le LPG Grenoble (J. Lilensten), l'ESA (O. Witasse) et le CESR (P.L.Blelly) pour l'ionosphère et le SA (F.Leblanc et J.Y.Chaufray) pour l'exosphère. Cet effort pour l'instant envisagé dans le cadre de Mars sera également réalisé à Titan notamment dans le cadre de CAPS/CASSINI et par un couplage entre modèles de magnétosphère et d'exosphère identique à celui réalisé pour Mars. Le développement de nouveaux modèles, pour Vénus dans la perspective de la mission Venus Express, et pour Mercure afin de préparer le programme théorique associé à la mission BepiColombo, est également envisagé.

L'autre partie du travail envisagé dans le cadre de Mars et Vénus consistera en l'exploitation des données du spectromètre UV-IR SPICAM et par la suite de SPICAV. L'étude de l'ionosphère et des émissions de l'atmosphère neutre aux hautes altitudes sera faite par F. Leblanc et J.Y. Chaufray à partir du travail de O.Witasse (ESA), J.Lilensten (LPG) et P.-L. Blelly (CESR) de prédiction des raies d'émissions de l'oxygène atomique martien (297.2 et 135.6 nm). Une étude particulière des émissions H et D sera menée par E.Quémerais ainsi que celle de l'émission de l'oxygène atomique de la couronne martienne jusqu'à la basse atmosphère. Le calcul des émissions de l'airglow de Vénus sera réalisé en étroite collaboration avec S. Lebonnois (LMD) dont l'un des projets est d'adapter le GCM de Mars au cas de Vénus.

Les développements instrumentaux dans le cadre de Mars et de l'étude de sa haute atmosphère sont principalement ceux liés à l'instrument PALOMA, dont le but est de mesurer l'atmosphère martienne à la surface de Mars et en particulier les rapports isotopiques des éléments la constituant. L'autre développement instrumental en cours est conduit au CETP par J.-J.Berthelier en collaboration avec F. Leblanc et consiste en l'étude d'un spectromètre de masse HNA adapté à la mesure des flux de particules neutres de basse énergie (quelques eVs) s'échappant de l'atmosphère martienne.

Par ailleurs, une mission orbitale martienne de type DYNAMO, embarquant des capteurs de mesure in-situ tel que HNA, et des instruments de télédétection comme un spectromètre EUV, ou un sondeur de vent thermosphérique de type HandSome (proposé par E.Quémerais sur Mars Premier) pourrait voir le jour dans un contexte NASA/SCOUT, ou ESA/AURORA (lancement : 2011). Une telle mission permettrait de caractériser en détail les processus d'échappement actuel, mais la participation des laboratoires de l'IPSL au hardware dépendra bien sûr du degré d'engagement sur d'autres projets (notamment MSL).

L'archivage des données SPICAM et plus tard SPICAV dans la base de données de l'IPSL, Centre de Données Atmosphères Planétaires (CDAP, responsable A. Sarkissian) devra être réalisé au cours des quatre années à venir.

### **II.4.3 - Magnétosphères et interactions plasma-planète**

Dans le domaine de la planétologie, les prochaines années seront marquées par deux projets phares : d'une part l'analyse des observations de CASSINI dans la magnétosphère géante de Saturne, d'autre part la préparation de la mission BEPI COLOMBO vers la magnétosphère miniature de Mercure. Au-delà des caractéristiques spécifiques de ces deux environnements planétaires, ces observations fourniront des informations importantes sur les processus à l'œuvre dans les plasmas spatiaux aux deux extrémités d'échelle.

Ce que nous connaissons aujourd'hui de la magnétosphère de Saturne provient, pour l'essentiel, des survols des sondes PIONEER 11 et VOYAGER 1-2 dans les années 1970, ainsi que de quelques observations effectuées à partir du sol ou, plus récemment, du Télescope Spatial Hubble. La magnétosphère de Saturne ressemble en partie à celle de la Terre par certaines de ses caractéristiques comme la topologie et l'intensité de son champ magnétique ou le rayonnement radioélectrique aux longueurs d'ondes kilométriques. Elle en diffère aussi très sensiblement par sa rotation rapide, comparable à celle de Jupiter, qui joue un rôle déterminant sur le transport du plasma magnétosphérique. De plus, les sources de plasma sont très différentes de l'environnement terrestre. Le vent solaire à une distance de 10 UA du Soleil est très peu dense. En revanche, Titan et l'atmosphère qui l'entoure, les satellites de glace et les anneaux, constituent autant de sources et de puits pour le plasma de la magnétosphère, et donc de termes à prendre en considération pour appréhender sa dynamique.

Titan est un objet d'un intérêt particulier puisqu'il représente le cas unique d'un corps non magnétisé dont l'atmosphère est en interaction directe avec des plasmas très distincts : vent solaire sur une partie de l'orbite et particules énergétiques de la magnétosphère sur l'autre partie. L'influence du plasma en écoulement autour de Titan contrôle très largement la dynamique et l'échappement de la partie ionisée de la haute atmosphère et l'évolution à long terme de l'atmosphère elle-même.

Lancée en 1997, la sonde CASSINI-HUYGENS est arrivée à la planète Saturne autour de laquelle elle s'est mis en orbite le 1er juillet 2004. Les 69 orbites prévues au cours des 4 années à venir vont permettre d'explorer les différentes régions de la magnétosphère depuis le voisinage de l'équateur et son système d'anneaux jusqu'aux latitudes aurorales et polaires en fin de mission. L'environnement des satellites de la planète fera l'objet d'études approfondies, en particulier celui de Titan qui sera traversé plus de 40 fois.

Le CETP participe en tant que co-investigateur à deux expériences sur CASSINI. L'expérience RPWS a pour objectifs la mesure des ondes radios et plasmas de l'environnement de Saturne. Le CETP a réalisé les capteurs magnétiques qui permettent une exploration de la gamme 0,1 Hz – 12,6 kHz. Il contribue à l'exploitation d'un sondeur à relaxation (construit par le LESIA de l'Observatoire de Meudon) qui fournit un diagnostic sur la densité et la température du plasma par méthodes actives. L'expérience CAPS pour sa part est destinée à l'étude des plasmas de

l'environnement de Saturne. Le CETP a réalisé l'optique d'un spectromètre (IMS) pour la mesure de la composition, du spectre en énergie et de la distribution angulaire des ions magnétosphériques.

Les seules mesures in-situ de l'environnement de Mercure dont nous disposons aujourd'hui sont celles obtenues lors des 2 survols de la sonde MARINER-10 en 1974 et 1975. Ces mesures ont mis en évidence l'existence d'un champ magnétique planétaire qui est suffisamment fort pour repousser le vent solaire à quelque distance de la planète. Ces mesures révèlent aussi des injections sporadiques d'électrons énergétiques (plusieurs centaines de keV), suggérant de facto l'existence de processus d'accélération efficaces. L'environnement ionisé de Mercure constitue un cas d'espèce puisque les échelles spatiales et temporelles de cette magnétosphère sont beaucoup plus petites que celles de la Terre et ses conditions aux limites (absence d'ionosphère, magnétopause à faible distance de la surface de la planète), radicalement différentes.

Ceci soulève de nombreuses questions concernant par exemple la structure à grande échelle de la magnétosphère herméenne et le développement d'une couche de plasma ou d'un courant annulaire stable, les sources et les puits des populations magnétosphériques, ou encore la dynamique de la queue de la magnétosphère et les interactions magnétosphère-exosphère-surface. Ces questions figurent parmi les nombreux objectifs scientifiques de la mission BEPI COLOMBO, identifiée comme "Pierre Angulaire" du programme scientifique de l'ESA (lancement prévu en 2012 pour une arrivée à Mercure en 2016). Cette mission conduit à une coopération étroite entre l'ESA, responsable du Mercury Planetary Orbiter (MPO) et l'agence spatiale japonaise JAXA, responsable du Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO).

La sonde MPO est dédiée à l'analyse la structure de la surface et la composition interne de la planète et à l'étude de l'exosphère. Parmi les instruments proposés, la responsabilité principale de l'expérience PHEBUS incombe au SA (PI : E. Chassefière, collaboration avec I. Yoshikawa de la JAXA et O. Korabely de l'IKI), ce qui implique la réalisation de l'architecture de l'instrument ainsi que de son intégration. Ce spectromètre dans la gamme EUV/FUV mesurera la composition et la structure de l'exosphère de Mercure ; il vise en particulier l'identification de nouveaux composants exosphériques. Le SA contribue aussi à l'expérience PICAM, sous responsabilité autrichienne (SRI, Graz), avec le développement et la construction des détecteurs en partenariat avec le CETP. Il s'agit d'un spectromètre de masse dédié à la mesure des ions planétaires présents dans l'exosphère.

La sonde MMO est plus spécifiquement dédiée à l'étude de l'environnement ionisé et de ses interactions avec les ondes électromagnétiques. En partenariat avec la JAXA, le CETP a proposé un spectromètre à temps de vol (Mass Spectrum Analyzer, MSA) permettant la mesure des fonctions de distribution 3D des ions sur de vastes gammes de masses (de 1 à 60 uma) et d'énergies (1 eV-30 keV). L'objectif est d'identifier les constituants majeurs attendus comme le sodium, l'hélium et l'oxygène, dans une moindre mesure, le potassium, le calcium et l'argon, et d'en étudier la dynamique. Le CETP participe aussi au système tri-axe d'antennes magnétiques (fluxmètres) avec la réalisation du capteur orienté parallèlement à l'axe de rotation du satellite. Ce capteur d'un nouveau type fournit la mesure de la composante magnétique axiale dans deux gammes jointives de fréquence (0,1 Hz - 20 kHz et 20 kHz - 640 kHz).

Enfin, dans le cadre de la préparation de la mission BEPICOLOMBO, des codes développés pour l'environnement terrestre ont été adaptés à la configuration de Mercure. Les travaux théoriques et numériques qui ont démarré au CETP et au SA visent à mieux comprendre l'environnement herméen et en particulier le rôle du couplage qui s'opère entre la surface, l'atmosphère, la magnétosphère de Mercure.

#### **II.4.4 - Physico-chimie atmosphérique de Titan et exobiologie**

Avec l'arrivée de la sonde Huygens dans l'atmosphère de Titan le 15/01/2005, les données collectées par les expériences ACP et GC-MS vont être traitées pour fournir les premières données directes sur la basse atmosphère de Titan et sur la composition des aérosols organiques. Ce traitement s'effectuera en utilisant, dans un premier temps, les étalonnages de laboratoire existants, et dans un second temps, des étalonnages spécifiques à mener pour affiner les informations sur les espèces gazeuses minoritaires et les aérosols. Les campagnes d'étalonnage vont donc se poursuivre, avec à moyen terme des étalonnages menés avec les modèles au sol des expériences ACP et GC-MS, axés aussi bien sur les aspects qualitatifs que quantitatifs du traitement, du fait de l'utilisation du détecteur de vol.

Pour ce qui est de la modélisation, il s'avère indispensable de s'acheminer vers un couplage complet entre dynamique atmosphérique, physique des aérosols et chimie pour comprendre le climat de Titan. A moyen terme, les objectifs prioritaires sont de mieux décrire les processus nuageux dans la troposphère et de comprendre la production des aérosols par la photochimie. A plus long terme, nous souhaiterions revenir à une description tridimensionnelle de la circulation et de la physique de Titan, et à étendre le modèle à la mésosphère. En plus de ces travaux centrés sur le MCG de l'atmosphère de Titan, nous visons à améliorer le modèle photochimique. Nous envisageons pour cela de participer à l'élaboration d'une base de données photochimiques pour les atmosphères planétaires, en collaboration avec les diverses équipes françaises intéressées par la modélisation photochimique des atmosphères planétaires. Enfin, la base de données de l'atmosphère de Titan issue du MCG, conçue et maintenue au sein du Pôle de Planétologie va permettre de renforcer les collaborations engagées, et de participer à l'analyse des données de la mission Cassini-Huygens.

L'expérience PAMPRE va continuer la production de tholins de Titan afin de générer des échantillons "représentatifs" utilisables dans le cadre des étalonnages des expériences ACP-GCMS et de l'interprétation des données des expériences de la sonde Huygens, et de déterminer de manière la plus exhaustive les propriétés physico-chimiques de ces analogues. En outre, une action spécifique va être menée pour caractériser les propriétés des analogues d'aérosols directement dans le réacteur de PAMPRE, ainsi que leur mode de production et d'évolution, et l'environnement dans lequel ils sont produits. A cette fin, un système de mesure multi-angles de la lumière diffusée par les particules produites va être adapté au réacteur. Ces mesures seront par ailleurs fortement adaptées à l'interprétation des données de diffusion des aérosols de Titan collectées par la mission Cassini-Huygens. A plus long terme, un système d'analyse in situ de la composition chimique du mélange gazeux dans le réacteur (spectrométrie de masse ou d'absorption IR) devrait également être adapté. En parallèle, des caractérisations électriques du milieu réactif seront menées au GREMI (Orléans) sur un réacteur similaire. L'ensemble de ces mesures alimenteront un modèle physico-chimique du plasma,

développé à l'Institut Polytechnique de Lisbonne. Enfin, nous sommes aussi associés au "réseau plasmas froids" du CNRS dans lequel un certain nombre d'équipes, en dehors du GREMI, travaillent aussi sur les plasmas poussiéreux. Ce travail devrait être prolongé dans le cadre d'expériences en microgravité (IMPF et ICAPS) dans la station ISS.

Dans le cas d'une sélection (mi-novembre 2004) de l'expérience SAM ou MACE pour la mission MSL09, l'IPSL développera et livrera une instrumentation de vol aux Co-PIs américains des expériences pour 2007. Pour la ou les expériences non sélectionnées, l'objectif sera d'achever le développement de modèles de démonstration pour une intégration possible dans la mission de l'ESA ExoMars. Dans une moindre mesure, d'autres techniques d'analyses (colorimétrie, spectroscopie à diode laser) pourront être étudiées.

Comme dans le cas de l'étude de Titan, le développement de simulations expérimentales spécifiques au soutien d'expériences martiennes et à l'étude de l'environnement physico-chimique de la planète apparaît important. Dans ce cadre, des expériences de laboratoires qui visent à étudier le comportement des composés organiques et de matériaux d'intérêt exobiologique potentiellement présents dans le sol de Mars aux conditions environnementales de surface de la planète devraient être développées. Ces expériences viseront également à déterminer l'influence de l'évolution de ces espèces sur la composition atmosphérique. Cette action est actuellement initiée par le développement d'une expérience conjointement avec le LISA, appelée Mars Organic Material Irradiation and Evolution (MOMIE) qui vise à étudier l'effet des radiations UV sur les espèces cibles. Une fois le programme lancé, diverses extensions seront développées entre le SA et le LISA avec une répartition équitable des activités sur les 2 laboratoires.

Par ailleurs, une étude de laboratoire est en cours de développement au SA pour étudier la possibilité de transposer la méthode ATD d'analyse minéralogique du sol de Mars (carbonates) à une analyse de type pyrolyse-SM. Cette étude repose sur un four de laboratoire récemment développé au SA et couplé à un SM de laboratoire.

Dans le cadre d'une éventuelle mission cométaire Odyssey à bas coût de la NASA, l'IPSL apportera une contribution scientifique et de compétences pour le développement d'une expérience de type pyr-CPG-SM développée par la NASA/GSFC.

Pour la pérennisation et l'évolution d'expériences d'analyse in situ à vocation exobiologique, l'achèvement des développements instrumentaux "martiens", en cas de non-sélection, devra être effectué en vue d'une intégration possible dans une prochaine mission, qu'elle soit martienne ou à destination d'autres environnements planétaires (astéroïdes géocroiseurs, satellites des planètes géantes...). De plus, des évolutions devront être opérées au travers d'actions R&T pour améliorer les performances de ces systèmes et pour les adapter aux environnements étudiés.

Enfin, afin de compléter les données sol issues des simulations expérimentales martiennes, le SA va s'impliquer dans des expériences, appelées UVolution, d'exposition de différents matériaux d'intérêt exobiologique aux conditions d'irradiation présentes en orbite terrestre, via des satellites orbitaux ou la station spatiale internationale.



## **II.4.5 - Matière primitive dans le système solaire, agglomération des grains proto-solaires aux noyaux cométaires et diffusion lumineuse par des particules irrégulières**

Les principales thématiques scientifiques peuvent être énoncées comme suit :

(i) Étude des propriétés des surfaces astéroïdales et cométaires. La connaissance des propriétés physiques de surface et sous-surface des astéroïdes, des noyaux cométaires, de Phobos et de Mercure est un objectif essentiel pour garantir le succès de missions avec des opérations d'atterrissage. L'objectif est comprendre les processus physiques qui ont marqué l'évolution de ces objets (fragmentation, impacts et hétérogénéités, température de surface et évolution thermique), et aussi d'aborder l'étude des objets de Kuiper. L'approche concerne à la fois l'observation de régolites et la simulation numérique et expérimentale de leurs propriétés physiques (porosité, distribution en taille, existence possible de glaces), grâce aux expériences passées ou présentes, PAMPRE, CODAG, PROGRA2, ICAPS-Précurseur, ICAPS-ISS.

(ii) Étude de l'évolution des particules solides interplanétaires et cométaires. L'évolution avec la distance à la source et avec les processus d'évaporation des particules cométaires (éjectées d'un noyau) et interplanétaires (d'origine cométaire ou astéroïdale) est un objectif essentiel pour résoudre des controverses actuellement très actives au niveau de la connaissance des chevelures cométaires. La réponse aux questions posées au niveau des comètes (gaz et sources étendues, présence de glaces dans la chevelure interne, taille et structure des particules solides, ...) devrait permettre de contraindre les modèles dynamiques. A cet effet, l'analyse des observations des poussières cométaires et interplanétaires, ainsi que la simulation expérimentale de particules couvertes de glaces, devront se poursuivre dans les prochaines années

(iii) Étude des risques liés aux impacts potentiels de comètes ou astéroïdes. Il s'agit là d'un thème transversal, et plus spécifiquement d'une problématique qui s'inscrit dans le contexte des études de missions (ESA) et des études de conséquences pour l'environnement et la société (ICSU). Les deux thèmes scientifiques définis ci-dessus permettent d'obtenir des informations essentielles, d'une part sur l'état de surface (présence ou non de régolite) pour assurer le succès de missions avec atterrissage sous brefs délais, d'autre part sur la structure interne (monolithes ou agrégats gravitationnels) pour modéliser l'interaction avec l'atmosphère terrestre des impacts.

Des moyens sont à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs, en particulier au niveau des simulations visant à bien documenter les propriétés de surfaces de régolites glacés sur des petits corps avant la phase critique de l'atterrissage de la mission Rosetta.

Il convient tout d'abord de souligner l'importance accrue des simulations numériques et expérimentales pour préparer les missions spatiales et l'analyse de leurs observations, liées à des processus physiques complexes. Les mesures PROGRA ont ainsi permis d'exploiter certains des résultats de OPE/Giotto ; des mesures plus élaborées sont nécessaires pour assurer l'exploitation des observations de SPICAM et préparer une stratégie propre à optimiser les observations des instruments embarqués à bord de Rosetta

Avec l'expérience de laboratoire IDA, nous prévoyons d'obtenir des particules avec dépôt de glaces constituant des analogues pour les régolites glacés planétaires (Mars, pôles de Mercure) et une première approche pour des petits corps glacés (noyaux cométaires, agrégats cométaires, objets de Kuiper). Les expériences de diffusion lumineuse vont continuer dans le contexte de développement imposé par ICAPS-IMPF à bord de la Station Spatiale Internationale. Il s'agit tout d'abord de continuer les mesures PROGRA2, en particulier avec des analogues cométaires et des simulants de régolites. Il s'agit aussi d'effectuer des mesures de diffusion lumineuse sur les particules chargées en lévitation électrostatique de l'expérience PAMPRE et d'étudier la complémentarité entre les mesures PAMPRE et PROGRA2. Il s'agit enfin de réaliser des mesures lors du ICAPS-Precurseur avec des agrégats bi-dispersés de particules de silice et carbone.

Les observations de comètes et d'objets de Kuiper, avec des télescopes nationaux ou internationaux doivent être poursuivies. Les comètes, mais aussi les astéroïdes (tels Steins, Lutetia ou Vesta), cibles des prochaines missions spatiales sont évidemment favorisés.

Un effort d'archivage et de mise en ligne de l'ensemble des données d'observation et des mesures de diffusion doit être mené. L'effort conduit par des collègues de l'Université de Leiden est à ce niveau exemplaire. Des moyens sont à identifier afin de parvenir à des résultats permettant une réelle valorisation des travaux accomplis.

#### **II.4.6 - Environnements lointains et astrophysique**

Nos projets pour l'étude du milieu interstellaire sont les suivants : (i) Établir la cartographie du gaz diffus et ionisé, qui complètera ainsi la précédente (travail en cours). (ii) Établir une carte cinématique montrant les mouvements relatifs des masses de gaz. (iii) Comparer avec les observations des émissions du gaz, notamment en radio. (iv) Comparer avec la distribution des poussières (données infrarouges, millimétrique, extinction).

L'étude développée pour l'hélium interstellaire dans le milieu interplanétaire va nous permettre une comparaison beaucoup plus raffinée avec les résultats SOHO/SWAN sur l'hydrogène atomique, et donc donner de meilleures contraintes sur l'héliosphère.

L'étude des données de SWAN se poursuit avec des activités opérationnelles (suivi des enregistrements SWAN de routine et recherches de cibles pour les temps d'observation libres), et avec l'analyse des distributions de vitesse et de leur évolution (recherche de traces de l'héliopause, effets des anisotropies solaires sur les distributions de vitesses, utilisation des modèles à l'interface avec nos collègues russes) et celle de la variation en latitude du vent solaire et de son évolution au cours du cycle (ce qui a été le moins étudié jusqu'ici). D.Koutroumpa a rejoint l'équipe scientifique de SWAN en tant que thésitive.

L'enregistrement des données Lyman alpha de Voyager dans l'héliosphère se termine. L'instrument UVS sera éteint dans les prochains mois. Deux collaborations sont en cours pour l'étude de ces données très importantes pour la compréhension de l'interface héliosphérique : l'une avec une équipe de Moscou (Lomonosov University, V.Izmodenov, Y.Malama), l'autre avec un groupe de Caltech (P.Liewer).

Nous avons modélisé l'émission X liée à l'échange de charge entre les ions de haut degré du vent solaire et les neutres interstellaires. Nos projets dans ce domaine sont tout d'abord d'étendre l'étude de l'émission X héliosphérique à d'autres systèmes d'interaction entre vent stellaire et gaz interstellaire neutre, d'établir un modèle d'émission X à l'interface nuage interstellaire neutre/ gaz chaud du halo galactique ou du centre galactique, et de rechercher la contribution de cette émission diffuse aux émissions X d'autres objets.

La poursuite des efforts sur l'AAA/EMILIE nécessite des recrutements de thésitifs en instrumentation et en observation, et l'octroi d'un certain support technique, à l'OHP en renfort de J.Schmitt (aussi Chef de Projet de SOPHIE), et au SA en électronique (effort ponctuel) et surtout en informatique, pour poursuivre le travail remarquable de S.Guibert. Notons que AAA/ EMILIE permet de mesurer les vents de Vénus avec une précision inégalée, par la mesure de l'effet Doppler du spectre solaire diffusé par les particules des nuages de Vénus.

Par ailleurs, nous mettons au point une méthode de mesure de la température à la surface des exoplanètes par photométrie différentielle infra-rouge (A. Sarkissian). Ce projet a été financé par l'IPSL et un détecteur sera opérationnel en Janvier 2005, sous condition de complément de financement. Des mesures sont prévues pour 2005 pour valider la technique proposée sur la Lune avec le soutien de la géophysique : lidar O<sub>3</sub>, T, Cirrus etc...

## II-4.7 - Perspectives

L'atelier de prospective du Pôle de Planétologie, qui a eu lieu le jeudi 18 novembre 2004, a fait ressortir la multiplicité des travaux menés par les chercheurs planétologues de l'IPSL, et des synergies croissantes entre équipes. Au plan scientifique, des liens forts se sont développés entre dynamiciens du LMD et chimistes et microphysiciens du SA. Dans le même temps, l'étude de l'interaction entre le vent solaire (ou le plasma magnétosphérique des planètes géantes) et les hautes atmosphères des planètes a fait l'objet d'une coopération accrue au sein de l'IPSL (interaction vent solaire- haute atmosphère au CETP, criblage et échappement au SA). Celle-ci a été étendue à d'autres laboratoires français de la discipline (LPG, CESR), dans le cadre d'un groupe de travail financé par le Programme National de Planétologie. Sur le plan expérimental, le Pôle de Planétologie a joué un rôle moteur dans la mise en place de l'expérience PAMPRE de synthèse en laboratoire d'aérosols analogues de Titan, et dans la conduite du projet PALOMA d'analyse isotopique de l'atmosphère de Mars, qui se concrétise déjà par un prototype de spectromètre à temps de vol miniaturisé. Ces développements s'inscrivent dans une période d'arrivée massive de données spatiales (Mars-Express, Cassini-Huygens, Venus-Express bientôt), qu'ils ont bien sûr préparée, et dont nous devons maintenant tirer les fruits.

L'échec du programme Mars PREMIER a, temporairement souhaitons-le, gelé des coopérations entamées sur des projets spatiaux d'envergure avec des partenaires tels que le LERMA et le LESIA (projet MAMBO), et les nombreux laboratoires impliqués dans le projet DYNAMO (CESR, LPG, LPCE, ...). Des collaborations ont été entamées, à l'occasion du projet NETLANDER, avec l'IPGP, et, sur PALOMA, d'autres laboratoires de Sciences de la Terre comme le MAGIE à l'UPMC. Dans le même temps, les liens avec le LISA, dans le domaine de l'exobiologie et du sondage in-situ des milieux planétaires et cométaires (COSAC), se sont renforcés. Le radar CONSERT, réalisé au

SA, mais dont le PI est au LPG, fournira des informations sur la structure du noyau cométaire, à rapprocher des études sur les processus d'agrégation des grains. La mission BEPICOLOMBO suscite, et suscitera dans les dix années à venir, des collaborations accrues entre le SA et le CETP sur la modélisation de la dynamique de l'exosphère et de la magnétosphère de Mercure. Par ailleurs, certaines activités, ne faisant pas l'objet d'une coopération au niveau IPSL, ont atteint dans les laboratoires où elles sont développées un niveau de reconnaissance élevé au plan mondial (notamment l'étude du milieu interstellaire au SA). Ces actions contribuent, tout autant que les actions fédératives, au rayonnement de nos laboratoires et du Pôle.

Cette dynamique de développement, favorisée par les rapprochements qui ont eu lieu au sein de l'IPSL, ne doit pas tout, loin s'en faut, à l'existence du Pôle de Planétologie. C'est à ses chercheurs, jeunes et moins jeunes, à leur dynamisme et à l'excellence reconnue au plan international de bon nombre d'entre eux, que l'IPSL doit la place croissante qu'il occupe dans la planétologie française. Le Pôle est toujours resté une structure souple, incitative, destinée à accroître la visibilité des activités, sans en entraver le cours par un excès de lourdeur. Son comité de pilotage, constitué d'une petite dizaine de membres, s'est réuni une à deux fois par an. Un nouveau comité sera mis en place, représentant toutes les sensibilités (équilibre entre thématiques, entre laboratoires, équilibre modélisateurs/ instrumentalistes). Le système de notes du Pôle récemment mis en route sera pérennisé, et des séminaires organisés, en profitant de la réduction du nombre de sites de 4 à 2. Le meilleur parti sera tiré de la création du Parcours de Planétologie, dans le cadre de la réforme LMD, pour installer nos laboratoires sur une base universitaire solide et structurée, tant au niveau master que doctoral. Les études ionosphériques et magnétosphériques terrestres menées au CETP, bien souvent par les mêmes chercheurs qui consacrent une partie de leur temps aux plasmas planétologiques, devront être positionnées plus clairement dans le dispositif du Pôle. Enfin le CDAP (Centre de Données Atmosphères Planétaires), installé à l'IPSL, et nœud possible du futur Centre de Données Planétaires national (CNES/INSU), a vocation à accueillir les données des expériences atmosphériques des missions spatiales en cours. Le réseau EUROPLANET, coordonné par l'Observatoire Midi-Pyrénées, fournira le lieu naturel d'une européanisation du CDAP, souhaitable à terme.

Au plan des moyens, des recrutements de chercheurs et enseignants-chercheurs, modélisateurs et instrumentalistes, seront nécessaires à un terme rapproché. L'interprétation des données Cassini (CAPS, RPWS) et Mars-Express (SPICAM, OMEGA partie atmosphère), puis Huygens (ACP) et Venus-Express (SPICAV), nécessite, au minimum, un recrutement par an dans les quatre ans qui viennent. Le développement du CDAP, et notamment de la mise en ligne des sorties de modèles, bénéficierait grandement d'un poste CNAP.

## II.5 - Mise en place et prospective du Pôle "Cycle de l'Eau"

L'étude du cycle de l'eau, de ses différentes composantes et de leurs interactions mutuelles constitue une priorité pour une meilleure compréhension de l'évolution du climat. Ce thème est l'un de ceux cités explicitement dans le projet de 6<sup>ème</sup> PCRD, et est depuis longtemps l'un des thèmes majeurs des grands programmes internationaux sur le climat (GEWEX, IGBP,...). Il fait d'ores et déjà partie des thèmes de recherche stratégiques de l'IPSL.

Les activités engagées au sein de l'IPSL concernent aussi bien les processus d'évaporation à la surface, le transport de vapeur d'eau et sa transformation dans l'atmosphère conduisant à la formation de nuages en interaction avec les particules d'aérosol, jusqu'à son retour sous forme liquide dans les précipitations, et leur impact sur le milieu sous-jacent, continental ou océanique. Les recherches effectuées par les équipes de l'IPSL reposent sur des approches différentes mais complémentaires qui vont de l'observation à échelle locale (en laboratoire ou in situ) jusqu'à l'échelle régionale et globale grâce aux missions spatiales, et de la modélisation des processus dynamiques et radiatifs de la petite échelle à la grande échelle.

La modélisation du climat est un des domaines où l'effort fédératif est le plus développé avec l'existence d'un Pôle au sein duquel le couplage des processus océaniques, continentaux et atmosphériques constitue un élément essentiel des développements. Ce pôle de Modélisation du Climat prend déjà en compte nombre d'aspects du cycle de l'eau et de ses interactions avec la dynamique des milieux. Il s'agit toutefois d'échelles de temps et d'espace assez grandes, compatibles avec la réalisation de simulations concernant de longues périodes temporelles. L'étude de la variabilité climatique, l'amélioration des prévisions et la prise en compte de paramètres critiques plus facilement accessibles par l'observation, font elles ressortir le besoin d'analyse à des échelles de temps et d'espace de plus en plus fines pour une meilleure représentation des processus et une meilleure détermination des bilans (d'eau, notamment) avec à la clé de nombreuses questions scientifiques qui gagneraient à être traitées à travers une approche coordonnée au sein de l'IPSL. A titre d'exemple, citons l'amélioration de la quantification des flux aux interfaces (surface - atmosphère ou couche limite / atmosphère libre), celle des forçages radiatifs en relation avec les nuages et les précipitations, l'initiation et le développement de la convection et les interactions résultant avec la circulation moyenne.

La mise en place de bases de données, de systèmes de traitement et de moyens d'assimilation adaptés à l'analyse de ces questions va ainsi constituer un enjeu majeur dans les années à venir. La réalisation 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, ainsi que les missions spatiales émergentes telles que l'Afternoon Train (Calipso, CloudSAT, PARASOL, Aqua, Aura, SMOS, TROPiques et GPM notamment), dans lesquelles les laboratoires de l'IPSL vont, sans aucun doute, apporter une partie des données nécessaires et fournir l'occasion de resserrer les liens entre les équipes impliquées pour mieux valoriser les travaux effectués à l'IPSL et progresser.

L'importance à l'IPSL de ces activités liées au cycle de l'eau ont conduit à la proposition de création d'un nouveau Pôle, qui permettra de regrouper les efforts engagés sur ces thèmes, offrira un

contexte large de discussion et d'échange plus favorable à la réalisation de ces travaux, et permettra l'émergence de nouveaux axes de recherche en articulation avec le Pôle de Modélisation du Climat. Cette réflexion a conduit à la rédaction d'un document fondateur sur lequel s'appuie largement cette prospective à quatre ans.

### **II.5.1 - Objectifs du Pôle**

Les forts impacts sur l'hydrologie, la végétation, les ressources en eau, d'événements comme les sécheresses, les précipitations exceptionnelles constituent autant de problèmes centraux pour notre société. Il est fondamental de mieux comprendre les phénomènes à l'origine de ces événements, pour mieux les prévoir. Les recherches dans ce domaine doivent s'intéresser aux processus de petite échelle et aller jusqu'aux échelles climatiques pour prendre en compte les différentes interactions et rétroactions.

La variabilité à différentes échelles est la signature des divers processus intervenant dans les échanges d'énergie. La compréhension de cette variabilité, qui, comme dans le cas du cycle de vie des systèmes nuageux va de la petite échelle jusqu'aux variations saisonnières, inter annuelles et décennales, (et même jusqu'aux tendances climatiques), nécessite la prise en considération de modélisations et observations à différentes échelles. Cet aspect est primordial dans la plupart de ces recherches sur les composantes du cycle de l'eau.

L'amélioration des paramétrisations des modèles de plus grande échelle est un besoin critique pour l'IPSL. C'est le cas, en particulier, pour la convection (initialisation, développement et alimentation, forçage radiatif), la formation de couches nuageuses stratifiées, la dynamique dans les régions d'interface (couche limite atmosphérique et tropopause), et les processus de surface. Les modèles à méso-échelle qui permettent d'effectuer des analyses résolues dans les mailles de ces modèles peuvent aider à cette amélioration. A plus petite échelle les modèles explicites, type LES, jouent ce rôle pour la méso-échelle.

Il est nécessaire d'utiliser conjointement les observations disponibles, qu'il s'agisse de données de missions spatiales, de satellites opérationnels, de réseaux de mesures opérationnels, de stations sols, ou encore de campagnes en mer. Ceci doit se concrétiser par le développement de méthodes de traitement spécifiques, ainsi que par l'amélioration et le prolongement des bases de données existantes. Le rôle de l'assimilation est également important dans l'analyse de données (surtout lorsqu'elles proviennent de sources très variées).

L'étude de la thématique cycle de l'eau rend donc nécessaire l'intervention et l'interaction de nombreuses compétences existant à l'IPSL. Le but du Pôle est d'organiser ces compétences autour de thèmes fédérateurs. Plusieurs thèmes généraux qui font l'objet de travaux engagés à l'IPSL, sont, de façon non-exhaustive, déjà identifiés :

- Les systèmes convectifs : initiation, alimentation, dynamique (courants de densité, intrusions sèches), microphysique, interactions d'échelles, cycle de vie, processus sommitaux et latéraux (échanges de vapeur d'eau...), précipitations et échanges d'énergie associés, forçages orographique, représentation dans les Modèles de Circulation Générale et amélioration des paramétrisations à travers les études de processus conduites par les expérimentateurs.

- Les nuages non précipitants : aspects microphysique, radiatifs, problèmes des interfaces (CLA, stratosphère) et des interactions avec les aérosols – impact des propriétés microphysiques et structurelles sur le rayonnement, extension spatiale et variabilité (bilan), forçages synoptiques, couplage avec la couche limite, interactions dynamique-rayonnement et dynamique-microphysique, changements de phase, ...
- Les échanges aux interfaces (surface, couche limite et tropopause) : transport vertical et horizontal de vapeur d'eau, incluant des questions d'échelle (hétérogénéité spatio-temporelle, rôle de la surface continentale ou marine) et les forçages thermiques, atmosphériques ou orographiques.
- Le bilan énergétique à la surface : la détermination des flux radiatifs et des flux turbulents à différentes échelles résulte des actions engagées sur les deux thèmes précédents. Cependant ceci reste un problème spécifique pour lequel des actions ciblées sont nécessaires.
- Le bilan en eau à différentes échelles spatio-temporelles : les bilans en eau à l'échelle de parcelles, de bassins hydrologiques, de systèmes convectifs, de zones climatiques sont des problèmes abordés trop souvent de manière indépendante par des spécialistes différents. Une approche combinée expérimentateurs/modélisateur est ici devenue indispensable.

## II.5.2 - Stratégie

La mise en œuvre concrète de ces thèmes fédérateurs sera effective dans des groupes de travail constitués autour de « zones atelier » ou de moyens fédérateurs où des expériences coordonnées de grande ampleur se mettent en place. Cette structure en groupe de travail sera bien entendu évolutive, avec une durée de vie limitée de ces groupes, selon les réponses apportées et les questions scientifiques émergentes à l'issue des travaux réalisés. Plusieurs zones atelier sont actuellement identifiées ainsi que deux activités transverses.

- L'impact des phénomènes tropicaux (sécheresses, moussons, cyclones) et l'importance de ces régions dans les bilans d'eau et d'énergie planétaires ont conduit à un certain nombre de programmes et projets (comme INDOEX par exemple) où, associé à d'autres partenaires, l'IPSL joue un grand rôle. Actuellement AMMA est le grand projet fédérateur des prochaines années, où la mise en œuvre du thème « bilan d'eau » sera centrale à l'IPSL. Un grand nombre de chercheurs de l'IPSL est déjà impliqué dans ce projet. Des groupes sont formés pour mieux définir les besoins, réaliser les bases de données existantes, et mettre en place des moyens d'observation sur le terrain. Ceci concerne la dynamique de la mousson (modélisation et observations à méso-échelle), la formation et la caractérisation des précipitations (groupe AMMA-précips), la documentation des débris des systèmes convectifs type cirrus et de leur impact sur la mousson (AMMA-Nuages), la restitution des champs de vapeur d'eau par satellite (AMMA-VAP), le suivi des états de surface (observation et modélisation) et leur couplage avec l'hydrologie des bassins et l'atmosphère (AMMASURF), et enfin la réalisation et l'utilisation d'une base de données constituée d'observations satellitales utiles à l'analyse des composantes du cycle de l'eau (groupe AMMA-SAT).

- L'IPSL participe à l'élaboration de projets européens destinés à étudier le bilan en eau à l'échelle du bassin méditerranéen, les tendances à l'assèchement de cette région, ainsi que l'évolution du bilan énergétique sous l'influence des perturbations anthropiques. Un tel projet entre dans le contexte des projets ciblés retenu par la Communauté Européenne. La sélection d'une proposition/participation de l'IPSL offrirait un cadre fédérateur à l'intérieur de l'IPSL compte tenu des expériences passées.
- En Ile de France, deux projets s'appuient sur les observations effectuées sur le site expérimental de l'IPSL localisé à Palaiseau (SIRTA). L'un (projet européen CLOUDNET) est ciblé sur la caractérisation des propriétés nuageuses, l'autre (projet IPSL COMPERES) offre un cadre un peu plus large alliant qualité de l'air (aérosols et étude de la CLA régionale) et vapeur d'eau et nuages. Les deux projets proposent une démarche assez similaire de comparaisons systématiques entre observations et résultats de modélisation pour l'amélioration des paramétrisations et des prévisions. Les études de qualité de l'air à l'échelle régionale impliquent également les observations effectuées sur le site du LSCE à Saclay.
- Enfin, dans la région Sud-est, un effort important est effectué par la communauté scientifique pour mieux caractériser les événements de précipitation intense (par exemple projet MAP) ayant un impact fort sur l'hydrologie régionale et des forçages liés aux reliefs pouvant conduire à des situations critiques pour les populations.

### **II.5.3 - Moyens**

L'IPSL possède un grand nombre de compétences en terme d'observations au sol, aéroportée et spatiale des composantes du cycle de l'eau. Le Pôle «Eau» constitué autour de questions scientifiques s'appuiera sur ces compétences et sur ces moyens mis en œuvre ou gérés dans le cadre du SIRTA, du centre Thématique ICARE, de son centre d'expertise IPSL, et dans le cadre de campagnes expérimentales. L'IPSL possède ou utilise également un grand nombre de moyens de modélisation numérique.

Différents moyens expérimentaux (au sol ou aéroportés) sont développés et mis en œuvre dans le cadre d'expériences de terrain. Le SIRTA implique plusieurs de ces moyens et permet déjà de conduire plusieurs activités transverses. Il permet le développement d'études méthodologiques comme l'intercomparaison de capteurs dédiés aux nuages et à la vapeur d'eau (campagne AMMA-VAP) et la validation d'observations satellitaires (POLDER, MSG, CALIPSO, ... cf II.7.4). Les grands projets vont avoir recours à une part importante de ces observations, en les utilisant de façon couplée.

Différentes missions spatiales dont les thématiques principales relèvent du cycle de l'eau et dont plusieurs investigateurs appartiennent à l'IPSL sont en préparation (Polder/Parasol, Calipso-Aqua-train, Megha-Tropiques). Des développements méthodologiques nécessaires pour une meilleure utilisation des données pourront être abordés d'une façon proche sur les ateliers régionaux et mettre en œuvre des moyens similaires incluant les données des nouvelles missions spatiales. L'existence de projets et d'actions déjà engagés définit un premier contexte sur lequel le Pôle peut s'appuyer. Une première évaluation des méthodes et des moyens communs mis en œuvre devra être effectuée.



La constitution de base de données multi-capteurs (AMMASAT, SIRTA, CALIPSO) est un moyen clé des études engagées. L'IPSL dispose déjà de moyens créés pour les études antérieures notamment : IPSL/CLIMSERV au LMD (données spatiales et le SIRTA) ; IPSL/DATASERV au CETP (données de campagnes incluant d'autres données spatiales) ; Centre de Données IPSL (réanalyses des données du Centre Européen et AMMASAT incluant AMMA-VAP). Le contexte des missions spatiales offre avec le développement par le CNES du centre thématique ICARE la possibilité de mettre en place des moyens complémentaires à l'IPSL comme centre d'expertise (AMMASAT est en fait rattaché à ICARE) et à Lille comme Centre de Gestion et de Traitement des Données.

La modélisation et l'assimilation à méso-échelle sont au centre de plusieurs activités de recherche de l'IPSL. Elles concernent l'étude des processus en chimie troposphérique, pollution atmosphérique, dynamique troposphérique (couche limite, système nuageux et précipitant, etc.), hydrologie et surfaces océaniques. Ces activités s'organisent selon 5 axes : l'exploitation de simulations à méso-échelle pour définir le contexte des campagnes d'observations, l'exploitation des simulations avec traceur lagrangien, la prévision locale pour mini-campagne (SIRTA), l'intercomparaison de sorties de modèles et d'observations en vue de leur validation, et le développement de procédures d'assimilation et leur mise en œuvre à différentes échelles (locale à régionale). Les modèles atmosphériques utilisés sont MM5, LMDZ et Méso-NH (qui constitue désormais un outil bien intégré dans les activités de l'IPSL à travers de nombreux groupes au CETP, au LMD, au SA et au LSCE).

La modélisation numérique des écoulements géologiques couplée à ceux de surface est elle basée sur l'utilisation du code Cast3m, code, souple et généraliste, qui a été utilisé dans nombre d'études prototypiques de sites naturels, et permet de faire de la modélisation distribuée à base physique à échelle locale (1-100 km<sup>2</sup>). Enfin, plusieurs chercheurs travaillent sur l'aspect assimilation à méso-échelle.

#### **II.5.4 - Mise en place du Pôle**

Plusieurs réunions ont été organisées afin d'identifier les questions scientifiques relatives aux thèmes fédérateurs indiqués précédemment, et auxquelles le Pôle pourrait répondre à courte échéance. Les discussions ont porté sur les processus physiques clés ou encore mal appréhendés dans le cycle de l'eau pour lequel le Pôle dispose de l'expertise et des moyens adaptés.

La réponse à ces questions nécessite la mise en place d'actions transverses reposant sur un dialogue scientifique entre équipes dont la complémentarité est évidente tant du point de vue de l'expertise scientifique que des moyens à mettre en œuvre. En pratique, il s'agit de définir une stratégie d'exploitation cohérente de ces moyens et de développer des méthodes d'analyse adaptées à l'étude des processus. Ces outils doivent également permettre de quantifier l'impact des processus aux échelles plus grandes et reposer sur une approche intégrative de moyens. Quatre groupes de travail ont ainsi été mis en place en plus de ceux existant dans le cadre d'AMMA. Leur rôle est de préciser les questions clés du thème concerné, de planifier les actions et développements nécessaires (exploitation

synergique de données spatiales, campagnes de terrain, analyse, etc..) pour y répondre, et de préciser les collaborations nécessaires pour atteindre ces objectifs.

*Interactions dynamique-aérosol-vapeur d'eau-nuages (Responsable C. Flamant, SA) :* Le premier de ces groupes se penche sur l'étude des processus d'interaction mis en œuvre lors du cycle de vie des nuages, entre les différentes composantes atmosphériques que sont la vapeur d'eau, les aérosols, la dynamique et les nuages. Ces processus jouent un rôle important non seulement sur le cycle de vie de ces nuages mais également sur les propriétés radiatives de l'atmosphère qui dépendent des propriétés microphysiques des aérosols et des nuages.

Ce thème fédérateur nécessite une expertise non seulement sur les différents compartiments du système intégré (eau atmosphérique, aérosols, dynamique, nuage, rayonnement), mais également à leurs interfaces (propriétés hygroscopiques des aérosols, effets direct, semi-direct et indirect des aérosols, échanges aux interfaces, etc..). L'expertise scientifique des équipes impliquées, ainsi que les outils adaptés (les instruments de recherche développés et mis en œuvre à l'IPSL, notamment) permettront de répondre à la problématique de la formation des nuages faiblement précipitants (i.e. les nuages de couche limite atmosphérique, cumulus et stratocumulus ; les nuages de moyenne altitude, altocumulus et altostratus ; et les nuages hauts, cirrus). Par ailleurs, la meilleure connaissance de ces interactions doit également permettre d'améliorer la représentation des nuages dans les modèles. Ainsi, simuler l'impact des nuages peu denses, faiblement précipitants (e.g. cumulus, stratocumulus) sur le rayonnement, la dynamique et la redistribution des constituants atmosphériques aux échelles locale, régionale et globale est devenu un enjeu majeur pour la modélisation à toutes les échelles de temps et d'espace.

*Hydrologie de bassins versants (Responsable P.Maugis, LSCE) :* Ce deuxième groupe s'intéresse à la réponse hydrologique de bassins versants aux précipitations, plus particulièrement à leurs caractéristiques spatio-temporelles. Il s'appuiera sur la mise en commun d'expertises en atmosphère, surface continentale et végétation, hydrologie et hydrogéologie. Deux actions seront nécessaires : un effort d'interfaçage de modèles représentant les différentes stratifications (atmosphère, surface, couche hydrologique, couche hydrogéologique) et une expérimentation sur un bassin versant à définir. Les différents termes du cycle de l'eau et leur représentation devront être évalués ou validés (précipitation, infiltration, ruissellement, recharge de la nappe, évaporation, etc...).

*Interaction océan-atmosphère (Responsable D.Bourras, CETP) :* Parmi les nombreux processus physiques clés ou encore mal appréhendés dans les interactions entre l'Océan et l'Atmosphère, ceux concernant l'effet des précipitations sur la surface océanique et sur les circulations océaniques de méso-échelle et leurs paramétrisations s'avèrent importants. Le Pôle dispose de l'expertise et des moyens adaptés pour y répondre mais ceci nécessite la mise en place d'actions transversales entre les différentes équipes de l'IPSL. Cet aspect pourra être abordé dans le cadre de la troisième période d'observations intensives du projet AMMA. Cependant, il nécessitera sans doute de mettre en place une campagne spécifique, à plus long terme.

*Assimilation à méso-échelle (Responsable O.Talagrand, LMD)* : Ce groupe de travail s'intéressera à l'assimilation à méso-échelle avec des activités transversales par rapport aux groupes précédents. Il devra être en interaction forte avec ces groupes afin de répondre aux enjeux scientifiques fixés. Ce groupe interagira avec les équipes impliquées dans le projet AROME. Ces activités porteront sur l'exploitation en synergie des observations sol ou aéroportées et satellitaires réalisées par l'IPSL et de la modélisation à méso-échelle. D'autres aspects pourront bien entendu être traités.

*Méditerranée (Responsable L. Li, LMD)* : Un enjeu majeur pour la période post AMMA est la réalisation d'une grande campagne internationale sur le bassin Méditerranéen. Si cette expérience est bien préparée, elle permettra, pour la première fois, d'avoir une approche globale de l'étude du cycle de l'eau dans cette région en coordonnant dès la définition des objectifs prioritaires de ce projet les différentes communautés de modélisation et d'expérimentation (climat, océan, atmosphère, chimie/aérosol, hydrologue, etc..). L'IPSL et ses partenaires se doivent de jouer un rôle clé dans cette campagne car elle couvre en grande partie les champs d'investigation possibles et peut permettre de mettre en place une approche multi-échelle et multi-thématique solide. Pour ce faire il a été décidé de mettre en place dès maintenant un groupe de travail qui définisse clairement la contribution de l'IPSL et les développements préparatoires à ce projet.

D'autres groupes de travail verront sans doute le jour assez rapidement dans le cadre de ce Pôle. On peut ainsi noter la forte demande scientifique concernant les transports d'humidité à l'interface troposphère/stratosphère et leur impact radiatif et l'émergence d'un thème transverse consacré à l'utilisation potentielle des isotopes de l'eau (deutérium et oxygène 18) dans les différents domaines mentionnés.

Enfin, l'organisation de séminaires du Pôle est une action complémentaire indispensable. Ces séminaires seront l'occasion d'inviter des chercheurs étrangers renommés qui ont déjà engagé en Europe ou aux Etats-Unis des activités transverses du type de celles que l'on veut voir apparaître dans le cadre du Pôle. D'autres journées devront être consacrées à des questions ciblées sur les travaux prioritaires du Pôle (par exemple sur les démarches couplées modélisation/observations).

Le fonctionnement du Pôle ne nécessite pas d'investissement financier majeur pour la coordination des activités. Les actions communes « concrètes » sur les bases de données (SIRTA, observations spatiales) peuvent être retenues comme liées à l'activité du Pôle et nécessiteront assez rapidement un soutien financier et en personnel de l'IPSL et des tutelles (CNES). Les besoins principaux porteront à court / moyen terme sur la mise en place du centre d'expertise ICARE lié au développement du segment sol des missions spatiales en préparation. L'exploitation optimale des données de campagnes (ou plus généralement des mesures in situ) nécessitera un effort d'homogénéisation ou d'organisation des bases de données existantes et en projet dans les diverses équipes du Pôle. Ces besoins liés au traitement des données spatiales et in situ seront traités en coordination avec le Centre de Données de l'IPSL.

## II.6 - Mise en place et prospective du Pôle Spatial et Instrumental

### II.6.1 - Introduction

L'activité spatiale constitue un des axes majeurs de la coopération entre les laboratoires de l'IPSL et les cinq laboratoires qui le composent ont, depuis de nombreuses années, consacré un potentiel humain et technique considérable à la réalisation d'expériences embarquées. Dans un grand nombre de cas, les observations spatiales sont indissociables des observations faites à partir du sol, de plates-formes aéroportées ou de ballons. Celles-ci interviennent en effet à plusieurs étapes du développement des instruments spatiaux : la réalisation et la mise en œuvre de démonstrateurs, souvent aéroportés ou sur ballons permettent, notamment dans le cas de l'observation de la Terre, une étude approfondie de la physique de la mesure et l'optimisation des performances des instruments spatiaux. Au cours de la phase initiale des missions spatiales, la validation des mesures en orbite bénéficie directement des comparaisons avec les mesures fournies par ces démonstrateurs ou par d'autres instruments spécifiques mis en œuvre au cours des campagnes sur le terrain.

Les expériences au sol ou aéroportées apportent enfin des données complémentaires, qui s'inscrivent dans la durée ou sur des périodes plus ciblées dans le temps et s'avèrent souvent indispensables pendant la phase d'exploitation scientifique. Ce sont très souvent des techniques communes qui sont mises en œuvre, et dans de nombreux cas, ce sont les mêmes équipes qui interviennent dans la recherche et dans les développements en amont et sont chargées des développements instrumentaux pour les différentes catégories d'expériences, spatiales (à partir de plates-formes aéroportées, de ballons, ou du sol). Les instruments réalisés peuvent, par la suite, évoluer vers d'autres objectifs de recherche.

La synergie entre les différentes catégories d'expériences apparaît donc bénéfique pour les ingénieurs et techniciens et, d'une façon plus générale, contribue à l'homogénéité, à la dynamique et à la compétitivité des équipes techniques.

L'ensemble de ces arguments milite à l'évidence pour la constitution d'un Pôle Spatial et Instrumental (PSI) fédérant les équipes techniques des laboratoires qui participent au développement des instruments spatiaux ou des moyens sol et aéroportés et aux grandes campagnes d'observation. Traduisant dans les faits la part croissante des projets coopératifs, il répond au souhait des tutelles, CNRS et Université, et à celui du CNES en particulier de voir se constituer une entité qui permettrait de coordonner dans de nombreux domaines les activités instrumentales des laboratoires de l'IPSL comme cela se fait déjà sur le plan scientifique grâce aux pôles thématiques.

Le PSI a ainsi pour vocation de fédérer les moyens humains et techniques des laboratoires pour réaliser les observations ou développer des compétences nouvelles au bénéfice des thématiques scientifiques qui s'expriment au sein des pôles scientifiques de l'IPSL ou au sein des laboratoires. La mise en place du PSI, par l'éventail des compétences et des besoins techniques qui s'y exprimeront, devrait aussi permettre des échanges plus nombreux avec le monde industriel. Le dispositif doit rester proche des chercheurs qui, dans le domaine spatial en particulier, prennent une part déterminante à la conception des expériences.

En outre, les études expérimentales s'accompagnent, dans les laboratoires ou dans les pôles thématiques, de travaux de modélisation et de simulation numérique, dont les objectifs principaux sont d'étudier la physique des processus, d'analyser leur variabilité aux différentes échelles, d'améliorer les paramétrisations et de préparer les outils d'assimilation de données dans des modèles globaux. Le développement de techniques d'observations ou de méthodes de traitement nouvelles repose pour une part sur l'exploitation et l'analyse des données existantes qui sont regroupées dans les bases de données.

Les travaux qui seront entrepris au PSI nécessitent donc d'être traités à travers une approche coordonnée qui maintienne des interactions fortes entre les équipes expérimentales, les modélisateurs et les équipes chargées des bases de données tout en offrant une ouverture sur le monde industriel. Cette large collaboration est d'ailleurs la vocation d'un institut comme l'IPSL et le PSI doit être doté des moyens que nécessite cette approche dans son organisation et son fonctionnement.

## **II.6.2 - Atouts et forces de l'IPSL dans le domaine spatial et instrumental**

Depuis de nombreuses années, la recherche et la mise au point de méthodes de mesure originales, la réalisation d'instruments innovants mis en œuvre à partir du sol, de plates-formes aéroportées ou sur satellites, et la validation des observations spatiales par des démonstrateurs ont donné aux laboratoires de l'IPSL une solide compétence dans un large domaine instrumental. Sans vouloir établir une liste exhaustive, nous pouvons citer :

- les capteurs pour les mesures in situ sous ballon,
- les systèmes optiques (lidars, radiomètres, spectromètres, imageurs...) pour les mesures au sol, sous ballon et aéroportées,
- les systèmes hyperfréquence (radars, radiomètres) pour les mesures au sol et aéroportées,
- les antennes pour la mesure des champs électriques et magnétiques, la spectrométrie de masse dans les plasmas et milieux peu denses et les analyseurs de particules énergiques,
- les capteurs pour la mesure in situ dans l'océan (sur mouillages, bouées dérivantes, navires)
- les analyses en laboratoire (chimie, spectrométrie de masse,...).

*II.6.2.1 - Instrumentation Spatiale* : Historiquement le SA, le LMD, et le CETP ont été les trois laboratoires pionniers dans le cadre des missions spatiales européennes, américaines ou soviétiques. On peut citer plusieurs missions ayant donné lieu à des développements instrumentaux spécifiques : MWR (radiomètre hyperfréquence installé sur ERS et ENVISAT) ; SCARAB, radiomètre infrarouge sur METEOR ; Alissa (système lidar) sur la station MIR pour l'étude de la structure nuageuse ; GOMOS, spectromètre UV, visible et proche IR sur Envisat permettant notamment la mesure d'ozone par occultation stellaire ; DEMETER (sondes de mesure du champ électrique) pour la détection des perturbations ionosphériques liées à l'activité sismique ; SWAN (cellule de mesure du flux Lyman alpha émis par l'hydrogène et le deutérium) pour l'étude des anisotropies du vent solaire ; ACP (système de prélèvement et de pyrolyse des aérosols) sur Cassini/Huygens pour la détermination de la composition chimique des aérosols de l'atmosphère de Titan ; CLUSTER (système de mesure

du champ magnétique) pour l'étude de l'interface magnétosphère de la Terre et du vent solaire ; COSAC (système de prélèvement et d'analyse par chromatographie) pour l'analyse moléculaire des matériaux constituant la surface et le sous-sol du noyau cométaire ; SPICAM pour l'étude de l'atmosphère de Mars et CAPS (contribution au spectromètre de masse ionique) sur Cassini pour l'étude de la magnétosphère de Saturne.

*II.6.2.2 - Instrumentation Sol et sur Avion, Ballon ou Fusées:* A partir des années 70, de nouveaux moyens d'observation au sol ont été développés pour les mesures atmosphériques, au CETP (radars, radiomètres) puis au SA et au LMD (lidars, radiomètres, spectrophotomètres).

<b>Moyens</b>	<b>Laboratoire</b>	<b>Paramètres mesurés</b>	<b>Mode d'utilisation</b>	<b>Commentaires</b>
<b>Radars</b> Ronsard, Rasta Astria, Ressac Storm, René Erasme	<b>CETP</b>	Dynamique, Précipitations, Surface, vent de surface (océan)	Sol, campagne avion	<u>Campagnes</u> TOGA-COARE, FASTEX, MAP, IHOP, AMMA Validation CloudSat
<b>Lidars</b> Leandre 1 et 2 Alto, Rameau LNA, LVT LESAA, Emil Wind	<b>LMD</b> <b>SA</b> <b>LSCE</b>	Dynamique, Aérosols, Ozone, Vapeur d'eau	sol, campagnes, avion	<u>Campagnes</u> MAP, IHOP AMMA Validation Calipso Réseau Sol
<b>Radiométrie / spectrométrie</b> Vis, IR, $\mu$ W	<b>CETP</b> <b>LMD</b> <b>SA</b>	H <sub>2</sub> O, LWP, WVP  O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	Sol, SIRTa, Ballons	Réseau SAOZ Validation Satellite
<b>GPS</b>	<b>SA-IGN</b>	Eau précipitable	<b>SOL</b>	Méthodologie de Couplage avec lidar
<b>Sodars</b> Anémomètres P, T, u Hygromètre	<b>CETP</b>  <b>LMD</b>	Flux turbulents Dynamique Thermodynamique, Profils H <sub>2</sub> O	Sol, Bateau campagnes Avion, ballon Campagnes	Mesures in situ CLA SIRTa Campagnes
<b>Diodes laser</b>	<b>SA</b>	H <sub>2</sub> O, autres gaz	Avion, ballon, Campagnes	Dév. M55 avion haute altitude
Analyse isotopes	<b>LSCE</b>	HDO	Campagnes	
Bouée CARIOCA, Capteur de salinité SURFACT, bouée YOYO	<b>LOCEAN</b>	Flux de CO <sub>2</sub> Salinité de surface  Profil vertical T, S	Campagnes, suivi long terme, Réseau de mesure, campagne mouillage	Mesures in situ, Complément mesure spatiale préparation SMOS Campagne, intérêt pour l'altimétrie
Boucle de courant, Magnétomètre 10 cm	<b>CETP</b>	Fluctuations magnétiques et densité de courant dans les cornets polaires	Fusée	Validation spatiale Co-développement LPCE

**Table II.6.1 :** Moyens expérimentaux développés à l'IPSL pour les observations au sol ou embarqués sur avion, sous ballon et sur fusée

Les années 80 et 90 ont vu la mise en place de ces observations en réseau au sol (réseau NDSC) puis à bord d'avions (lidar et radar). En ce qui concerne l'océan, le LODyC a développé, dans le même temps, des instruments de mesure (capteur de mesure de pression partielle de CO<sub>2</sub> sur bouée dérivante, bouée de sub-surface YOYO). Récemment, le CETP s'est impliqué dans des projets de fusées afin de qualifier de nouveaux concepts instrumentaux.

Conçus au départ comme outils de recherche dans le cadre d'études de processus, bon nombre de ces instruments ont également un intérêt certain comme démonstrateurs de nouvelles techniques embarquables sur satellite, ou comme instrument d'observation complémentaire. L'exemple le plus récent est celui des instruments utilisés pour la préparation et la validation de plusieurs satellites constituant l'AQUA-Train. La table II.6.1 présente une partie des instruments développés, au sein des laboratoires de l'IPSL, dans ce cadre et plus largement pour les campagnes de mesure.

L'IPSL a la volonté de maintenir la dynamique et la compétence technique et instrumentale qui lui ont permis depuis de nombreuses années d'être une force de proposition au sein de la communauté internationale et qui garantissent sa compétitivité.

Avant de terminer ce chapitre nous rappelons les liens qui se sont créés entre les activités de développement instrumental et d'autres activités menées dans l'IPSL ou à l'extérieur :

- avec les équipes de modélisation, celles, en particulier, du Pôle de Modélisation du Climat dont le rôle pour aider à l'interprétation des données et à leur assimilation dans les modèles est de première importance.
- avec les moyens d'observation au sol et notamment le SIRTA qui fournit un support souvent essentiel pour les essais initiaux, la validation et la comparaison avec d'autres mesures des nouvelles techniques d'observations développées au sein du PSI.
- avec les entités chargées de la constitution et de la gestion des bases de données comme ETHER et ICARE qui permettent une exploitation optimale des observations et fournissent, grâce aux jeux de données dont elles disposent et à leurs moyens de calcul, un support essentiel pendant la phase de développement et de mise au point des instruments nouveaux.

Le maintien des liens étroits qui se sont développés par le passé avec ces autres équipes est une des conditions d'un fonctionnement efficace du PSI.

### **II.6.3 - Projets en cours et Perspectives**

Nous présentons dans ce chapitre les projets en cours ou déjà sélectionnés et leurs implications pour le PSI y compris, le cas échéant, les campagnes de mesures corrélées. Nous avons aussi recensé parmi les perspectives à plus long terme celles qui demandent, à court ou à moyen terme, un travail de préparation ou de validation des concepts et doivent donc être prises en compte pour évaluer le plan de charge des équipes qui constituent le PSI.

**II.6.3.1 - Missions Spatiales** : Dans le cadre des missions spatiales identifiées, la participation des équipes de l'IPSL comprend en général, les études de mission, la conception de certains capteurs et la réalisation de démonstrateurs au sol ou aéroportés, la définition d'algorithmes de traitement, la validation des données et produits fournis après lancement et l'exploitation des données.

La démarche scientifique s'appuie donc sur une approche coordonnée entre observations et modélisation qui, au sein de l'IPSL, est favorisée par les interactions entre les différents laboratoires et les pôles thématiques.

#### **II.6.3.1.1 - Atmosphère, Climat et Environnement**

*a) Cycle de l'eau* : D'une façon générale, les campagnes permettent une validation détaillée des mesures spatiales et, en retour, celles-ci fournissent le cadre global sur lequel doit s'appuyer une exploitation scientifique optimale. Outre son activité dans le domaine des expériences au sol et aéroportées, l'IPSL s'est ainsi fortement impliqué dans les missions spatiales dédiées à l'étude du cycle de l'eau qui existent (METEOSAT, TOVS, TRMM) ou qui seront lancées entre 2005 et 2010 : CALIPSO, CLOUDSAT, MEGHA-TROPIQUES, MSG, METOP/IASI puis EARTHCARE pour le cycle de l'eau atmosphérique (vapeur d'eau, nuages et précipitations) et le bilan radiatif, et SMOS pour l'humidité de surface.

L'exemple du programme international AMMA dédié à l'étude de la mousson africaine est un exemple de la très large couverture scientifique et observationnelle mise en œuvre lors des grandes campagnes coordonnées. Elle concerne de nombreux aspects scientifiques pour l'atmosphère et aussi l'océan, et implique la constitution de base de données (mises en place au centre d'expertise ICARE)

De nombreux projets qui peuvent avoir des retombées sur l'activité du PSI dans différents domaines ont été proposés, ou sont en discussion :

**Nuages** : Au delà de la mission CALIPSO (lancement prévu en 2005 avec une durée de vie de 2 à 3 ans) et de l'utilisation des données dans le cadre d'AMMA, l'amélioration de la climatologie des nuages reste un besoin qui implique des observations sur de longues durées. La mission AEOLUS (lancement prévu 2007 avec une durée de vie de 5 ans) retenue par l'ASE comme « core mission » principalement dédiée à l'amélioration des prévisions par assimilation des mesures de vent, doit être une seconde étape dans ce domaine. Au delà de 2010-2012 et avant de passer à l'étape opérationnelle, la mission EARTHCARE est proposée conjointement par l'ASE et la JAXA. Entre temps, d'autres missions qui prévoient l'emport d'expériences actives (lidars, radars) dédiées à des objectifs similaires (poursuite de Calipso ou de CloudSat) ou différents (mesures de CO<sub>2</sub>), et auxquelles l'IPSL serait associé, pourraient apporter une contribution à la climatologie des nuages.

**Vapeur d'eau troposphérique et altimétrie en région côtière ou continentale** : mesure de la colonne (ou du profil) avec une bonne résolution horizontale. Plusieurs satellites permettent d'effectuer des mesures du contenu en vapeur d'eau intégrée tels par exemple SSM/I



(surtout sur mer) ainsi que MODIS et/ou POLDER (sur Terre). Les données de sondeurs spatiaux tels que AIRS, IASI, AMSU, sont maintenant destinées à être directement assimilées dans des modèles. De façon prospective, et avec l'objectif de réaliser des observations à méso-échelle depuis l'espace, plusieurs missions, programmées ou proposées, nécessitent des mesures précises de la quantité ou des profils de vapeur d'eau dans les basses couches :

- L'altimétrie océanique dans le domaine côtier. Ces régions très hétérogènes en ce qui concerne l'humidité sont sujettes à des changements rapides (cycle diurne), et les mesures actuelles sont très insuffisantes. La stratégie proposée dans ce domaine consiste à tirer parti des mesures spatiales disponibles (AIRS, IASI, AMSU) pour tester ou approfondir les concepts expérimentaux nouveaux avant d'entreprendre un développement instrumental.
- Les missions opérationnelles telles que METOP où a priori les mesures à basse altitude sont moins précises en raison de l'absence d'information sur la position de la surface et sur le sommet de la couche limite atmosphérique, et d'une résolution verticale limitée à 1-2 km. La caractérisation du transport d'humidité dans les basses couches, notamment par le flux de mousson, est un enjeu important pour de nombreux pays dans la ceinture tropicale.
- Le développement d'une mission spatiale visant à mesurer le profil de vapeur d'eau dans les basses couches passe par la mise en œuvre d'un LIDAR spatial effectuant des mesures de vapeur d'eau avec une résolution horizontale kilométrique, permettant d'accéder à la variabilité et au transport de la vapeur d'eau dans les basses couches, entre 0 et 5 km. Ce type de mission doit être encore être mûri par une phase O/A plus approfondie et, en cas de sélection, impliquera le démarrage d'actions de R et T.

**Hydrologie** : Les propositions de mesure des écoulements à la surface par lidar impliquent le développement de mesures Doppler similaires à celles réalisées pour l'atmosphère. Le prototype pourrait être développé à partir des technologies Télécom utilisant des lasers fibrés par exemple ou bien l'émetteur Laser à base d'OPO dans le cas de la mesure de CO<sub>2</sub>.

- Les perspectives d'utilisation de la mission SMOS (radiométrie en bande L) pour l'étude du bilan hydrique de surface sont très prometteuses. Cependant il reste de nombreuses questions à résoudre en physique de la mesure (interprétation du signal sur zones à couvert dense, zones urbaines,...), dans les algorithmes d'inversion et méthodes de traitement des données (agrégation/désagrégation, assimilation), questions que l'IPSL devra s'attacher à résoudre dans les prochaines années. Ces objectifs pourront s'appuyer sur des observations aéroportées avec un radiomètre en bande L combiné à des observations par radar aéroporté, pour séparer les effets de rugosité et d'humidité dans le signal.

**b) Dynamique de l'atmosphère** : La mission AEOLUS, qui repose sur l'utilisation de la technique lidar à effet Doppler, doit permettre une mesure directe du champ de vent depuis l'espace. Des mesures complémentaires pourraient être obtenues en utilisant le concept VIVA où le vent est mesuré par effet Doppler passif en comparant le spectre solaire direct et le spectre diffusé par les

molécules ou les particules atmosphériques, en particulier les nuages. L'instrument correspondant doit faire l'objet d'études amont par simulation et démonstrateur aéroporté éventuellement.

**c) Ozone Stratosphérique** : L'étude à long terme du bilan de l'ozone stratosphérique sera fondée sur les mesures d'ozone total par les instruments TOMS et GOME, les mesures du profil vertical d'ozone par les instruments SBUV, GOME, ODIN, SAGE 2 et 3, et OMI sur le satellite AURA. Les nouveaux jeux de données satellitaires offrent en outre l'opportunité d'accéder à la mesure de la quasi-totalité des espèces azotées, et des constituants avec lesquels elles interagissent. Dans ce domaine, l'IPSL a un rôle majeur à jouer en intervenant sur :

- la surveillance de l'ozone et des variables associées (température, aérosols, NO<sub>2</sub>) dans le cadre du réseau NDSC/SAOZ.
- l'extension des études à l'échelle globale par l'exploitation des données des différents satellites en orbite, en particulier GOMOS sur ENVISAT et ODIN ;
- les études des processus chimiques, dynamiques et radiatifs affectant l'équilibre de la couche d'ozone (expériences sous ballons stratosphériques).

Ces études s'appuient également sur des efforts de modélisation de la chimie et de la dynamique stratosphérique (modèles Reprobus, MIMOSA et LMDz étendu à la stratosphère) ainsi que sur l'assimilation de données.

La pérennisation des observations au-delà d'ENVISAT et d'AURA n'est pas actuellement assurée, mais de nouvelles missions impliquant notamment des plates-formes de taille réduite (microsatellite dédié) sont en discussion.

L'IPSL participera activement au projet intégré européen SCOUT-O3 qui abordera les problèmes de transferts entre haute troposphère et basse stratosphère (UTLS) : campagnes de mesures en ballons de longue durée et exploitation des données ENVISAT pour la composition chimique, CALIPSO pour les nuages fins (cirrus) ainsi que GOMOS pour l'ozone.

**d) Branche atmosphérique du cycle du carbone et du gaz carbonique** : Un effort commun a été entrepris entre le LSCE et le LMD pour valider les observations satellitaires actuelles (TOVS, AIRS) à partir de mesures aéroportées, notamment celles qui seront obtenues lors des campagnes de mesure de l'observatoire RAMCES. Cependant, le meilleur moyen pour valider une mesure par satellite de la concentration en colonne reste actuellement le spectrophotomètre solaire. L'instrument vise le soleil et acquiert un spectre à très haute résolution spectrale dont la profondeur des raies d'absorption peut être reliée au profil de concentration intégré sur la colonne. Les incertitudes de cette mesure en visée directe solaire sont nettement plus faibles que celles de la mesure spatiale.

Ainsi, nous proposons de participer à la validation de l'instrument OCO (Orbital Carbon Observatory) dédié à la mesure de la colonne atmosphérique de CO<sub>2</sub>, que la NASA prévoit de lancer en 2007. Le dossier est actuellement en cours d'instruction et demandera une forte participation du CNES dans le cadre du soutien au pôle spatial de l'IPSL : participation aux campagnes de validation, installation de moyens nouveaux.

Par ailleurs, trois laboratoires de l'IPSL : LMD, SA et LSCE, travaillent en collaboration avec des industriels (Alcatel et Noveltis) sur une étude pour l'ESA. Cette étude concerne l'intérêt d'utiliser en orbite à l'horizon 2010 un Lidar DIAL pour la mesure précise du contenu total en gaz carbonique ou du contenu intégré dans la couche limite. L'étude doit permettre de comparer les avantages et les inconvénients de cette expérience par rapport à ceux des mesures radiométriques passives comme AIRS, IASI et OCO. Si elle donne satisfaction, elle devrait être suivie d'une étude de phase A. Dans ce cas, l'IPSL devra se positionner et décider, le cas échéant, de poursuivre les études entreprises avant de passer la main aux industriels en phase B par exemple.

**e) Pollution et chimie atmosphérique** : L'IPSL est déjà largement impliqué dans cette thématique qu'il entend continuer à développer autour d'un certain nombre d'axes de recherche centrés, d'une part, sur l'étude expérimentale de processus physiques et physico-chimiques et, d'autre part, sur de nouvelles avancées dans le domaine de la modélisation numérique. Le couplage entre observations et modélisation est ici également une priorité.

A la suite des campagnes ESQUIF en Ile de France, de nouveaux projets émergent tel celui "Pollution de l'air en Ile de France" dédié à l'interaction avec la surface et au rôle de la chimie rapide. Couplée à la modélisation (utilisation indirecte ou assimilation), l'analyse des données de missions spatiales doit, dans un futur proche, permettre d'apporter de nouvelles informations sur l'évolution spatio-temporelle des polluants. Dans ce domaine, même si les missions spatiales actuelles telles qu'ENVISAT ou AQUA-Train permettent d'offrir une meilleure vision spatiale à un moment donné, de nouvelles missions doivent être développées pour accéder à l'évolution temporelle. Le couplage avec MSG (Meteosat Second Generation) est une première étape avant le développement d'une mission spécifique impliquant des observations dédiées sur un satellite géostationnaire.

La détermination de la température, de l'humidité et de diverses espèces chimiques pour la surveillance de la pollution troposphérique depuis l'orbite géostationnaire apparaît de plus en plus comme le défi à relever aussi bien en hyper-fréquences que dans le domaine de la haute résolution spectrale. Une première proposition incluant un spectromètre à transformée de Fourier dans l'infrarouge thermique et moyen (FTIR), un spectromètre à réseau UV-visible type GOME, et un détecteur de nuages « intelligent » a été présentée en réponse à l'appel à propositions ESA pour des missions d'opportunité en 2001.

### **II.6.3.1.2 - Océanographie**

**a) Dynamique océanique** : L'importance de l'observation spatiale pour le suivi de la circulation océanique a été largement illustrée par le projet MERCATOR. Les mesures de hauteur de la mer par altimétrie (TOPEX/POSEIDON et JASON ainsi que par ERS et ENVISAT) font, à l'IPSL, l'objet d'études spécifiques.

Dans un futur proche, les mesures de surface également indispensables pour évaluer le forçage de la circulation océanique et pour valider les modèles (température et vent de surface), seront complétées par les mesures de salinité déduites de SMOS. Les travaux menés à l'IPSL dans le cadre de cette mission ont porté sur l'étude de faisabilité, sur le développement d'un démonstrateur et l'évaluation des performances attendues à travers des expériences dédiées (développement et mise en

œuvre de capteurs de salinité dérivants) et sur les méthodes d'inversion. Après le lancement, l'IPSL participera à l'étalonnage et la validation en vol des mesures.

**b) Surface de l'Océan et Océan peu profond** : Un point sur lequel l'IPSL entend maintenir une activité liée au spatial concerne l'aspect « rugosité de surface », paramètre caractérisant à la fois le vent de surface, le flux de quantité de mouvement, et les grandes vagues (houle). Les projets futurs sont liés aux projets de mission AltiKa (altimétrie à haute résolution en bande Ka) et SWIMSAT (mesure des vagues, du vent et des caractéristiques statistiques de la rugosité de surface), tous deux bien positionnés dans les priorités ou recommandations des agences spatiales.

La mission SWIMSAT, dédiée à la caractérisation de l'état de la mer (spectre de vagues, vent et caractéristiques statistiques de la surface), a été classée 4<sup>ème</sup> dans le cadre de l'appel d'offres Earth Explorer Opportunity Missions en 2001. Selon les opportunités des futurs appels d'offres, cette mission sera très probablement re-proposée en y apportant les évolutions nécessaires. Des progrès importants ont été faits ces dernières années à la fois sur l'assimilation des données et sur les technologies nécessaires à la réalisation de cet instrument, qui aujourd'hui sont disponibles.

Au-delà de SWIMSAT et de la mission SMOS (lancement prévu en 2008), l'IPSL devrait continuer à être une force de proposition pour des missions visant à mieux connaître les caractéristiques de la surface océanique (salinité, vent, vagues, courants, hauteur dynamique, couleur). Cette connaissance est indispensable pour mieux comprendre et paramétrer les échanges d'énergie et de matière entre l'océan et atmosphère, ainsi que les processus dynamiques et bio-géochimiques dans l'océan.

A l'interface avec les études menées sur les cycles bio-géochimiques dans l'atmosphère, le rôle de la biosphère marine dans le cycle du carbone est l'objet du modèle couplé OPA (Océan Parallélisé). La composante bio-géochimie s'appuie sur les études de processus (campagnes de mesures) et l'exploitation des mesures satellitaires, notamment de couleur de la mer (SEAWIFS, MODIS, MERIS).

**II.6.3.1.3 - Relations Soleil -Terre et Plasmas Terrestres** : Nous rappelons pour mémoire le projet de micro-satellite PICARD, qui va mobiliser une équipe importante du SA pour un lancement en 2007.

Deux missions américaines multi-satellites sont actuellement prévues dans le domaine des *plasmas terrestres*. La première, THEMIS, est dédiée à l'étude de la dynamique de la queue de la magnétosphère et des instabilités qui sont à l'origine du déclenchement des sous-orages magnétosphériques. La seconde, MMS, qui s'intéresse aussi à la physique magnétosphérique est davantage axée sur l'étude microphysique des phénomènes de reconnections et d'instabilités sur la magnétopause et au niveau de la couche de courant de la queue de la magnétosphère. Le CETP fournit les antennes magnétiques qui équipent les 5 satellites de la mission THEMIS dont le lancement est prévu en 2006. En ce qui concerne MMS, qui fait l'objet d'une étude de phase A pour un lancement prévu actuellement entre 2009 et 2012, les équipes du CETP participent à l'un des deux consortia chargés de cette étude. Le processus de sélection est en cours.

Citons également le projet de micro-satellite TARANIS, actuellement en phase A et dont l'objectif est d'étudier le couplage électrique entre les foyers orageux dans la haute troposphère et l'ionosphère, ainsi que l'impact des particules solaires. L'aspect multidisciplinaire de ce projet qui associe les phénomènes météorologiques majeurs que constituent les orages troposphériques et la physique des plasmas de la basse ionosphère, apparaît d'un intérêt particulier pour l'IPSL.

**II.6.3.1.4 - Planétologie et Plasmas du Système Solaire** : Dans le domaine planétaire, plusieurs programmes majeurs déjà en orbite vont fournir une quantité considérable de données nouvelles dans les quelques prochaines années. Outre la mission CASSINI / HUYGENS qui a entamé en 2004 sa phase opérationnelle et explorera la magnétosphère de Saturne et l'atmosphère de Titan, les missions MARS-Express puis VENUS-Express vont fournir des observations totalement nouvelles de l'atmosphère de ces deux planètes telluriques dont l'évolution a été radicalement différente de celle de la Terre. A plus long terme, à partir de 2013, la mission ROSETTA entamera sa phase opérationnelle par son rendez-vous avec la comète Churyumov-Gerasimenko.

*a) Exploration de Mars* : En ce qui concerne l'exploration des planètes telluriques, l'IPSL a, sur la mission Mars Express de l'ESA, la responsabilité d'une expérience d'étude de l'atmosphère par occultation stellaire (SPICAM). Cette expérience, dont l'interprétation va nécessiter l'utilisation couplée de modèles chimiques et dynamiques de l'atmosphère de Mars, constitue un vecteur important de rapprochement entre chercheurs du SA et du LMD. A l'horizon 2009 ou 2011, l'expérience de radar à pénétration de sol WISDOM (CETP) a été sélectionnée pour la charge utile PASTEUR de la mission EXOMARS (programme AURORA de l'ESA). L'expérience PALOMA (SA et CETP) dont un prototype final devrait voir le jour à l'automne 2005 est un instrument complexe qui vise à réaliser, avec une précision supérieure d'un ordre de grandeur à celle des précédentes mesures de Viking, la mesure des rapports isotopiques des gaz rares et des éléments principaux de l'atmosphère martienne. Elle a été proposée dans le cadre de MSL 2009 et pourrait aussi faire partie des objectifs d'un futur programme global d'étude de l'évolution à long terme de l'atmosphère martienne comprenant à la fois un satellite aéronautique et des mesures à la surface. La plupart des expériences qui avaient fait l'objet de premières études de R et T ou de préparation de mission dans le cadre de la proposition DYNAMO soumise par l'IPSL dans le cadre du programme MARS PREMIER seraient parfaitement placées pour une sélection et demanderont donc un important travail de prototypage et d'essais en laboratoire. D'autres projets de mesure in situ (par GCMS -SAM, diodes lasers accordables, spectrométrie de masse laser), sont également à l'étude dans les laboratoires. Enfin, à la suite de l'abandon du projet NETLANDER par le CNES, un groupe de travail auquel participent notamment trois laboratoires américains leaders dans le domaine (JPL, SwRI, LPI) et les 2 instituts français qui avaient une participation majeure dans NETLANDER (IPSL et IPG), s'est constitué pour préparer une éventuelle mission dédiée à la recherche et à la caractérisation des réservoirs hydriques et à l'étude de la structure profonde de la planète. Les travaux préparatoires comprennent en particulier une série de campagnes de mesure sur des analogues martiens (déserts, Arctique Canadien, Sibérie) permettant de comparer les possibilités des différentes méthodes d'exploration électromagnétique.

*b) Vénus* : L'expérience SPICAV (similaire à SPICAM) doit voler en 2005 sur la mission Venus-Express, rapidement décidée par l'ESA en 2002. Un travail d'exploitation similaire à celui entrepris pour Mars devra donc être réalisé pour Vénus.

*c) Mercure, la mission BEPI COLOMBO* : La mission BEPI COLOMBO réalisée conjointement par l'ESA et la JAXA et définitivement sélectionnée en 2004 pour un lancement en 2012, comprend deux orbiteurs. Le Mercury Planetary Orbiter (MPO sous la responsabilité de l'ESA) est dédié à des objectifs spécifiquement planétaires tandis que le second, Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO sous la responsabilité de la JAXA), s'intéresse à l'étude de la magnétosphère. Le CETP et le SA sont fortement impliqués dans cette mission avec deux expériences sélectionnées sur MMO (spectromètre de masse ionique IMSA/MPPE et antennes magnétiques du consortium PWI), et deux également sur MPO, l'une pour l'étude de l'exosphère par spectrométrie UV (PHEBUS), l'autre pour l'analyse des ions d'origine planétaires (PICAM/SERENA). La compréhension des processus de production de l'atmosphère de Mercure par érosion du régolite, de l'interaction entre cette atmosphère ténue et le vent solaire en présence d'un champ magnétique planétaire, des mécanismes de transport et de perte de l'atmosphère vers l'espace, constitue un nouvel axe de rapprochement entre spécialistes des atmosphères neutres du SA et plasmiciens du CETP et offre l'occasion d'une synergie forte qui se manifeste par la mise en place d'équipes intégrées au sein de l'IPSL.

Il faut également signaler, pour l'avenir à moyen terme, deux missions solaires : Solar Orbiter de l'ASE, sur lequel le CETP a proposé une participation concernant le traitement à bord, devrait être lancé en 2012 et le redémarrage probable du projet de Sonde Solaire de la NASA qui intéressera les équipes plasma du CETP ainsi qu'une équipe du SA. Il s'agit d'un projet fédérateur dans lequel la communauté française s'était fortement impliquée lors d'un premier appel d'offre.

Enfin, aux missions spatiales décrites ci-dessus, il faut ajouter les observatoires au sol, et notamment l'accéléromètre absolu développé par P.Connes au SA, utilisé à l'OHP pour rechercher et caractériser les planètes extra-solaires.

### **II.6.3.2 - Observations au Sol, Aéroportées, sous Ballon et à bord de Fusées :**

L'étude et le développement d'expériences au sol, ou embarquées sur des plates-formes aéroportées (avions, hélicoptères), sous des ballons stratosphériques ainsi qu'à bord de fusées, correspondent à 3 objectifs principaux :

- la nécessité d'améliorer la qualité des mesures existantes (précision, sensibilité, résolution) et de mettre au point des méthodes de mesure innovantes pour accéder à de nouveaux paramètres.
- une aide à la préparation des expériences spatiales puis à leur validation en vol par la mise en œuvre de démonstrateurs le plus souvent aéroportés.
- la mise en œuvre d'instruments ayant une vocation pérenne afin de réaliser de longues séries d'observation dans le cadre des observatoires ou d'être impliqués dans des campagnes dont l'IPSL a la responsabilité. Les instruments correspondants ont en général été développés dans le cadre du premier objectif.

Grâce à ses compétences et à une longue expérience, l'IPSL joue un rôle important dans ce domaine qui est stratégique pour le maintien de la compétitivité de ses programmes scientifiques. Les grandes campagnes de mesure comme AMMA conduisent à mobiliser tous les moyens d'observation disponibles à différentes échelles sur des régions clés pour des études de processus ciblées de telle sorte qu'il n'y a plus lieu désormais de faire de distinction entre les expériences au sol, aéroportées, en ballons et même en satellite puisque toutes concourent au même but avec leurs capacités spécifiques. On peut cependant souligner qu'elles offrent des possibilités d'investigation différenciées quant aux échelles spatiales et temporelles, ce qui conduit à des modes d'analyse différents. Pour donner une idée des travaux qui seront menés au PSI, nous rappelons rapidement ci-dessous les principales composantes de cette activité d'observation.

**II.6.3.2.1- Les moyens au sol et à la mer :** L'IPSL réalise un effort important sur des sites d'observation permanents dans le cadre des services d'observation labellisés, constitués en réseaux d'observation (NDSC, AERONET, ...). Cette activité doit se pérenniser, et un premier objectif est d'étendre ces réseaux et d'améliorer leur automatisation. Un second objectif concerne l'amélioration de l'autonomie des instruments, de la quantité et de la qualité des données transmises.

Le soutien de l'IPSL s'étend à des sites nouveaux : le SIRTA pour les nuages (projet d'observatoire SIRUS) et le site de l'UPMC pour le projet QUALAIR (Qualité de l'AIR en région parisienne). S'ajoute ainsi à la vocation d'observatoires en réseau, celle d'utilisation de données locales permettant les essais et la validation d'instruments nouveaux, qu'il est alors possible de comparer aux instruments opérationnels.

**II.6.3.2.2- Les moyens aéroportés :** Plusieurs instruments ont été conçus à l'IPSL pour réaliser des mesures aéroportées :

- Les lidars développés pour offrir des capacités nouvelles d'observation et d'analyse de l'atmosphère météorologique (LEANDRE, WIND, LAUVA) ou de la dynamique des transferts d'ozone (ALTO).
- Les radars d'observation des surfaces embarqués sur avions ou hélicoptères qui ont été par le passé et continueront à être des outils nécessaires dans le cadre de missions de type ERS, ENVISAT, RADARSAT, METOP,... Ils permettent d'une part la mise au point d'algorithmes d'inversion (humidité de surface, rugosité, vent et vagues à la surface de la mer), et d'autre part la validation des produits de niveau 1 et 2 des radar spatiaux embarqués sur ces missions. Ils constituent également un outil permettant d'aborder les problèmes d'agrégation/désagrégation d'échelles (mesures à différentes résolutions spatiales et temporelles).
- RALI mettant en œuvre un lidar (LEANDRE nouvelle génération) et le radar nuages RASTA dans sa version aéroportée. La spécificité de chacun des systèmes permet de mieux répondre à l'étude des interactions dynamique-rayonnement dans les nuages glacés et d'aborder la thématique d'interaction aérosols-nuages. RALI est en cours de développement en

collaboration avec l'INSU/DT. Il est prévu d'effectuer des premiers vols pour la validation des observations de l'AQUA-Train (CLOUDSAT-CALIPSO) en été 2005.

- Le spectromètre SAMU (Spectromètre de masse Aéroporté Multi-espèces) développé pour mesurer au sol et sur avion, et avec un même instrument, deux types de composés: les composés organiques oxygénés et les radicaux OH et HO<sub>2</sub>. Le principe de l'instrument proposé repose sur la formation, à partir des espèces traces, d'ions par réaction ion-molécule qui sont détectés, prélevés et analysés par spectrométrie de masse. La technique choisie est sensible (limite de détection 1 pptv), spécifique et a un temps de réponse suffisamment court (1 min) aux faibles concentrations atmosphériques de certaines espèces envisagées (OH).
- La cuve à diode laser permet d'effectuer des mesures précises de constituants minoritaires par spectroscopie d'absorption avec une précision de quelques pour-cent à une fréquence élevée (100 Hz) avec une très grande dynamique. Ceci concerne notamment la mesure des espèces telles que CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O dans le proche infrarouge. De tels senseurs ont été développés pour fonctionner sous ballon (SDLA), et seront installés sur les avions pour réaliser des mesures dans la haute troposphère (mesures sur l'avion stratosphérique M55 dans le cadre du programme SCOUT).

Ces développements impliquent une maintenance, une documentation, une conservation du savoir faire, le cas échéant une veille sur les approvisionnements, qui se fait pour partie en partenariat avec l'INSU/DT mais qui nécessite une structure adaptée à l'IPSL.

#### **II.6.3.2.3 - Les ballons** : Trois principaux types de ballons peuvent être considérés :

- les ballons stratosphériques ouverts (BSO) pour un vol de lourde charge, 500 kg, de quelques heures à haute altitude, vers 35 à 40 km, ou dans une version allégée de « petits ballons » pour des vols plus flexibles et plus fréquents de plusieurs petits instruments donnant accès à la variabilité de l'atmosphère.
- les ballons de longue durée : Montgolfières Infra-Rouge (MIR) et ballons pressurisés (BP) à niveau constant dans la basse stratosphère pour des vols de plusieurs semaines avec des charges modestes ;
- les ballons basses couches, captifs, petits BP dérivants ou encore « Aéro-Clipper » munis d'un guide-rope ou traînard pour des études à l'interface océan-atmosphère.

En Europe, les ballons sont principalement développés et opérés par le CNES, bien que d'autres pays, Suède, Norvège, Italie, possèdent également des moyens de lancement. Suivant les objectifs, les vols peuvent avoir lieu en France ou en campagne extérieure à toutes latitudes, très largement en Arctique au cours des 20 dernières années pour des recherches liées à l'ozone stratosphérique, plus récemment aux tropiques. Les vols au profit des laboratoires de l'IPSL représentent plus de 50% du total des opérations du CNES.



Parmi les projets de l'IPSL récents ou en cours: 18 vols de petits BSO, MIR et BP pour HIBISCUS au Brésil en 2004 ; 20 vols de BP en Antarctique en 2005 pour le projet VORCORE d'étude du vortex polaire stratosphérique ; des vols d'Aéro-Clipper en 2005 dans l'océan Indien pour le projet VASCO. Une campagne tropicale combinant les projets SCOUT-O3 et AMMA et faisant appel à pratiquement tous les types de ballons est en gestation pour 2006.

L'amélioration des performances des ballons (par exemple le développement de la montgolfière infrarouge permettant d'effectuer des mesures de profils verticaux) et de nouvelles stratégies de campagnes de mesures font partie de la stratégie d'observation mise en place au cours des dernières années. Citons également dans ce contexte le concept Aero-Clipper de mesure de paramètres à l'interface océan-atmosphère par traîne sous ballons. Des réflexions sont également en cours sur l'utilisation de flotteurs dirigeables (gliders), qui devraient représenter l'évolution future des aéro-clippers.

La variété des systèmes ballon offerts aujourd'hui permet d'imaginer des observations tout à fait originales, enrichies souvent par une combinaison d'observations depuis le sol et en orbite. En retour, les ballons sont largement utilisés pour la validation des instruments atmosphériques satellitaires, actuellement celle des instruments ENVISAT qui sera suivie de celles d'AURA et METOP au cours des prochaines années. Enfin les ballons offrent une occasion inégalée de formation de jeunes chercheurs expérimentalistes qui se destinent aux projets spatiaux. Plusieurs équipes de trois laboratoires de l'IPSL (LMD, SA et CETP) sont engagées dans ces projets auxquelles le PSI pourrait offrir un cadre de réalisation et d'évolution ultérieure.

**II.6 3.2.4 - Les fusées :** L'implication du CETP dans les expériences fusées offre l'opportunité de valider de nouveaux concepts instrumentaux. Les expériences sur fusées développées par le passé se sont déroulées en collaboration avec la GSFC NASA et le Département de Sciences Physiques de l'Université d'Oslo avec le support d'Andoya Rocket Range (Norvège). Elles sont également un moyen efficace, pour les personnels techniques nouvellement recrutés de réaliser un instrument complet répondant à des spécifications spatiales (en terme de tenue en température, résistance aux vibrations, etc...) dans des délais courts (1 à 2 ans de la conception au lancement) en comparaison des durées sur lesquelles s'étendent les projets spatiaux (5 à 10 ans).

**II.6.3.3 - Développements instrumentaux et R&D :** Dans tous les domaines de l'instrumentation, les laboratoires de l'IPSL poursuivent une politique de développement et d'innovation pour disposer des moyens qui seront nécessaires dans l'avenir à la réalisation de nouvelles mesures et à l'obtention de nouveaux paramètres. Ces politiques de R&D sont propres aux laboratoires de l'IPSL, et ne sont pas incluses comme telles dans l'activité propre du Pôle, cependant elles commandent l'originalité et les performances des instruments que l'IPSL va ensuite mettre en oeuvre. Elles peuvent regrouper plusieurs laboratoires de l'IPSL. Le PSI devrait donc être un lieu d'échange offrant dans ce contexte la possibilité de mieux structurer ces développements et de bénéficier de l'entraînement lié aux collaborations entre équipes.

## a) Instrumentation Sol, dans les domaines radars et lidars:

### Au CETP

- RASTA (version sol de RALI) pour l'étude de la dynamique et des propriétés nuageuses. Le concept d'utilisation de radars de type FM-CW va, cette année, être testé pour les mesures des propriétés nuageuses, dans le cadre du projet européen CloudNET et de la perspective du développement de stations opérationnelles d'observation des nuages,
- CURIE (radar FM-CW) pour l'étude de la dynamique de la couche limite (remplacement des sodars,
- HYDRIX radar Doppler et polarimétrique en bande C pour les applications hydrologiques,
- Radars ionosphériques de la chaîne SuperDARN en prévision de l'extension du réseau au Dôme C.

### Au LMD-SA

- EMIL (lidar Doppler 2  $\mu\text{m}$ ) pour la dynamique de la couche limite et la mesure du profil vertical du flux horizontal de  $\text{CO}_2$ ,
- Station Tress (système transportable couplant lidar et photométrie) au LMD.

### Au LSCE

- LAUVA : lidar UV à sécurité oculaire pour les applications concernant la qualité de l'air et la météorologie,
- Les mesures in situ et télédétection sur ULM (qualité de l'air).

**b) Instrumentation aéroportée :** Dans le domaine des expériences qui pourraient être embarquées sur avion plusieurs développements sont en cours. Ils représentent des enjeux importants, qu'ils soient à finalité thématique (e.g. étude de processus) ou destinés à des démonstrateurs ou à des mesures de validation des observations spatiales, notamment :

- Les nouveaux lidars (LMD, SA) : dans le cadre du cycle du carbone, et dans la continuité de l'étude de prédéfinition (FACTS) et des études avec le prototype EMIL, une nouvelle étude portant sur le développement d'un démonstrateur opérant à partir du sol et par la suite d'avion est en cours de discussion. Ce nouveau prototype LIDAR DIAL bénéficierait du soutien du CNES en s'inscrivant dans la continuité du programme français de Lidar Météorologique Aéroporté LEANDRE qui a permis à la communauté française de prendre sa place dans les programmes de Lidar en cours comme CALIPSO (CNES-NASA) et ÆOLUS-ADM (ASE).
- Le concept d'OPO (oscillateur paramétrique) qui est un des choix pour effectuer des mesures dans l'infrarouge proche et moyen pourrait être également étendu à d'autres applications (pollution).
- L'accélérométrie (SA) : le concept spatial VIVA de vélocimétrie des nuages par accélérométrie absolue peut bénéficier du développement d'un prototype aéroporté pour valider l'approche proposée de mesure de vitesse sur les nuages.

- La radiométrie hyperfréquence (CETP) : un radiomètre bande L aéroporté est en discussion pour la validation de SMOS.
- L'instrumentation aéroportée légère (SA, LSCE), déjà mise en œuvre avec succès pendant la campagne ESQUIF pour la mesure de polluants, ou proposée pour la campagne YAK de mesure du CO<sub>2</sub>. De nouveaux analyseurs multi-espèces peuvent être intégrés, fondés par exemple sur l'utilisation des diodes laser pour la mesure de constituant minoritaires sur ballon et avion. Cette compétence métrologique est précieuse pour l'organisation de nouvelles campagnes qui doivent maintenant viser les échelles régionale / continentale (100 - 1000 km) pour lesquelles les mesures représentatives sont actuellement très rares.
- Dans les techniques génériques de base (*optique, hyperfréquences et techniques radioélectriques, spectrométrie de masse et détection de particules*) un grand nombre de travaux souvent très amont sont en cours, soutenus soit par l'INSU soit par le CNES pour les instruments spatiaux.

**c) Optique.** L'effort industriel sur la technologie des détecteurs et des filtres, va s'accompagner du développement de concepts instrumentaux innovants. Ceci requiert essentiellement des études de faisabilité et un travail important au niveau des maquettes de laboratoire, qui pourraient déboucher sur la mise au point :

- de spectromètres ou de spectromètres-imageurs (TF statique, AOTF, hétérodyne à haute résolution spectrale, TF UV)
- de lidars à émission continue modulée (même principe que les systèmes radar), à source fibrée ou des lidars OPO,
- de techniques évoluées d'occultation stellaire pour miniaturiser les instruments du type GOMOS et les rendre compatibles avec un microsatellite,
- de futurs instruments qui pourraient être placés sur des satellites géostationnaires et qui intéressent plusieurs domaines (dynamique et chimie de l'atmosphère, observation décimétrique, superspectral, surveillance solaire, ...),
- de systèmes de synthèse d'ouverture optique pour les observations de l'atmosphère ou du Soleil.

**d) Hyperfréquences et techniques radioélectriques.** Après les développements réalisés pour les SARs, l'effort se porte plutôt aujourd'hui vers :

- la miniaturisation des systèmes pour les rendre compatibles avec les mini et les microsatellites
- la physique de la mesure pour l'utilisation des basses fréquences (P et L), l'interférométrie radar, et la mise en constellation ou en formation. L'utilisation de la roue interférométrique en bande L est une application potentielle pour l'étude de l'humidité à faible profondeur du sol.
- le développement des techniques de sondage des sous-sols planétaires. Les travaux, démarrés au dernier trimestre 2004, s'orientent sur 2 voies :

- la montée en fréquence des antennes magnétiques par amélioration des matériaux magnétiques, dans un premier temps jusqu'à des fréquences de l'ordre de 30-50 MHz.
- l'étude de techniques numériques pour la génération des signaux dans les gammes VHF et UHF dont pourront d'ailleurs bénéficier les radars sol ou aéroportés.

**e) Capteurs magnétiques et électroniques de traitement de bord :** Pour les capteurs magnétiques les développements s'orientent vers un instrument polyvalent (en vue accéder aux mesures du continu au MHz, actuellement 3 instruments sont nécessaires) et de masse réduite. Les travaux portent sur :

- la miniaturisation (technologie MCMV en collaboration avec la société 3D+) et la réduction du bruit basse fréquence des préamplificateurs.
- l'étude, la mise en œuvre et l'amélioration des capteurs à effet Hall et magnéto-résistance
- la modélisation, la simulation et l'optimisation des capteurs magnétiques pour la réduction de masse et la conception des capteurs multi-bandes.
- Par ailleurs, un nouvel instrument à « boucle de courant » est en développement pour la mesure de la densité des courants ionosphériques.
- Pour l'électronique de traitement de bord, un démonstrateur a été développé au CETP, qui doit être rendu compatible avec les exigences des missions spatiales (masse, consommation et tenue aux radiations).

**e) Spectrométrie de masse et mesures de particules.** Plusieurs études sont en cours avec pour objectif la mise au point des techniques suivantes :

- détecteurs combinant mesure de temps de vol et imagerie pour des spectromètres imageurs à haute résolution
- analyseurs de particules ultra rapides 3D

**g) Techniques spécifiques de Laboratoire :** On peut enfin citer les travaux sur la production d'aérosols en microgravité et leur analyse par spectrométrie de masse pour les observations du milieu interplanétaire.

## **II.6.4 - Le rôle du pôle spatial et instrumental**

**II.6.4.1 - Objectifs :** Le Pôle Spatial et Instrumental a pour vocation de fédérer les activités expérimentales des laboratoires de l'IPSL pour le développement et la réalisation des instruments d'observation et leur exploitation dans le cadre de campagnes de mesures ou de missions satellitaires. Il doit répondre aux besoins de l'ensemble des thématiques scientifiques des laboratoires et des pôles et prendre en compte les différentes techniques d'observation, à partir du sol, sur des plates-formes aéroportées ou sur ballons et à bord de satellites. Fédérant les efforts des équipes techniques des laboratoires qui participent à la réalisation des instruments et à la réalisation des observations, il jouera un rôle important en :

- rationalisant les efforts dans les secteurs et les techniques génériques (mécanique, thermique, aspects systèmes, assurance qualité et fiabilité, conditionnement de l'énergie, électronique digitale et traitements à bord, interfaces TM/TC) et les moyens d'essais, d'étalonnage et d'intégration. Pour ce qui est des moyens d'essais, il n'est pas envisagé de dupliquer inutilement. Si les moyens existent ailleurs et sont raisonnablement disponibles au niveau des plannings et des coûts, le pôle en fera l'économie. Ce pourrait être le cas des moyens d'essais lourds en vibration et en vide/thermique. Dans ce domaine des équipements de capacité modeste, permettant des essais sur des sous-systèmes doivent suffire.
- réalisant la mise en commun et la diffusion des compétences et connaissances entre les équipes techniques.
- développant les liens avec les PME de préférence régionales, mais pas uniquement lorsque les compétences pointues sont ailleurs, et en mettant en place un "réseau" de PME sur lesquelles les équipes techniques peuvent s'appuyer. Il s'agit d'une condition indispensable au maintien de la capacité des équipes techniques (i) pour profiter de la technicité de pointe de certaines PME (microélectronique, mécanique, thermique), (ii) pour valoriser les développements instrumentaux effectués par les laboratoires, (iii) pour faire face à la diminution des effectifs et avoir une réelle capacité de sous-traitance pour les travaux qui peuvent se réaliser dans l'industrie.

**II.6.4.2 - Potentiel Existant** : L'essentiel des forces du PSI se trouvera à Guyancourt où seront regroupés le CETP et le Service d'Aéronomie. Pour autant, les personnels relevant du Pôle ne sont pas concentrés en un lieu unique : compte tenu de la nature multi sites de la plupart des laboratoires de l'IPSL, des éléments du potentiel se trouvent sur les autres sites. L'organisation du PSI devra faire en sorte que ces équipes participent à l'effort fédératif et en bénéficient.

Le potentiel en ITA que représente le pôle est d'environ 150 personnes en incluant les CDD. Ceci fait ressortir un élément très important à l'heure actuelle, la part notable prise (environ 30%) par les personnels non permanents au développement et à la réalisation des instruments et au traitement des données. Il y a plusieurs explications à cette situation :

- l'érosion du potentiel technique des laboratoires par la vague de départ en retraite et le non-remplacement des ITA dans une proportion qui oscille au cours des dernières années entre 30 et 50%.
- simultanément, les avancées rapides des technologies qui exigent un effort conséquent de RetT et d'innovation.
- la nécessité de réaction rapide pour rester dans la course face à la concurrence internationale. Les laboratoires ne peuvent s'accommoder du manque total de vision à moyen terme sur l'évolution de leur potentiel technique, conséquence du flou qui règne depuis plusieurs années au niveau des tutelles.
- la nécessité de l'augmentation temporaire du potentiel au cours des phases de développement de gros projets (spatiaux notamment).

Maîtriser cette situation qui fragilise les laboratoires et maintenir le ratio non permanents/permanents à un niveau raisonnable demande un engagement rapide et clair de la part des tutelles ainsi qu'une évolution du soutien que nous accorde le CNES et que nous proposons ici.

**II.6.4.3 - Catégories d'Activité** : La table II.6.2 indique (pour juillet 2004) comment se répartissent les forces suivant les catégories de tâches qui sont actuellement à la charge des équipes techniques des laboratoires ainsi que les prévisions d'évolution à moyen terme.

Sur la base de la force de proposition actuelle des chercheurs de l'IPSL, le PSI doit pouvoir conduire, en général avec des partenaires, une demi-douzaine d'études de phase 0 et A par an et poursuivre un nombre conséquent d'actions de R et D. Ces activités correspondent approximativement à 1 ou 2 IT par projet. L'algorithmique, la préparation des traitements jusqu'au niveau 2 (qui ne se limite pas nécessairement aux réalisations de l'Institut), la participation aux opérations d'étalonnage et de validation, sont des secteurs dans lesquels le potentiel propre est insuffisant, et le recours aux ingénieurs en CDD très important voire excessif, alors qu'il s'agit d'un besoin quasi pérenne.

	Catégorie	Contenu	Effectif <b>ETP</b>	Evolution du besoin
1	Services d'observation Campagnes de tests	Services labellisés, site SIRUS	12	+
2	Petites et moyennes expériences (sol, sous ballon, avion)	Développement	10	+++
3	R et D, Phases 0 et A	Propositions, faisabilité	10	++
4	Phases de transit et Phases E	Algorithmique, Validation, exploitation	20	+++
5	Phases BCD de projets spatiaux, gros projets sol, ballon, avion	Maquettes, maîtrise d'œuvre, réalisations, intégration, tests	40	++ avec compléments de métiers
6	Applications, Valorisation		10	++

**Table II.6.2** : Catégories définissant les activités du pôle. L'évolution du potentiel nécessaire est faible (+), modérée (++) ou grande (+++)

La limite entre les catégories 2 et 5 est nécessairement évolutive; les projets de la catégorie 5 nécessitent typiquement au minimum 15 hommes x an, parfois beaucoup plus, ainsi qu'une formalisation souvent lourde de l'organisation en projet et des relations avec les organismes, principalement dans le cas des projets spatiaux. Dans la phase post-lancement (E), il faut distinguer la phase initiale de *validation/ calibration* impliquant les campagnes et celle *d'exploitation pour la recherche*, impliquant le développement d'algorithmes et de moyens d'analyse proches des instruments. La catégorie 5 est celle qui a vocation à accueillir la majorité des personnels en CDD. Le développement des moyens d'essais, des méthodes de simulation (thermique, mécanique) des actions de qualité-fiabilité pour accompagner les réalisations nouvelles implique certainement le recrutement de personnel d'intérêt commun, absent actuellement des laboratoires (e.g.thermiciens, qualitatifs).

La dernière ligne (Applications, Valorisation) prend en compte l'aspect très important de la valorisation qui, malheureusement et faute de personnel, a une priorité souvent faible dans les actions des laboratoires. Si les tutelles mettent l'accent sur cette question et sont prêtes à en tirer les conséquences au niveau des postes d'ingénieur de valorisation, la situation devrait pouvoir évoluer et cette activité devra être renforcée au niveau du PSI.

Le développement des moyens d'essai nécessaires à la mise en place des projets nouveaux au sein du pôle motive, dans la catégorie 5 (phases B, C, D), le recrutement de personnel d'intérêt commun, absent actuellement des laboratoires (thermiciens par exemple). Ceci n'exclut pas le besoin temporaire de CDD.

**II.6.4.4 - Opérations en cours ou prévues dans un futur proche** : Les catégories 2, 3 et 4 peuvent faire l'objet d'un raisonnement en termes d'enveloppe, sans qu'il soit nécessaire d'identifier les projets, qui sont de petite dimension, en grand nombre, et dont la programmation est en partie à court terme. Pour la catégorie 5 (gros projets), en raison des à-coups inévitables dans la programmation qui résultent des processus de sélection (voire, malheureusement, parfois d'abandon) des grands programmes (campagnes de grande envergure, missions spatiales) un raisonnement en terme d'enveloppe s'impose également. Par ailleurs, une bonne concertation entre les différents projets du PSI est indispensable pour assurer une répartition optimale des plans de charge. C'est un domaine où le remplacement des IR et IE instrumentalistes ou chefs de projet, sur la compétence desquels repose très souvent le sort d'une expérience, est indispensable. Ceci n'exclut pas le recours ponctuel à des CDD.

Les candidats à la catégorie 5 pour les projets en cours sont PICARD, SPICAV, SOLSPEC, THEMIS, MEGHA TROPICQUES, BEPI COLOMBO.

Des projets de moindre ampleur (catégorie 2) mais impliquant également des moyens de catégorie 5 concernent les moyens aéroportés et sous ballon. On identifie aussi dans ce domaine un certain déficit pour les prochaines années par rapport au besoin, lié aux nombreux départs en retraite et à l'essor de projets nouveaux. La liste en est : RALI (lidar-radar), SAMU (spectromètre de masse), SDLA (diodes laser), Aero-Clipper, VORCORE, VASCO, SCOUT-03, MUST-2D et STRATEOLE.

La liste suivante SWIMSAT, TARANIS, VIVA, Mini-Gomos, SAM / PALOMA, OPO, Radiomètre bande L, prend en compte des projets non démarrés mais qui ont une chance de l'être à

court ou moyen terme. Ils ont fait (SWIMSAT) ou devront faire l'objet de phases 0/A détaillées (catégorie 3).

**II.6.4.5 - Interfaces** : Nous ne reviendrons pas sur la nécessité, exprimée précédemment de maintenir une interaction forte entre le PSI et les équipes de modélisation d'une part, que ce soit au sein du pôle de modélisation ou dans les laboratoires, et les équipes chargées des bases de données d'autre part. Notons cependant que le développement des services d'observation, des bases de données et la mise en place des centres d'expertise (ICARE, ETHER, ...) sont des atouts majeurs pour l'implantation d'instruments nouveaux, la réalisation de campagnes, la préparation des missions spatiales (phases 0 et A), et l'exploitation de nouvelles missions (phase E). La mise en place du PSI doit ainsi prendre en compte cette dimension, impliquant la conjugaison des moyens entre le site de Guyancourt et les autres sites de l'IPSL.

Les interfaces que nous allons maintenant décrire sont celles que le pôle devra avoir avec le monde extérieur.

**a) Avec les partenaires scientifiques et institutionnels** : L'IPSL est, aux échelles nationale et internationale, déjà inséré dans une multitude de réseaux extrêmement développés. Ces collaborations seront poursuivies à travers le PSI. Nous devons progresser dans la formalisation de nos liens avec les laboratoires partenaires tels l'IPGP et surtout le LPCE qui est partie prenante de nombreux projets satellites ou ballons. Mais les collaborations qui nous semblent les plus importantes pour les activités du PSI et que nous souhaitons mettre en exergue sont les suivantes :

- le partenariat avec la D.T. INSU dont le potentiel est précieux (développement de moyens aéroportés et sous ballon),
- la collaboration avec Météo-France pour l'organisation de campagnes communes. L'évolution du modèle MésoNH vers le modèle opérationnel AROME va nous conduire à réfléchir à l'assimilation à méso-échelle et à l'échelle régionale dans le cadre du pôle eau mais aussi à envisager les études d'impact (pollution) et celles relatives au cycle du carbone,
- le projet MERCATOR,
- les travaux entrepris avec l'ESA et EUMETSAT, dont nous sommes un partenaire constant pour de nombreuses études amont et de définition de mission,
- la collaboration avec les autres pôles spatiaux qui devraient se mettre en place, en particulier le pôle ASTRO en Ile de France. Il va de soi que les 2 pôles Franciliens, celui de l'IPSL ("la Terre et les Planètes") et celui d'Astrophysique, ne doivent pas travailler isolément. En particulier, ils devront nécessairement coopérer sur des domaines techniques communs (hyperfréquences et étalonnages par exemple). Sans qu'un fonctionnement "en réseau" doive être explicitement stipulé et formalisé, un contact régulier devra s'établir afin de favoriser la mise à jour des compétences, d'harmoniser le développement ou l'achat d'équipements lourds et, le cas échéant, de favoriser des interactions mutuelles pour faire face aux plans de charge.
- La collaboration avec les laboratoires extérieurs à l'IPSL (LOA, LPCE, ...)



- le partenariat avec le CNES. La collaboration que nous souhaitons établir avec le CNES est un élément essentiel pour le PSI. Dans de nombreux domaines et depuis de nombreuses années, cette collaboration est déjà très importante (analyse et préparations de missions, division Ballons, actions de R&T, projets spatiaux...) et a permis aux laboratoires d'acquérir les compétences et la place qu'ils occupent dans la communauté internationale. Mais nous souhaitons qu'un pas supplémentaire puisse être franchi par la participation directe de jeunes ingénieurs du CNES aux projets spatiaux que nous menons. Il s'agit d'une idée qui a été évoquée il y a plusieurs années déjà. L'évolution de notre potentiel technique fait apparaître que, dans les années à venir, l'un des déficits majeurs va se situer au niveau des chefs de projet. Le détachement temporaire au PSI, et sur des durées de 3 à 5 ans, d'ingénieurs CNES susceptibles de remplir cette fonction serait très certainement une excellente solution. En ce qui nous concerne, elle nous donnerait la capacité de mener à bien et dans de bonnes conditions les projets les plus importants. En ce qui concerne les jeunes ingénieurs du CNES, cette intégration à une équipe scientifique et technique sur la durée d'un projet représente un moyen très efficace pour acquérir l'ouverture sur le monde de la recherche, les compétences et l'expérience qui seront un atout dans la suite de leur carrière.

**b) Avec les partenaires industriels :** Développer les liens avec les PME, de préférence régionales mais pas uniquement si les compétences pointues sont ailleurs, et mettre en place un "réseau" de PME sur lesquelles les équipes techniques peuvent s'appuyer sont deux des objectifs majeurs du PSI. Il s'agit d'abord du maintien de la capacité des équipes techniques : tout en bénéficiant de la technicité des PME dans des domaines technologiques nouveaux (micro-électronique, usinages spéciaux en mécanique, thermique, etc...). Disposer d'un bon réseau de PME et avoir des liens étroits avec le milieu industriel (bourses CIFRE, par exemple) aide aussi à valoriser les développements instrumentaux effectués par les laboratoires et correspond au souhait affiché clairement par nos tutelles.

**c) Avec le monde de l'éducation et le grand public :** L'IPSL devrait prendre une position vigoureuse sur le concept américain d'outreach, c'est-à-dire l'ouverture vers le grand public et le monde de l'éducation. Cette activité reste encore le domaine de quelques volontaires ou de quelques manifestations comme la Fête de la Science. Nous ressentons la nécessité d'un effort plus soutenu de diffusion des connaissances et de vulgarisation scientifique qui est probablement une façon efficace pour intéresser les lycéens et les étudiants à la science et au monde de la recherche à une époque où les effectifs dans les filières scientifiques se réduisent de plus en plus. Le PSI, par la vitrine instrumentale et technologique qu'il peut proposer, devrait, dans ce domaine, jouer un rôle important.

Dans le domaine de l'enseignement supérieur, le regroupement des équipes techniques et scientifiques autour de moyens instrumentaux importants et de très haut niveau constitue un potentiel riche pour développer de nouvelles filières universitaires ou conforter celles existantes. Ceci peut être envisagé aussi bien pour les filières destinées à la recherche académique que pour les débouchant sur le monde industriel (ex. TP pour Master professionnel).

**II.6.4.6 - Fonctionnement** : Le PSI est une entité de l'OSU IPSL qui fédère les équipes techniques des laboratoires et comporte un groupe d'ITA spécialistes de techniques génériques utilisées par la majorité des projets (mécanique, thermique, convertisseurs, etc...) et, pour les administratifs, des problèmes particuliers de gestion (appels d'offres, contrats, personnels temporaires, ...). Le Pôle Spatial et Instrumental, service de l'OSU IPSL, a vocation à intégrer les recherches amont, les développements et les réalisations instrumentales qui constituent l'activité expérimentale propre à l'ensemble des laboratoires et des pôles scientifiques de l'Institut. En pratique, et comme cela se fait depuis longtemps au niveau des laboratoires, les activités doivent être organisées sous forme de projets et par conséquent donner lieu à la constitution d'équipes projet.

Conformément aux objectifs indiqués au début de ce chapitre, l'organisation et le fonctionnement du pôle doivent permettre (i) de rationaliser les efforts dans le domaine des techniques génériques communes à la très grande majorité des projets, (ii) d'instituer un transfert efficace des connaissances et des compétences entre les différentes équipes techniques qui sont rassemblées dans ce pôle et (iii) de mettre en œuvre les collaborations entre les équipes pour la réalisation des projets qui, par leur ampleur, par leur calendrier ou parce qu'ils fédèrent plusieurs laboratoires, nécessitent le regroupement de plusieurs équipes techniques sur des durées définies. Dans cette optique, le fonctionnement courant du PSI pourrait être organisé par un comité de direction (à définir) sous la responsabilité du Directeur de l'Institut et rassemblant les représentants des laboratoires.

Le PSI devra être doté d'une structure administrative légère (1 à 2 personnes) pour la gestion des contrats, les relations avec les industriels, et la valorisation.

## **II.6.5 - Demandes de l'Institut**

**II.6.5.1 - Demande en personnel technique** : La mise en place du PSI, rendue difficile par le contexte de relocalisation à Guyancourt et le taux élevé des départs en retraite, se doit d'être mobilisatrice pour garantir le succès de l'opération et, à un niveau plus élevé, de la création de l'IPSL lui-même.

La situation présentée pour 2004 n'est évidemment pas représentative de celle que nous aurons en 2010. En effet, les départs à la retraite, qui ont déjà commencé, vont affecter de façon importante les personnels dans toutes les catégories. Globalement, la poursuite de l'érosion du potentiel technique des laboratoires que nous constatons actuellement (de 20 à 40% d'ici 2010) réduirait à néant les chances de réussite de l'opération, élément qui motive les craintes et les réticences des personnels.

Il sera donc indispensable de disposer du soutien des tutelles pour arrêter l'hémorragie et rééquilibrer le potentiel technique dans son ensemble eu égard aux besoins des projets futurs. C'est le cas tout particulièrement pour les chefs de projets des catégories 2 et 5, et nous avons indiqué que, dans ce domaine, l'aide du CNES pouvait être déterminante, et pour les personnels chargés de l'exploitation des données (catégorie 4). Indépendamment des besoins propres des laboratoires, et en plus du redéploiement interne possible sur certains domaines d'activité, on peut identifier une douzaine de postes qui devraient être mis en place pour donner au pôle la structure dont il a besoin à l'horizon 2010.

La réorganisation des activités techniques à travers la mise en place du PSI permettra des gains d'efficacité mais il doit être clair qu'elle ne doit pas servir d'alibi pour diminuer de façon inconséquente le potentiel actuel des laboratoires. Si le pôle technique spatial était créé par recyclage de postes techniques rendus disponibles par une ponction dans les effectifs des laboratoires au moment de leur renouvellement, il n'aurait aucun sens et mettrait en péril l'existence même de ces derniers. Une première analyse permet d'établir comme suit la liste des métiers pour les 4 ans à venir :

	<b>Catégorie</b>	<b>Créations de postes</b>
1	Services d'observation	1 IE électronicien
2	Petites et moyennes expériences (sol, sous ballon, avion)	1 IR électronicien système 1 IE techniques génériques
3	R et D, Phases 0 et A	1 IE instrumentaliste
4	Phases de transit et Phases E	1 IE qualicien 2 IR physicien
5	Phases BCD de projets spatiaux, gros projets sol, ballon, avion	1 T vide, étalonnages 1 IE mécanicien/thermicien 1 IR chef de projet
6	Interfaces et applications	1 IR valorisation 1 AI fonctionnement

**Table II.6.2** - Créations de postes demandées sur la période 2006-2009.

### **II.6.5.2 - Demande budgétaire :**

Le nouveau bâtiment de l'IPSL sur le site UVSQ de Guyancourt accueillera une grande partie des chercheurs et ITA du Service d'Aéronomie et du CETP et l'administration de l'IPSL. Le pôle spatial et instrumental qui y sera implanté accueillera non seulement des personnels permanents, mais également les participants au pôle venant pour des périodes plus ou moins longues des autres sites et laboratoires de l'IPSL dans le cadre des projets développés au sein du pôle. Le site devrait ainsi accueillir ainsi jusqu'à 300 personnes en période de pointe. La demande budgétaire couvre l'équipement du bâtiment en mobilier, matériel informatique, bureautique, matériel de laboratoire ainsi que les équipements spécifiques du pôle spatial et instrumental. Elle tient compte du matériel existant dans les laboratoires qui pourra être déménagé.

La répartition de la demande entre les différents organismes a été effectuée de la manière suivante :

- UVSQ + région Ile de France : mobilier, bureautique, extincteurs, copieurs, équipement, déménagement.
- INSU : informatique commune, participation à l'équipement du pôle, remise en état du site de Verrières
- CNES : gros équipements du pôle

La table reportée dans le document complet indique la distribution des coûts par unité fonctionnelle et par source de financement

L'échéancier des dépenses (table II.6.3) reprend la totalité des coûts identifiés dans la distribution par unité fonctionnelle et les répartit sur les 5 années à venir. Il a été établi en supposant une installation en 2008. Certains coûts (mobilier, bureautique) peuvent être étalés sur les 4 ans. Les coûts d'équipement et les prestations liées à l'installation devront être financées l'année de l'installation.

	<b>Total</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>UVSQ</b>	1200	300	300	300	300
<b>Région</b>	1400			1150	250
<b>CNES</b>	2400			1200	1200
<b>INSU</b>	1500			1300	200
<b>Total</b>	<b>6500</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>3 950</b>	<b>1 950</b>

**Table II.6.3** : Echancier des budgets demandés (k€)

## II.7 - Services d'Observation et Outils Nationaux

A travers ses objectifs de recherche en environnement, l'IPSL a, dès sa création, affiché la volonté de contribuer à l'effort international de collecte de séries d'observations systématiques nécessaires pour l'étude du climat. Du fait de son expertise, l'IPSL disposait, dès mi-1990, de trois Services d'Observations : NDSC (Observation de l'ozone stratosphérique), RAMCES (Suivi des gaz à effet de serre dans l'atmosphère) et OISO puis CARAUS (Suivi des échanges de CO<sub>2</sub> au niveau de l'océan Austral), labellisées et soutenues par l'INSU. Ces Services d'Observation qui s'inscrivent dans la durée et sont associés à une activité de recherche (figure II.7.1) ont été également reconnus au niveau du Ministère de la Recherche à travers une labellisation comme Observatoires de Recherches en Environnement (ORE). Enfin, il faut souligner la contribution de l'IPEV qui soutient pour une large partie ces trois Services d'Observation qui ont en commun d'être associés aux protocoles et amendements internationaux ratifiés par la France et liés, soit à l'ozone (Montréal), soit aux gaz à effet de serre (Kyoto).

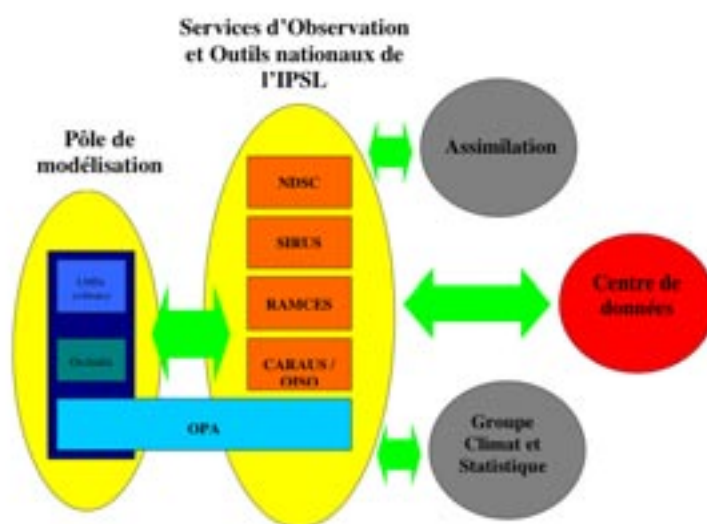


**Figure II.7.1** : Schéma représentant les domaines d'action des services d'Observation et leur double mission recherche / service.

Plus récemment deux autres activités ont été créées :

- OPA : est un modèle d'océan, utilisé par une large communauté (recherche et opérationnel), nécessitant une assistance aux utilisateurs et une gestion de l'évolution des performances et donc à ce titre défini labellisé comme outil national et défini comme une tâche de service au niveau de l'INSU.
- SIRUS : consiste en la collecte d'observations permettant l'étude du rôle des nuages et de leur impact radiatif sur le changement climatique. Ces observations déployées sur le site instrumental de l'IPSL (SIRTA), sont actuellement non labellisées par l'INSU, mais fournissent des séries de mesures indispensables pour la recherche sur le changement climatique, au cœur des thématiques scientifiques de l'IPSL.

Ces missions de service sont parfaitement intégrées dans les thèmes de recherche de l'IPSL et de ses laboratoires (Figure II.7.2). Ceci est particulièrement vrai par rapport à la stratégie de modélisation du climat de l'IPSL où est développé dans le cadre du Pôle de modélisation, le modèle couplé océan-atmosphère actuellement en phase d'extension à la stratosphère et au cycle du carbone. Ainsi les observations menées par les S.O. sont-elles extrêmement importantes pour initialiser et valider les études numériques, voire être utilisées en mode assimilation. Il existe aussi des liens évidents, et directs, avec le centre de données (base de données, web, ETHER, pérennisation...), et avec les groupes de travail de l'IPSL "Climat et Statistique", "Assimilation" et "Cycle de l'Eau".



**Figure II.7.2** : Interactions entre les SOON et les autres structures de l'IPSL.

Le fonctionnement de ces Observatoires et la gestion des outils nationaux connaissent des problématiques spécifiques induites par la double mission recherche / fonctionnement opérationnel. Le défi consiste donc à gérer en permanence des compromis pour assurer une insertion forte de ces activités dans une dynamique de recherche mais également pour mettre en place des structures opérationnelles qui assurent la pérennité de ces missions. Le rôle de l'INSU et de l'IPEV est ici déterminant. Par, ailleurs, la disponibilité du personnel affecté à ces opérations souffre de la diminution générale des effectifs des laboratoires affectés à ces objectifs, de la difficulté d'une motivation à long terme sur de tâches de fonctionnement routinier et de plans de charge complexes, en compétition avec des expériences de durées plus courtes et souvent considérées comme prioritaires. L'objectif consiste donc à ne pas superposer plusieurs services à la communauté mais à exploiter au mieux la synergie de ces différentes composantes et de valoriser la cohérence existante entre les observations et les projets de recherche de l'IPSL en général et notamment l'effort de modélisation.

Compte tenu des enjeux, des moyens développés, et de la contribution de l'IPSL au niveau national, se met en place un comité chargé d'assurer une coordination et une visibilité forte des observatoires et outils nationaux au sein de l'IPSL. Ce comité SOON (Services d'Observations et Outils nationaux) sera composé d'un représentant de chaque SO (C.David, M.Haeffelin, C.Lévy, N.Metzl, M.Ramonet), d'un ingénieur dédié (S.Morvan) et d'un coordinateur (P.Keckhut). La

constitution de ce groupe doit permettre de mener des actions transverses concernant, la recherche de financements et le suivi des relations avec des différentes tutelles, la valorisation des activités, la participation à la stratégie nationale, et enfin l'échange d'expérience et d'expertise avec les activités, existantes ou émergentes de l'IPSL. Pour les années à venir, les objectifs de SOON portent sur la pérennisation des données, sur la présentation des performances et des besoins, sur la définition d'une stratégie de développement, sur le soutien des recrutements prioritaires (CNAP, ingénieurs ou techniciens), sur la valorisation des données (notamment sur l'amélioration de la synergie modélisation / observation), sur la valorisation des tâches récurrentes des ingénieurs et techniciens impliqués et, enfin sur la labellisation du Service d'Observation IPSL SIRUS.

Les activités des SOON sont financées correctement, mais il est nécessaire de prospecter les autres possibilités de financement telles que les OOE (Observatoires Opérationnels en Environnement) et les structures européennes en émergence. Dans le cadre du présent plan pluriformation les demandes de soutien sont limitées au NDSC, à RAMCES et au SIRTA, celles liées à CARAUS et à OPA étant formulées dans le cadre du plan pluriformation de l'UPMC. Dans le but de donner une vision d'ensemble des activités de SOON, nous présentons cependant les perspectives des cinq entités concernées.

### **II.7.1 - NDSC**

Pour le NDSC, la synergie entre modélisation et observation est très importante et ce situe à plusieurs niveaux. La validation des expériences spatiales va se poursuivre avec ENVISAT puis AURA et CALIPSO. Ces projets s'accompagneront de l'utilisation des techniques d'assimilation afin de réduire au maximum les problèmes de coïncidences spatio-temporelles entre données depuis l'espace et depuis le sol.

On devrait assister dans les années à venir à une réduction de la destruction d'ozone dont le suivi requiert une amélioration des méthodes d'analyse pour la détection de fluctuations non linéaires. Ces quantifications seront très importantes vis-à-vis des protocoles internationaux associés aux réductions des émissions anthropiques de chlore. Un effort de modélisation qui bénéficiera de l'extension à la stratosphère du modèle communautaire LMDZ, sera conduit en parallèle en vue d'expliquer les évolutions observées. Cette analyse des mécanismes de transport sera complétée par des études portant sur la microphysique aussi bien en région polaire que sur les cirrus, avec l'objectif de mieux paramétriser la formation et la persistance de ces nuages et leurs caractéristiques radiatives et chimiques. Enfin la région de la haute troposphère et de la basse stratosphère sera particulièrement étudiée au niveau des échanges à travers la tropopause et de l'impact radiatif de l'ozone et de la vapeur d'eau dans cette région.

Nos collègues de Lille et de Grenoble ont récemment été impliqués dans le NDSC à travers l'inclusion dans le réseau de spectromètres UV destinés à suivre l'exposition UV au sol. Les travaux sur la variabilité de la stratosphère ont révélé la grande variabilité du champ d'ozone. Les modèles d'advection qui rendent bien compte de cette variabilité seront donc utilisés pour étudier et modéliser le rayonnement UV aux échelles régionales bien adaptées.

Du point de vue des infrastructures, la labélisation de la station de la Réunion, comme station primaire, associée à la construction d'un observatoire d'altitude, est le principal enjeu des années à venir. Peu de développements de nouveaux instruments seront envisagés mais des jouvences importantes seront réalisées.

*Demandes en personnel* : Ces activités demanderont des moyens humains supplémentaires au niveau physicien CNAP (Chaînes SAOZ et ballons), opticien LIDAR (IE/IR) et opérateur station MAIDO.

## II.7.2 - RAMCES

Les activités d'observation du CO<sub>2</sub> par l'équipe RAMCES sont focalisées sur deux régions clés, l'océan subantarctique et le continent eurasién.

L'océan subantarctique, puits d'environ 15% des rejets anthropiques de carbone (1 GtC par an), est l'une des régions les plus sensibles au changement climatique car une stratification accrue de l'océan pourrait diminuer son potentiel d'absorption. Les estimations de flux obtenues à partir des inversions atmosphériques y sont inférieures d'environ un facteur 2 par rapport aux mesures directes. Le transport zonal y étant très rapide, les gradients de concentration en CO<sub>2</sub> sont faibles et il faut donc disposer de mesures en continu à très haute précision pour extraire des informations sur les flux à partir de modèles inverses. Cet objectif est en passe d'être atteint grâce à l'installation d'un nouvel analyseur LOFLO à l'île d'Amsterdam (installation prévue à Cape Grim et à Macquarie en 2005). Les mêmes analyseurs seront installés en Australie par le CSIRO, ce qui permettra une comparaison très fine des concentrations de CO<sub>2</sub>. L'intégration des données atmosphériques et des mesures de flux air/mer devrait alors permettre d'établir une modélisation cohérente du bilan de carbone de l'océan Austral (action FLAMENCO/PROOF).

Les écosystèmes du continent eurasién jouent eux un rôle de puits de carbone qui reste mal évalué à l'échelle continentale et régionale et notre objectif est de développer les mesures atmosphériques de CO<sub>2</sub> qui y permette une régionalisation des flux de carbone par approche inverse. Sur ce continent, l'hétérogénéité des paysages et des flux est très grande et il en est de même de la variabilité du CO<sub>2</sub> qui résulte d'un mélange de contributions biosphériques, anthropiques et océaniques. La stratégie d'échantillonnage doit tenir compte de la nécessité de se placer loin des sources locales et de minimiser les effets du transport atmosphérique à petite échelle. L'approche adoptée consiste à mesurer le CO<sub>2</sub> en continu au niveau du sol dans des observatoires situés dans des environnements différents :

- La station côtière de Mace-Head en Irlande permet de caractériser les concentrations de CO<sub>2</sub> des masses d'air arrivant en Europe.
- La station de moyenne altitude du Puy de Dôme est située dans un environnement rural au centre de la France.
- La station péri-urbaine de Saclay est très fortement influencée par les émissions de la région Ile de France.



La sélection des données en fonction de leur représentativité spatiale joue un rôle important. Il s'agit de différencier à partir des données météo ou des mesures de traceurs tels que le radon, les données à caractère global ou régional, de celles représentatives de flux locaux ou de mécanismes de transport à petite échelle (qui peuvent cependant être utilisées pour les inversions atmosphériques, à condition de leur attribuer une erreur de représentativité plus forte). Ce travail de sélection des mesures, opérationnel à Mace Head et en cours de validation au Puy de Dôme, reste à développer pour le site de Saclay.

Au cours des quatre prochaines années deux nouveaux observatoires seront installés à Hanle (Inde) et Cape Farewell (Groenland). Mi-2005, un analyseur  $\text{CO}_2$  sera installé à Hanle, site de haute montagne au Nord de l'Inde, dans le cadre d'un projet franco-indien soutenu par le CEFIPRA. Le site de Cape Farewell, à l'extrême sud du Groenland, particulièrement bien situé pour échantillonner les masses d'air à la sortie du continent Nord Américain, sera équipé dans le cadre du projet européen CARBOCEAN, le suivi du  $\text{CO}_2$  y étant complété par celui de l'oxygène atmosphérique. L'installation coïncidera avec l'année polaire internationale en 2007, et un soutien logistique est demandé à l'IPEV.

Dans le cadre du projet européen CHIOTTO, une tour de 100 à 200 m de haut sera instrumentée en région Centre pour la mesure par chromatographie gazeuse des composés  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{SF}_6$  (ces données sont représentatives des sources et puits dans un rayon de 500 à 1000 km). Ce suivi sera complété par l'acquisition de données météo et par l'analyse in-situ du radon-222 en vue d'estimer les émissions des autres composés à effet de serre par une méthode de corrélation. Un autre analyseur  $\text{CO}_2$  sera, pour une durée limitée, installé en 2005 sur une tour en région Midi Pyrénées (campagnes intensives du projet CARBOEUROPE).

Enfin, des mesures régulières aéroportées sont nécessaires pour définir les conditions de fond saisonnières en atmosphère continentale. Depuis 1996, des vols réguliers en basse atmosphère sont réalisés à Orléans entre 100 et 3000 mètres (affrètement d'un avion Piper Aztec et utilisation d'un instrument compact de mesure du  $\text{CO}_2$  aéroporté développé au LSCE). Dans le cadre du projet Européen CARBOEUROPE, la fréquence des vols au dessus de la forêt d'Orléans sera augmentée à partir de 2005 (un vol tous les 5 jours), certains d'entre eux étant étendus jusqu'à Toulouse (collaboration avec le Laboratoire d'aérologie). Un survol saisonnier des écosystèmes sibériens sera également développé à partir de l'été 2005 (projet YAK).

Ce développement d'observatoires pour le suivi en continu des gaz à effet de serre est une stratégie indispensable pour la régionalisation des flux de carbone en milieu continental. Cependant, cette stratégie reste coûteuse, en particulier en raison du manque d'instrumentation fiable, automatique et bon marché. Afin d'étendre le réseau de mesure, un protocole d'échantillonnage a été développé ; il est mis en oeuvre à une fréquence hebdomadaire dans les observatoires mentionnés ci-dessus et dans une dizaine de sites supplémentaires (régions australes et eurasiennes). Des échantillons sont également prélevés régulièrement à bord d'avions de tourisme en vue d'effectuer des profils verticaux entre 100 et 3000m sur un transect ouest-est sur le continent eurasien : Griffin (Ecosse); Orléans (France), Hegyhatsal (Hongrie), Tver (Russie), Ubs-Nur (Russie). Au total près de 2000 échantillons sont analysés chaque année. S'y ajoutent les calibrations et intercomparaisons qui se sont fortement développés au cours des trois dernières années dans le cadre du projet européen TACOS-Infrastructure.

Contrairement aux mesures in-situ, les programmes de prélèvement hebdomadaire d'échantillons ne permettent pas de représenter les cycles diurnes et synoptiques. Par contre ils permettent des mesures multi-composés avec une très bonne reproductibilité (réalisées par deux chromatographes HP-6890 installés en série). L'installation et l'optimisation de ces instruments a été réalisée entre 2001 et 2003. Les isotopes du CO<sub>2</sub> sont analysés par un spectromètre de masse Finnigan MAT-252 avec une reproductibilité de 0.03 et 0.10 ‰ pour <sup>13</sup>C et <sup>18</sup>O. L'effort portera en 2005 sur le lien entre les mesures brutes et la base de données RAMCES en cours de développement, et sur la possibilité d'ajouter la mesure de deux traceurs atmosphériques (H<sub>2</sub> et C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>) à la palette des gaz déjà analysés. En ce qui concerne les mesures isotopiques, un nouveau banc d'injection sera développé sur le modèle de celui construit au MPI-Jena, avec le soutien de l'INSU.

*Demandes en personnel* : Ces activités demanderont des moyens humains supplémentaires qui seront recherchés, en priorité, dans le cadre des postes CNAP (2 physiciens, l'un responsable scientifique du suivi des gaz à effet de serre, l'autre des mesures aéroportées) ; les besoins concernent également 1 AI pour les analyses d'échantillons d'air et un IE (remplacement).

### II.7.3 - CARAUS

A l'inverse des observatoires NDSC et RAMCES, les activités de CARAUS (CARbone AUstral), désormais conduites au sein du LOCEAN, n'ont pas été présentées dans la précédente demande pluriformation. Avant d'aborder la partie prospective, nous en décrivons donc les objectifs et faisons état de quelques résultats majeurs déjà obtenus.

**Objectifs** : L'observation et la compréhension des variations saisonnière, interannuelle et décennale du cycle du carbone océanique sont primordiales pour estimer les bilans contemporains de carbone à l'échelle planétaire et paramétriser puis valider les modèles climatiques prédictifs. Jusque dans les années 80, très peu de mesures répétitives de carbone inorganique et de la pression partielle pCO<sub>2</sub> 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'inversions atmosphériques. 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 l'ENSO. Elles ont enfin permis de dresser pour la première fois un inventaire de carbone anthropique dans l'océan mondial avec cependant de grandes incertitudes dans l'océan austral. Fort 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 (cadre du programme SOLAS) que sur la colonne d'eau (cadre de CLIVAR). En effet, ces observations permettent d'acquérir des informations déterminantes sur l'état du système biogéochimique dans l'océan, sur sa variabilité et son évolution (suivre l'accroissement du CO<sub>2</sub> dans les eaux de surface), sur le rôle de l'océan vis à vis du piégeage

du CO<sub>2</sub> atmosphérique, voire sur la manière dont il subit les impacts anthropiques (acidification et déplacement des niveaux de saturation des carbonates).

Les observations biogéochimiques (dont le CO<sub>2</sub> dans l'océan) telles que celles proposées dans l'observatoire CARAUS sont fondamentales pour accroître la connaissance des mécanismes internes océaniques ; elles aussi attendues pour valider les modèles de prédiction climatique. Le programme OISO (Océan Indien Service d'Observation, labéllisé 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.

**Résultats** : Cet ensemble d'observations a déjà permis l'obtention de résultats majeurs au rang desquels nous citerons :

- une première estimation directe de la variabilité saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> à l'interface air-mer en zone australe : les estimations des sources hivernales de CO<sub>2</sub> ont été révisées et utilisées pour 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, dans un contexte de réchauffement.
- la première campagne de mesures in-situ sur le système du CO<sub>2</sub> couplées aux observations satellitales de couleur de la mer.
- les premières mesures hydrologiques et biogéochimiques sur la colonne d'eau durant l'hiver et d'observer des couches de mélange profondes qui piègent une grande partie du carbone anthropique durant cette saison.
- l'identification du CO<sub>2</sub> anthropique en surface et sur la colonne d'eau.

**Prospective** : L'ensemble des résultats obtenus dans les océans Indien Sud et Austral montre l'intérêt de poursuivre les séries d'observations CARAUS (en été comme en hiver) pour évaluer la variabilité des flux et les mécanismes mis en jeu. Elles soulignent aussi les précautions à prendre pour extrapoler les résultats locaux et créer des climatologies basées sur peu de campagnes (notamment dans l'austral) ou pour évaluer les tendances décennales du CO<sub>2</sub> océanique et en déduire le piégeage de carbone anthropique dont les inventaires présentent d'importantes incertitudes en zone australe.

Dans les années à venir, il faudra compter sur d'étroites collaborations avec les partenaires au sein de l'IPSL, en particulier avec le Pôle de Modélisation du Climat. Il s'agit d'une part de mieux documenter la variabilité interannuelle à décennale des flux air-mer telle qu'elle peut être déduite des inversions de données atmosphériques (coopération avec le S.O. RAMCES et programme

FlamenCO2 de PROOF). En effet, seules des observations océaniques répétées d'année en année pourront nous éclairer sur l'origine de la variabilité actuelle. D'autre part, les données CARAUS seront utilisées afin d'évaluer la qualité des modèles océaniques et climatiques, notamment ceux incluant une composante biogéochimique (ORCA-P).

Ces études s'appuieront sur les liaisons organisées entre l'ORE CARAUS et le Service OPA de l'IPSL. De plus, les travaux originaux portant sur la variabilité interannuelle du cycle du carbone océanique dans les hautes latitudes sud (notamment via le compartiment biologique), devraient s'appuyer sur une collaboration avec l'ORE NDSC en vue d'évaluer le lien éventuel entre les variations de concentrations d'ozone et de lumière (visible et UV) disponible pour la production primaire marine. Enfin, CARAUS a un intérêt croissant pour l'utilisation de la base de données IPSL, afin de disposer de forçages réalistes (vent, nuage et précipitation) pour les modèles biogéochimiques que nous utilisons.

*Demandes en personnel* : au niveau Physicien CNAP plus un AI (mesures) et un IR développement instrumental (chimie marine, automatisation).

## **II.7.4 - Site Instrumental et observatoire SIRUS :**

**II.7.4.1 - Le site instrumental de télédétection de l'IPSL (SIRTA)** est un moyen d'observation focalisé sur la description des processus radiatifs et dynamiques au sein de la couche limite atmosphérique et à travers toute la troposphère libre. Les objectifs sont (i) de mieux comprendre les processus tels que le cycle de vie des nuages (eau et glace) et leurs impacts sur le rayonnement atmosphérique et la qualité de l'air, (ii) d'utiliser ces connaissances pour améliorer la représentation de ces processus physiques dans les modèles (météo, climat, chimie-transport), et (iii) de valider les observations satellitales de ces paramètres et de préparer les missions spatiales futures. Une base de données d'observation (2002-2004) des propriétés des nuages et de leurs précurseurs (aérosols, vapeur d'eau) a été développée à partir de mesures combinées par lidar (ondes visible et proche-IR), radar (ondes millimétriques) et radiomètres (visible, IR, micro-ondes). Ces observations ont déjà permis des avancées significatives sur :

- La représentation des nuages de couche limite dans les modèles de prévision météorologique (ARPEGE, ECMWF) et de changement climatique (LMDZ)
- La compréhension des processus dynamiques au sein des nuages de glace et leur représentation dans les modèles
- La distribution verticale des aérosols dans les atmosphère polluées et sa représentation dans les modèles de chimie-transport (CHIMERE)
- Les méthodologies de restitution des propriétés des nuages à partir d'observations par radar et lidar et l'exploitation de synergies instrumentales Les résultats obtenus démontrent l'intérêt des observations détaillées de l'atmosphère pour la communauté scientifique. La poursuite des observations va permettre d'échantillonner des situations météorologiques diverses et parfois extrêmes (canicules, situations de blocage, tempêtes). La pérennisation des observations de

type continu ou routinier va permettre également d'aborder l'étude des variabilités interannuelles des fréquences et intensités des systèmes nuageux observés, et ce dans un contexte de changement climatique accéléré (rétroaction des nuages liée à l'augmentation des gaz à effet de serre). C'est l'objectif de l'observatoire SIRUS (voir section suivante).

La poursuite du fonctionnement opérationnel du SIRTA est également un élément important pour l'enseignement universitaire dans les formations de second cycle et doctorales de l'institut, pour des initiations et des stages d'étudiants de l'UVSQ ainsi que pour des travaux de thèse. Plus de 200h de travaux pratiques sont enseignés chaque année au SIRTA depuis 1999, dont environ 100h pour dans le cadre de formations UVSQ. Ces travaux touchent des formations de plus en plus diverses et nombreuses (140 étudiants reçus en 2004). La pérennisation de ces observations nécessite des développements et consolidations, en terme d'infrastructure et de moyens d'observations, qui vont avoir lieu sur la période 2005-2007.

**II.7.4.2 - L'observatoire SIRUS** regroupe les observations du SIRTA à caractère opérationnel, ainsi qu'une communauté de chercheurs (instrumentalistes, modélisateurs, spécialistes des processus) impliquée dans l'étude du rôle des nuages et de leur impact radiatif sur le changement climatique. SIRUS a pour mission d'acquérir et de mettre à disposition de longues séries temporelles des propriétés macro et microphysiques, optiques et dynamiques de l'ensemble des nuages de la colonne atmosphérique et des flux radiatifs solaires et telluriques associés. Les objectifs sont de restituer les propriétés des nuages, de documenter leurs évolutions et d'étudier leurs rôles dans le changement climatique par l'observation et la modélisation. Avant même que de longues séries temporelles de données ne soient disponibles, les données de l'observatoire SIRUS permettront d'apporter énormément à la validation des nuages dans les modèles de climat. Les approches consistant à caractériser les propriétés nuageuses en fonction des différents régimes dynamiques auxquels les nuages sont associés paraissent particulièrement pertinentes : d'une part, elles servent de guide pour l'amélioration de la représentation physique des nuages dans les modèles, et d'autre part elles facilitent l'analyse des changements nuageux survenus dans la nature ou dans un modèle climatique sous l'effet de forçages naturels ou anthropiques.

La base de données SIRUS permettra également d'étudier les processus complexes mis en œuvre au cours du cycle de vie des nuages dans un grand nombre de situations. Les longues séries temporelles permettront d'échantillonner des situations qui se produisent fréquemment ainsi que des événements extrêmes. De plus, les observations de l'observatoire SIRUS vont permettre de développer une base de données de validation d'observations satellitales. Les observations à partir du sol des propriétés des nuages de la colonne au-dessus de la couche limite atmosphérique sont représentatives de domaines spatiaux en parfaite adéquation avec les résolutions spatiales de capteurs embarqués sur satellites.

L'observatoire SIRUS fait partie de deux réseaux internationaux d'observation de la troposphère du Global Energy and Water Experiment (GEWEX) Radiation Panel :

- Le groupe de travail « Cloud and Aerosol Profiling » (WCAP) dont l'objectif est d'harmoniser le fonctionnement des observatoires exploitants des instruments de télédétection active et passive pour l'étude des nuages et du rayonnement.
- Le réseau « Baseline Surface Radiation Network » (BSRN) dédié au suivi du bilan radiatif à la surface sur l'ensemble du globe à partir de sites d'observations de référence.

La participation active aux développements et activités de recherche au sein de ces deux réseaux est une des actions fondamentale de l'observatoire SIRUS.

*Demandes en personnel* : le développement de l'observatoire SIRUS demandera des moyens humains supplémentaires pour la recherche (CNAP ou enseignant-chercheur) et pour le traitement des données de télédétection (ingénieur d'étude en calcul scientifique).

## **II.7.5 - L'outil national OPA**

Le système OPA est une plate-forme de modélisation numérique de l'océan (dynamique et biogéochimie) et de la glace de mer. Ce système à été développé depuis 20 ans dans des laboratoires de recherches. Il est aujourd'hui largement utilisé dans le monde pour des projets recherche et opérationnel à la fois pour des études visant la compréhension des processus océaniques et pour la modélisation du climat. Ce système est actuellement en bonne place au niveau international. En effet, il conjugue une bonne représentation des processus modélisés et une structuration informatique performante et pérenne, grâce à l'existence d'un pôle d'expertise en océanographie et d'une expertise technique. Nous présentons le système OPA tel qu'il existe actuellement au LODyC puis la prospective à 4 ans.

### **II.7.5.1 - Présentation**

Les modèles ont aujourd'hui une représentation acceptable des phénomènes modélisés mais de nombreux progrès restent à faire, autant sur le plan de la science que sur celui des techniques de modélisation. Ceci requiert un développement pérenne de l'outil car il faut à la fois garantir la fiabilité et la continuité dans l'utilisation du système et permettre l'intégration des nouveaux développements. Cet objectif est réalisable dans un cadre associant étroitement l'équipe technique et la recherche en océanographie. C'est dans ce cadre que l'INSU a mis en place au LODyC, l'équipe Système OPA (ESOPA) dont l'existence a été officialisée lorsque le Système OPA a été labellisé comme « outil national » fin 2002. Il s'agit de mettre en place une équipe pérenne autour de ce système de modélisation de l'océan qui comprend un ensemble de codes sources (les composantes), de configurations de base et d'outils associés. Il s'agit d'une version de référence partagée par l'ensemble des utilisateurs. Leur évolution, mise en œuvre par l'Equipe Système OPA est alimentée par la communauté. Les outils de pré- et post-traitement associés permettent de configurer des simulations (MODIPSL) et mettre au point de fichiers d'entrée ou de visualiser et d'analyser des fichiers de sortie des simulations (SAXO, INTERP). Les configurations, dont un nombre restreint est

maintenu par l'Equipe Système OPA sont des applications utilisant un ou plusieurs composantes. Elles permettent de valider les évolutions des modèles et facilitent la mise en place des applications des utilisateurs, qui partagent donc ces modèles, et qui peuvent utiliser les configurations de référence ou en développer d'autres pour leurs propres besoins.

Le Système OPA a été enregistré par le CNRS à l'Agence de Protection des Programmes (APP) en 2002 comme œuvre collective. Le travail en cours via les services de valorisation du CNRS devrait permettre une diffusion sous licence libre (LGPL). Il est actuellement utilisé dans 48 sites dans le monde dont 18 en France mais un petit nombre de personnes est concerné par le développement pérenne du système (physique, numérique, pré- et post-traitements, interfaces, portabilité et architectures matérielles).

L'Equipe Système OPA doit assurer la coordination des développements pérennes du Système et leur intégration dans la version de référence. Le travail de cette équipe se définit en concertation avec la communauté des utilisateurs via des réunions plénières de l'ensemble des utilisateurs, des réunions des « développeurs », et des réunions du Comité de Pilotage du projet. Les différentes tâches permettant à assurer relèvent des aspects suivants :

**Fiabilité et continuité du système** : L'évolution de l'architecture des calculateurs et le développement de nouvelles physiques motivent la mise à jour fréquente de la version de référence du système et de son environnement. Pour cela, les codes doivent être lisibles et portables. L'utilisation d'une configuration est donc basée sur l'existence d'une version dite de référence, partagée par tous et remise à jour régulièrement. Une version de référence a une durée de vie de 2 à 4 ans et s'appuie fortement sur la version précédente. Une configuration de base correspond plutôt à l'engagement d'un projet scientifique ; elle a une durée de vie de 3 à 5 ans, souvent plus, et peut reposer sur plusieurs versions de référence successives. Le rôle de l'équipe Système OPA est de maintenir la version de référence, de la tester et de la valider pour les configurations de référence, d'y intégrer tous les nouveaux développements utiles en veillant à ce qu'ils restent cohérents, et de la documenter. Il est aussi de mettre en place, de maintenir, et de valider les configurations de référence dans la version la plus récente du système.

**Assistance aux utilisateurs de la plate-forme OPA** : Dans un contexte de diversification de l'utilisation du Système OPA et d'accroissement du nombre d'utilisateurs, l'assistance doit tenir ses utilisateurs informés de l'évolution de la version de référence et des configurations. A cette fin, les pages web contiennent toutes les informations nécessaires à l'installation du Système OPA dans une configuration donnée. Par leur intermédiaire, tout utilisateur est en mesure d'extraire une configuration, de l'utiliser, de comparer ses propres résultats avec ceux de la référence, et d'accéder aux outils nécessaires pour développer sa propre configuration. Ainsi, le rôle de l'assistance est d'aider les utilisateurs à installer le système lorsque les pages web ne suffisent pas et à résoudre les problèmes de compilation et/ou d'exécution. Compte tenu du grand nombre de combinaisons possibles au niveau des paramétrisations physiques, l'assistance n'a pas l'expérience de l'ensemble des choix possibles mais elle a une plus grande maîtrise sur les configurations de référence.

**Veille technologique, architecture et environnement** : Pour assurer la continuité du service sur le système OPA, une veille technologique est nécessaire. Il s'agit de suivre les évolutions techniques pour que les outils actuels restent opérationnels ou qu'on puisse en changer à temps sans trop de gêne pour les utilisateurs.

**Intégration-Développements scientifiques** : Le développement scientifique étant du domaine des équipes de recherche, la responsabilité de l'équipe Système OPA se situe aux niveaux de la coordination des développements afin d'éviter les doublons, de la mise en place et du maintien des normes de développement, de conseil et d'expertise lors de la mise en œuvre de développements, et d'aide aux équipes scientifiques afin d'assurer que ces développements soient compatibles avec les différentes composantes de la plate-forme et les différents calculateurs offerts à la communauté. L'équipe Système OPA récupère auprès des équipes de recherche les développements réalisés selon les normes et reconnus d'utilité générale et les insère dans le système de référence. Après concertation avec la communauté et avis du comité de pilotage, elle peut intégrer de nouvelles fonctionnalités ou physiques développées et validées dans d'autres codes océaniques ou biogéochimiques.

**II.7.5.2 - Prospective** : Les enjeux pour les années à venir concernent les aspects suivants :

**Dynamique de l'océan, couplages en surface** : Les enjeux concernent l'utilisation de la plus haute résolution (horizontale et verticale) ainsi que le développement de nouvelles paramétrisations physiques et biologiques et d'outils pour changer de résolution plus facilement sur une grille globale et pour réaliser des zooms.

**Couplages et cycle du carbone** : La composante de biogéochimie marine est en cours d'intégration dans le modèle système terre, permettant la prise en compte du cycle du carbone. Cette nouvelle étape induira probablement des développements pérennes dans les composantes du Système OPA (cycle diurne, etc...).

**Prévision océanique** : Les projets d'océanographie opérationnelle se précisent (MERSEA) et les techniques d'assimilation sont en cours de validation et en évolution rapide. Le développement pérenne du système pour ces applications demandera un effort pour intégrer les développements et définir des interfaces cohérentes.

**Océanographie côtière** : Les projets de modélisation côtière avec OPA se développent (Hadley Center en particulier, mais aussi plusieurs projets de recherche en France). En relation avec ces projets, il est prévu d'intégrer les interfaces AGRIF (Adaptive Grid Refinement In Fortran, dans la version de référence).



**PEPO (Performances et Portabilité)** : La diversité des applications et des machines disponibles incite à une démarche active de participation aux bancs d'essais et d'expérimentation sur les nouvelles machines (Earth Simulator) pour se donner de bons arguments sur quand et comment franchir les étapes de portabilité et d'optimisation.

Du point de vue des projets opérationnels, **MERCATOR** se base sur le système OPA pour ses configurations de modèle direct. Le Hadley Center (Angleterre) devrait adopter le Système OPA au printemps prochain pour ses études tant climatiques que côtières tandis que d'autres équipes d'Angleterre, d'Italie, d'Allemagne et de Belgique, en envisagent la mise en oeuvre pour des études climatiques. Le défi posé est de construire une plate-forme commune de modélisation numérique de l'océan pour la recherche et l'opérationnel. C'est le sens de l'engagement pérenne de l'INSU vis à vis des utilisateurs, via la reconnaissance du Système OPA comme outil national. A terme, ce système (les modèles, les configurations standards et les outils associés) sera une contribution majeure à la construction d'un outil commun de modélisation océanique dont la construction est en cours au niveau européen (Consortium NEMO : Nucleus for European Modelling of the Ocean).

## II.8 - Centre de Données

Le Centre de Données de l'IPSL entend continuer à renforcer ses activités autour des centres thématiques reconnus d'intérêt national (ETHER, ICARE), autour de bases de données rattachées aux activités fédératives (Pôle de Modélisation, Pôle de Planétologie, Pôle eau, SOON), tout en cherchant à répondre à des demandes plus ponctuelles de chercheurs de l'IPSL présentant un intérêt partagé au sein de l'Institut ou de la communauté nationale (base de données de modèles de prévision atmosphérique, de modèles de climat, flux océan/atmosphère, couleur de l'eau,...).

L'Institut est fortement impliqué dans ETHER, pôle thématique portant sur les données de chimie atmosphérique récemment créé par les organismes (CNES et INSU) et faisant suite au centre de données dont l'IPSL avait la responsabilité (partagée avec le CNES jusqu'en 2003). L'IPSL est également l'un des deux centres d'expertise pour la base thématique nationale ICARE consacrée aux nuages, aérosols, paramètres du cycle de l'eau à leurs interactions avec le bilan radiatif de la Terre. Nous décrivons donc de façon relativement détaillée ci-dessous les activités techniques liées à ETHER et au Centre d'Expertise ICARE/IPSL (CEXII) qui se met actuellement sur pied. Les activités générales complémentaires du Centre de Données sont décrites dans un 3<sup>ème</sup> paragraphe.

### II.8.1 - 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. En effet ETHER était principalement dédié jusqu'en 2003, aux données satellites concernant la chimie de la haute atmosphère (stratosphère principalement). Les contours redéfinis en 2004 étendent sa mission 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,...). Par ailleurs, une structuration en groupes thématiques est en cours de mise en place au sein de la communauté nationale ETHER.

L'IPSL joue un rôle majeur dans ETHER, avec la responsabilité de la base de données (unique base ETHER depuis l'arrêt du serveur CNES fin 2003). Pour le Centre de Données de l'IPSL, l'évolution d'ETHER doit être accompagnée de nombreux développements techniques (certains sont déjà en cours) : structuration du serveur ETHER tenant compte du découpage en groupe d'expertises, extension des capacités de stockage, prise en compte des nouveaux types de données à distribuer, normalisation des données... Les relations entre le serveur de données ETHER et les données gérées par le service d'observation NDSC sont également à améliorer.

Par ailleurs, il faut noter que l'IPSL prend actuellement en charge une partie du traitement opérationnel des données de niveau 1 du satellite ODIN. Ce type d'action (traitement opérationnel systématique) devra rester d'amplitude limitée à l'IPSL dont le centre de traitement des données n'est pas dimensionné pour répondre à des besoins opérationnels, ni en moyens humains, ni en moyens matériels.

Les chercheurs de l'IPSL ayant une implication dans ETHER ou bénéficiant des services ETHER se répartissent au SA, au LMD et au LSCE, mais le rayonnement de ETHER dépasse largement le cadre de l'IPSL. Avec 13 laboratoires français et au moins 4 instituts étrangers impliqués, c'est un service utilisé par une centaine de chercheurs. Du fait de l'évolution prévue (voir ci-dessus), et de projets européens qui vont s'y rattacher (notamment projet ACCENT), ce service est amené à se développer dans les prochaines années. En regard de cela, l'effectif technique sur lequel repose actuellement l'activité autour d'ETHER à l'IPSL est relativement limité : 1 IR-CNRS, 1 AI CNRS (recrutement fin 2004) affectées à l'IPSL, 2 IE-CDD CNES en cours de recrutement. Un soutien important du CCR (Centre de Calcul) de Jussieu est apporté pour l'archivage et la sauvegarde des données.

Etant donné le rôle important de l'IPSL dans ETHER, il apparaît souhaitable de prévoir deux recrutements de permanents au cours des quatre prochaines années : un *informaticien développeur* de codes et bases (IE) et un *thématicien* (IE ou IR).

## **II.8.2 - Base thématique Nuages/rayonnement : Centre d'expertise ICARE-IPSL**

Le pôle thématique national ICARE a été institué par la convention du 24 octobre 2003 entre le CNRS, l'INSU, l'Université USTL et la région Nord-Pas-de-Calais. Son objectif est de développer, produire, distribuer des produits géophysiques dérivés des missions spatiales destinées à observer les nuages, les aérosols et les paramètres du cycle de l'eau atmosphérique ainsi que d'en promouvoir et d'en faciliter l'utilisation scientifique.

Le pôle ICARE est organisé autour de deux types d'entités : un Centre de Gestion et de Traitement de Données (CGTD à objectif opérationnel de production de données), situé à Villeneuve d'Ascq, et des centres d'expertise scientifique sur la thématique « aérosols, nuages, rayonnement et eau ». L'IPSL est l'un des deux centres d'expertise identifiés à ce jour (avec le LOA). L'objectif de ces centres d'expertise est d'apporter au pôle thématique, les connaissances les plus récentes issues de la recherche permettant de définir des « produits » issus des observations spatiales, de proposer de nouveaux algorithmes, de valider les données de missions spatiales et les algorithmes mis en place, et de valoriser par la recherche les données produites.

Le « Centre d'Expertise ICARE/IPSL » (CExII) a des objectifs qui lui sont propres, notamment dans le domaine de l'étude, du développement et de la validation des méthodes de traitement et d'analyse des données d'expériences spatiales concernant la thématique ICARE. Ces travaux sont préparatoires avant transfert pour développements ultérieurs et application opérationnelle, au CGTD. Il a également pour vocation de développer des bases de données permettant la réalisation des tests et validations des méthodes qu'il développe. Certaines de ces bases de données peuvent être transférées au CGTD pour développement et pérennisation, d'autres répondent aux besoins d'expériences spécifiques auxquelles participent les laboratoires de l'IPSL. Pour ces expériences spécifiques, il est important que les utilisateurs restent proches des bases de données, de façon à pouvoir expérimenter facilement les traitements qu'ils souhaitent mettre en œuvre. De par sa structure

communautaire, le CExII s'attache également à favoriser les échanges scientifiques entre les utilisateurs, avec mise en commun de méthodologies, de produits et/ou d'objectifs scientifiques.

Il a donc été proposé de mettre en place au niveau de l'IPSL des moyens d'archivage réduits par rapport à ceux du CGTD mais suffisamment importants pour permettre de satisfaire les besoins utilisateurs tels que définis ci-dessus. Il s'agit donc de mutualiser des moyens informatiques au niveau du centre d'expertise IPSL. Le service ClimServ, regroupant moyens de calcul et de stockage, installé au LMD Palaiseau, est une des composantes du centre de données IPSL et sert de base pour la construction du système à mettre en place à l'IPSL. Les projets développés au sein de l'Institut et nécessitant l'utilisation de moyens informatiques communs et de bases de données regroupés dans le CExII sont de plusieurs types :

- Préparation d'expériences spatiales relevant de la thématique ICARE, mise au point d'algorithmes destinés à être transférés au CGTD, validations. Deux expériences relèvent actuellement de cette catégorie, l'expérience CALIPSO, dont le lancement est prévu en 2005, et l'expérience MEGHA-TROPIQUES, dont le lancement est prévu en 2009.
- Établissement de climatologies à partir de données de satellites, avec là aussi deux projets l'un portant sur le bilan radiatif de la Terre au moyen des diverses missions qui se sont succédées depuis le début des années 1980, l'autre sur l'analyse des résultats des différents sondeurs atmosphériques emportés sur les satellites depuis les mêmes dates.
- Développement de bases de données pour les besoins d'expériences spécifiques faisant partie de la thématique ICARE, telles celles des données satellites d'AMMA (AMMA-SAT) ou du SIRTa.
- Projets ciblés sur des produits ou des analyses de données spécifiques concernant par exemple, l'estimation des précipitations (TRMM, Megha-Tropiques, GPM et E-GPM), la climatologie africaine, et la combinaison lidar/radar.

Dans cette approche, le centre de données et le CExII ont pour objectif de mettre à disposition des chercheurs de l'IPSL un sous-ensemble de données des centres opérationnels – sur une durée ou une région limitée- mais multi-sources (multi-capteurs, combinaison observations sol/satellite, combinaison modèles/données satellites,...). Il ne s'agit en aucun cas d'une simple duplication de l'archivage de données existant ailleurs : la valeur ajoutée des données mises à disposition par l'IPSL réside dans cet aspect multi-sources, 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.

Cette activité est réalisée au bénéfice de chercheurs de l'IPSL qui se répartissent principalement entre le CETP, le SA, le LMD, et le LSCE. Le lancement prochain des satellites de l'AQUA-TRAIN (notamment CALIPSO), et la préparation de missions spatiales récemment décidées ou proposées (MEGHA-TROPIQUES, EARTHCARE E-GPM...) conduira à un renforcement de cette activité dans les prochaines années. Cette évolution devra s'accompagner d'une augmentation des capacités de stockage de données et des capacités de calcul associées à ces données.

Le personnel technique sur lequel repose le centre d'expertise ICARE de l'IPSL est actuellement constitué d'une IR-CNRS affectée à l'IPSL (pour la gestion du serveur Climserv et des données) et de 5 CDD « ICARE » affectés dans les laboratoires de l'IPSL (pour des activités liées à l'algorithmie satellitaire et à la base de données AMMASAT). Etant donnée la croissance de l'activité liée au CExII, *une forte priorité est donnée au recrutement de personnel sur cette activité.*

### **II.8.3 - Activités générales**

Dans les prochaines années, le Centre de Données continuera à mener des actions pour la mise à disposition, et la diffusion de données, dans une dynamique fédérative, et en partenariat avec les pôles de l'IPSL.

- Le métacatalogue de données a été mis en place depuis plusieurs années. Il regroupe l'information sur les données produites par les chercheurs de l'IPSL ou sur les données externes mises à disposition de chercheurs de l'Institut, avec un système d'interrogation (interface homme/machine) avancé. La norme DIF, choisie pour fournir les informations sur les données, est compatible avec plusieurs systèmes internationaux d'interrogation de bases de données, ce qui donne une bonne visibilité à ce métacatalogue qui, pour qu'il trouve tout son intérêt, devra être maintenu dans la durée, enrichi de nouvelles informations et accompagné d'une interface homme/machine régulièrement améliorée.
- Un effort très important a été réalisé ces trois dernières années pour mettre à disposition des chercheurs de l'IPSL, les ré-analyses 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). Cette activité sera poursuivie comme une activité « de fond », lors des prochaines années, l'essentiel des ré-analyses ayant récemment été rapatrié à l'IPSL.
- Le Centre de Données s'est engagé en 2004 dans la mise en place d'une base de données " atmosphère planétaire " en collaboration avec le pôle de planétologie. La base de données va dans un premier temps accueillir les données de l'instrument SPICAM déployé dans le cadre de la mission Mars-Express, et s'enrichira progressivement de données acquises lors de missions antérieures (OPE sur la mission Giotto de l'ESA, ISAV sur la sonde russe vénusienne Vega, AUGUSTE sur l'orbiteur Phobos de Mars, ...) et de données de futures missions (ACP sur Huygens, SPICAV sur Venus-Express, ...). Il sera progressivement, et le plus rapidement possible, ouvert à la communauté nationale et internationale. 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).
- Un soutien du Centre de Données est prévu pour mettre à disposition les simulations du modèle de climat, réalisées par le pôle de modélisation dans le cadre des simulations pour le GIEC. A plus long terme, on doit envisager une mise à disposition plus systématique de résultats de simulations des modèles de circulation atmosphérique, océanique, ou des modèles climatiques.

- Le Centre de Données continuera d'apporter un soutien ponctuel à la mise à disposition des données du site expérimental SIRTA de l'IPSL, (observations in situ, radars, lidars, radiomètres, sorties de modélisation,...), en fonction des besoins liés aux projets du SIRTA (notamment l'expérience sur la convection nuageuse et la vapeur d'eau atmosphérique, prévue en 2005).
- En ce qui concerne les données relatives aux services d'observation de l'IPSL, celles-ci sont gérées directement par ces services. Le Centre de Données IPSL devra aider à harmoniser tout ce qui peut l'être (portail commun, référencement croisés, politique de distribution, type de données distribuées, ...). Un des objectifs communs de ces services est de mettre à disposition des données comportant de la valeur ajoutée par rapport aux mesures d'origine.
- Accueil de nouvelles bases de données, à la demande des chercheurs de l'IPSL : plusieurs demandes ou suggestions récentes de chercheurs ou groupes de chercheurs de l'IPSL montrent que ceux-ci ont bien compris l'intérêt du centre de données, à la fois comme outil interne à l'IPSL et comme dispositif jouant un rôle national voire international. Dans cet esprit, les nouvelles actions possibles pourront concerner notamment : i) La mise en place (en 2005 et 2006) d'une chaîne semi-automatique de traitement de données satellitaires (dont les algorithmes sont issus de travaux de recherche à l'IPSL) pour fournir de façon systématique à une large communauté (modélisateurs de l'océan, climatologues,...), les flux de chaleur, le flux de précipitation et le bilan Evaporation-Précipitation à la surface des océans, estimés à partir des observations par satellite sur une durée supérieure ou égale à 10 ans, ii) à plus long terme, selon les propositions scientifiques, la coordination au niveau national et les moyens humains disponibles, une mise en place d'une procédure de traitement et de mise à disposition d'un produit « couleur de l'eau » de capteurs satellitaires pourrait être envisagée.
- De façon générale, de nouveaux développements de services à valeur ajoutée (visualisations, outils statistiques, outils de co-localisations) continueront à être mis en place ou mutualisés au bénéfice de tous les utilisateurs des données gérées par le centre de données.
- Une activité de veille sur les techniques de grille sera maintenue, et quelques activités pilotes autour de cette technologie pourront éventuellement démarrer (selon le personnel disponible). Rappelons que cette technologie, actuellement en plein essor (plusieurs projets européens), est d'un grand intérêt pour développer l'inter-opérabilité entre bases de données ou entre moyens de calcul et base de données. Même si l'IPSL se place avant tout comme un utilisateur potentiel de cette technique, il est important que certains ingénieurs acquièrent une connaissance technique approfondie dans ce domaine.

Toutes ces activités reposent sur le travail de 3 permanents (2 jusqu'en 2004) du centre de données qui sont également impliquées dans ICARE et ETHER. Des recrutements sont nécessaires pour développer ces activités. Pour définir les priorités en sein de cet ensemble d'objectifs, le comité de pilotage, composé de chercheurs de l'IPSL représentant la plupart des types de besoins en matière de données continuera à jouer son rôle de modérateur et coordinateur.

## **II.8.4 - Moyens techniques**

L'architecture du Centre de Données repose donc sur 4 serveurs principaux, situés sur trois sites de l'IPSL (Campus Jussieu-Université Pierre et Marie Curie, laboratoire LMD sur le site de l'École Polytechnique, laboratoire CETP à Vélizy) et hébergeant chacun différentes bases de données. Il s'appuie également sur les moyens de calcul et d'archivage de centres extérieurs (CEA, IDRIS, CCR). Ces moyens sont régulièrement mis à niveau, avec le soutien actif d'ingénieurs «informatique système» des laboratoires de l'IPSL mais le développement d'ICARE et d'ETHER va être associé à une croissance significative des moyens informatiques.

### **Demandes en personnel :**

- 1- IE système et réseau sur les moyens affectés au centre d'expertise ICARE (pourrait être à temps partagé avec le LMD)
- 2 - IR développement bases de données thématiques – application à ICARE
- 3 - IR développement bases de données thématiques - application à ETHER,
- 4 - IE informatique système, base de données application ETHER, développement de nouveaux outils grille et veille technologique.

## II.9 - Groupes de travail

Les Groupes de Travail, Dynamique des Fluides Géophysiques, Neuratel (inversion de données satellitales par réseau de neurones), GAPI (assimilation de données et problèmes inverses), CLIMSTAT (climat et statistiques) vont poursuivre leurs activités avec des objectifs présentés ci-dessous. Notons cependant que, suite à une recommandation formulée lors de l'analyse thématique conduite par le Conseil Scientifique des activités de l'IPSL (cf résumé en annexe), les Groupes de Travail Neuratel, GAPI et CLIMSTAT, envisagent de fusionner pour former un Pôle Scientifique. Le souhait de former un tel Pôle a également été formulé par le Groupe de Travail, Dynamique des Fluides Géophysiques. A l'inverse, de nouveaux Groupes de Travail pourraient être formalisés à l'initiative de groupes informels (stratosphère, Méditerranée,... ) ou dans la ligne de suggestions faites lors de cette analyse thématique (par exemple sur les aspects liés, d'une part, aux impacts, de l'autre, aux cycles biogéochimiques).

### II.9.1 - Dynamique des Fluides Géophysiques

Jusqu'ici les travaux de ce Groupe de Travail, organisés sous forme des séminaires informels réguliers et des discussions les accompagnant, ont montré le potentiel de la communauté "dynamique" de l'IPSL et sa capacité d'apporter des réponses aux questions sur l'identification et la meilleure compréhension des mécanismes dynamiques des base. 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 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 de l'ordre du km dans l'océan sont aussi très demandeurs de meilleure compréhension des mécanismes de base. De l'autre coté, l'augmentation 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, ....

Pour la période 2004-2008, les dynamiciens de l'IPSL (qui souhaitent regrouper leurs activités au sein d'un pôle) proposent d'orienter leur activités vers certains thèmes- clefs tels que :

- L'interaction onde - écoulement moyen, y compris les effets non linéaires (déferlement des ondes), avec un double accent sur les aspects dynamiques (la traînée des ondes) et ceux du mélange et le transport (perméabilité des barrières dynamiques, mélange vertical dans l'océan).
- La fronto- cyclogenèse, ajustement géostrophique, dynamique des fronts et des jets.
- Les effets topographiques, ondes de relief (contexte atmosphérique et océanique).
- La dynamique équatoriale, ondes équatoriales non linéaires, interaction onde - écoulement moyen dans les basses latitudes.



- La dynamique côtière: instabilités de fronts d'upwelling et courants côtiers, transport côte - large.
- Instabilités hydrodynamiques, instabilité symétrique et son rôle dans les phénomènes météorologiques intenses
- La dynamique de la couche limite, convection.

## II.9.2 - Neuratel

Un nouvel axe de recherche sur l'assimilation des données, introduit en 2000, constituera un des thèmes essentiels pour Neuratel pour la période 2006-2009. Il s'agit des inversions variationnelles très employées par les géophysiciens et qui permettent, en particulier, d'aborder l'assimilation des données dans les modèles physiques. Ces inversions utilisent un modèle direct (relation liant les variables géophysiques aux observations) qui décrit la physique du phénomène étudié et travaille dans le domaine des observations afin de déterminer les variables physiques qui les ont inférées. Elles consistent à déterminer le minimum d'une fonction de coût mesurant l'écart entre les observations et le modèle physique en faisant varier les paramètres du modèle physique (dits "paramètres de contrôle"). Cette méthode est très coûteuse sur le plan informatique, puisque tout physicien qui cherche à l'employer doit tout d'abord calculer les gradients de cette fonction de coût par rapport aux variables de contrôle.

Une approche nouvelle, basée sur la décomposition de systèmes complexes en graphes, est en cours de développement au LOCEAN. Le formalisme proposé est très utilisé en méthodologie neuronale. Son intérêt est de discrétiser les équations dynamiques de la physique sous forme de graphe, où chaque point du domaine discrétisé est en relation avec des prédécesseurs lui transmettant une information (par exemple, les points adjacents lui transmettent un flux de traceur par advection) et des successeurs qui reçoivent de l'information de ce point. Les équations envisagées peuvent être de type classique (fonction analytique dérivable) ou des réseaux de neurones. Le formalisme modulaire permet une modélisation par objet et la conception d'un outil général (YAO) permettant à l'utilisateur de se concentrer sur la spécification et de réduire sa part de programmation. Le code étant écrit sous cette structure, cela permet d'avoir de façon quasi-automatique le code adjoint permettant de calculer le gradient d'une fonction de coût. Un grand avantage de cette méthode est sa flexibilité et la facilité avec laquelle il est possible de modifier une partie du code.

A l'heure actuelle, la méthodologie a été testée sur différents exemples académiques ; elle a montré sa capacité à produire facilement des modèles adjoints et à permettre l'assimilation des données en 4-D VAR (prise en compte des observations à n'importe quel moment durant le temps d'assimilation). Son utilisation dans le cadre de l'inversion variationnelle d'images de télédétection, doit permettre d'obtenir un modèle adjoint prenant en compte les dépendances spatiales de l'image. YAO peut s'avérer très intéressant pour la communauté des géophysiciens. Une partie des efforts de recherche sera donc mis dans l'élaboration d'un outil facilement accessible aux personnes qui veulent initier des recherches en assimilation 4D-VAR des données.

### **II.9.3 - GAPI (assimilation de données et problèmes inverses)**

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 se concentrera autour des points suivants.

- Développement de l'enseignement sur les méthodes d'assimilation et les problèmes inverses. Un tel enseignement existe, sous la forme de cours donnés dans les différents DEA de la mouvance IPSL. Mais il est encore incomplet et un peu disparate, et beaucoup de chercheurs débutants doivent encore chercher les éléments de base de leur travail dans une littérature touffue et des contacts personnels plus ou moins occasionnels ou aléatoires. Il importe de coordonner, dans le cadre plus général de la réforme LMD, les différents cours déjà dispensés et, peut-être, d'en créer de nouveaux.
- Mise en commun et échange de logiciels entre les différents Laboratoires de l'IPSL. Le but est ici d'éviter la répétition, trop fréquente, de tâches de programmation similaires. Cette activité demandera qu'un informaticien en reçoive spécifiquement la responsabilité au sein de l'IPSL.
- Organisation de séminaires réguliers. C'est principalement pour cette action particulière que le GAPI demandera un soutien financier, dans le but d'inviter des conférenciers extérieurs.
- Organisation régulière 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.

### **II.9.4 - CLIMSTAT**

Le groupe de travail "Climat et Statistiques" a dégagé, pour les années à venir, les actions prioritaires suivantes :

- La poursuite à un rythme quasi-trimestriel des journées scientifiques “ Climat et Statistiques ” avec la participation de spécialistes français et étrangers et l'organisation de séminaires spécialisés. Les journées de présentations se focaliseront sur un sujet bien déterminé : il pourra être thématique (i.e. présentation de divers outils mathématiques pour la résolution d'un problème climatique) ou bien technique (i.e. présentation de diverses applications climatiques d'une même technique). Deux journées sont actuellement à l'ordre du jour : l'une thématique (rétro-actions climatiques) et l'autre serait technique (détection de signaux).
- La maintenance du 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.

Avec un effort de maintenance suivi, ce site WEB pourra devenir un véritable outil de travail pour la communauté scientifique.

- Dans la mesure du possible, le groupe “ Climat et Statistiques ” jouera aussi le rôle d'experts auquel les chercheurs pourraient faire appel en cas de besoin. L'organisation de cette activité de consulting reste à déterminer, mais pourra s'appuyer sur les notes techniques publiés par CLIMSTAT.
- L'organisation d'une école d'été sur la thématique des statistiques pour l'analyse du climat. Cette école serait préférentiellement ouverte aux doctorants et aux jeunes chercheurs de l'IPSL.
- La consolidation des liens avec la communauté statistique à travers le groupe du groupe "Environnement" de la Société Française de Statistique (SFdS),.
- La formation à différent logiciels de statistiques.
- La mise en place d'une « NewsLetter » par E-mail afin de simplifier la dissémination des nouvelles méthodes statistiques
- La poursuite de la publication des comptes rendus des journées CLIMSTAT dans les Notes des Activités Instrumentales (NAI) de l'IPSL.

Demandes en personnel **au niveau des Groupes de Travail** : 1 IR Informaticien, traitement des données.

## II.10 - Projets structurants et collaborations

La stratégie de développement de l'IPSL s'inscrit à l'évidence dans un contexte national et international extrêmement dynamique. Ceci vaut aussi bien pour les recherches sur le climat, avec toutes ses composantes, et plus généralement, sur l'environnement terrestre que pour celles liées à l'étude des Planètes et des milieux ionisés. La stratégie de l'IPSL tient compte de ce contexte et s'appuie sur de nombreux partenaires en France et à l'étranger, plus particulièrement sur le plan Européen. Au-delà d'un tissu très riche de collaborations mises en oeuvre au niveau des équipes de recherche et des laboratoires, certains grands projets impliquent, de par les thématiques très larges qu'ils couvrent, plusieurs laboratoires de l'IPSL. Ils peuvent donc bénéficier d'une dynamique interne à l'IPSL et, en retour, jouer un rôle structurant dans la stratégie scientifique de notre Institut. Sans être exhaustif, il nous semble intéressant de citer certains de ces programmes au sein desquels l'IPSL a, ou tout au moins devrait avoir, une forte visibilité, en mentionnant de façon succincte la façon dont les équipes de l'Institut y sont impliquées.

**AMMA** : Malgré des travaux assez nombreux conduits depuis 20 ans sur différents aspects de la Mousson de l'Afrique de l'Ouest - biosphère, hydrosphère, atmosphère (physique et chimie) - de l'échelle locale à la grande échelle, des questions fondamentales restent sans réponse. Ainsi en est-il de l'augmentation du déficit pluviométrique observé régionalement depuis les années 1970, dont les causes potentielles sont multiples et incertaines :

- Interactions d'échelles et Couplage Océan-Atmosphère-Continent,
- Rôle important aux échelles régionale & globale des aérosols et de la chimie,
- Transport important mais non quantifié à l'échelle convective et régionale : couplage convection-chimie/aérosols-dynamique,
- Dynamique de la mousson: composantes atmosphériques assez bien connues, interactions entre composantes importantes et mal connues,
- Interactions d'échelle (convective - régionale) mal quantifiées,
- Variabilité intra-saisonnière à interannuelle (climat, météorologie, hydrologie, ...).

Par ailleurs, on sait que les facteurs environnementaux (climat, météorologie, aérosols, ...) ont un impact fort sur la santé, les ressources en eau, l'agriculture, ... mais les liens sont parfois non expliqués (au delà de l'existence de corrélation). S'agit il de problème d'échelles, de désagrégation de l'information, .... ?

Pour répondre à ces questions majeures, le besoin de travaux de recherche multidisciplinaires a été affirmé. AMMA est ainsi une étude régionale intégrée, et un projet pluri-annuel, multidisciplinaire et multi-échelle. Ses objectifs sont i) de faire avancer nos connaissances sur la Mousson Africaine dans ses aspects physiques, chimiques, hydrologiques, et son conditionnement par les interactions océan-atmosphère-continent, ii) d'améliorer les bases scientifiques qui permettront d'aborder les problèmes de ressources en eau, de sécurité alimentaire et de santé dans les pays d'Afrique de l'Ouest et iii) de définir les stratégies d'observations adéquates.

Le projet AMMA, initié par un groupe de chercheurs français lors de la prospective INSU/OA en 2000, est devenu un programme international majeur d'étude intégrée de la mousson africaine. Il implique la grande majorité des laboratoires français et établissements de recherche concernés par les thématiques du projet. Il est retenu comme « Hot Spot » de l'action Climat du 6<sup>ème</sup> PCRD (démarrage en 2005) et inclut un partenariat scientifique avec les principaux pays d'Afrique de l'Ouest et une collaboration avec les Etats-Unis. La phase expérimentale a démarré en 2002 pour ce qui concerne les observations long terme, et des mesures intensives seront conduites lors de la saison 2006, encadrées par des mesures de routine densifiées pendant les deux cycles annuels encadrant cette période. L'IPSL participe largement au programme AMMA, à travers la prise en charge d'actions scientifiques (work packages - WP) dans le projet européen et sur le plan national, et la coordination scientifique du projet intégré. Les équipes de plusieurs laboratoires sont très actives dans les phases de terrain, ainsi que dans les études climatiques et les études d'impact. L'IPSL pilote le développement de l'observation satellitale et des bases de données. AMMA est donc un programme structurant fort pour l'IPSL, impliquant largement les acteurs du pôle Cycle de l'eau, et intéressant le Pôle Modélisation du Climat. Le Centre de données a la responsabilité technique des données satellitales (dans le cadre du CExII/ICARE). Le bureau du projet européen va être implanté au sein de l'institut, sur le campus de l'UPMC. Environ 20 chercheurs de l'IPSL travailleront à temps plein sur le programme dans les 5 années à venir avec comme principaux responsables :

- J. Polcher : coordinateur du programme européen,
- S. Janicot : responsable d'un WP et de l'EOP (Extended Observing Period) en France,
- M. Desbois : responsable du volet satellite (WP) + France,
- A. Protat : responsable pour la France des observations depuis le sol,
- L. Eymard : responsable bases de données (WP)+ France,
- F. Hourdin : responsable pour la France de la modélisation grande échelle
- C. Flamant : coordinateur de la période intensive (démarrage et phase centrale de la mousson)
- K. Law : responsable du WP chimie atmosphérique
- S. Cloché : responsable technique base de données AMMASAT

**ENSEMBLE** est un projet intégré du 6<sup>ème</sup> PCRD coordonné par le Hadley Centre (responsable IPSL : H. Le Treut). L'objectif est de munir l'Europe d'un système de prévision climatique couvrant les échelles de temps saisonnière à multidécennale. Il intègre des simulations climatiques globales et régionales, les liens avec les modèles d'impact (agriculture, industrie), la concertation avec les économistes, et la formation. Ce projet intégré regroupe 70 partenaires. L'IPSL est l'un des principaux partenaires. Il a la co-responsabilité du RT4 (H.Le Treut, LMD et J.Slingo, CEGAM, UK) dont l'objectif est de réduire les incertitudes des projections climatiques grâce à une meilleure compréhension des processus et rétroactions mis en jeu ainsi que la responsabilité des WP4.1 (P. Friedlingstein) "feedbacks et climate surprises" et WP5.2 (P. Braconnot) "Evaluation of processes and phenomena". La prospective du Pôle de Modélisation du Climat est remarquablement inscrite dans ce projet, avec une participation dans de nombreux "workpackages".

Les principaux engagements concernent la construction du modèle système Terre de l'IPSL en ajoutant pas à pas les composantes biogéochimiques et la participation aux simulations d'ensembles du changement climatique suivant les scénarios recommandés au fur et à mesure de l'accroissement de

complexité du modèle. Les analyses prévues serviront à comprendre (RT4) et évaluer (TR5) les différents processus et rétroactions mis en jeu en s'intéressant aux régions tropicales (mousson, ENSO) et à leur téléconnexions, ainsi qu'aux processus faisant intervenir la vapeur d'eau, les nuages, le rayonnement et les modifications de la circulation océanique. Les processus intervenant dans les régions polaires ou concernant la glace de mer seront traités en interaction avec le LGGE et l'UCL. Les rétroactions liées aux cycles biogéochimiques seront également considérées en mettant l'accent sur l'impact du changement climatique et de la teneur en gaz carbonique sur l'utilisation des sols. L'IPSL s'est aussi engagé à coupler OPA au modèle du centre européen à des fins de prévisions saisonnières à décennales, et à analyser et développer des méthodes de test pour évaluer la représentation des fluctuations intra-saisonnières issues des prévisions saisonnières et les structures dynamiques associées.

**CARBOOCEAN** : Le projet européen CARBOOCEAN est un projet intégré relevant également du 6<sup>ème</sup> PCRD (thème "Changement global et écosystèmes"). L'objectif est d'établir une évaluation précise de la distribution spatiale et de l'évolution temporelle des régions océaniques qui constituent des sources ou puits pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'échelle de temps prise en compte est comprise entre - 200 ans et + 200 ans (par rapport à la période contemporaine). Les régions considérées sont l'océan Atlantique et l'océan sud. Le projet comprend un volet impliquant une importante partie expérimentale et un volet centré sur une approche de modélisation afin de pouvoir mener à bien les extrapolations temporelles mettant à profit les acquis des projets expérimentaux. La date de début du projet est fixée au 1<sup>er</sup> janvier 2005. Sa durée est de 5 ans. Le budget global est de 14.5 millions d'euros. La coordination en est assurée par C.Heinze (Université de Bergen en Norvège). Deux laboratoires de l'IPSL y participent :

- au sein du LOCEAN, des études in situ sont menées à partir de mesures acquises à l'aide de navires ou de bouées. Les régions étudiées sont centrées d'une part sur l'océan Atlantique nord et tropical et d'autre part les secteurs Atlantique et Indien de l'océan sud. Les chercheurs impliqués sont, J.Boutin, N.Lefevre, N.Metzl et L.Merlivat.
- au LSCE des travaux de modélisation visent, en particulier, à étudier les mécanismes des rétroactions d'origine biogéochimique pouvant influencer dans le futur l'importance et la dynamique du rôle puits pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique d'origine anthropique joué par l'océan mondial. Les chercheurs impliqués sont M.Gehlen, J.Orr et L.Bopp.

**SCOUT-O3** : L'évolution future de la couche d'ozone et du flux UV à la surface dépendra non seulement de la diminution de la charge en chlore et en brome de l'atmosphère mais également de l'évolution du climat induite par l'augmentation des gaz à effet de serre. Le projet intégré 6<sup>ème</sup> PCRD SCOUT-O3 a pour objectif de prévoir l'évolution couplée du système stratosphérique chimie-climat et de son impact sur l'ozone et les flux UV de surface. Il comporte une forte composante expérimentale aux tropiques, avec l'objectif de comprendre les mécanismes de déshydratation et d'injection d'espèces chimiques à travers la tropopause, ainsi qu'une composante modélisation de l'interaction

chimie stratosphérique-climat. L'IPSL intervient dans la campagne tropicale (SA), les études extra-tropicales (SA, LMD) et la modélisation chimie-climat (LSCE, SA).

**ACCENT** : Il s'agit d'un réseau d'excellence européen 6<sup>ème</sup> PCRDT dédié à l'étude des changements de la composition atmosphérique et à leur impact sur la qualité de l'air, la santé et le climat. L'objectif est de développer les collaborations entre les différents instituts scientifiques européens et de favoriser l'interaction avec les décideurs et le grand public. L'IPSL est largement impliqué dans ACCENT et abrite le GDR créé pour coordonner la participation française à ce réseau.

**GMES/GEMS** : Dans le cadre des modifications de l'environnement liées au changement global, l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne ont mis en place le programme GMES (Global Monitoring Environment System) dont l'ambition est de développer à terme des systèmes opérationnels de surveillance et de prévision de la qualité de l'environnement. Le projet intégré 6<sup>ème</sup> PCRDT GEMS (Global and regional Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data), récemment sélectionné, a pour objectif de développer un système préopérationnel d'assimilation dans des modèles globaux et régionaux, des observations, in-situ et spatiales, de variables environnementales. Les prévisions ainsi réalisées fourniront des informations clés sur le transport à longue distance des polluants qui serviront à initialiser les modèles de prévision régionale de la qualité de l'air. Elles donneront une capacité de surveillance des gaz à effet de serre, des espèces chimiques actives et des aérosols qui aideront à identifier les sources et les flux de ces espèces. Grâce à ses capacités en modélisation et en analyse d'observations et à son expertise scientifique sur les différents cycles bio-géochimiques mis en jeu, L'IPSL est fortement impliqué dans les 4 sous-projets de GEMS, gaz à effet de serre à l'échelle globale (LMD, LSCE), gaz réactifs à l'échelle globale (SA), aérosols à l'échelle globale (LSCE, SA), qualité de l'air à l'échelle régionale (LMD).

**En dehors de ces grands programmes structurants**, les relations privilégiées que nous avons citées au niveau du bilan (CNRM, CERFACS, EGER, SYSPHE, ... en France, MPI Hambourg, à l'étranger) devraient se poursuivre avec, dans le cas du CNRM et du MPI Hambourg, la programmation d'une réunion annuelle. D'autres contacts ont été pris plus récemment (avec le CERE, cf I-13, et avec le LPMA présent sur le campus de Jussieu) avec ce même esprit. Enfin, sur le plan international, nous citerons le programme COPE (Coordinated Observation and Prediction of the Earth System) du PRMC (dont H.Le Treut est, depuis début 2005 membre du Joint Steering Committee). L'objectif central de ce programme que le PRMC envisage de mettre en place sur la période 2005-2015 est "de faciliter la prédiction de l'évolution et de la variabilité du Système Terre, en vue d'une utilisation dans un nombre croissant d'applications pratiques directement pertinentes et bénéfiques au développement de nos sociétés". A travers COPE, il s'agit donc de construire un système qui mette en synergie, autour de cet objectif ambitieux, les activités des différents programmes de recherche du PRMC. L'IPSL a été sollicité pour participer, en collaboration avec Météo-France, à la mise en place de COPE. Dans un premier temps, cette action sera mise en oeuvre par C.Michaut (anciennement secrétaire du projet SPARC), sous la responsabilité de H. Le Treut.

## II.11 - Communication

Malgré les thématiques très porteuses des recherches effectuées à l'IPSL et sa renommée internationale, l'Institut reste assez mal connu du grand public. Ses atouts sont pourtant importants puisque le changement climatique et la pollution, dont les citoyens pressentent bien les retombées sur leur niveau de vie futur, font partie des thèmes scientifiques sur lesquels la demande sociale est très forte. Par ailleurs, l'IPSL est forte à la fois par l'importance de son potentiel scientifique, par la diversité de ses compétences et par la qualité de ses recherches. La position de l'IPSL dans le dispositif de recherche national fait potentiellement de lui l'un des interlocuteurs majeurs de la société civile sur les problèmes environnementaux.

Cependant, l'Institut souffre de deux faiblesses structurelles pour réussir à imposer son image à l'extérieur : d'une part, il est constitué de plusieurs laboratoires localisés dans des sites différents, de l'autre, les moyens consacrés à la communication sont très faibles. Des choix doivent être faits pour fixer les priorités et un effort particulier sera entrepris pour favoriser la communication interne et faire connaître les réalisations de l'IPSL à ses personnels. Par ailleurs, on s'appuiera sur les personnels des laboratoires volontaires pour développer la diffusion des connaissances et on cherchera à mutualiser le plus possible les ressources qui existent dans les laboratoires pour permettre leur utilisation par le plus grand nombre et pour favoriser ainsi l'implication des personnels dans la diffusion des connaissances.

Pour éviter un éparpillement des actions entreprises, les personnels seront consultés pour un inventaire des ressources disponibles dans les laboratoires et pour recueillir leur avis sur les actions réellement susceptibles de développer une dynamique IPSL. A partir de ces consultations, une proposition de plan de communication sera faite au Conseil scientifique en février 2005 pour qu'il donne son avis sur les priorités et sur les moyens à mettre en œuvre.

Deux actions clés de l'IPSL semblent devoir faire, **en priorité**, l'objet d'efforts de communication particuliers et rapides : la modélisation du climat et l'enseignement. L'évolution du climat (à toutes les échelles de temps) et sa modélisation constituent les thèmes sur lesquels l'Institut est le plus souvent interpellé, en particulier depuis que le modèle couplé de l'IPSL « a tourné » sur les scénarios de l'IPCC. Le développement d'actions de communication sur ce thème fédérateur doit à la fois satisfaire la demande publique et l'information interne, de même qu'elle doit pouvoir être un outil pour les chercheurs directement impliqués par cette activité. Par ailleurs, face au désintérêt croissant des étudiants pour les carrières de la recherche publique et au vieillissement de la population actuelle des chercheurs, il est urgent d'œuvrer pour attirer les étudiants vers nos laboratoires. Cela passe par une information complète des nouvelles filières de formation menant vers la recherche en sciences de l'environnement.

**La modélisation du climat :** Parmi les supports de communication possibles, un site web a l'avantage d'être utile à une grande variété de publics différents (étudiants et élèves, médias, grand public, scientifiques externes et internes à l'IPSL,...). Le site web du Pôle de Modélisation du Climat, qui existe depuis 2 ou 3 ans, sera remanié pour être lisible par trois publics différents : le grand public, les scientifiques extérieurs, et les scientifiques intérieurs. La partie « grand public », qui devra



contenir des ressources destinées à des personnes de niveaux variés, sera alimentée progressivement en veillant à éviter les redondances. Le concours de chacun sera nécessaire si l'on veut que le site devienne un site de référence pour la vulgarisation scientifique. La partie dédiée aux scientifiques « extérieurs » devra impérativement être bilingue français-anglais et contenir tous ce que les chercheurs souhaitent trouver sur les activités de modélisation de l'IPSL (présentation des modules et du modèle couplé, comment faire « tourner » le modèle couplé et créer des graphiques, accès aux simulations de référence, documentation, projets de modélisation, ...). Enfin, l'intranet devra intégrer des possibilités d'édition partagée pour que cette partie devienne un instrument de travail incontournable pour la communauté rassemblée autour du pôle de modélisation.

**Les actions vers les étudiants :** La réforme Licence-Master-Doctorat est effective depuis la rentrée 2004 et les nouvelles filières de formation ont été en partie déjà mises en place. Cette mise en place devrait se poursuivre. Les étudiants, soucieux de se construire des cursus cohérents, doivent pouvoir disposer d'informations claires sur les parcours qui leur sont offerts. L'IPSL, présent sur deux universités, a un fort potentiel d'enseignants qui se sont mobilisés pour que l'offre sur les sciences de l'environnement soit étendue et cohérente. Il faut maintenant relayer cette information auprès des étudiants pour qu'ils puissent rapidement savoir à quelle formation ils doivent s'inscrire et à qui s'adresser si leur plan de carrière croise les sciences de l'environnement. L'effort de communication entrepris devra pouvoir amener les étudiants vers les thématiques développées à l'IPSL. Trois supports de communication seront utilisés pour assurer une visibilité de plus en plus pointue : une affiche succincte pour dire aux étudiants où se renseigner si les sciences de l'environnement les intéressent ; une plaquette qui pourra être distribuée par les enseignants ou déposée dans les scolarités ; une information précise et complète sur le site web de l'IPSL.

**La communication interne :** Elle vise à développer le sentiment d'appartenance à l'IPSL pour, in fine, favoriser le développement de son image externe. Les vecteurs de la communication interne sont nombreux puisque les personnels sont habitués à travailler avec des supports variés (sites web, réunions, publications, ...). Mais d'ores et déjà, on peut dire que, faute de personnel, les actions qui touchent tous les sites seront favorisées par rapport à celles qui touchent chaque site pris individuellement. Parmi les actions susceptibles de souder l'IPSL, plusieurs, particulièrement utiles, seront progressivement développées :

- Une meilleure circulation de l'information à tous les niveaux.
- Une plaquette pour présenter l'IPSL aux nouveaux personnels et thésitifs entrant dans les laboratoires. Pour éviter une charge de travail trop importante, on regroupera la conception de cette plaquette interne avec celle d'une plaquette externe. Ceci sera rendu possible par la forme de la plaquette IPSL qui sera composée d'un dossier contenant des feuilles volantes. Ces feuilles volantes seront adaptées aux différents publics visés. La plaquette sera accompagnée d'une présentation orale de l'IPSL, présentation qui sera faite systématiquement lors des journées scientifiques des laboratoires.

- La mise sur pied de séminaires IPSL d'intérêt général qui circuleraient sur plusieurs des sites des laboratoires. Au cours de ces séminaires, les actions scientifiques clefs de l'IPSL seront présentées (par exemple : modélisation du climat, cycle de l'eau, cycle du carbone, AMMA, missions spatiales, ...)
- Une journée de réflexion sur des problèmes d'actualité en rapport avec les activités de l'IPSL : on peut penser par exemple à une réflexion sur le principe de précaution, sur l'opportunité de prises de positions de l'IPSL dans les débats de société (sur les thèmes qui le concernent bien évidemment), sur la création d'une cellule de veille pour répondre aux désinformations concernant le changement climatique, sur la manière d'interagir avec les médias, ...
- La poursuite et le développement d'actions qui aident les chercheurs dans leur travail quotidien (intranet du site du pôle de modélisation, mise à disposition de matériels pouvant être partagé tels que des posters, des cours ou des transparents, ...)
- Des actions symboliques qui visent à uniformiser les adresses internet des personnels et des sites de l'IPSL (nom.prenom@labo-ipsl.site.fr ; www.labo-ipsl.site.fr)
- En ce qui concerne les actions qui sont plus reliées aux sites géographiques, il en est deux qui favorisent les contacts entre les personnels des divers labos et donc la synergie IPSL et qui concernent plus spécifiquement les sites de Jussieu et de Guyancourt : il s'agit de la mise en commun des infrastructures des laboratoires (salles de réunion, bibliothèques par exemple) et du développement d'espace et de moments conviviaux communs à l'ensemble des laboratoires d'un même site. Par ailleurs, d'autres actions pourraient être envisagées, dans la mesure du temps et des ressources disponibles : journal scientifique interne; des journées scientifiques à l'image de celles des laboratoires ; développement de sessions de formation communes aux différents laboratoires de l'IPSL, ...

**La communication externe** : Les actions prioritaires décrites ci-dessous devraient favoriser la connaissance, par le public, de l'IPSL. Il faut cependant développer d'autres actions pour le public, et les besoins dans ce domaine sont énormes car des messages spécifiques sont à développer pour chaque public et chaque classe d'âge ainsi que pour les différents supports de communication nécessaires pour toucher le plus grand nombre.

La priorité portera sur les élèves des écoles car c'est par les enfants que l'éducation à la sauvegarde de l'environnement se transmettra aux générations futures, et aussi parce qu'il nous faut pouvoir attirer les élèves vers les études scientifiques. Il faudra dans ce domaine mettre en place un système permettant de diffuser et partager les expériences de chacun. On peut penser par exemple à la rédaction d'un manuel de recommandations à ceux qui se lancent dans les classes (et ceci pour chaque classe d'âge), et à la mise à disposition de tous des matériels développés et utilisés par chacun. Les journées « Portes ouvertes » lors de la Fête de la science devraient aussi être l'occasion d'inviter les scolaires. Enfin, on peut aussi atteindre les enfants par l'intermédiaire de leurs enseignants. On développera donc le partenariat avec les cellules culturelles des rectorats de la région parisienne. Plusieurs actions sont envisagées :

- L'édition d'une nouvelle plaquette bilingue : En effet, l'édition de la plaquette précédente était intervenue dans un contexte de forte évolution de l'Institut alors qu'il s'agit maintenant de montrer, en français et en anglais, les apports scientifiques de l'IPSL. Pour toucher des publics variés et pour permettre une évolution à moindre coût, la plaquette sera modulaire (chemise à trois volets et feuilles volantes). Le concept de cette plaquette, la méthodologie suivie pour sa validation ainsi qu'un budget et un calendrier de réalisation seront présentés au Conseil scientifique de février 2005.
- A moyen terme, le site web de l'IPSL devra être repensé pour que le lecteur trouve plus facilement les informations qu'il recherche à partir de trois rubriques principales correspondant aux trois missions de l'institut (recherche, observations, enseignement). Il faudra aussi impérativement rendre ce site bilingue et automatiser un certain nombre de tâches qui sont actuellement très consommatrices de temps. Mais il faut être conscient qu'un site web est très consommateur de temps, en particulier si on veut qu'il soit vivant et donc constamment édité. Avant de se lancer dans ce travail, il faudra donc envisager le moyen de séparer les tâches de rédaction et d'édition pour qu'elles soient assurées par deux personnes différentes.
- Enfin, à partir des ressources éducatives existant dans les laboratoires et sur la toile, on construira petit à petit un espace « Science pour tous » sur la site web de l'IPSL. Cet objectif ne pourra, de toute évidence, qu'être mené sur le long terme à partir des contributions de chacun et de certains développements spécifiques.

Enfin rappelons, et c'est certainement là l'approche la mieux à même d'assurer la visibilité de l'Institut aux plans aussi bien national qu'international, la demande du Directeur de l'IPSL concernant la citation systématique de l'IPSL dans les publications. Celle-ci a été approuvée **par les différents conseils de l'Institut, par les Directeurs des laboratoires, et par les tutelles** lors du Conseil de Surveillance du 3 Juillet 2003 qui dans son relevé de conclusions "*entérine la proposition, précédemment approuvée par le CD et le CS, stipulant que l'IPSL doit systématiquement être cité dans tous les articles publiés par les chercheurs appartenant à un laboratoire de l'Institut*".

## **III - Documents annexes**

### **III.1 - Fonctionnement de l'IPSL**

La Fédération de Recherche IPSL est placée sous la responsabilité d'un directeur (Gérard Mégie jusqu'à sa nomination à la Présidence du CNRS à la fin de l'année 2000, puis Jean Jouzel, par intérim en 2001 puis pour un mandat de 4 ans, 2002-2005). Elle est dotée de deux instances externes, le Comité d'Evaluation (auquel est destiné le présent document) et le Conseil de Surveillance (composé des représentants des organismes signataires), et de deux instances internes, un comité de direction (CD) et un conseil scientifique (CS).

Le Conseil de Surveillance (une réunion tous les 2 ans) s'est réuni le 3 Juillet 2003. Il a, pour l'essentiel, traité d'aspects liés à la stratégie de l'IPSL dans le domaine du spatial et à l'implantation de l'Institut à Guyancourt, au déménagement sur le site de Jussieu et à la réforme LMD. Le Comité Directeur (CD), composé du Directeur et du président du CS de la FR, des Directeurs de chaque Unité et des responsables des Pôles Scientifiques, se réunit une fois par mois (en principe le premier lundi). C'est une instance où sont examinés l'ensemble des aspects liés à la vie de l'Institut et sur laquelle s'appuie le Directeur préalablement aux prises de décision. Le CS, est composé de deux représentants de chacune des Unités et de membres nommés par le Directeur de la FR. Au cours des 3 dernières années, la présidence en a été assurée par Laurence Eymard, jusqu'à sa nomination à la direction du LODyC, puis par Jacques Pelon depuis le début de l'année 2004. Ce conseil s'est réuni de façon régulière (3 fois par an) autour des aspects scientifiques de la vie de l'Institut, apportant un avis sur les priorités dans ce domaine et sur le soutien à apporter, ou non, aux projets scientifiques (actions incitatives, projets à intégrer dans les plans quadriennaux).

L'IPSL agit sous la forme d'une seconde entité, un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU), Ecole interne de l'UVSQ dont les statuts ont été approuvés en juin 2000 et dont la mise en place effective s'est faite en Novembre 2002. A noter que dans le respect des règles en vigueur le Directeur de l'OSU-IPSL est le Directeur de la Fédération de Recherche IPSL (les deux entités ayant les mêmes contours). L'OSU IPSL est doté d'un Conseil présidé par Michel Blanc (OHP). Ce Conseil OSU, formé de membres élus et nommés, se réunit deux fois par an et a un rôle plus formel (e.g., examen et vote du budget) que le CS. Les deux conseils, CS et Conseil de l'OSU apparaissent très complémentaires et ont fonctionné en excellente harmonie depuis la mise en place de l'OSU.

Sur l'UPMC, l'IPSL est rattaché à l'UFR 924 (Electronique, Électrotechnique, Automatique et applications de la Physique) dirigée par Pierre Encrenaz.

### **III.2 - Personnels**

Même si l'on note 5 départs (I.Genau, C.Vialle, E.Wilmart, chargée de valorisation à mi-temps, C.Dutreilly et W.Stzepourginski puis F.Pougeol), le personnel permanent attaché à la structure fédérative de l'IPSL a augmenté au cours des 3 dernières années (11 recrutements dont 3 CNAP). Le fonctionnement de l'IPSL s'appuie sur les personnels permanents suivants :

### - Personnel administratif

- Administratrice Armella Longrez (IE CNRS)
- Secrétariat Sophie Barbaric (T CNRS)
- Gestionnaire Blandine Moutiers (T CNRS)
- Soutien logistique Emma Melloulchi (AJT UPMC)

### - Administrateurs système (informatique fédérative) :

- Laurent Bourdette (IE CNRS) en remplacement de Claude Dutreilly
- Frank Corsini (ITRAF UVSQ) en remplacement de Françoise Pougeol
- En outre, la sécurité informatique de l'IPSL est prise en charge par Frédéric Bongat (LMD)

Nous rappelons également ici l'apport essentiel du groupe JIII qui regroupe les administrateurs systèmes des laboratoires implantés à Jussieu, à l'ENS et au Muséum (cf I-12)

### - Pôle de Modélisation

- Responsable de l'architecture du modèle couplé Marie - Alice Foujols (IR CNRS)
- Informatique scientifique Marie - Angèle Filiberti (IR CNRS)
- Patricia Cadule (IE CNRS)
- Martial Mancip (IR CNRS)

### - Centre de Données

- Responsable ETHER Cathy Boone (IR CNRS)
- Responsable CexII (ICARE) Sophie Cloché (IR CNRS)
- ETHER, Activités générales Nathalie Poulet - Crovisier (AI CNRS)

### - Groupe de Travail Neuratel : Informatique scientifique Carlos Meija (IR CNRS)

### - Services d'Observation : Base de données Sylvain Morvan (IE CNRS)

Les personnels CNAP rattachés administrativement à l'OSU IPSL, sont désormais au nombre de 6 : Christine David, Philippe Keckhut, Alain Sarkissian auxquels se sont ajoutés Jean-Luc Baray, Elena Seran et Sébastien Masson.

### Chargés de Mission

- Responsable de la communication Catherine Senior (CR CNRS)
- Responsable de la valorisation Poste vacant

S'y ajoutent les personnels en CDD (une dizaine sont gérés par l'IPSL dont environ un tiers sont affectés dans la structure fédérative, les autres l'étant dans les laboratoires).

Pour les 4 années à venir, **les priorités de recrutement** seront, après avis du CS, définies en fonction des demandes faites par chaque entité de la structure fédérative (cf prospective), et ce dans le cadre d'une concertation avec les Directeurs des laboratoires en vue de définir une stratégie commune. Les priorités de recrutement des enseignants - chercheurs (Maîtres de Conférence et Professeurs) sont également discutées au niveau de l'Institut en concertation avec les Directeurs des laboratoires et avec les enseignants, et avis des conseils.

### III.3 - Bilan financier

- Récapitulatifs des financements sur la période 2001 - 2004

		2001	2002	2003	2004
CNRS	Soutien de base	46 000 €	46 000 €	41 200 €	45 550 €
	CSOA	7 600 €	41 000 €	100 000 €	21 000 €
	Autres crédits affectés	138 000 €	59 000 €	112 000 €	49 400 €
	Ressources propres	82 000 €	417 000 €	140 800 €	15 000 €
	Vacations		11 000 €	9 000 €	0€
		<b>275 601 €</b>	<b>576 002 €</b>	<b>405 003 €</b>	<b>132 954 €</b>
INSU	CNES	231 900 €	388 800 €	135 700 €	215 400 €
	SO	137 200 €	137 200 €	137 300 €	95 880 €
	ACI RNC			50 000 €	50 000 €
		<b>369 100 €</b>	<b>526 000 €</b>	<b>323 000 €</b>	<b>361 280 €</b>
UPMC	Equipement	25 300 €	87 100 €	65 700 €	18 300 €
	Fonctionnement	17 800 €	29 500 €	40 800 €	39 300 €
	Personnel	18 600 €			
		<b>61 700 €</b>	<b>116 600 €</b>	<b>106 500 €</b>	<b>57 600 €</b>
UVSQ	Equipement	60 000 €	62 000 €	36 000 €	36 000 €
	Fonctionnement	40 700 €	31 600 €	57 600 €	57 600 €
	Ressources propres				50 000 €
		<b>100 700 €</b>	<b>93 600 €</b>	<b>93 600 €</b>	<b>143 600 €</b>
<b>Total</b>		<b>807 101 €</b>	<b>1 312 202 €</b>	<b>928 103 €</b>	<b>695 434 €</b>

Les crédits de fonctionnement et d'équipement récurrents de la FR émanent du CNRS (soutien de base), des contrats quadriennaux UPMC et UVSQ, et du CNES. Les fluctuations constatées sont consécutives à des notifications reportées d'un exercice sur l'autre (UPMC 2002) ou à une avance de crédits liée à la remise à niveau de l'informatique fédérative en 2003 (UPMC 2003) remboursés l'année suivante (UPMC 2004).

Le financement par l'INSU du service d'observation NDSC est stable, la diminution constatée en 2004 étant simplement consécutive à la prise en compte de crédits 2003 non engagés. Les fluctuations les plus importantes sont liées aux ressources propres, qu'il s'agisse de crédits européens, de crédits CNES (pour l'essentiel destinés au recrutement de CDD) ou de financement d'opérations ponctuelles du CNRS (mise à niveau de l'informatique fédérative)

### Récapitulatif des dépenses 2004 (€ HT)

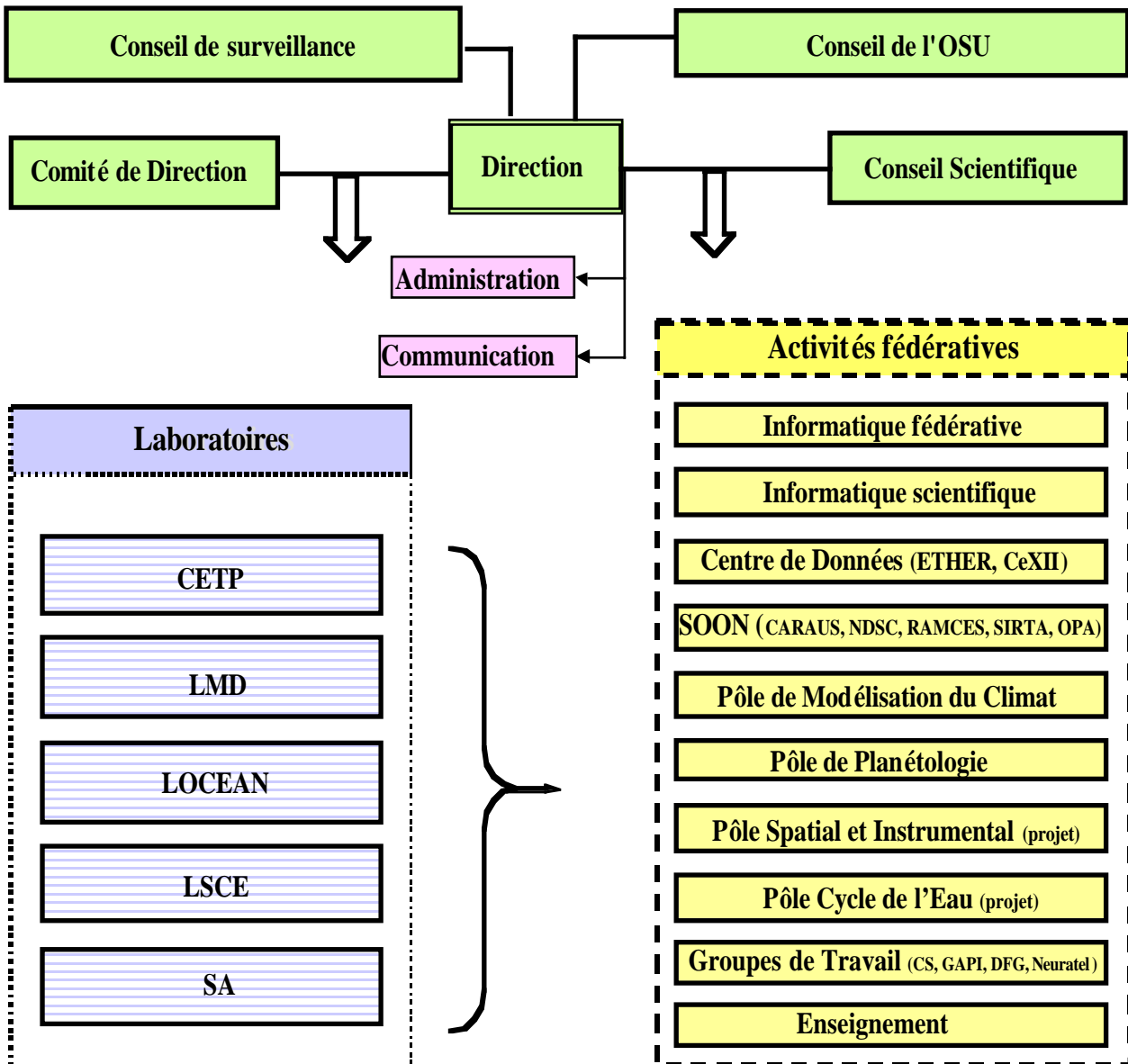
Sur la même période, le montant total des dépenses, hors frais de personnel et CDD CNES est en constante augmentation, suivant en cela l'activité croissante des structures fédératives. A titre d'exemple (cf ci-dessous), le bilan des dépenses 2004, tous crédits confondus (hors CDD CNES), traduit l'effort porté sur les activités fédératives, effort qui, à l'avenir, sera amplifié dans la limite des crédits notifiés.

STRUCTURE FEDERATIVE	
Informatique	
maintenance	25 000 €
logiciels	24 000 €
équipement	62 600 €
Enseignement	36 000 €
AO scientifiques 2003	83 000 €
Soutien Pôles/GT	19 000 €
Centre données	75 000 €
Abonnements en ligne	
AMS +archives	8 800 €
AGU+archives	50 000 €
Publications(NAI/Notes Planeto)	10 000 €
Communication	6 500 €
Formation	18 000 €
Personnel/vacations	6 500 €
	<b>424 400 €</b>

FEDERATION	
FONCTIONNEMENT	
Guyancourt Fonct/missions	39 000 €
Jussieu Fonct général	31 000 €
EQUIPEMENT informatique	
Guyancourt	11 700 €
Jussieu	37 000 €
Jussieu infrastructure	5 000 €
	<b>123 700 €</b>



### III.4 - Organigramme de l'IPSL



### III.5 - Fiches de présentation des laboratoires

**CETP, Centre d'étude des Environnements Terrestre et Planétaires**

UMR 8639 CNRS- UVSQ

**Directeur** : Hervé de FERAUDY (PR UVSQ), **Directrice Adjointe** : Danièle HAUSER (DR CNRS)

<b>Implantations :</b>	Centre Universitaire de Vélizy, 10 Avenue de l'Europe -78140 Velizy	Observatoire, 4 Avenue de Neptune 94100 SAINT-MAUR
------------------------	---	--

<b>Effectifs</b>	
Chercheurs CNRS	13 DR - 15 CR – 2 IR + 1 DR détaché
Enseignants Chercheur	5 P - 12 MC
CNAP	1 A Adj.
<b>Total chercheurs</b>	<b>48 + 1 détaché</b>
ITA CNRS	41
ITARF UVS	3
<b>Total ITA - ITARF</b>	<b>44</b>
Doctorants	22
Post doc et invités 1an	4
ITA sur CDD	11
<b>Total non permanents</b>	<b>37</b>
<b>Total général</b>	<b>129 + 1 détaché</b>

<b>Moyens financiers :</b>
Soutien de base : 470 k€, Ressources contractuelles (CNES, contrats...) : 1 440 k€

<b>Organisation</b>
5 Départements Scientifiques, 2 Départements Techniques, 1 Département Administratif

<b>Activités de recherche</b>
Activité expérimentale (télé-détection hyperfréquence, mesures in situ d'ondes et spectrométrie de masse des plasma, spectrométrie de masse des atmosphères planétaires), modélisation et simulation numériques
<b>Environnement proche de la Terre : le cycle de l'Eau</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• processus à moyenne échelle dans l'atmosphère météorologique</li> <li>• microphysique et dynamique des nuages non précipitants</li> <li>• mesure des précipitations et climatologie</li> <li>• interaction océan-atmosphère</li> <li>• interaction biosphère et surfaces continentales</li> <li>• électromagnétisme, application à la télé-détection des surfaces et sub-surfaces, et méthodes d'analyse et de traitement des données</li> </ul>
<b>Plasma du Système Solaire et Planétologie</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• dynamique de l'environnement ionisé de la Terre : convection et</li> <li>• échappement du plasma ionosphérique</li> <li>• interaction vent solaire-magnétosphère et régions d'interface</li> <li>• héliosphère et interaction du vent solaire et des atmosphères ou magnétosphères planétaires</li> <li>• accélération et rayonnement dans les régions aurorales</li> <li>• sous-orages magnétosphériques</li> <li>• constitution, dynamique et évolution des environnements neutres et ionisés planétaires et cométaires</li> <li>• sondage électromagnétique des sous-sols planétaires.</li> </ul>

**LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique**

UMR 8539 CNRS/ENS/UPMC/EP

Directeur : Hervé Le Treut Directeurs Adjoints : François Vial (DR2), Vladimir Zeitlin

<b>Implantations :</b>	École Normale Supérieure 24, rue Lhomond 75231 PARIS CEDEX 05	École Polytechnique, Route de saclay 91128 Palaiseau	UPMC Tour 25 5 <sup>ème</sup> étage Case 99 4, place Jussieu 75252 Paris Cedex 05
------------------------	---	--	--

<b>Effectifs</b>		
Chercheurs CNRS		28
Enseignants-chercheurs		12
Chercheurs bénévoles		6
<b>Total chercheurs</b>		<b>46</b>
ITA CNRS		38
IATOS UPMC		2
ITA EP		2
<b>Total ITA/IATOS</b>		<b>42</b>
Non permanents	Doctorants	30
	Post doc	19
<b>Total non permanents</b>		<b>49</b>
<b>Effectif total</b>	<b>:</b>	<b>137</b>

**Moyens financiers** (moyenne 2001 /2003)

Soutiens de base : 0,3 Meuros Ressources contractuelles(CNES, CEE, contrats...) : 1 Meuros (fortes fluctuations liées à la transition entre 5eme et 6eme PCRD, et au statut de certains projets spatiaux)

**Organisation** 9 Equipes scientifiques 5 Equipes techniques Services généraux

**Activités de recherche**

- **Études théoriques** : Turbulence et dynamique des fluides géophysiques. Comportement non-linéaire de la circulation atmosphérique, dynamique des ondes. Développement de méthodes statistiques pour l'analyse de données (observées ou simulées) à des fins climatiques.

- **Modèles et simulations numériques** : Modélisation du climat et de la circulation atmosphérique globale, couplage océan atmosphère biosphère. Etude du rôle de la composante atmosphérique dans les changements climatiques (réponse aux perturbations anthropiques –déforestation/effet de serre). Impacts climatiques et lien avec l'économie. Prévision de la qualité de l'air et des pollutions urbaines Rôle des échanges troposphère-stratosphère sur l'ozone stratosphérique. Modélisation des atmosphères planétaires (Mars, Vénus, Titan). Modèles de processus, couplages chimie transport. Assimilation de données dans les modèles.

- **Analyse d'observations spatiales** : Étude de la structure tridimensionnelle de l'atmosphère par l'analyse des sondages multi-spectraux des satellites à défilement. Étude du cycle de l'eau et de l'énergie à partir des images des satellites géostationnaires. Étude du bilan radiatif global au sommet de l'atmosphère. Constitution de bases de données climatiques : mise en œuvre de la composante thématique IPSL du projet ICARE.

- **Instrumentation spécifique** : Conception, développement et construction d'instruments embarqués sur satellite (ScaRaB, IIR/CALIPSO, SAPHIR) ou aéroportés (lidar Doppler WIND) , ou au sol (lidar de mesure du CO2 atmosphérique). Développement d'instruments embarqués sous ballons (mesure de la vapeur d'eau, des aérosols, de la turbulence, ...) et participation à des campagnes expérimentales (validation ENVISAT, projets VORCORE en Antarctique, Hibiscus en Amérique du Sud, VASCO sur l'Océan Indien, ....) Le LMD est actuellement partenaire de plusieurs grands projets spatiaux d'observation de la Terre (CALIPSO, MEGHA-TROPIQUES/ SAPHIR, AIRS/IASI., EARTHCARE) ainsi que de Mars. Mise en œuvre du Site d'Observation de l'IPSL (SIRTA) sur le site de Palaiseau.

**LOCEAN - Laboratoire d'Océanographie et du Climat :****Expérimentation et Approches Numériques**

UMR 7617 CNRS / IRD / UPMC / MNHN

**Directeur :** Laurence Eymard DR CNRS    **Directeur- adjoint :** Yves Dandonneau

Implantation :	Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) 4, place Jussieu BP 100 75252 PARIS CEDEX 05
----------------	--

<b>Effectifs</b>		
Chercheurs CNRS		20
Enseignants-chercheurs	Paris VI	8
	Paris VII	2
	MNHN	4
	UVSQ	1
	ENSTA	2
Chercheurs non CNRS		13
<b>Total chercheurs</b>		<b>50</b>
ITA CNRS		20
ITA non CNRS	ITARF	12
	IR	2
<b>Total ITA/ITARF</b>		<b>34</b>
Non permanents	Doctorants	34
	Post doc	5
	CDD	8
<b>Total non permanents</b>		<b>47</b>
<b>Effectif total</b>	:	<b>131</b>

<b>Organisation</b>
<b>Sept équipes scientifiques,</b>
Interactions air-mer-glace à l'échelle climatique (IAMG)
Dynamique et Couplages de l'Océan de Surface (DyCOS)
Processus dynamiques et échanges air-mer (PRODYAM)
Dynamique Océanique et Climat (DOC)
Variabilité Tropicale, Téléconnexions, et Impacts (VARTROP)
Cycles Biogéochimiques et Paléocéanographie (Bio&Pal)
Equipe transversale "Modélisation et Méthodes Statistiques Avancées"
<b>Trois équipes techniques</b>
Développement instrumental et techniques marines (in situ et en laboratoire) (DITM)
Réseau informatique
Gestion et secrétariat
<b>Equipe ESOPA</b>

Activités scientifiques
- étude des processus dynamiques gouvernant la circulation océanique et des mécanismes impliqués dans l'évolution du système climatique terrestre à toutes les échelles de temps et d'espace (incluant les climats du passé)
- étude de la dynamique des écosystèmes marins ;
- étude du cycle océanique du carbone et de ses forçages par des processus physiques (transport, mélanges...), biologiques (production, reminéralisation...), chimiques, ou externes avec l'atmosphère ;
- étude couplée biogéochimie – dynamique, pour d'une part comprendre la variabilité biogéochimique due aux processus dynamiques (transport, mélanges, à toutes les échelles) et en retour bénéficier de l'information biogéochimique pour améliorer la modélisation dynamique ;
- étude de l'évolution saisonnière à interannuelle du climat. Un axe nouveau dans lequel le laboratoire s'engage fortement est celui des impacts de la variabilité climatique naturelle ou d'origine anthropique: les études sont principalement centrées sur les régions tropicales, considérées comme particulièrement vulnérables en matière de santé et d'agriculture, et sur le bassin méditerranéen.

**LSCE Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement**  
UMR 1572 (CEA-CNRS)

**Directeur** : Laurent TURPIN **Directrice Adjointe** : Pascale Delécluse

<u>Implantations</u> :	CNRS Bât 12 Avenue de la Terrasse 91198 Gif sur Yvette	CEA Orme des Merisiers Bât 701 Saclay 91191 Gif sur Yvette
------------------------	---	---

<b>Effectifs (décembre 2004) :</b>		
Chercheurs CNRS		28
Chercheurs non CNRS	CEA	57
	IRD	1
Enseignants Chercheurs	(UVSQ, P6, P7)	5
<b>Total chercheurs</b>		<b>91</b>
ITA CNRS		29
ITA CEA		29
<b>Total ITA</b>		<b>58</b>
Doctorants		32
ITA sur CDD		15
Post-docs et chercheurs CDD		16
<b>Total non permanents</b>		<b>63</b>
<b>Total général</b>		<b>212</b>

**Activités de recherche :**

L'axe de recherche principal du LSCE est centré sur l'étude de la variabilité des mécanismes contrôlant l'environnement global et le climat. Cet axe de recherche se décline selon trois approches fondées sur la mise en œuvre en synergie de méthodes expérimentales (les mesures isotopiques occupent une place prépondérante) d'investigation géochimique et de simulation numérique :

- La variabilité des climats passés : reconnaissance de la dynamique et de la variabilité naturelle rapide du climat à partir de données issues des glaces et sédiments marins, caractérisation des relations spatiales et temporelles et des rétroactions entre les composantes du système climatique (océan, atmosphère, biosphère).
- Les cycles biogéochimiques globaux des composés à effet de serre et leur perturbation anthropique : modélisation globale du cycle du carbone (atmosphère, océan, biosphère) et des composantes atmosphériques du bilan radiatif (gaz, aérosols), études de processus, mesures directes et satellitaires, activité d'observatoire et campagnes de mesures des composés à effet de serre.
- La géochronologie et la géochimie : géochronologie des changements de l'environnement du Quaternaire (radiocarbone, Ar, éléments à courte période), traceurs dynamiques stables (gaz rares) et radioactifs des flux dans les enveloppes externes (océan, surfaces continentales), hydrologie continentale.

**Partenariats** : Au delà des laboratoires de l'IPSL et de leurs organismes de tutelle, le LSCE entretient des partenariats bilatéraux privilégiés avec des laboratoires académiques : EGER, SISYPHE, EPOC, CEREGE, LGGE, LISA, LAMP, LOA, LA, IPGP..., des agences et organismes : IPEV, CNES, ADEME, MEDD, IRD ..., et, au niveau européen, la DG Recherche, la Max Planck Gesellschaft (Hambourg, Mainz, Jena), le PIK (Potsdam), des universités (Reading, Bristol), le Hadley Centre et le CEPMMT. Il coordonne ou participe activement à des grands projets internationaux : forages polaires (Vostok, GRIP, North GRIP, EPICA), campagnes océaniques de carottage (IMAGES), intercomparaison de modèles (PMIP, OCMIP), réseau de surveillance des composés à effet de serre RAMCES, maîtrise d'ouvrage de l'algorithmique du segment sol de l'instrument spatial POLDER. Il est également un partenaire d'EDF pour le suivi radio-écologique des sites de production. Il est laboratoire d'appui de l'UMS 2572 (LMC14).

**SA : Service d'Aéronomie**  
UMR 7620 (CNRS, UPMC, UVSQ)

**Directeur :** Alain HAUCHECORNE    **Directeur Adjoint :** Eric CHASSEFIERE

<b>Implantations :</b>	Réduit de Verrières - BP 3 91371 Verrières le Buisson cedex	Université P et M Curie 4 Place Jussieu - Boite 102 T 45-46 - 3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> étage - 75252 Paris
------------------------	--	--

<b>Effectifs (décembre 2004) :</b>		
Chercheurs CNRS		25
Chercheurs ITA CNRS		3
Chercheur Ens.Sec.	1 Pag	1
Enseignant Chercheur	UPMC	10
Enseignant Chercheur	UVSQ	2
Chercheur CNAP		3
<b>Total chercheurs</b>		<b>44</b>
ITA CNRS		57
ITARF UVSQ		1
ITARF UPMC		4,5
<b>Total ITA</b>		<b>62,5</b>
Doctorants		17
Post-docs		12
ITA sur CDD		8
<b>Total non permanents</b>		<b>37</b>
<b>Total général</b>		<b>143,5</b>

<b>Moyens Financiers:</b>	<b>(en k€)</b>
Ressources de Base : (Soutien de base, contrats quadriennaux)	837
Ressources contractuelles (CNES, UE, programmes, divers)	2820

<b>Organisation:</b>	
Equipes de recherche	6
Département technique et moyens généraux	45+5,5 agents permanents
Département administratif	11 agents permanents

<b>Thèmes de recherche:</b>	
Physicochimie des atmosphères planétaires	
Interactions surface/ atmosphère/ vent solaire	
Système solaire lointain	
Physicochimie et climatologie de la stratosphère - haute troposphère	
Physicochimie de la troposphère	
Atmosphère météorologique et environnement	
Dynamique atmosphérique à petite échelle	
Traitement du signal	
<b>Service d'observation :</b> NDSC (surveillance de l'ozone)	

## **III.6 - Bilan de l'analyse thématique de l'IPSL (mars 2004)**

### **III.6.1 - Objectifs, contexte et méthodologie de l'analyse**

Depuis la création et la mise en place des structures transversales (Pôle de Modélisation du Climat, Centre de Données, Services d'Observations, Groupes de Travail ...) de l'IPSL, les collaborations entre les laboratoires se sont développées, de nouvelles thématiques scientifiques ont émergé et les priorités de la communauté nationale et internationale ont évolué. Il est indispensable que l'IPSL évolue d'une part en veillant à ce que son potentiel humain lui permette de mener à bien ses missions, et d'autre part en adaptant ses structures pour faciliter les mises en commun des compétences de chacun et rationaliser ses moyens.

C'est pour faciliter l'organisation de sa politique scientifique que le Conseil Scientifique de l'IPSL a décidé, fin 2002, de faire une analyse des effectifs et des activités de l'Institut. Cette analyse repose sur un questionnaire élaboré par les membres du conseil scientifique, et rempli pour chaque composante institutionnelle de l'IPSL (laboratoires et personnel propre). L'IPSL est donc ici considéré comme la somme de ses composantes, et les actions / organisations transversales (pôles, groupes, centres, ...), qui sont sous la responsabilité directe des instances de l'IPSL (conseil scientifique, conseil de l'OSU, direction) ne sont pas spécifiquement analysées. Mais les personnels propres de l'institut ont été pris en compte de la même façon que les personnels des laboratoires.

Pour effectuer cette analyse, différentes grilles ont été élaborées, regroupant des domaines ou approches définis au moyen de mots clefs peu ou non spécialisés. Pour chaque grille d'analyse, chaque personnel de l'IPSL a été compté en ETP (équivalent temps plein) entre 0 et 1, considérant que les enseignants-chercheurs enseignent pour 50 % de leur activité. Dans chaque grille, le maximum par personne est  $\leq 1$ , sauf éventuellement dans certaines grilles où il peut y avoir recouvrement des activités (comme la grille outils et méthodes par exemple). Nous avons considéré les doctorants et post-doctorants comme des chercheurs non-permanents et, pour préparer la politique de recrutement, nous avons comptabilisé les personnels nés avant 1945 (>58 ans).

Cette analyse donne donc un « instantané » de l'IPSL en 2003. Une révision tous les deux à quatre ans sera à prévoir pour mettre à jour ce bilan, tout en affinant le questionnaire.

### **III.6.2 - Analyse globale**

#### **III.6.2.1 - Les effectifs globaux**

L'effectif global de l'IPSL est d'environ 800 personnes, avec un personnel permanent de 340 chercheurs et 285 ITA.

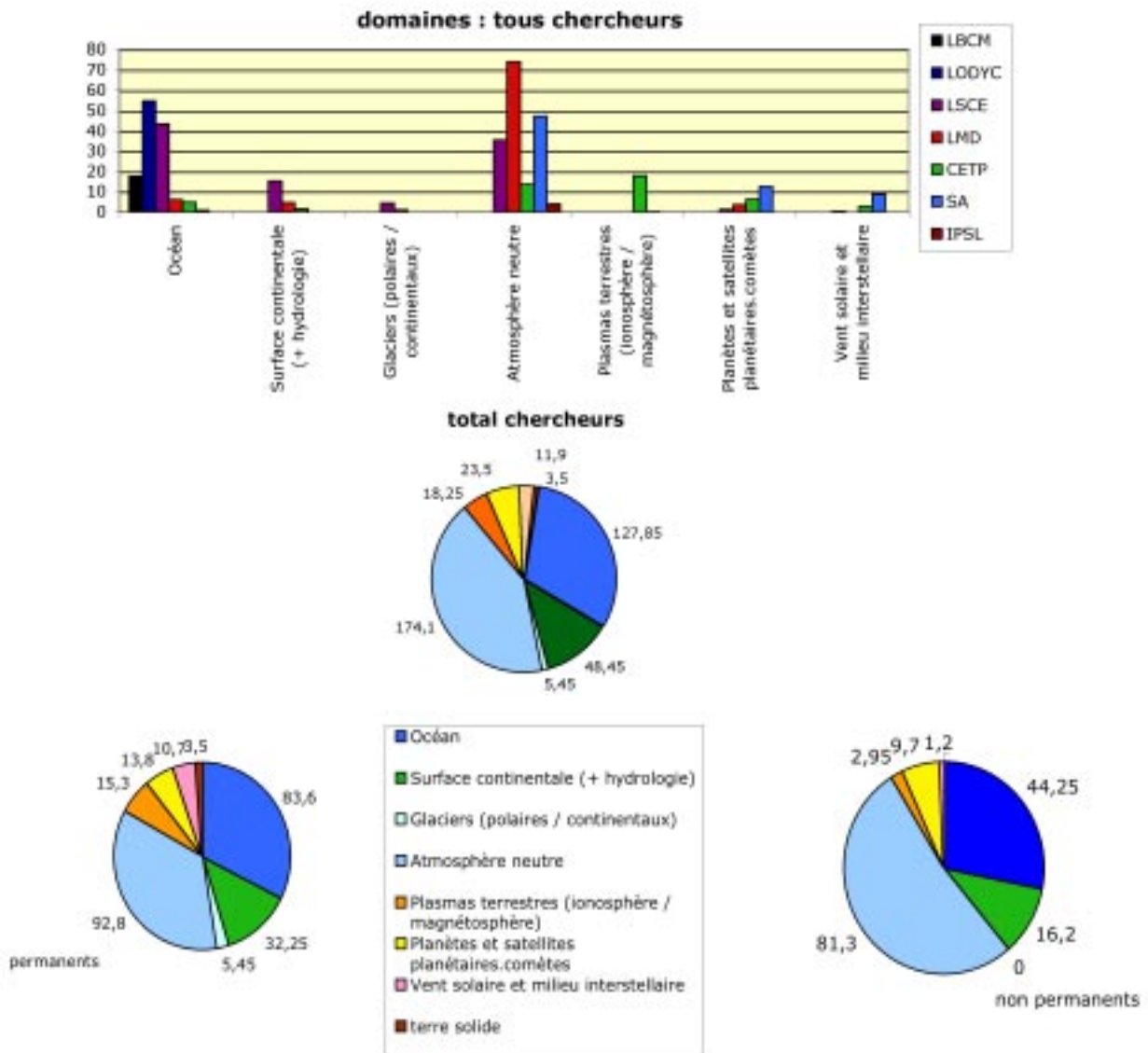
L'effectif chercheur est pour un tiers environ composé de non-permanents. Les chercheurs proches de la retraite (>58 ans) représentent 13,1% des chercheurs permanents. Globalement, 45.8% des chercheurs sont potentiellement en situation de travail temporaire (non permanents et chercheurs de plus de 58 ans). On peut noter que les flux d'entrée doivent être ajustés pour compenser les départs à la retraite sur une période de plusieurs années. Pour les chercheurs, le fait marquant est le nombre

important de chercheurs du LSCE dans presque toutes les tranches d'âge, mais avec un pic vers 40 ans. Les effectifs dans les autres laboratoires (principalement CNRS et Universités) sont plus faibles et la proportion de chercheurs de plus de 55 ans est importante au CETP, au LMD et au SA.

Pour les ITA, les effectifs relatifs des différents laboratoires sont beaucoup plus équilibrés, plus faibles toutefois dans les deux laboratoires océanographiques (LODYC+LBCM). Ils sont relativement constants dans les tranches d'âge allant de 25 à 55 ans (avec un léger pic dans la tranche 30-35). On note le nombre important d'ITA de plus de 55 ans, particulièrement dans les laboratoires spatiaux (SA, LMD et CETP). Les non-permanents représentent 30% des personnels IT, alors que les IT de plus de 58 ans sont 23% des permanents. Dans la suite, il faut tenir compte de cette disparité des effectifs dans l'analyse thématique.

### III.6.2.2 - Analyse par grands domaines naturels

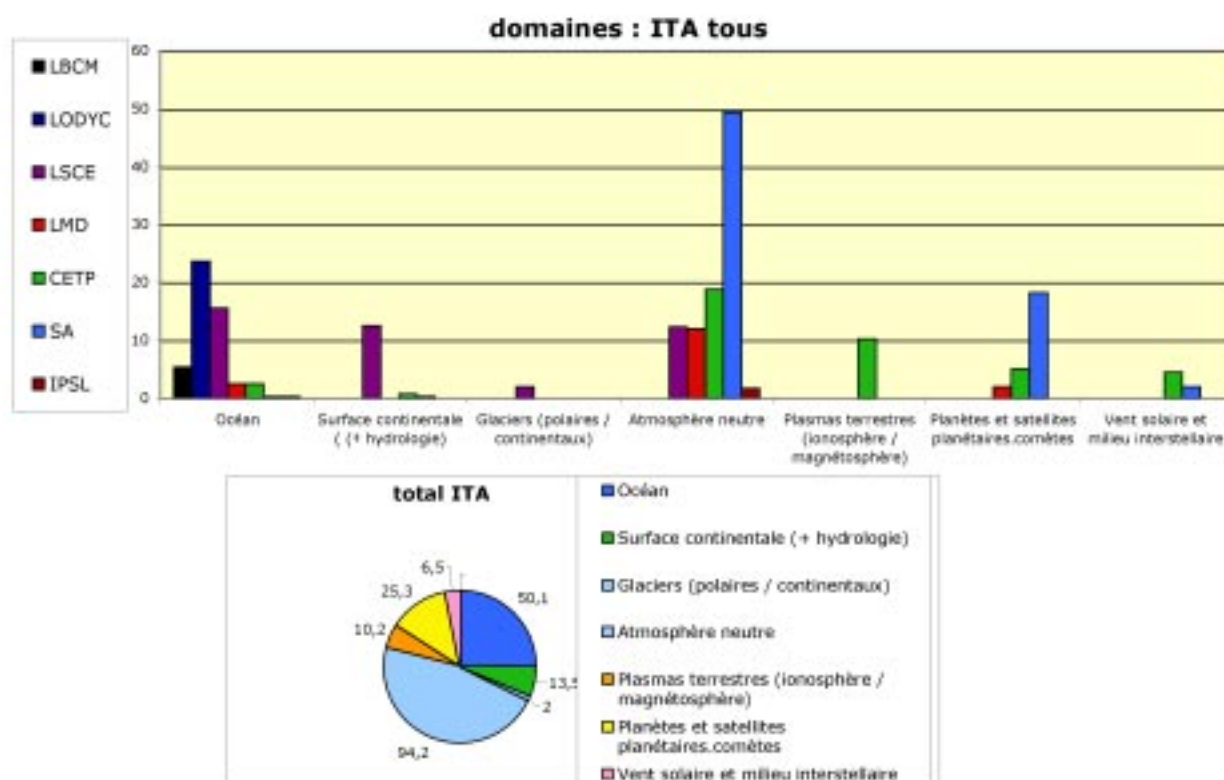
Cette grille d'analyse (diagrammes ci-dessous) n'a pas pour ambition de couvrir tous les thèmes de recherche abordés à l'IPSL, mais de faire ressortir les grandes tendances.





On s'en doutait, mais l'étude permet de le quantifier : on étudie l'océan principalement au LODYC, LBCM et au LSCE et l'atmosphère au LMD, au SA et au LSCE. Au LSCE, océan, atmosphère, et surfaces continentales sont très bien représentés. On peut remarquer le fort recouvrement de plusieurs laboratoires sur les trois compartiments principaux : atmosphère (tous sauf LBCM), océan (tous sauf SA) et surfaces continentales (tous sauf LBCM/LODYC) ; Glaciers et terre solide ne concernent que le LSCE, alors que la planétologie intéresse le LMD, le CETP et le SA, ces deux derniers étant seuls à s'intéresser aux milieux ionisés et milieu interplanétaire.

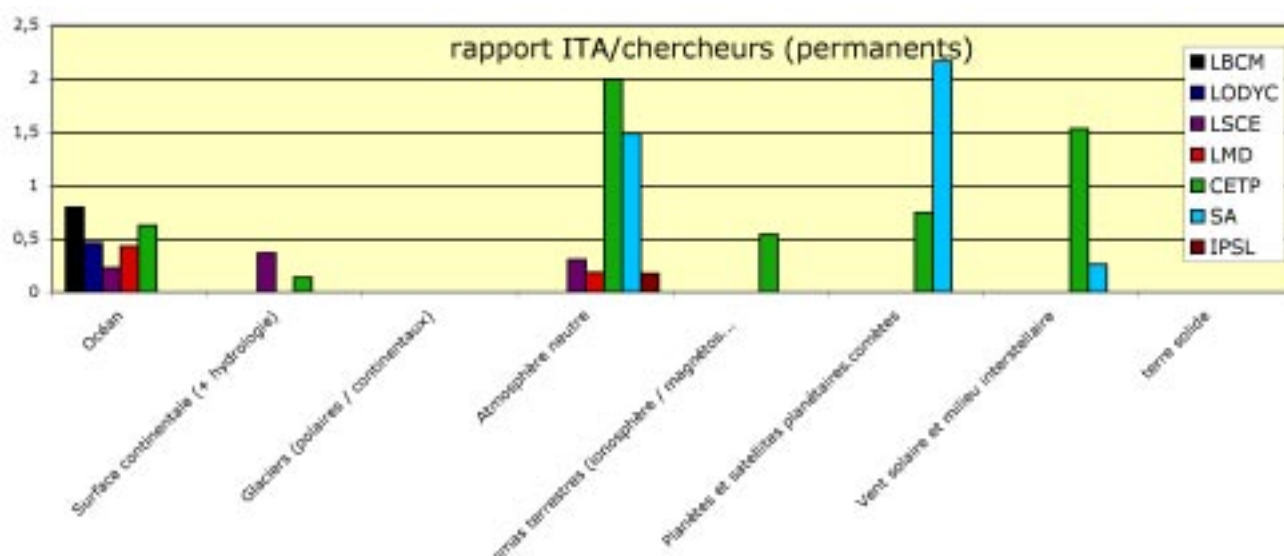
La répartition des chercheurs par grands domaines naturels ne présente pas non plus de surprise : l'atmosphère et l'océan regroupent respectivement la moitié et le tiers des chercheurs de l'IPSL, et les surfaces continentales environ 12%. Les chercheurs travaillant sur les autres domaines naturels sont largement minoritaires (environ 11% au total). La répartition des chercheurs non-permanents par compartiment accentue encore le déséquilibre entre l'atmosphère neutre et les autres domaines. Toutefois dans les deux domaines majoritaires à l'IPSL, le pourcentage de chercheurs non-permanents et d'âge supérieur à 58 ans s'élève à 51.9% pour l'atmosphère neutre) et à 46.5% pour l'océan. Cette situation indique un risque d'affaiblissement à moyen terme du potentiel chercheur dans les domaines principaux de l'IPSL. Nous devons ainsi être vigilants et en surveiller les flux par son évolution.



Pour les ITA (ingénieurs et techniciens essentiellement), les domaines atmosphère neutre et océan sont aussi majoritaires (respectivement la moitié et un quart des effectifs globaux). Les non-permanents sont mieux répartis dans les divers domaines que les permanents. De même, les IT de plus de 58 ans se répartissent aussi dans tous les domaines. Au total, les IT non-permanents et âgés

de plus de 58 ans représentent 44.1% de l'effectif total. Ils sont respectivement 46.1%, 29.2% et 43.5% pour l'océan, l'atmosphère neutre et la planétologie.

Enfin, le rapport ITA / chercheurs est en moyenne de 0.75, avec de grandes disparités suivant les domaines et les laboratoires. Ces disparités reflètent, pour l'essentiel, le fait que les ITA sont plus nombreux dans les laboratoires spatiaux. Par exemple, c'est au SA et au CETP que ce rapport est le plus fort, dans les activités spatiales de ces laboratoires (atmosphère neutre, planétologie et milieu interplanétaire).



### III.6.2.3 - Analyse par activités hors recherche

On appelle ici « activités hors recherche » tout ce qui concerne les autres activités de l'IPSL : l'enseignement, les moyens communs (informatique réseau, administration, communication et valorisation).

Pour le personnel chercheur, trois rubriques apparaissent : le soutien informatique, l'enseignement (effectué surtout par les enseignants-chercheurs mais pas uniquement), les tâches de gestion, d'administration de la recherche, de valorisation et de communication (les responsabilités administratives de type direction de laboratoire ou d'équipe ont été mises dans cette catégorie).

Concernant l'enseignement, le LMD, le CETP et le SA sont les laboratoires comprenant le plus grand nombre d'ETP enseignant (à relativiser en fonction de son personnel total pour le LBCM). Le CETP et, dans une moindre mesure, le LMD se détachent pour les « autres activités ». Notons que les non-permanents contribuent également à l'enseignement et au soutien informatique et technique (enseignement par les doctorants, en particulier).

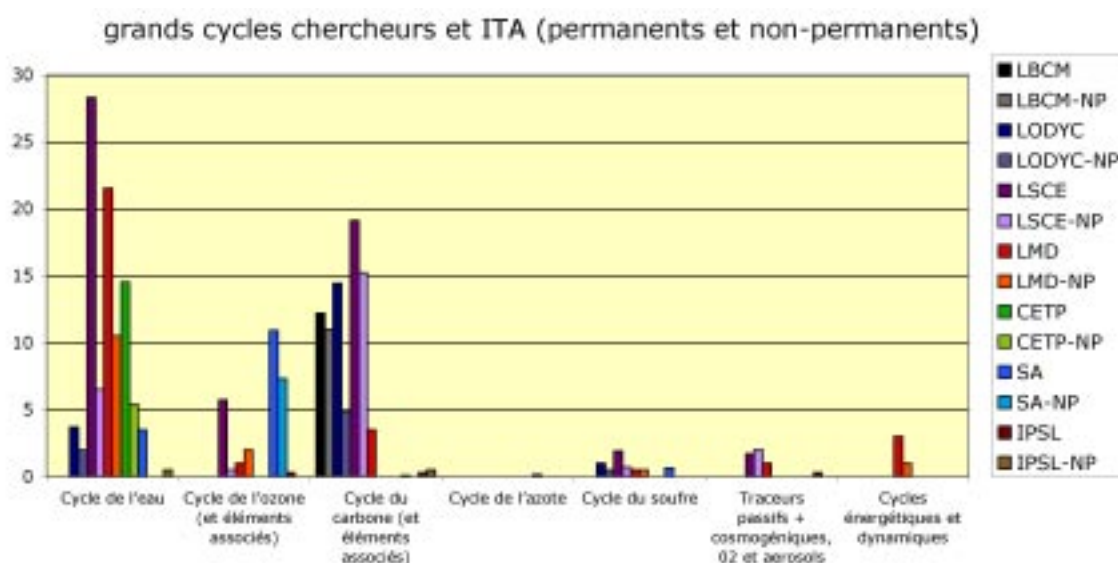
Les ITA se répartissent essentiellement entre soutien technique et informatique, d'une part, et soutien administratif, d'autre part. Notons la participation des non permanents à ces deux activités. Les ITA de plus de 58 ans se trouvent majoritairement au SA (soutien technique).

### III.6.3 - Analyse par thématiques scientifiques

On considérera ici les activités vues sous l'angle des grands cycles, des études d'impact et des mécanismes et processus, afin de mieux caractériser les activités de recherche de l'IPSL. Par rapport au nombre de chercheurs qui apparaissent dans l'analyse globale ci-dessus, le nombre total d'ETP chercheurs dans les trois grilles d'analyse qui suivent est relativement faible (168 pour les cycles, 110 pour les impacts et environ 260 pour les mécanismes et processus) car toutes les activités de recherche ne sont pas déclinées dans chacune des grilles ci-dessous. Les graphiques représentent l'ensemble des personnels, chercheurs et IT.

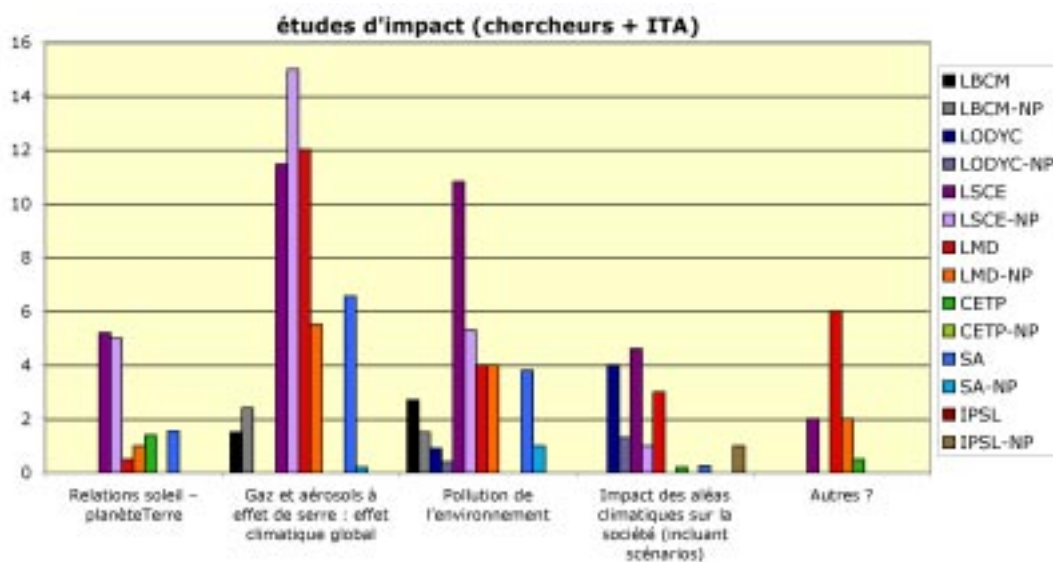
#### III.6.3.1 - Les grands cycles

Seuls les cycles de l'eau, de l'ozone et du carbone font significativement l'objet d'études à l'IPSL. LMD, CETP et LSCE pour le cycle de l'eau, LBCM, LODYC et LSCE pour le carbone, et majoritairement le SA pour l'ozone. La part des non-permanents dans ces études est très forte (plus de 50% des ETP chercheurs). Les cycles de l'eau et du carbone sont donc des thèmes transversaux forts de l'IPSL.



#### III.6.3.2 - Les études d'impact

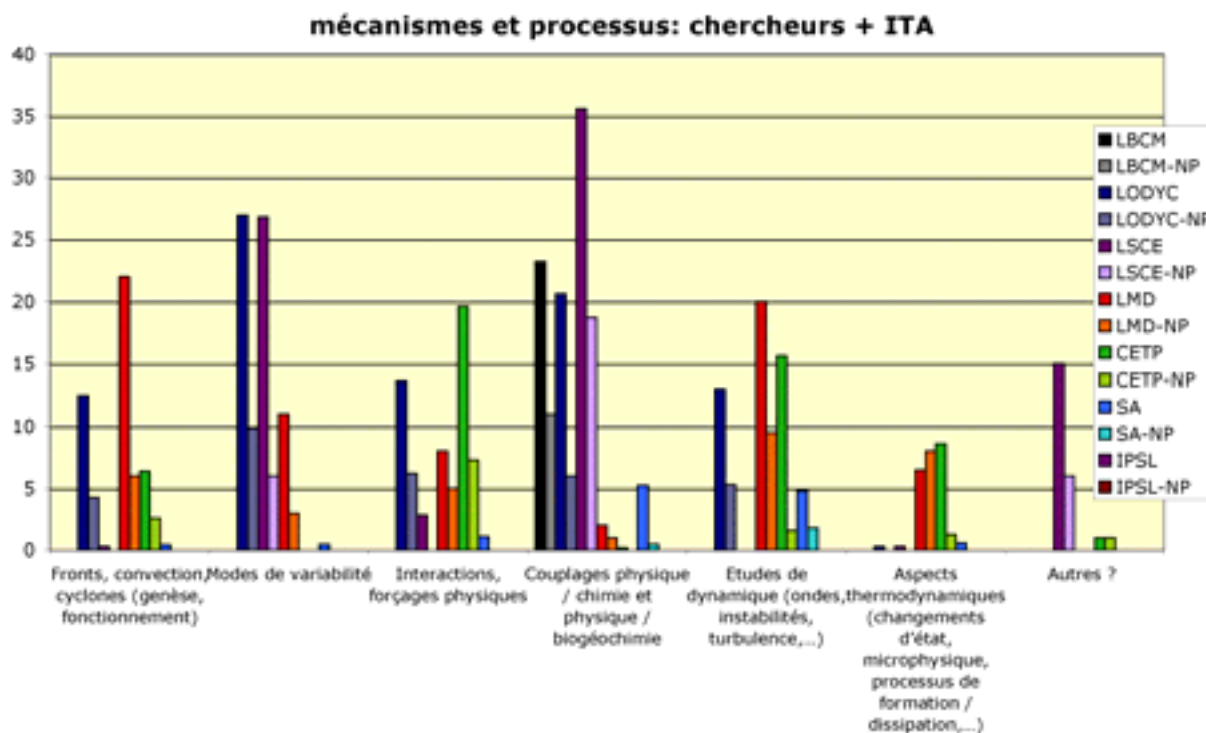
La première constatation est que le LMD et le LSCE en sont les principaux acteurs (le LSCE participe à toutes les études d'impact présentes dans la grille), alors que les autres sont faiblement représentés dans ce type d'étude. L'effet climatique global et la pollution sont les principales études d'impact étudiées à l'IPSL, ce qui était prévisible. Cependant, les autres études d'impact (soleil – terre, aléas et autres) ne sont pas négligeables. Seulement 1,30 ETP de l'institut sont concernés par ce type d'études qui sont donc assez peu développées à l'IPSL, mais probablement amenées à croître.



### III.6.3.3 - Mécanismes et processus

Par rapport aux deux précédentes grilles d'analyse, on constate que les travaux visant à comprendre les mécanismes et processus regroupent beaucoup plus de monde (446 ETP).

Le couplage physique-chimie et physique-biogéochimie rassemble le plus grand nombre de chercheurs, mais le CETP et le LMD n'y participent pratiquement pas. Notons que ce domaine est celui pour lequel il y a le plus grand nombre de non-permanents (LBCM et LSCE) (qui sont probablement aussi comptabilisés dans les cycles bio-géochimiques).



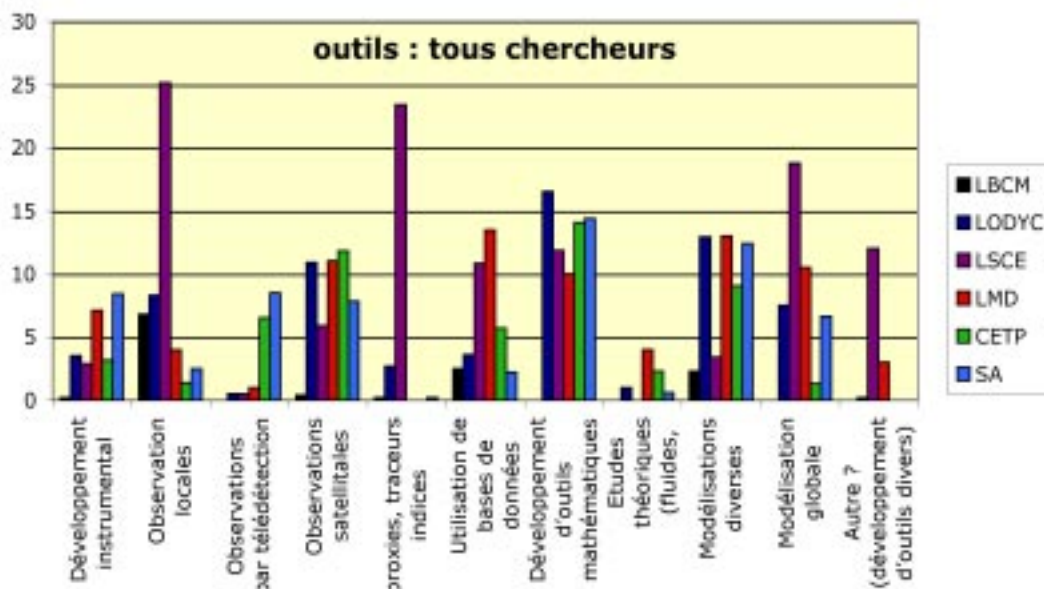
Les modes de variabilité sont un sujet partagé par les trois laboratoires les plus impliqués dans les études du climat (LODYC, LMD, LSCE). Seuls les aspects thermodynamiques et autres ont un

total inférieur à 30 ETP. On note que la répartition entre laboratoires diffère fortement d'une rubrique à l'autre : le LBCM n'apparaît que dans le couplage physique–bio–géo-chimie ; le LMD principalement dans les fronts, les modes de variabilité et la dynamique ; le LODYC dans les 5 premiers, mais avec un accent sur les modes de variabilité ; le CETP apparaît principalement dans les interactions / forçages physiques, et un peu dans les fronts, la dynamique et la thermodynamique ; le LSCE est fortement majoritaire dans la rubrique couplages, mais aussi dans les modes de variabilité et la rubrique « autres » (transferts et diagénèse) ; enfin le SA est le plus faiblement représenté dans cette grille d'analyse, et se limite aux couplages physique–chimie et à la dynamique.

Cette grille d'analyse révèle ainsi la diversité et la complémentarité des approches de l'IPSL pour l'étude de l'environnement naturel.

### III.6.4 - Les outils, méthodes et approches

Les chercheurs de l'IPSL apparaissent majoritairement dans 5 rubriques : observations locales, observations satellitaires, développement d'outils mathématiques, et les deux rubriques modélisation (diverse et globale). Tous les laboratoires sauf le LBCM ont une activité soutenue en outils mathématiques et tous utilisent des observations satellitaires. Les observations locales sont majoritairement utilisées au LBCM, au LODYC et au LSCE. Tous les laboratoires font de la modélisation (24% en tout des chercheurs), mais LBCM et CETP sont moins impliqués, surtout pour la modélisation globale (quasi inexistante dans ces laboratoires). On note aussi que le LSCE se distingue largement des autres laboratoires par l'utilisation des « proxies » (pour la paléoclimatologie). Il y a peu d'études théoriques à l'IPSL (environ 2%). La recherche instrumentale est effectuée dans tous les labs, mais avec une dominante au SA (plus de 10 ETP chercheurs).

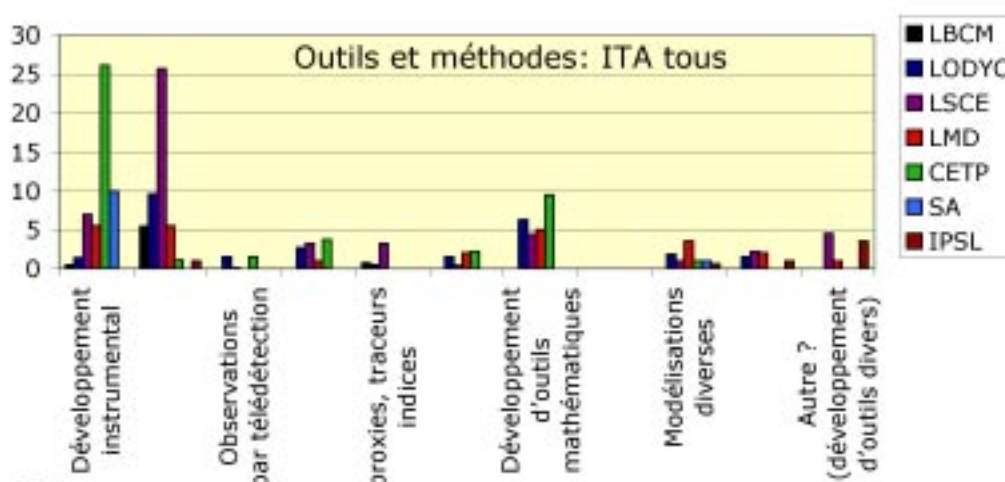


Les ingénieurs et techniciens suivent une répartition très différente : les dominantes chez les permanents sont le développement instrumental (à 33%), les observations locales (à 28%) et, dans une moindre mesure, le développement d'outils mathématiques (à environ 12%). La répartition par laboratoire montre que l'activité technique en développement instrumental se fait majoritairement au

CETP, LSCE et SA, tandis les observations locales sont davantage développées au LBCM, LODYC et LSCE, en cohérence avec l'activité des chercheurs. Le développement d'outils mathématiques, lui, ne suit pas l'équilibre des chercheurs entre les laboratoires, puisque seuls les IT du LODYC, du CETP et du LSCE y contribuent. Notons aussi le faible nombre total d'IT en modélisation, pour une activité majeure de l'IPSL. Les personnels propres de l'IPSL contribuent aux observations locales, à la modélisation et au développement d'autres outils, complémentaires de la modélisation et pour la gestion des grands jeux de données.

Il serait intéressant dans la suite d'affiner cette grille d'analyse, pour approfondir certains points :

- quelle est la part de recherche et la part d'utilisation d'outils chez les personnels qui ont renseigné la rubrique « outils mathématiques » ?
- la grille est-elle adaptée à la description des métiers ITA ? pourrait-on l'améliorer (quelles sont les activités menées à l'IPSL en développement instrumental ? que signifie le fort poids de la rubrique « outils mathématiques » ?, etc...)



### III.6.5 - Conclusions

Ce bilan purement quantitatif ne peut prétendre expliciter toutes les activités de l'IPSL. Mais il permet de dégager quelques indications :

- si la répartition des personnels par domaines naturels n'a rien de surprenant (prédominance de l'étude de l'atmosphère neutre, de l'océan et des surfaces continentales), l'analyse permet de quantifier les différences entre les laboratoires de l'IPSL, et de mettre en évidence les recouvrements de thèmes. On note en particulier la relative faiblesse du nombre de chercheurs dans le domaine des surfaces continentales, justifiant une politique de collaboration scientifique forte avec des partenaires extérieurs permettant de couvrir l'ensemble des compartiments du système climatique terrestre. Elle montre aussi que les personnels travaillant sur le milieu naturel externe (plasmas terrestres et au-delà) représentent 11% des effectifs totaux, ce qui n'est pas négligeable;

- le croisement des analyses chercheurs et ITA montre la part relative du soutien technique aux activités de recherche. Il serait intéressant d'approfondir les raisons des apparents déséquilibres entre chercheurs et ITA (par exemple dans l'analyse par outil, méthodes). En particulier, les ITA travaillant sur le développement instrumental et les observations locales (près de 100 ETP) sont largement plus nombreux que ceux qui assurent le soutien général technique et informatique des laboratoires, et le développement d'outils mathématiques et de modèles. Le nombre d'ETP ITA sur les observations satellitaires et les bases de données est particulièrement faible, au regard du nombre de chercheurs correspondant, et les non-permanents y sont majoritaires ;
- les cycles de l'eau et du carbone devraient clairement être plus structurés à l'IPSL, considérant leur fort partage entre tous les laboratoires ;
- le relativement faible nombre d'ETP chercheurs concernés par les études d'impact montre que ce n'est pas actuellement une activité majeure à l'IPSL, mais la proportion importante de chercheurs non-permanents dans ces études montre que c'est une activité en développement ;
- De façon globale, concernant les effectifs, une proportion élevée des ITA est proche de la retraite (23% des permanents), surtout dans les laboratoires actifs en technique spatiale. Il y a là un risque majeur de perte de compétence, alors que l'institut s'engage clairement dans ce domaine avec la création du Pôle Spatial et Instrumental. Par ailleurs, environ 13 % des chercheurs permanents est proche de la retraite notamment en océan et atmosphère. Le recrutement de jeunes chercheurs (l'IPSL accueille un fort pourcentage de chercheurs non permanents (35 %) ) doit donc être adapté dans les prochaines années pour assurer le développement des activités dans ces domaines en évolution forte à l'IPSL.

### III.7 - Glossaire des sigles, acronymes et abréviations

			(de l'IPSL)
<b>ACP</b>	Aerosol Collector Pyroliser	<b>CEA</b>	Commissariat à l'Energie Atomique
<b>AAA</b>	Accéléromètre	<b>CENA</b>	Climtologie Etendue des Nuages et des Aérosols
<b>ACI</b>	Astronomie Absolu Action Concertée Incitative	<b>CEPMET</b>	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen terme
<b>ADEOS</b>	Advanced Earth Observing Satellite	<b>CEREA</b>	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
<b>AEROCARB</b>	Airborne European Regional Observations of the CARbon Balance	<b>CERFACS</b>	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
<b>AEROCOM</b>	Global Aerosol Model Intercomparison	<b>CESR</b>	Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements
<b>AIM</b>	Aerosols and the Indian Monsoons utilisation de l'humidité superficielle des sols mesurée par radar	<b>CETP</b>	Centre d'Etudes des Environnements Terrestres et Planétaires
<b>AIMWATER</b>	embarqué (ERS/SAR) pour la modélisation pluie-débit	<b>CExII</b>	Centre d'Expertise Icare IPSL
<b>AIRS</b>	Atmospheric Infrared Sounder	<b>CFC</b>	Chloro Fluoro Carbone
<b>ALTO</b>	Airborne Lidar for Tropospheric Ozone	<b>CFMIP</b>	Cloud Feedback Model Intercomparison Modèle de simulation et prévision de la pollution photo oxydante en milieu urbain
<b>AMMA</b>	African Moonsoon Multidisciplinary Analyses	<b>CHIMERE</b>	Centro de Investigacion del Mar y de la Atmosfera (Argentine)
<b>ARPEGE</b>	Action de Recherche à PEtite et Grande Echelle	<b>CIREN</b>	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
<b>ASE</b>	Agence Spatiale Européenne	<b>CLA</b>	Couche Limite Atmosphérique Service de données
<b>AURORA</b>	programme européen d'exploration du système solaire	<b>CLIMSERV</b>	Climat et Rayonnement du LMD
<b>AVIRAD</b>	Veine isocinétique embarquée pour les prélèvements des aérosols atmosphériques	<b>CLIMSTAT</b>	CLImat et STATistiques
<b>BEPI COLOMBO</b>	Mission ESA en coopération avec le Japon d'exploration de Mercure	<b>CLIVAR</b>	CLimate VARIability and prediction research programme
<b>BP</b>	Ballons Pressurisés	<b>CLNC</b>	Couche Limite Nuages Convection
<b>BQR</b>	Bonus Qualité Recherche	<b>CLOUDSAT</b>	Mission spatiale destinée à l'études des effets des nuages sur le climat
<b>BSO</b>	Ballons stratosphériques ouverts	<b>CMIP</b>	Coupled Model Intercompraison Programme
<b>CAATER</b>	Co-ordinated Access to Aircraft for Transnational Environmental Research	<b>CNES</b>	Centre National d'Etudes Spatiales
<b>CAFICA</b>	CARbon Fluxes in India and Central Asia	<b>CNRM</b>	Centre National de Recherche Météorologiques
<b>CALIPSO</b>	Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	<b>CNRS</b>	Centre National de la Recherche Scientifique
<b>CAPS</b>	Cassini Plasma Spectrometer	<b>COMPERE</b>	Comparaison Observation Modele PERmanent au Sirta
<b>CARAUS</b>	CARBone AUStral réseau de msures de CO2 océanique dans l'océan austral	<b>CONSERT</b>	COmet Nucleus Sounding Exprtiment by Radiowave Transmission
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device	<b>COSAC</b>	COmetary SAMpling and Composition experiment
<b>CCR</b>	Centre de Calcul Recherche (Paris VI & Paris VII)		
<b>CCRI</b>	Climate and Carbon Research Institute		
<b>CCRT</b>	Centre de calcul du CEA		
<b>CDAP</b>	Centre de Données des Atmosphères Planétaires		



<b>COSPAR</b>	COmmittee on SPACe Reasearch	<b>FNS</b>	Fond National de la Science
<b>CS</b>	Conseil Scientifique ( de l'IPSL)	<b>FOXES</b>	Forecasting eXtreme Events)
<b>CSIR</b>	Conseil de la Recherche Scientifique et Industrielle (Inde)	<b>FP 6</b>	Sixth Framework Program
<b>CSIRO</b>	Communwealth Scientific and Industrial Research Organisation (	<b>GAPI</b>	Groupe Assimilation et Problèmes Inverses
	Australie)	<b>GCM</b>	General Circulation Model
<b>DataGRID</b>	projet de grille de calcul européen	<b>GC-MS</b>	Gaz Chromatography/Mass Spectrometry
<b>DEA</b>	Diplôme d'Etudes Approfondies	<b>GEMS</b>	Global Environment Monitoring System
<b>DEMETER</b>	Detection of Electro- Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions	<b>GEWEX</b>	Global energy and water cycle experiment
<b>DESS</b>	Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées	<b>GFDL</b>	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory
<b>DYNAMO</b>	Dynamic of North Atlantic MOdels	<b>GFSC</b>	Goddard Space Flight Center
<b>EARLINET</b>	European Aerosol Research Lidar Network	<b>GIEC</b>	Groupe d'Experts Gouvernemental sur le réchauffement Climatique
<b>ECLAP</b>	Etude de la Couche Limite en Agglomération Parisienne	<b>GOME</b>	Global Ozone Monitoring Experiment
<b>ECMWF</b>	European Center for Medium-range Weather Forecasts	<b>GOMOS</b>	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
<b>EGER</b>	IFR "Environnement et Gestion de l'Espace Régional"	<b>GPR</b>	Ground Penetrating Radar
<b>EMILIE</b>	spectrographe	<b>GPS</b>	Système mondial de localisation
<b>ENPC</b>	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées	<b>GREMI</b>	Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés
<b>ENS</b>	Ecole Normale Supérieure	<b>HUYGENS</b>	sonde d'exploration de Jupiter et Titan
	Projet européen de développement d'un système complet de prévisions du	<b>HYDISC</b>	Hydrology of the Indian Sub-Continent
<b>ENSEMBLE</b>	changement climatique et de ses impacts	<b>IASI</b>	infrared atmospheric Sounding Interferometer
<b>ENSO</b>	El Nino Southern Oscillation	<b>ICAPS</b>	Interaction in Cosmic and Atmospheric Particles
<b>ENSTA</b>	Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées	<b>ICARE</b>	Interactions Clouds Aerosols Radiations Etc
<b>Envisat</b>	ENVIronment SATellite	<b>IDDRI</b>	Institut du Développement Durable et des Relations Internationales
<b>EOS</b>	Earth Observing System	<b>IDRIS</b>	Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique
<b>EP</b>	Ecole Polytechnique		Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires
<b>ESA</b>	European Space Agency	<b>IFRTP</b>	International Program Geosphere Biosphere
<b>ESCRIME</b>		<b>IGBP</b>	Integrated Global Observing Strategy
<b>ESQUIF</b>	Etude et Simulation de la Qualité de l'air en IDF	<b>IGOS</b>	Institut de recherche spatiale russe
<b>ETHER</b>	Service de gestion de données en chimie atmosphérique	<b>IKI</b>	International Micro Gravity Plasma Facility
<b>EUCREM</b>	European Cloud REsolving Modelling	<b>IMPF</b>	Interaction with Chemistry and Aerosol model
<b>EUMESAT</b>	Europe's Meteorological Satellite Organisation	<b>INCA</b>	INDian Ocean EXperiment
<b>EUROCS</b>	EUROpean Cloud System	<b>INDOEX</b>	Institut National d'Agronomie
<b>FASTEX</b>	Front and Alantic Storm- Track Experiment	<b>INRA</b>	
<b>FeTCH</b>	Flux, Etat de la mer et Télé-détection en condition de fetch variable		

<b>INSU</b>	Institut National des Sciences de l'Univers (CNRS)	<b>LSCE</b>	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
	Association Internationale (européenne)	<b>MAGIE</b>	
<b>INTAS</b>	indépendante pour le développement de la coopération avec les pays de l'ex-URSS	<b>MAMBO</b>	Mars Atmosphere Microwave Brightness Observer
<b>IOIPSL</b>	IPSL Input Output Library	<b>MEGHA-TROPIQUES</b>	satellite dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel of Climate Change	<b>MERCATOR</b>	système opérationnel d'analyse et de prévision de l'océan global
<b>IPEV</b>	Institut Paul Emile Victor	<b>MERIS</b>	MEdium Resolution Imaging Spectrometer Instrument
<b>IPGP</b>	Institut de Physique du Globe de Paris	<b>MESSENGER</b>	sonde d'exploration de la surface de Mercure
<b>IRD</b>	Institut de Recherche pour le Développement	<b>METEOR</b>	Série de satellites météorologiques russes
<b>IRSN</b>	Institut de Radio-protection et de Sureté Nucléaire	<b>METOP</b>	Satellites METéorologique OPérationnels polaires de EUMESAT
<b>ISCCP</b>	International Satellite Cloud Climatology Project	<b>MGC</b>	Modèle de circulation générale
<b>ISSI</b>	International Space Institute (Berne)		Modèle Isentropique de transport Mésoséchelle de l'Ozone Stratosphérique par Advection avec CHIMie
<b>ISSI</b>	International Space Station	<b>MIMOSA-CHIM</b>	Mesure à l'Interface Eau-air de la Variabilité des Echanges de CO2
<b>JAXA</b>	Japon Aerospace Exploration Agency	<b>MINERVE</b>	Mercury Magnetospheric Orbiter
<b>JGOFS</b>	Joint Global Ocean Flux Study	<b>MMO</b>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<b>JPL</b>	Jet Propulsion Laboratory	<b>MODIS</b>	Mars Organic Material Irradiation and Evolution
<b>KMNI</b>	Institut royal météorologique des Pays-Bas	<b>MOMIE</b>	Instrument de mesure de la pollution dans la troposphère
<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut	<b>MOPITT</b>	Monsoons and the Tropical Intraseasonal and Interannual Variations
<b>LBCM</b>	Laboratoire de Biochimie et Chimie Marine	<b>MOTIV</b>	Max Plank Institute
<b>LEGOS</b>	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales	<b>MPI</b>	Mercury Planetary Orbiter
	Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique	<b>MPO</b>	Mass Spectrum Analyser
<b>LESIA</b>	Laboratoire de Glaciologie de Grenoble	<b>MSA</b>	Météosat Seconde Génération, satellite météorologique géostationnaire d'EUMETSAT
<b>LGGE</b>	Life Cycle of Convective Systems	<b>MSG</b>	Mars Science Laboratory
<b>LICOS</b>	Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques	<b>MSL</b>	National Aeronautics and Space Agency
<b>LISA</b>	Laboratoire de Météorologie Dynamique	<b>NASA</b>	National Center of Atmospheric Research
<b>LMD</b>	Modèle de circulation générale du LMD	<b>NCAR</b>	National Center for Environmental Prediction
<b>LMDz</b>	Laboratoire d'Optique Atmosphérique	<b>NCEP</b>	Medium Range Weather Forecasting
<b>LOA</b>		<b>NCMRWF</b>	Network for Detection of Stratospheric Change
<b>LOBSTER</b>		<b>NDSC</b>	projet européen de réseau de stations scientifiques sur Mars
<b>LOCEAM</b>	Laboratoire	<b>NETLANDER</b>	
	Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie		
<b>LODyC</b>	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement		
<b>LPCE</b>			

<b>NEURATEL</b>	groupe de travail pour le développement de l'utilisation des éthodes neuronales en géophysique	<b>PNCA</b>	Programme National de Chimie de l'Atmosphère
<b>NMHC</b>	Non Methane Hydrocarbon	<b>PNEDC</b>	Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat
<b>OASIS</b>	Ocean Atmosphere Sea-Ice and Soil	<b>POLDER</b>	POLARization and Directionality of the Earth's Reflectances
<b>OCMIP</b>	Ocean Carbon Cycle-Model Intercomparison Project	<b>POOZ</b>	Permanent Ocean Open Zone
<b>OCO</b>	Orbital Carbon Observatory	<b>PRISM</b>	PRogram for Integrated Earth System Modelling
<b>ODIN</b>	Satellite franco-suédois	<b>PROFIRMEC</b>	PROgramme Franco-Indien de Recherche en METéorologie et Climat
<b>OHP</b>	Observatoire de Haute Provence	<b>PSI</b>	Pôle Spatial Instrumental
<b>OISO</b>	Service d'Observation de l'Océan Indien	<b>QBO</b>	Quasi Biennal Oscillation
<b>OMEGA</b>	spectromètre de cartographie destiné à analyser la minéralogie de la surface de Mars	<b>RAMCES</b>	Réseau Atmosphérique de Mesures des Composés à Effet de Serre
<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale	<b>RASC</b>	Radio Atmospheric Science Center (Kyoto)
<b>ONERC</b>	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique	<b>RIO</b>	Resource in the Indian Ocean
<b>OPA</b>	Océan PARallélisé (modèle de simulation océanique)	<b>RONSARD</b>	Radar destiné à l'étude des systèmes précipitants
<b>OPA/ORCA</b>	A Global Ocean configuration of OPA (Ocean Parallélisé)	<b>ROSETTA</b>	Mission d'exploration avec mesures in-situ de la comète Churyumov/Gerasimenko
<b>ORCHIDEE</b>	Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms	<b>RPWS</b>	Radio and Plasma Wave Science
<b>ORNL</b>	Oak Ridge National Laboratory	<b>SA</b>	Service d'Aéronomie
<b>OSU</b>	Observatoire des Sciences de l'Univers	<b>SAMBAAO</b>	base de données Mousson Africaine
<b>PALOMA</b>	PAYload for Local Observation of Mars Atmosphere	<b>SAMU</b>	Spectromètre de masse Aéroporté MULTi-espèces
<b>PAMPRE</b>	Production d'Aerosols en Microgravité par Plasma Réactif	<b>SAOZ</b>	Système d'Analyse par Observation Zénitale
<b>PASIM</b>	modèle de simulation d'écosystème prairial	<b>SCOUT</b>	Stratosphere-Climat links with emphasis on the UTLS - Ozone
<b>PCRD</b>	Programme Cadre de Recherche et Développement	<b>SDLA</b>	Spectromètre à Diode Laser Accordable
<b>PICAM</b>	Planetary Ion Camera (pour Bepi Colombo)	<b>SDU</b>	Département des Sciences de l'Univers (CNRS)
<b>PICARD</b>	Expérience spatiale dont l'objectif principal est l'influence du forçage solaire sur le climat terrestre	<b>SECHIBA</b>	Schématisation des Echanges Hydriques à l'interface entre la Biosphère et l'Atmosphère
<b>PILPS</b>	Projet de comparaison des schémas de surface des principaux modèles climatiques mondiaux	<b>SECHIBA</b>	Schématisation des Echanges hydriques à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmosphère
<b>PISCES</b>	modèle	<b>SIRTA</b>	Site Instrumenté Régional de Télédétection
<b>PISCES</b>	Modèle biogéochimique de l'océan mondial	<b>SMOS</b>	Atmosphérique, IPSL
<b>PMP</b>	Paleoclimate Modeling IntercomParison	<b>SO</b>	Soil Moisture and Ocean Salinity
<b>PMP</b>	Paleoclimate Modeling IntercomParison	<b>SOHO</b>	Service d'Observation Solar and Helioscopic Observatory
		<b>SOLAS</b>	Surface Ocean - Lower Atmosphere Study
		<b>SOON</b>	Services d'Observation et outils Nationaux

<b>SPARC</b>	Stratospheric Processes And their Roles in Climate	<b>VLT</b>	Very Large Telescope
<b>SPICAM</b>	UV Atmospheric Spectrometer	<b>WMO</b>	World Meteorological Organization
<b>SRES</b>	Special Report on Emissions Scenarios	<b>WOCE</b>	World Ocean Circulation Experiment
<b>SSTs</b>	Site Specific Traget Levels		
<b>STICS</b>	Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standart Saclay Toulouse Orsay		
<b>STOMATE</b>	Model for Analysis of Terrestrial Ecosytems (Module qui calcule		
<b>SWAN</b>	Solar Wind Anisotropics		
<b>SWAN</b>	Solar Wind Anisotropics		
<b>SWINSAT</b>	Surface Waves Investigation and Monitoring from SATellite		
<b>TAAF</b>	Terres Australes et Antarctiques Françaises		
<b>TACOS-INFRASTRUCTURE</b>	Terrestrial and Atmospheric Carbon Observing System Infrastructure		
<b>TBO</b>	Tropospheric Biennal Oscillation		
<b>TDLAS</b>	Tuneable Diode Laser Absorption Spectroscopy		
<b>TOMS</b>	Total Ozone Mapping Spectrometer		
<b>TOPEX-POSEIDON</b>	TOPOgraphie de l'Experience Océan(satellite)		
<b>TOPS</b>	Total Ozone Mapping Spectrometer		
<b>TOVS</b>	TIROS Operational Vertical Sounder		
<b>TRMM</b>	Tropical Rainfall Measuring Mission (NASA-JAXA)		
<b>UARS</b>	Upper Atmosphere Research Satellite		
<b>UBA</b>	Universidad de Buenos- Aires		
<b>UCL</b>	Université Catholique de Louvain		
<b>UFR</b>	Unité de Recherche et Formation		
<b>UKMO</b>	UK MapOffice		
<b>UMR</b>	Unité Mixte de Recherche		
<b>UPMC</b>	Université Pierre et Marie Curie		
<b>UTLS</b>	Upper Troposphere Lower Stratosphere Ozone Programme		
<b>UVSQ</b>	Université Versailles saint Quentin		
<b>VAMOS</b>	Variational Assimilation of Meteorological and Oceanographic Systems		
<b>VAPIC</b>	water Vapor Profiling Inter-comparison Campain at SIRTa		
<b>VASCO/CIRENE</b>	campagne		
<b>VIRTIS</b>	Visible InfraRed Thermal Imaging Spectrometer (mission Rosetta)		