

Documentation annexe : documents de travail
prospectifs internes préparés par
les Pôles, Services, Groupes et Groupes de Travail de
l'IPSL

Le document de prospective proposé au Comité de visite du LMD est le résultat de plusieurs démarches qui se sont développées tout au long de l'année 2008.

- Des exercices prospectifs propres à chacune des entités constituées de l'IPSL (Pôles, Services, Groupes), qui ont produit des documents souvent assez longs.
- Un exercice de prospective à 10 ans, mis en place par Daniel Vidal-Madjar autour de cinq groupes de travail, qui a conduit à des documents courts, de 5 à 6 pages

Ces documents sont surtout à vocation interne : ils ont fourni la matière de 3 réunions du comité de direction de l'IPSL (CD IPSL), à l'automne 2008, qui ont conduit au document de synthèse présenté à l'AERES.

C'est bien sûr ce document de synthèse qui traduit l'état achevé des réflexions au sein de l'IPSL.

Nous pensons qu'il est utile malgré tout de fournir au comité de visite du LMD et aux représentants des tutelles un accès à certain de ces documents de préparation parce qu'ils témoignent de l'ampleur et de la vigueur de la réflexion interne à l'IPSL, et parce qu'ils peuvent donner des éléments à certains membres du comité pour approfondir la réflexion sur un point particulier.

Il faut prendre ces documents pour ce qu'ils sont : des documents qui servent d'étapes dans un processus évolutif qui se poursuit. La présentation qui en est faite n'est pas exhaustive. Un document de Philippe Keckhut et Cathy Clerbaux sur la réorganisation du Centre de Données et des Services d'archivage, par exemple, n'est pas inclus car il a donné lieu à une réflexion qui a fortement évolué, et qui est présentée sous sa forme aboutie dans le document de prospective synthétique.

Documents longs issus du travail des entités constituées de l'IPSL

- **A : Pôle de Modélisation du Climat**
- **B : Pôle Système Solaire**
- **C : Groupe de Travail Instrumentation** (version détaillée, modifiée après la discussion du CD IPSL et non revue par le CD IPSL ; plusieurs annexes ont été omises)
- **D : SAMA**
- **E : Stratosphère**

Documents issus du travail des GT de travail issus de la prospective à 10 ans (quand il existe un document long, le document court n'est pas répété, par exemple pour le Pôle de Modélisation ou le Pôle Système Solaire)

- **F : GT Interactions Climat Environnement et Société**
- **G : GT Projet de transmission des connaissances**
- **H : GT Environnement et climat régional**

(par contiguïté thématique, nous avons choisi de présenter à cet endroit un document du Pôle Prométhée qui est un peu différent de celui des autres Pôles, puisqu'il est plus court et est consacré à une réflexion sur la réorientation de ce Pôle. Sa rédaction est postérieure à la dernière discussion au CD IPSL)

- **I : Document prospectif Prométhée**

A : Pôle de modélisation de l'IPSL : **Éléments de prospective 2010-2013**

Le Pôle de Modélisation de l'IPSL coordonne les efforts autour de la modélisation globale du système climatique réalisés dans différents laboratoires de l'IPSL (LATMOS, LMD, LOCEAN, LSCE). Durant ces quatre dernières années, les activités du Pôle de Modélisation de l'IPSL ont beaucoup porté sur la réalisation de simulations pour la préparation du 4e rapport du GIEC et sur la distribution des données correspondantes. Ce travail a été mené avec succès: pour la première fois le modèle de l'IPSL a pleinement contribué à la préparation d'un rapport du GIEC; les données des simulations ont été largement diffusées aussi bien au niveau national qu'international et un important travail de valorisation a été réalisé. En parallèle le modèle climatique de l'IPSL a continué à évoluer sur les aspects informatiques (parallélisme, environnement) et en terme de complexités (couplage avec la chimie, les aérosols, le cycle du carbone). Des avancées importantes ont également été réalisées sur les différentes composantes du système, aussi bien en terme de phénomènes considérés que de réalisme des résultats de simulation. Ainsi nous avons su mener de front l'utilisation intensive du modèle en mode « production » et les développements nécessaires pour son amélioration.

L'analyse des simulations a conduit à un nombre significatif de publications (cf. Rapport d'activité). Néanmoins, ce travail pourrait être plus riche du fait de la diversité des compétences au sein de l'IPSL; il a une place plus importante dans notre projet, avec notamment un lien renforcé avec les observations pour le climat récent et pour les climats passés.

Les projets du Pôle de modélisation restent toujours centrés autour du développement d'un modèle de climat incluant les différentes composantes (atmosphère, océan, végétation, glace de mer et glace continentale) sous leurs différents aspects (physique, chimique, biogéochimique....), et de son utilisation pour les études des changements climatiques. Par rapport à nos travaux et projets précédents, nous voulons renforcer les études d'analyses de simulations, mettre en place des actions spécifiques sur l'étude des variations décennales du climat et des climats régionaux et renforcer les liens avec les communautés autres que celle des physiciens du climat.

Dans la pratique, il s'avère que le Pôle de Modélisation ne peut coordonner ou mener à bien que des travaux autour d'un nombre limité de thèmes scientifiques. Nous continuerons à maintenir un nombre réduit de thèmes scientifiques fédérateurs nécessitant un travail organisé autour du modèle climatique d'une part, et à encourager l'utilisation du modèle ou des résultats par une communauté plus larges, mais sans coordination lourde, d'autre part.

La présentation de la prospective est organisée selon trois axes: (I) les études en prolongement de celles déjà engagées, (II) les études sur des thèmes nouveaux et (III) les évolutions des outils de modélisation.

I- Poursuites des études en cours

A l'occasion du 4ème rapport du GIEC, un ensemble sans précédent de simulations climatiques a été réalisé de façon coordonnée sous les auspices du WGCM (working group on coupled models), dans le cadre du projet CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Les résultats de ces simulations ont été mis à la disposition de toute la communauté scientifique, et leur analyse a débouché sur un nombre considérable de publications. Le Pôle de Modélisation de l'IPSL a participé à cet exercice avec le modèle couplé atmosphère-océan IPSL-CM4 et a aussi réalisé des simulations complémentaires pour des études spécifiques: rétroaction climat-carbone, chimie-climat, aérosols-climat... Fort de cette expérience, le Pôle de Modélisation de l'IPSL peut mieux anticiper et s'organiser pour la préparation du prochain rapport du GIEC, aussi bien en termes de production de simulations que de leurs analyses. En parallèle, des simulations sur les climats passés seront réalisées avec le même modèle. Toutes ces simulations et ces analyses représentent un volume de travail très important, mais celui-ci a une très forte visibilité et joue un rôle très fort dans la structuration de notre travail: les modèles utilisés pour ces simulations servent ensuite de référence pour de multiples études postérieures. Les analyses sont souvent à l'origine de nouvelles collaborations qui apportent de nouveaux regards sur les modèles. Au niveau national, elles sont coordonnées à travers le projet ESCRIME auquel participent l'IPSL, le CNRM, le CERFACS et le LGGE.

I-1 Préparation et réalisation des simulations pour le 5^e rapport du GIEC

Le Pôle de Modélisation de l'IPSL développe son modèle de climat suivant deux axes principaux. Le premier vise à améliorer le contenu physique des composantes et leur couplage, et à accroître le degré de réalisme du climat simulé. Le second porte sur l'augmentation de la complexité du modèle, notamment via le couplage avec de nouveaux cycles. Il concerne ce que l'on appelle le « système Terre » (ou ESM, Earth System Model). Lorsque des améliorations du contenu physique des composantes sont introduites, elles sont rendues opérationnelles et sont éprouvées dans la version « physique » du modèle avant de l'être dans la version ESM. Ceci nous amène à organiser nos futures simulations autour de ces deux versions du modèle de l'IPSL.

La version « physique du climat » du modèle a quatre objectifs principaux. Le premier est d'augmenter notre confiance dans les projections de changements climatiques. En effet, un certain nombre de questions clés, parfois clairement identifiées, demeurent sans réponses alors qu'elles conditionnent les réponses à de nombreuses autres questions. Ces questions concernent notamment la réponse des nuages ou les changements de précipitation au-dessus des continents. Le second objectif est de mettre à l'épreuve ou d'approfondir certaines hypothèses, telles que la fonte rapide de la calotte du Groenland, ou d'autres plus extrêmes telle que la fonte de la calotte de l'Antarctique de l'Est. Le troisième est de rendre les modèles climatiques plus pertinents en termes de simulations de variables météorologiques afin de réduire la distance entre les objectifs initiaux des modèles climatiques, qui étaient de simuler les phénomènes à grande échelle, et les nouvelles attentes en termes de réalisme des phénomènes simulés. Ceci devrait faciliter et rendre plus pertinente la comparaison aux observations in situ, les études sur les effets des changements climatiques et les couplages avec d'autres modèles. Enfin le quatrième objectif est de fournir un outil utilisable par tous les chercheurs de l'IPSL pour étudier divers aspects du climat: rétroactions radiatives, cycle hydrologique, variabilité climatique, variations récentes du climat...

La version « système Terre » du modèle comprend (en plus de l'océan et de l'atmosphère) des composantes de chimie atmosphérique, cycle du carbone, cycle biogéochimie océanique, et d'évolution de la végétation (évolution naturelle ou anthropique)... Le but est de prendre en compte le système climatique et ses interactions avec l'environnement de la façon la plus cohérente possible. Le Pôle de Modélisation de l'IPSL s'est engagé dans ce travail il y a plusieurs années déjà et fait partie des centres climatiques les plus avancés dans ce domaine. L'approche modulaire et progressive permet de considérer une composante ou un cycle particulier, ou son couplage avec le reste du système.

Un des thèmes abordés avec cet outil est l'étude des rétroactions entre le climat et le cycle du carbone. Les premières études réalisées à l'IPSL en 2000, ont pris de l'ampleur, et s'orientent notamment vers une meilleure évaluation des modèles par rapports aux observations et vers une étude des fortes variations observées dans les paléoclimats.

Un second thème est désormais l'étude des couplages entre chimie et climat. Par exemple les évolutions futures de l'ozone et du méthane dépendent fortement des variations futures du climat. Le lien entre activité solaire et climat via la chimie stratosphérique est une question ouverte que le Pôle de Modélisation aborde également. La quantité et les propriétés des aérosols font intervenir des réactions chimiques et dépendent fortement des sources d'émission et de la circulation atmosphérique. De nombreux types d'aérosols ont été introduits dans le modèle de l'IPSL ce qui ouvre le champs à des études variées, aussi bien sur les perturbations anthropiques, que sur les variations passées ou sur certains aspects du climat actuel (par exemple effet des aérosols désertiques sur l'extension de la mousson africaine).

Enfin, un dernier thème porte sur l'étude des couplages entre climat et changement de couverture de la végétation, que ces changements soient d'origine anthropique ou naturelle.

Les simulations à réaliser dans le cadre de la préparation du prochain rapport du GIEC sont connues dans leurs grandes lignes, même si plusieurs points restent en discussion. Elles reposent sur des modèles « physique du climat » ainsi que sur des modèles « système Terre » et se répartissent en fonction de différents objectifs d'étude:

- *Évaluation des modèles:* une simulation de contrôle « longue » (500 ans) et des simulations « 20e siècle »
- *Projections climatiques :* plusieurs simulations d'évolution du climat pendant le 21e siècle (avec extension jusqu'au 23e siècle pour certaines) selon différents scénarii d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre.
- *Quantification des forçages, étude des rétroactions et compréhension des différences entre modèles:* ensemble de simulations idéalisées avec le modèle atmosphérique seul, le modèle climatique (modèle couplé atmosphère-océan) et le modèle couplé climat-carbone
- *Rétroaction climat-carbone:* simulations avec des modèles couplés climat-carbone forcés par le concentration en CO₂. Les émissions compatibles avec ces concentrations en sont déduites.
- *Détection et attribution des changements climatiques,* contribution relative de la variabilité naturelle et des effets anthropiques: ensembles de simulation de l'évolution du climat au 20e siècle avec différents jeux de forçages naturels et anthropiques, avec le modèle couplé ou le modèle atmosphérique seul.

- Évolution du climat dans les prochaines décennies. Simulation du climat de 1980 à 2030 environ, avec un intérêt particulier sur les événements extrêmes.

En plus de ces simulations, d'autres seront réalisées pour alimenter d'autres exercices coordonnés ou d'autres sujets d'études. Citons par exemple les simulations des paléoclimats dans le cadre du projet PMIP, les simulations de la variation de la composition chimique de l'atmosphère et de la distribution des aérosols (AEROCOM)....

Le nombre et le volume des données produites par ces simulations et qui devront être stockées, mises en forme, documentées et diffusées ne cessent de croître. Par exemple la régionalisation des résultats des modèles globaux nécessite l'utilisation de plusieurs champs atmosphériques 3D à hautes fréquences (toutes les 3 heures), ce qui représente un changement drastique d'ordre de grandeur dans le volume des données à stocker et diffuser. Pour relever ce nouveau défi, le Pôle de Modélisation souhaite mettre en place dans les prochaines années une action spécifique (cf; section III-2).

I-2 Simulations des climats passés

Comprendre et simuler les variations passées du climat représentent un véritable test de notre capacité à représenter la sensibilité climatique et les différentes rétroactions intervenant dans le système climatique. Nous souhaitons renforcer les études conjointes entre les climats du passé et les projections climatiques futures de façon à produire une meilleure évaluation des forçages intervenant à différentes échelles de temps, des rétroactions associées et de leur impact sur les caractéristiques de la variabilité interannuelle à multi décennale. Nous nous baserons comme point de départ sur les simulations de l'Holocène moyen, il y a 6000 ans, du dernier maximum glaciaire, il y a 21000 ans, et des derniers 1000 ans, qui font partie des simulations clefs pour le prochain jeu de simulations du GIEC et qui seront stockées dans la base de données du projet international PMIP coordonnée au LSCE. Au-delà de ces périodes nous nous appuierons sur des simulations à l'équilibre ou transitoires permettant de comprendre le cycle du carbone et le rôle des flux d'eau douce issus des calottes de glace. Ces analyses se baseront d'une part sur des simulations réalisées avec la même version du modèle que celle utilisées pour les projections futures et d'autre part sur des simulations avec la version basse résolution, qui permettra en autres, d'aborder la question de l'entrée et sorties des périodes chaudes interglaciaires. Ces simulations offriront aussi une base de comparaison naturelle pour l'évaluation du couplage entre la calotte de glace et le modèle de climat.

Un volet majeur de l'étude des climats passés est la confrontation des résultats des modèles aux données disponibles. Ces confrontations permettent à la fois d'évaluer le réalisme des simulations et de permettre l'intégration dans un cadre cohérent de différents indicateurs climatiques qu'ils soient issus des carottes de glace, des sédiments marins ou continentaux. Néanmoins, ces comparaisons ne sont pas toujours directes et requièrent soit d'inverser les données pour en extraire le signal climatique ou de modéliser les données pour permettre une comparaison directe aux données. Nous renforcerons le recours à la modélisation des indicateurs paléo climatiques dans ces comparaisons, en bénéficiant des développements effectués dans le modèle d'océan pour représenter différents traceurs de la circulation et de l'intégration de la modélisation des isotopes de l'eau dans l'atmosphère et son extension à l'ensemble du système couplé.

I-3 Analyse des simulations

La mise à disposition pour une large communauté des résultats des simulations réalisées par les modèles couplés atmosphère-océan a donné une impulsion considérable aux travaux d'analyses de ces simulations. Ceux-ci portent notamment sur l'évaluation de l'aptitude des modèles à représenter le climat actuel ou son évolution récente, sur la caractérisation des changements climatiques futurs et sur l'estimation de la robustesse des résultats. Nous présentons ici quelques unes des études déjà réalisées dans le cadre du Pôle de Modélisation et qui seront poursuivies. Par ailleurs, l'évaluation des modèles par rapport aux observations est un aspect sur lequel nous voulons mettre d'avantage l'accent, et ce point sera repris plus loin (II-3).

I-3-1 Mécanismes des changements climatiques et dispersion inter-modèle

Si les activités humaines ont un effet sur la température de la Terre, notamment via un accroissement des gaz à effet de serre, l'amplitude de cet effet demeure incertaine, de même que les changements associés de grandeurs aussi importantes que les précipitations au-dessus des continents. Sur de grandes régions continentales, certains modèles simulent un accroissement des précipitations, d'autre une diminution, sans que l'on n'ait aucun critère pour déterminer lesquels de ces résultats sont les plus plausibles.

Si le fait que tous les modèles produisent les mêmes résultats n'est pas un critère sur leur justesse, le fait qu'ils produisent des résultats différents, notamment à l'échelle régionale, donne une valeur minimale des erreurs dans les projections. Il est parfois possible d'aller plus loin en recherchant des mécanismes en jeu dans ces différences via des modèles théoriques ou simplifiés. Par exemple, si on s'intéresse à l'amplitude des changements climatiques pour un forçage donné, la réponse des nuages bas a récemment été identifiée comme la principale cause de dispersion entre les modèles. La question de la sensibilité climatique est donc posée de façon plus précise, ce qui ouvre des possibilités de progresser. Pour les changements de précipitations sur les continents, qui sont d'une extrême importance, une des approches est de bien identifier le rôle respectif de la circulation grande échelle et des interactions avec la surface, aussi bien aux échelles de temps inter-annuelle qu'aux échelles de temps décennales à centennales.

Cette recherche de mécanismes peut également être réalisée en utilisant des outils statistiques, tels que les méthodes de classification. Leur utilisation pour des variables de surface telles la température ou les précipitations a déjà été entreprise et pourra être généralisée à d'autres variables ainsi qu'à des ensembles de variables. Ceci nous permettra par exemple d'identifier les modèles ayant des comportements similaires sur le 20^{ème} et le 21^{ème} siècle et donc d'avoir des analyses approfondies ciblées permettant de mieux comprendre les mécanismes physiques communes développées par les modèles de climat.

I-3-2 Attribution des changements climatiques observés

(dont variations décennales, variation 1000 dernières années, variation de la stratosphère...)

1. réponse à différents forçages: GES, aérosols, volcans, intensité solaire, paramètres orbitaux
2. identification des mécanismes en jeux

I-3-3 Variabilités et téléconnection dans le système climatique

L'analyse de la variabilité du climat peut apporter des éléments de réponse sur plusieurs aspects importants des changements climatiques. Les modes de variabilité et les téléconnexions associées mettent en jeu un grand nombre de mécanismes, et bien les simuler permet d'accroître notre confiance dans les modèles. D'autre part, dès que l'on veut aborder la question des variations du climat en réponse à un forçage, par exemple dû aux activités humaines, il est nécessaire de bien séparer les variations du climat dues aux forçages de celles dues à la variabilité interne du climat.

Sur des échelles de temps de plusieurs centaines ou milliers d'années, on dispose depuis peu de reconstructions de la température de surface de l'océan, en quelques points, avec une résolution temporelle de l'ordre de l'année. Ces séries temporelles de températures de surface de l'océan (SSTs) à haute résolution ont été obtenues à partir de proxies paléocéanographiques (alcénones un proxy de SSTs et IP25, un proxy de la glace de mer) et couvrent le dernier millénaire. Elles sont actuellement étendues à des périodes plus longues (Holocène: 10 000 ans). Ceci permettra d'étudier les variations décennales à multi-décennales sur de plus longues périodes, donc dans des conditions de forçage différents.

A l'échelle régionale ou locale, les phénomènes climatiques sont influencés par les conditions locales mais aussi par les caractéristiques du climat à grande échelle (régime de circulation, stabilité verticale...). Connaître et comprendre comment les principaux modes de variabilité seront modifiés dans l'avenir conditionne largement l'estimation que l'on pourra faire des changements locaux.

Dans les tropiques, les structures de la variabilité s'étalent sur plusieurs échelles spatiales et temporelles couplées entre elles. Spatialement, il faut considérer les structures synoptiques (cyclones par exemple) jusqu'aux mécanismes à l'échelle des bassins (rétroaction vent/SST de Bjerknes par exemple), en passant par les structures régionales comme les upwellings côtiers ou les courants de bord ouest. Temporellement, il faut considérer aussi bien le cycle diurne que les variations décennales, en passant par les variations intra-saisonnières (ondes de Madden Julian par exemple), le cycle saisonnier (les régimes de moussons), la variabilité interannuelle (El Niño ou le dipôle de l'océan Indien). Comprendre les mécanismes d'emboîtement des échelles spatio-temporelle de variabilité tropicale et comprendre les liens entre variabilité et changement d'état moyen sont des enjeux importants pour le futur.

Dans les moyennes latitudes, le lien entre le réchauffement planétaire et les modifications des extrêmes climatiques n'est pas encore bien compris. Certains effets ont été peu étudiés jusqu'à présent alors qu'ils pourraient jouer un rôle important. On peut citer les fronts de température de surface de l'océan (SST), la vapeur d'eau (par son effet sur la dynamique à travers le dégagement de chaleur latente) et l'effet de l'humidité du sol pour la dynamique des canicules. Dans ces différents cas, il y a des interactions fortes avec le rail des dépressions atmosphériques (le « storm-track ») qui est à l'origine des régimes de temps. L'étude de la modification des régimes de temps doit donc être couplée à celle de la modification des événements extrêmes dans le cadre du réchauffement global.

II- Inflexions ou nouvelles pistes

II-1 Variations et prévisibilités du climat aux échelles de temps décennales

Les études sur le changement climatique s'intéressaient jusque là aux échelles de temps centennales. Elles reposaient sur des projections climatiques, basées sur des scénarios d'évolution des perturbations, et n'avaient pas pour ambition d'être des prévisions. Les sujets d'études portaient sur les tendances de l'évolution du climat et non pas sur l'évolution temporelle précise des variations. Les prévisions climatiques étaient elles focalisées sur des échelles de temps beaucoup plus courtes, principalement saisonnière, et souvent orientées sur une région ou un processus particulier tel que le déclenchement de la mousson ou la prévision d'ENSO.

Depuis quelques années, les études à l'échelle de temps décennales se font de plus en plus nombreuses, grâce à l'existence de nouvelles observations d'une part, à l'émergence de la notion de « prévision » d'évolution du climat, et non plus seulement de projection de changement climatique, d'autre part. Par exemple, le projet d'inter-comparaison de modèle CMIP-5, qui servira de support au prochain rapport du GIEC, inclura un exercice de prévision du climat des prochaines décennies. D'un autre côté, les observations réalisées au cours des deux dernières décennies permettent d'analyser avec une bonne couverture spatiale et temporelle les évolutions concomitantes de plusieurs variables climatiques : température de surface, vapeur d'eau, nuages, bilan radiatif, circulation atmosphérique, niveau des mers, etc. Ceci permet de vérifier la cohérence de ces variations observées et de rechercher les mécanismes qui les régissent. Pour beaucoup de ces variables, les variations observées sur les dernières décennies sont d'amplitude supérieure à celles qui sont simulées par les modèles climatiques sur la même période. Ces évolutions sont pour une part dues à la variabilité naturelle du climat aux échelles décennales, et pour une autre part au réchauffement global, ce qui signifie que les modèles climatiques sous-estiment l'un ou l'autre (ou les deux). Avec l'augmentation continue du forçage anthropique, on s'attend à ce que dans les prochaines années la signature du réchauffement global devienne de plus en plus prépondérante par rapport à la variabilité naturelle.

Pour la période 2010-2014, le Pôle de Modélisation de l'IPSL entend développer les thématiques scientifiques associées à la prévisibilité décennale par des études amont, autour des questions suivantes:

- 1) Quelle est la part de variabilité naturelle et celle due aux forçages anthropiques dans les variations récentes du climat ?
- 2) Quels sont les mécanismes sous-jacents et peut-on mieux les évaluer dans les modèles?
- 3) Quel est le potentiel de prévisibilité? Il y a-t-il par exemple des régions océaniques clefs?
- 4) Quelle méthodologie, quelles procédures d'initialisations mettre en oeuvre pour réaliser et éprouver des prévisions décennales?

Ce travail s'organisera autour de deux axes. Le premier concerne l'étude du système couplé atmosphère-océan autour de régions ou de phénomènes particuliers: (i) mousson africaine, (ii) mousson indienne, (iii) variabilité ENSO et (iv) région Europe/Méditerranée. Le second concerne plus spécifiquement les surfaces continentales, aussi bien en terme de variables climatiques physiques que de cycle du

carbone et de transport de CO₂. Il est notamment prévu de développer un système intégré d'assimilation du cycle du carbone (CARBONATOR) qui permettra de mieux déterminer les flux de CO₂ à la surface et d'optimiser les paramètres du modèle ORCHIDEE sur la période récente (25 dernières années).

II-2 Études à l'échelle régionale et régionalisation du climat global

Après une phase d'alerte sur les risques d'un changement climatique global, les questions aujourd'hui portent sur des points plus précis, tels que comment éviter ou se préparer à ces changements, quels seront leurs effets sur le milieu naturel, sur les ressources hydrologiques, sur les activités humaines, sur les questions de santé... Les questions portent ainsi davantage sur une meilleure description des changements à l'échelle régionale, par exemple en terme de précipitations ou d'événements extrêmes . Bon nombre de questions sur le réalisme des simulations des climats régionaux passe tout d'abord par une meilleure représentation du climat global et des mécanismes mis en jeu. C'est le cas par exemple pour la représentation des régimes de temps dans les moyennes latitudes ou des systèmes de moussons. D'autres questions nécessitent de mettre en oeuvre des descentes d'échelle, soient statistiques à partir de régimes de temps par exemple, soient dynamiques pour prendre en compte notamment l'impact d'éléments géographiques déterminants (orographie, bassins versants pour l'hydrologie). Une approche classique dans ce domaine, et qui va certainement se développer encore dans les années qui viennent, consiste à «régionaliser» des simulations globales, en utilisant des modèles imbriqués (en aller simple ou en aller-retour) ou des modèles avec zoom. Différents types d'approches sont à l'étude aujourd'hui pour la régionalisation des scenarii aussi bien pour l'atmosphère (versions zoomées de LMDZ, utilisation de WRF, MesoNH, MM5, ...) que pour l'océan (utilisation d'une aire limitée ou d'un emboîtement de modèle avec AGRIF pour NEMO). L'utilisation des sorties des modèles de climat (globaux ou régionaux) pour des applications de type hydrologique, agriculture ou autres, amène également à poser un regard nouveau sur le contenu physique des modèles et leur capacité à simuler le climat. L'agriculture au Sahel, à l'échelle de la parcelle, est par exemple très sensible aux pauses pluviométriques dues à la fois à des pauses à grande échelles et au côté aléatoire de la localisation des orages, deux questions potentiellement abordables avec les modèles actuels, sous réserve de poser correctement le problème. Répondre efficacement à ces questions nécessite de sortir d'un cadre « fournisseur de produit climatique pour les impacts» et de développer des recherches multidisciplinaires, impliquant par exemple agronomes et physiciens du climat pour cet exemple particulier. Enfin, les études régionales sont aussi l'occasion d'explorer plus en détail des mécanismes essentiels pour le climat global, autour de campagnes d'observations dédiées.

Les approches utilisées et les régions étudiées étant très variées à l'IPSL, le Pôle Modélisation se concentrera sur :

- l'amélioration de la physique du modèle global, dont nous avons dit que c'est un des enjeux premiers pour les climats régionaux
- l'articulation des études régionales avec la modélisation couplée globale. Il y a par exemple un enjeu à se doter de procédures automatiques et standardisées permettant de mener des études de régionalisation avec différents modèles.
- le développement de configurations couplées à plus haute résolution ou raffinées localement, pour aborder des questions particulières.

Certaines thématiques régionales seront davantage mises en avant dans les années qui viennent, parce qu'elles correspondent soit à des enjeux particuliers (Europe, Sahel) soit à des zones clefs pour des processus climatiques, souvent en lien avec des campagnes d'observation.

Afrique de l'Ouest et Atlantique

Les modèles de climats sont encore aujourd'hui en profond désaccord quant au signe même de l'évolution du cumul des précipitations dans les régions de mousson, et au signe et à l'amplitude des couplages avec l'océan ou l'hydrologie de surface. L'explication de la grande sécheresse des années 70-80 au Sahel est elle aussi encore en débat. Un enjeu prioritaire pour les années qui viennent sera d'utiliser les résultats des observations réalisées dans le cadre du projet AMMA d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine pour évaluer les modèles et améliorer leur contenu physique, que ce soit pour les processus convectifs et nuageux, les couplages avec l'hydrologie de surface ou la composition atmosphérique et son lien avec le transport atmosphérique. De nombreuses études sont développées dans ce cadre, en collaboration entre le LOCEAN, le LMD et le LPAOSF (Dakar), avec un volet sur les impacts, sur l'agriculture ou l'hydrologie. Peu d'études ont en revanche été menées jusque-là avec un couplage océanique. Deux configurations du modèle couplé de l'IPSL vont être développées: l'une globale avec une résolution horizontale de 1° dans l'atmosphère et de 0,25° dans l'océan, l'autre zoomée sur l'Afrique de l'ouest avec une résolution double (0,5° et 0,125°) sur l'Atlantique tropical. Le but est d'étudier les mécanismes de couplage entre le système de mousson et les températures de surface océaniques, à la fois sur le golf de Guinée et sur le proche Atlantique, et d'explorer la réalisation de projections climatiques décennales. Le couplage avec les aérosols (poussières désertiques notamment) est également une thématique importante qui devrait se développer dans les années qui viennent.

LE BASSIN MEDITERRANEEN

Dans le dernier rapport du GIEC paru 2007, tous les scénarios et modèles convergent vers un assèchement du bassin méditerranéen dans le contexte du changement climatique. Il est cependant actuellement très difficile de prévoir son impact à l'échelle locale car le climat régional, de par la complexité géographique du bassin méditerranéen (bassin océanique quasi-fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté et une forte urbanisation) est fortement dépendant des interactions et rétroactions des différents compartiments de ce bassin (atmosphère, surfaces continentales, océan) affectant les dynamiques géophysiques et bio-géochimiques. La prévision des événements extrêmes (pluies intenses à l'automne, vents violents, sécheresse en été) demeure délicate en raison d'un manque d'information sur leur préconditionnement qui met en jeu toute une hiérarchie de processus intervenant de manière non linéaire aux échelles les plus fines.

La réponse à ces questions nécessite une meilleure compréhension du système couplé dans le bassin Méditerranéen à l'échelle régionale en relation avec le forçage global dans le contexte du climat présent et dans celui d'un changement climatique global. L'effort de recherche à l'IPSL porte sur l'étude du cycle de l'eau et de la composition chimique dans un contexte de réchauffement global avec une attention particulière sur la représentation des extrêmes climatiques (incluant l'évaluation des incertitudes et la propagation d'erreurs dans la simulation de ces extrêmes).

Pour ce faire, le développement d'une plateforme de modélisation régionale couplée permettant de quantifier la réponse régionale du système Terre à un forçage de grande échelle est nécessaire et est actuellement en cours de développement pour la région Méditerranée dans le cadre des projets européen CIRCE et GIS "Climat-Environnement-Société" MORCE-MED. Cette plateforme intègre les modèles régionaux développés et/ou utilisés par les équipes de l'IPSL dans les différents compartiments (NEMO-MED pour la dynamique océanique, LMDZ et WRF pour la dynamique atmosphérique, ORCHIDEE pour l'hydrologie et les écosystèmes continentaux, CHIMERE pour la chimie atmosphérique, ECO-3M pour la bio-géochimie marine).

Autres domaines étudiés : océan indien et hautes latitudes Nord

II-3 Variations du niveau des mers

Une incertitude importante dans tous les rapports IPCC, y compris le dernier, est de quantifier la remontée du niveau marin, et notamment la contribution des calottes de glace. Or les conséquences seront radicalement différentes si cette élévation est de 20 cm ou de 2 mètres. La dernière fois sur Terre où la concentration de CO₂ a dépassé 400 ppm, il y a entre 30 et 40 millions d'années, il n'y avait pas de calotte de glace sur Terre. La question de la fonte rapide des calottes dans un monde avec une forte croissance du CO₂ se pose.

Les modèles de calottes doivent tenir compte des glaciers émissaires qui drainent l'eau douce vers l'océan; ils doivent pouvoir inclure leur dynamique ce qui nécessite de prendre en compte les sédiments sous glaciaires et de travailler à très haute résolution. Ils doivent mieux modéliser également les plates-formes de glace de l'Antarctique de l'Ouest et en particulier la fusion basale par l'océan. Une collaboration étroite entre le LGGE et l'IPSL est nécessaire pour les aspects modélisation. Mais il faut également intensifier les relations avec le LEGOS pour bénéficier des mesures satellitaires qui permettent de valider les bilans de masse des calottes (utilisation de GRACE). On s'attend à ce que la contribution des calottes à la remontée du niveau marin puisse être évaluée de façon fine et fiable ces 10 prochaines années, ce qui devrait permettre de mieux tester les modèles et ainsi améliorer les projections pour la fin du siècle.

II-4 Utilisation des observations par les modèles globaux

Au cours des dernières années, l'analyse et l'évaluation des différentes versions du modèle couplé de l'IPSL n'a pas toujours reçu une attention suffisante. Il est donc proposé de mettre en place un groupe de travail multidisciplinaire au sein du Pôle chargé du développement méthodologique de la validation et de l'évaluation du modèle. L'objectif est de rassembler une variété de diagnostics permettant d'évaluer la pertinence des résultats du modèle et d'aider à ce que les défauts du modèle mis en évidence puissent être corrigés sur la base d'une compréhension physique. Les questions auxquelles ce groupe de travail devra répondre seront notamment celles posées par le groupe de développement du modèle du GFDL:

- 1) Quelles sont les principales erreurs du modèle (et/ou de ses différentes versions) ?
- 2) Comment ces erreurs diffèrent-elles selon les versions?

3) Quels mécanismes et processus peuvent expliquer les erreurs communes d'une part

et les différences entre les versions d'autre part ?

Une partie des études liées à ces questions se focalisera sur une composante particulière et se fera essentiellement au sein du ou des laboratoires concernés. Une autre partie relèvera du couplage entre composantes et d'un travail interdisciplinaire et sera assuré par le Pôle de Modélisation.

L'évaluation des modèles passe par la comparaison *automatisée* des simulations aux nombreux jeux de données déjà disponibles (et la préparation à l'utilisation des nouveaux jeux de données) avec des méthodologies adéquates.

Pour la composante océanique, des travaux porteront sur des études de processus grâce aux nouveaux jeux d'observation à très petites échelles spatiales et temporelles (campagne VASCO-CIRENE par exemple). Leur intégration à l'évaluation des modèles est en cours de développement. Des essais sont par exemple menés au LOCEAN pour sauvegarder, en sus des sorties classiques du modèle, des séries temporelles à haute fréquence aux points précis de localisation des observations.

Pour la composante atmosphérique, les études de processus seront également poursuivies grâce aux campagnes d'observations, telles AMMA. Pour les études à l'échelle globale, deux actions sont en développement : d'une part *l'adaptation du jeu de diagnostics développé au NCAR*, sur la base de recommandations du WGNE, au modèle LMDZ puis au modèle couplé (diagnostics sur la climatologie, les modes de variabilités diurne, intra-saisonnière, saisonnière et inter-annuelle, les ondes tropicales, les phénomènes de blocage, les transports d'énergie, etc) , et d'autre part *l'utilisation de simulateurs d'observations spatiales* (simulateurs ISCCP, CALIPSO, CloudSat, RTTOV, etc) permettant de comparer de façon cohérente les sorties de modèles aux observations spatiales passives ou actives.

Pour l'évaluation du modèle couplé dans son ensemble, nous nous appuyerons également sur l'étude de la dérive initiale du modèle, en particulier lors de simulations de prévisions saisonnières. Par exemple, on peut réaliser un ensemble de simulations à partir de conditions initiales différentes, certaines d'entre elles ayant été suivies d'un événement ENSO, d'autres pas. Les mécanismes à l'origine de la dérive initiale du modèle par rapport aux observations et les mécanismes qui favorisent ou au contraire limitent le développement d'ENSO pourront être étudiés et évalués. Des méthodes d'initialisation assez légères ont déjà été testées avec succès, telle la réalisation de simulations dans lesquelles le vent et la température de surface sont simplement rappelés vers les observations. Ce travail s'organise au niveau international dans le cadre du « Climate-system Historical Forecast Project (CHFP) » proposé par CLIVAR.

II-5 Liens entre climat et société

Les projections climatiques constituent la base de nombreuses études, qui vont bien au-delà des activités de recherches menées à l'IPSL. Ces activités nécessitent de notre part à la fois la diffusion des données simulées, la réalisation de simulation régionalisées ou l'application de différentes techniques de descente d'échelle pour étudier l'impact du changement climatique, ainsi qu'une activité de conseil sur la pertinence des simulations, de leurs résultats ou de leur utilisation. Cette activité s'est concrétisée ces dernières années par la diffusion des connaissances via le livre blanc ESCRIME et plusieurs articles de vulgarisation, ainsi que par les projets ONERC et

IDDRI permettant de mettre les connaissances à la disposition du grand public ou des industriels. Le nombre de ces études est en forte croissance et ont de fortes répercussions sur les groupes de modélisation réalisant les projections climatiques. En effet, la qualité des différentes études pouvant être menées à partir des projections climatiques est fortement contrainte par les biais des modèles de climat, l'accès aux variables pertinentes pour l'étude envisagée et la discussion des incertitudes incluant à la fois les modèles, les forçages et la qualité des données distribuées. Nous souhaitons renforcer cette activité d'interface, de façon à garantir un meilleur service aux utilisateurs. Ces actions seront entreprises avec le groupe impacts de l'IPSL, le GIS climat et société et via différents projets engagés (IDDRI) ou en cours de négociation (Is-ENES). Elle se décline en trois parties

- diffusion des données sous une forme facilement exploitable par d'autres communautés.
- Participation à quelques études d'impact
- Identification d'indicateurs climatiques pertinents

La réalisation technique s'appuiera sur le projet Is-ENES ou une ébauche de service vers les autres communautés sera élaborée dans les 4 prochaines années. Dans un premier temps, il s'agira d'identifier les besoins, de rassembler des cas tests permettant de décrire les éléments permettant de passer de la simulation climatique à grande échelle à la variable d'impact et de présenter sous forme d'exemple des cas tests. A plus long terme, des outils d'analyses simples seront mis à disposition. Une activité complémentaire permettra en lien avec différents projets d'impacts de déterminer des indicateurs pertinents permettant de guider les autres communautés dans leurs analyses. Ces indicateurs (comme les vagues de chaleur, le nombre de jours de gel et...) nécessitent en général des données à la résolution journalière ou inférieure et, pour pouvoir répondre à différents projets simultanément, il faut pouvoir à terme inclure ces diagnostics à la base dans les simulations. Nous chercherons aussi favoriser les analyses permettant de mieux comprendre les raisons de leur variations dans un climat différents, de façon à discuter les incertitudes et, le cas échéant, d'émettre des recommandations sur les qualités ou les biais des modèles. .

III- Évolution des outils de modélisation

III-1 Évolution du modèle du système Terre

Ces dernières années, l'objectif principal du Pôle de Modélisation était de construire un modèle climatique qui soit reconnu au niveau international et qui puisse servir de fondation aux développements futurs. Pour cela, le Pôle de Modélisation s'est concentré sur un objectif précis: participer à la préparation du 4^e rapport du GIEC et développer un modèle du « système Terre » couplant les différentes composantes de ce système en considérant à la fois les processus physiques, chimiques et biogéochimiques. Cet objectif a été atteint, avec un modèle dont la résolution horizontale est de $3,75^\circ \times 2,5^\circ$ pour l'atmosphère et de $2^\circ \times 2^\circ$ pour l'océan. Nous voulons élargir le champ d'utilisation du modèle de l'IPSL dans plusieurs directions:

- simuler des périodes de temps plus longues (plusieurs millénaires) pour étudier notamment les entrées et sorties de glaciations et les couplages entre le climat et le cycle du carbone à ces échelles de temps. (?? à préciser, liens avec les obs. ??). Une version du modèle dite « grande vitesse » est en cours de développement. Elle est proche de la version standard, mais avec une résolution spatiale réduite et des paramétrisations spécifiques pour modéliser les phénomènes non résolus.

Comme les autres versions du modèle couplé, elle inclue désormais une représentation des isotopes stables de l'eau. Dans sa version actuelle, la résolution de l'atmosphère est de 10°x5° environ, celle de l'océan 2°x2°

- accroître la résolution horizontale et verticale des modèles pour mieux tenir compte des caractéristiques locales, mieux simuler le cycle diurne, les tourbillons océaniques, les cyclones tropicaux... et de façon plus générale étudier les interactions d'échelles dans le système climatique. Cette version « haute résolution » sera mise prochainement en place, avec notamment comme but d'étudier les échelles de temps décennales. Dans un premier temps, la résolution de l'atmosphère sera de 1° et celle de l'océan de 0,25°
- Ajouter le couplage avec les calottes polaires, et étudier le couplage entre toutes les composantes via l'ensemble de processus physique, chimique et biogéochimique. Cette version, dite « système Terre » (ESM), est en développement depuis plusieurs années et a déjà été utilisée dans de nombreuses études. Néanmoins, vu la complexité du système, seule une partie des composantes ou des processus étaient effectivement activés dans ces études, l'activation de l'ensemble restant à faire
- améliorer le contenu physique des modèles pour accroître la pertinence des simulations, notamment de changement climatique. Ce travail repose avant tout sur le développement de chacune des composantes. Par exemple, un travail important de refonte de la partie physique du modèle d'atmosphère a été entrepris et devrait représenter un saut qualitatif en termes de pertinence des simulations, et permettre mieux étudier les interactions avec l'océan ou avec les surfaces continentales. Ces développements lourds nécessitent d'être bien validés avant d'être intégrés à la version « système Terre ».

Parallèlement à ces évolutions du contenu et des configurations du modèle, plusieurs développements informatiques ont été réalisés et seront poursuivis (cf. sect. III-3)

III-2 Distribution des données

La dénomination générique « distribution des données » couvre en fait deux volets distincts. D'une part les outils nécessaires à la réécriture, à la transformation et à la mise en conformité de nos fichiers avec des critères ou des recommandations internationales et d'autre part les technologies et les méthodes à mettre en œuvre pour permettre aux communautés utilisatrices ou demandeuses de nos données d'y avoir un accès renseigné et le plus simple possible.

- Le premier volet s'appuie sur des outils développés au cours de la participation de l'IPSL aux exercices d'inter comparaisons internationaux (GIEC, CMIP, PMIP, AMIP, ...). Ces outils évolueront en étroite collaboration avec les équipes développant le modèle système terre, l'objectif étant d'intégrer au mieux ces outils de mise en conformité aux modèles eux-mêmes et à l'environnement d'exécution du modèle système terre développé à l'IPSL.
- Le deuxième volet s'articulera autour de PRODIGUER, un projet fédérateur du Pôle de Modélisation de l'IPSL en lien étroit avec le Centre de Données, s'appuyant sur les moyens IPSL et sur les institutions INSU et CEA. Il a pour but de faire de l'IPSL l'un des nœuds d'accès aux données pour les trois groupes de travail du GIEC. Le projet se propose de s'approprier et de déployer une Technologie de type grille de données adaptée à la Communauté Climat. Les projets EarthSystemGrid, Collaborative-

Climate-Community Grid et Grid Relational Catalog Project Portal sont les grands projets internationaux développant ces technologies.

Le savoir-faire acquis permettra à d'autres projets IPSL de bénéficier de cette plateforme de distribution, favorisant l'échange d'expertise au sein de l'IPSL. Au delà de la diffusion par l'IPSL d'une partie des données AR5, ce projet permettra la mise en place d'un portail d'accès centralisé aux données produites par le Pôle de Modélisation (données très spécifiques, extrêmement volumineuses et réparties dans plusieurs centres de calcul, IDRIS, CCRT). En s'appuyant sur plusieurs projets européens (METAFOR, IS-ENES, EGEEIII, PRACE et DEISA2) l'IPSL disposera des outils et méthodes nécessaires à la distribution des résultats du Modèle Système Terre. En interne, l'IPSL via une structure informatique multi site reliant le serveur ClimServ (Palaiseau) au serveur Cyclades (en cours de démarrage à Jussieu) pourra également épauler cette plateforme dédiée à la recherche climatique en explorant les possibilités offertes par les méso centres de calcul dans le contexte de déploiement d'un portail d'accès et d'analyse de données climatiques.

III-3 Vers une nouvelle génération de modèles globaux

Le pôle de modélisation a engagé depuis plusieurs années le chantier de la parallélisation du modèle système Terre, de ses composantes et de son environnement. Une première version du modèle climat parallèle est en production scientifique depuis fin 2007. Elle est adaptée au travail sur quelques dizaines de processeurs et les calculateurs vectoriels restent les plus efficaces. Avec l'implémentation dans le modèle atmosphérique d'un niveau de parallélisme en mémoire partagée (OpenMP) sur la verticale (travail en cours dans le projet ANR CICLE), le nombre maximum de processeurs sera étendu. Ceci rendra cette version mieux adaptée aux machines scalaires parallèles prévues au CINES (SGI), à l'IDRIS (IBM Power6) et au CCRT (Bull - Itanium), avec des temps de calculs comparables aux ordinateurs vectoriels. La mémoire disponible par processeur sur la BlueGene de l'IDRIS est clairement trop petite pour envisager son utilisation.

Aux résolutions plus élevées, les goulets d'étranglement prévisibles concernent les entrées/sorties et le couplage entre modèles. Un premier travail de mise en œuvre d'un serveur d'entrées/sorties est déjà engagé (soutien supplémentaire par le projet européen IsENES). Cependant, les performances matérielles des systèmes d'entrée/sorties des futurs calculateurs restent une inconnue, et peuvent devenir limitantes. Concernant le couplage, le passage à OASIS4 prévu (projet ANR CICLE) permettra de s'affranchir des congestions prévisibles avec OASIS3 lorsque l'on accroît la fréquence temporelle d'échanges de champs.

Les simulations d'ensemble deviendront systématiques et l'environnement d'exécution devra intégrer dans la chaîne de production les analyses d'ensembles (moyennes, variances, ...). Pour cela les concepts introduits par libIGCM, de description d'une simulation et de la configuration produisant cette simulation, devront être étendus et complétés. L'environnement d'exécution libIGCM en s'appuyant sur la conceptualisation sous jacente au CIM (Climate Information Model) de METAFOR permettra de généraliser l'utilisation des ensembles sur les plateformes de calcul disponible.

Ce travail autour du modèle actuel est bien engagé. Il permettra d'utiliser les machines disponibles en France (maintenant qu'elles ont été remises à niveau) et,

pour des études exceptionnelles exploratoires, au niveau européen.

Au-delà de ces étapes connues, pour préparer l'utilisation des machines pétaflopiques (10^{15} opérations flottantes par secondes), nous allons améliorer notre expertise dans plusieurs directions :

- Continuer le développement des paramétrisations physiques afin d'améliorer la simulation des phénomènes climatiques et accompagner l'accroissement de résolution;
- Progresser vers une nouvelle dynamique adaptée au parallélisme massif.
 - Garder la modularité des codes pour préserver l'indépendance des parties dynamique et physique et garder des possibilités d'évolution différenciées ;
 - Développer notre expertise en finissant le développement et en faisant tourner dans le code atmosphérique un cœur dynamique basé sur un maillage icosaédrique qui permet de s'affranchir des singularités aux pôles et d'envisager une parallélisation massive ;
 - Étudier les différents cœurs dynamiques disponibles dans les autres équipes pour les codes de circulation atmosphérique et océanique, et en particulier leurs qualités dynamiques et numériques et leurs performances informatiques. Explorer l'intérêt que l'océan et l'atmosphère partage le même noyau dynamique;
- Garder un environnement performant :
 - Garder la cohérence entre les configurations des composantes autonomes jusqu'au système Terre incluant chimie et cycles ;
 - Optimiser les entrées/sorties en fonction des performances matérielles des systèmes d'entrée/sorties des futurs calculateurs, aujourd'hui inconnues
 - Adapter les post-traitements aux grilles non géographiques et optimiser les post-traitements qui devront être parallélisés;
- Poursuivre la veille technologique :
 - Sur les évolutions des architectures et des processeurs ;
 - Sur les évolutions des langages ;
- Echanger nos expériences lors de journées de travail. La première est prévue début 2009.

III-4 Les moyens de calculs

Les ressources calcul nécessaires au Pôle de Modélisation du climat sont importantes et croissent régulièrement en fonction de l'évolution des questions scientifiques traitées et en phase avec les possibilités offertes au niveau national et international. Cet accroissement de besoins en ressources est due à des évolutions selon plusieurs axes : augmentation de la qualité des modèles, augmentation des longueurs de simulations, extension de la complexité du système terre, augmentation du nombre de simulations d'ensembles, augmentation des résolutions horizontales et verticales.

Dans les années à venir, il faut s'attendre à une très forte hétérogénéité dans les ressources calcul disponibles. En effet, après deux révolutions, celle du vectoriel (années 1980) puis celle du parallèle (années 1990), nous sommes en train de vivre une troisième révolution. Celle-ci est liée à la fin de l'augmentation des puissances calcul reliée directement à l'augmentation régulière de la fréquence d'horloge des calculateurs. La créativité des architectes de processeurs est très sollicitée et dans le même temps, seuls les constructeurs capables de s'installer sur le marché de masse

pourront perdurer. Les développeurs de compilateurs et outils nécessaires au calcul intensif ont besoin de temps pour optimiser leurs outils en fonction des caractéristiques des processeurs. Nous sommes au niveau des applications et tributaires des progrès réalisés dans ces deux domaines. Dans ce cadre, nous devons répondre à nos besoins de production calcul en masse et être capable d'utiliser les machines nouvelles et repérer celles qui seront adaptées à nos besoins. Ceci implique 2 actions de notre part à soutenir dans les années à venir :

- Maintenir nos prévisions des besoins calcul 2 ans à l'avance
- Analyser les machines disponibles au regard des caractéristiques de nos applications : consommations de mémoire, de calcul, d'entrées/sorties, vitesse réelle d'exécution, ...

B. Prospective du Pôle Système Solaire

1. Contexte d'évolution du Pôle Système Solaire

La fusion du SA et d'une partie du CETP en un seul laboratoire, le LATMOS, et l'élargissement de l'IPSL à de nouveaux laboratoires où se pratique la planétologie (LPMAA-P6, LISA-P12, IDES-P11 –en cours d'association-, GSMA-Reims -ayant le statut de laboratoire associé-) renforce le socle et la pertinence du Pôle Système Solaire. Le rapprochement avec ces nouveaux laboratoires aux compétences complémentaires (physique cométaire au LPMAA, exo-astrobiologie au LISA, physicochimie des atmosphères planétaires au GSMA, dynamique des environnements de surface à l'IDES) va nécessiter un travail d'intégration scientifique important. D'ores et déjà, avec l'entrée dans l'IPSL du LPMAA et du LISA, le Pôle Système Solaire compte 60 chercheurs et enseignants chercheurs ETP (permanents et non-permanents), et constitue une force significative du paysage francilien en planétologie.

Outre l'IDES et le GSMA, qui sont déjà associés au Pôle Système Solaire, plusieurs laboratoires de Sciences de la Terre à l'UPMC Paris 6 (SISYPHE, MAGIE, LGBS) ont noué des collaborations avec le LATMOS autour de projets d'instruments spatiaux (spectrométrie de masse, chromatographie en phase gazeuse, sondage électrique des subsurfaces). Un groupe de planétologie rassemblant géologues et atmosphériciens autour des thématiques de l'exobiologie et des interactions subsurface-atmosphère est en cours de constitution dans l'UFR TEB. Par ailleurs, plusieurs chercheurs du CETP rejoignant le LPP seront chercheurs associés au LATMOS, ce qui permettra de poursuivre dans le cadre du pôle les collaborations entamées entre le SA et le CETP dans le domaine des couplages haute atmosphère-magnétosphère-vent solaire.

Le rôle central qui sera joué par le LATMOS dans la mise en place des activités du Pôle d'Innovation Instrumentale et Spatiale (PI2S) à Guyancourt, et les collaborations en cours sur des techniques spatiales d'intérêt planétologique (par ex. spectrométrie micro-onde au LMD, GCMS au LISA, sondage radar à l'IDES, sondage électrique à SISYPHE, spectroscopie par diodes laser accordable au GSMA, etc...), donnent au PSS une dimension spatiale large et interdisciplinaire qui en est l'une des caractéristiques principales.

Dans cette construction, le PSS pourra se reposer sur des coopérations déjà bien établies autour de grandes thématiques telles que : météorologie et climat (LMD-LATMOS), échappement et évolution des atmosphères (LATMOS-LPP), astro-exobiologie (LISA-LATMOS). De nouveaux axes émergents sont en train de se dessiner, matérialisés par des financements incitatifs de l'IPSL sur des thématiques focalisées, comme le soulèvement des poussières martiennes (LATMOS-LISA) ou le sondage radar des subsurfaces (LATMOS-IDES). Des projets de physique cométaire en coopération LATMOS-LPMAA ont également été inscrits au prochain quadriennal de l'IPSL à l'UPMC Paris 6.

Par ailleurs, le PSS a vocation à entretenir des liens étroits avec le Pôle de Planétologie du PRES UniverSud, qui permet de monter des coopérations avec un autre acteur majeur de la planétologie spatiale, à savoir l'IAS (Orsay Paris 11).

2. Prospective scientifique

L'exercice de prospective a été mené suivant un découpage en trois grandes thématiques :

- Climat et météorologie des planètes (LMD, LATMOS, LISA, IDES, laboratoires de Sciences de la Terre de l'UFR TEB, GSMA)
- Origine des planètes et de la vie (LISA, LATMOS, LPMAA)
- Evolution des atmosphères et interactions magnéto-héliosphériques (LATMOS, LMD, chercheurs du LPP associés au LATMOS)

Par ailleurs, une réflexion spécifique a été menée sur les bases de données (BDAP, IDIS/ Europlanet, VO), dont les résultats apparaissent dans le chapitre consacré aux SOON, et sur les synergies entre la planétologie et l'environnement à l'IPSL.

2.1 Climat et météorologie des planètes

LMD : F. Codron (30%), F. Forget (100%), F. Hourdin (15%), S. Lebonnois (100%),
LATMOS : J.L. Bertaux (70%), N. Carrasco (70%), G. Cernogora (70%), E. Chassefiere (20%), F. Leblanc (30 %), F. Lefevre (50%), E. Marcq (100%), F. Montmessin (100%), A. Sarkissian (70%), M. Hamelin (30%), J.-J. Berthelier (35%), V. Ciarletti (100%), GSMA : T. Cours (60%), L. Daumont (50%), G. Durré (50%), V. Tsyterev (40%), P. Rannou (100%), M. Rey (50%), IDES : F. Costard (50%), B. Platevoet (30%), P.-M. Bardintzeff (30%) soit 14,5 ETP (+10 doc/postdoc \square **≈25 ETP**)

L'étude des atmosphères des trois principales atmosphères telluriques du système solaire (Mars, Titan Vénus) est au coeur de l'activité des équipes de l'IPSL depuis l'origine. Nous proposons de poursuivre ces travaux, mais aussi d'étendre notre champ d'investigation vers les climats primitifs de ces planètes, d'étudier Pluton et Triton (satellite de Neptune), d'amorcer dès à présent l'étude des climats sur les planètes extrasolaires telluriques, et enfin d'aborder à terme la modélisation des atmosphères des planètes géantes.

2.1.1 Mars

Observations

L'observation de Mars à L'IPSL sera tout d'abord marquée par la poursuite de l'exploitation des données de la mission ESA Mars Express. L'IPSL compte un laboratoire responsable d'un instrument (SPICAM, développé au SA) et de nombreux intervenants scientifiques au sein des équipes des instruments OMEGA, ASPERA et PFS. L'IPSL a ainsi pris part à la moisson scientifique exceptionnelle de la mission, et les probabilités sont fortes de la voir se poursuivre jusqu'en 2011 (certains échos faisant même état de 2015), ce qui permettra d'établir une climatologie longue durée pour la vapeur d'eau, la poussière, les nuages, l'ozone... Au delà de Mars Express, le contexte programmatique s'est enrichi de plusieurs missions dans lesquelles l'IPSL est fortement impliqué. D'ici à 2013, devraient se succéder Mars Science Laboratory (MSL) en 2009 (NASA), la mission russe Phobos Grunt (2009 ou 2011), la mission NASA Mars Scout (2013), et enfin la mission ESA Exomars (2013). Les deux dernières citées attendent néanmoins une décision politique que l'on devrait connaître d'ici la fin de l'année 2008. La contribution IPSL à MSL, née d'une synergie SA-

LISA, porte essentiellement sur la suite d'instruments SAM (Sample Analysis at Mars) dédiée à la recherche d'indices possibles de vie passée sur Mars ou d'une activité prébiotique (voir le volet « origine des planètes et de la vie »). Phobos Grunt est une mission russe consacrée à la collecte et l'analyse *in-situ* d'échantillons de la surface du satellite martien Phobos. Elle intègre une contribution du GSMA pour la fourniture d'une diode laser et l'apport du LATMOS par l'intermédiaire des colonnes du chromatographe en phase gazeuse, le tout couplé au système de séparation/analyse de gaz. Le LATMOS participe aussi au développement d'un sondeur infrarouge de l'atmosphère de Mars, avec une détection possible du méthane. Ce composé fait l'objet d'une attention renforcée, de par sa connotation exobiologique (sur Terre, 90% du méthane est d'origine biogène) et parce que les premières détections effectuées depuis 2004 restent à ce jour très controversées. Dans ce contexte, le spectromètre infrarouge haute résolution SOIR (déjà utilisé sur Venus Express, et dont le SA est co-responsable), a été proposé et présélectionné par la NASA dans le cadre de son programme Scout, avec de bonnes chances de sélection (il ne reste que deux propositions en compétition pour une place). Il permettra d'abaisser les standards de détection actuels d'un facteur 100 et de contraindre le rapport $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, ceci afin de désigner plus précisément une origine géophysique ou biologique.

Egalement à l'horizon 2013, EXOMARS pourrait entraîner l'IPSL et plusieurs de ses laboratoires (LATMOS, LISA) dans le sillage d'un projet européen ambitieux d'exploration planétaire. La mission sera constituée d'un engin mobile embarquant une suite d'instruments dédiés à la caractérisation chimique, minéralogique et biologique de l'atmosphère, de la surface et du sous-sol martien ainsi que d'une station géophysique fixe. Six instruments, actuellement en phase B, pourraient être fournis par l'IPSL. Parmi eux, les radars WISDOM et EISS du CETP chargés de sonder le sous-sol à la recherche de couches de pergélisol, voire de réseaux aquifères (non détectés cependant depuis l'orbite). L'interprétation de ces futures données radar est déjà en préparation grâce à des tests menés en chambre froide (collaboration LATMOS-IDES). MOMA (LISA-LATMOS), contribution sensiblement équivalente à SAM/MSL, est décrit en détails dans la partie « Origine des planètes et de la vie ». ARES (LATMOS) est un capteur du champ électrique martien, dont la mesure permettra de caractériser un champ électrique global entre la surface et la ionosphère, et surtout de mieux comprendre le rôle probable des processus tribo-électriques se produisant entre les aérosols minéraux en suspension, et qui pourraient jouer un rôle majeur dans le soulèvement des poussières et dans l'intensification de certains processus chimiques. ODS (LATMOS) devrait compléter le mât météorologique par des sondages réguliers de l'opacité atmosphérique. Enfin, MSMO (contribution LATMOS) sera sensible au champ magnétique et enregistrera ses fluctuations.

Modélisation et étude théorique

Le modèle de climat martien développé à l'IPSL (LMD-LATMOS) est particulièrement reconnu en planétologie. Ses applications sont utilisées par plus d'une centaine d'équipes à travers le monde. Son développement sera naturellement poursuivi, avec pour objectif premier de construire un modèle « complet » du système climatique martien intégrant les grands cycles du climat martien (cycle des poussières atmosphérique, cycle de condensation-sublimation du CO_2 dans les calottes polaires, cycle de l'eau et cycle photochimique), ainsi que leurs couplages entre eux, avec la circulation et avec le rayonnement. Ces modèles existent déjà en partie. A l'avenir l'effort portera sur la caractérisation des sources de poussières, la microphysique des aérosols et des nuages, et l'extension de la

photochimie. Un tel modèle servira de « plateforme » pour simuler d'autres cycles du système martien que nous pouvons observer et qui sont riches d'enseignements sur le présent et le passé de la planète. Citons pour exemple le cycles du deutérium ou le cycle du radon. Le GCM est aussi étendu vers la thermosphère afin de comprendre cette partie de l'atmosphère encore énigmatique, et de permettre un couplage avec les nouveaux modèles 3D de l'ionosphère et des interactions avec le vent solaire (cf. section « Evolution des atmosphères et interactions magnéto-héliosphériques »).

Une application importante de ce modèle sera la simulation des variations climatiques du dernier milliard d'années générées par les oscillations des paramètres orbitaux et de l'obliquité. Cela permet d'interpréter de nombreuses structures géologiques observées sur Mars (glaciers, calottes polaires, dunes, ravines, etc...), mais requiert une extension des processus physique prise en compte dans le modèle (Épaisse couverture nuageuses, modification du pergélisol).

La modélisation du climat sera aussi utilisée pour mieux comprendre le passé lointain de la planète Mars, caractérisé par un énigmatique climat relativement clément et propice à la formation de lacs et de rivières il y a 3 à 4 milliards d'années. Pour simuler cet environnement, nous utiliserons notre nouveau GCM « universel » (cf. section « atmosphères primitives » ci-dessous). Un autre objectif sera de comprendre pourquoi Mars a évolué vers la planète glacée que nous connaissons actuellement. Pour cela nous modéliserons les relations entre l'intérieur de la planète, son atmosphère et son échappement vers l'espace (cf. section « Evolution des atmosphères et interactions magnéto-héliosphériques »). Nous étudierons en particulier l'histoire du dégazage des planètes, notamment au travers de l'étude des isotopes de l'argon et le cycle géochimique du méthane.

Après la modélisation globale, un nouveau modèle méso-échelle est en développement à l'IPSL (LMD). Ses applications sont multiples, et particulièrement propices à la météorologie comparée avec la Terre : dynamique méso-échelle et interaction avec le relief, simulations des nuages (glace d'eau et de glace carbonique) et de la convection, application aux paléoclimats (glaciers, ravines, etc...).

2.1.2 Vénus

Observations

L'IPSL est impliqué dans la mission Vénus Express, avec l'instrument SPICAV (sous responsabilité LATMOS), et plusieurs co-I sur d'autres instruments. L'exploitation des données fournies par cet instrument se poursuivra certainement bien au delà de la fin de la mission, envisagée pour 2010. L'IPSL s'est également investi dans des projets de missions futures comme le « European Venus Explorer » (EVE, sous leadership LATMOS) combinant orbiter, lander et ballons dans le cadre de l'appel à proposition de l'ESA Cosmic Vision. Cette mission n'a pas été retenue, mais de tels projets impliquant fortement l'IPSL restent à l'étude à l'ESA et dans le cadre de collaboration avec les USA.

Modélisation

Les données Vénus Express donnent un nouvel élan aux études sur le fonctionnement du climat de Vénus. Toutefois, l'interprétation de ces données dans ce but nécessite l'utilisation de modèles climatiques élaborés (GCM). Au LMD, le développement d'un tel modèle est engagé depuis quelques années, et se poursuivra en partenariat avec le LATMOS, comme pour nos autres modèles climatiques. L'IPSL jouera un rôle majeur dans la communauté grâce à ce modèle, qui est l'un des deux

modèles les plus avancés au monde, et qui est indispensable pour l'interprétation des données Vénus Express (SPICAV, VIRTIS, VeRA). Les évolutions du GCM à mener à court et moyen termes sont :

- 5) L'extension en altitude. Au delà de 70 km, il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes radiatifs non-LTE. Au delà de 100 km, il faut inclure les processus thermosphériques: paramétrisation de la conduction, chauffage EUV, diffusion moléculaire, photochimie. Pour tous ces aspects, nous bénéficions de l'expérience déjà acquise pour Mars, en collaboration avec l'IAA de Grenade, Espagne. Cette extension est indispensable pour l'interprétation des données SPICAV (LATMOS). Les étapes suivantes pour l'étude de la haute atmosphère de Vénus sont les couplages avec des modèles d'ionosphère et d'échappement. L'IPSL possède dans ce domaine une compétence très forte.
- 6) La modélisation de la photochimie/thermochimie, et le couplage avec le GCM, pour l'étude de la composition de l'atmosphère et l'interprétation des données Vénus Express (SPICAV, VIRTIS). Cette modélisation s'engagera au LATMOS.
- 7) La modélisation de la microphysique des nuages, et le couplage avec le GCM. Cette composante sera développée également au LATMOS.

Le modèle pourra, à moyen terme, être aussi appliqué à l'étude des variations climatiques générées par les variations d'activités volcaniques à long terme. L'étude du paléoclimat de Vénus permettra à l'IPSL d'apporter des éléments de réponses à la question cruciale de l'histoire passée de Vénus.

2.1.3 Titan

Observations

L'IPSL joue un rôle important au niveau international pour l'exploitation des données de la mission Cassini-Huygens : VIMS, CIRS (GSMA, LMD, LATMOS). Nous participons aussi au projet de mission TSSM/TandEM (ESA – Cosmic Vision), avec un projet de spectromètre UV, et spectromètre IR dédié aux occultations solaires (LATMOS). Ces données spatiales sont complétées par des études en laboratoire. En particulier, le GSMA et le LPMAA s'investissent dans des études spectroscopiques amont théoriques et en laboratoire, avec par exemple la caractérisation de l'absorption du méthane et l'étude des transitions vibro-rotationnelles entre niveaux excités à basse température (Titan et autres atmosphères froides telles Jupiter, Saturne) notamment sous l'effet des collisions avec N₂ (Titan), H₂ ou He (Saturne)

On notera également l'étude de la chimie complexe des composés carbo-azotés de l'atmosphère de Titan, avec spectrométrie de masse à moyenne résolution, futurs spectromètres à ultra-haute résolution (LATMOS-LPG/Grenoble-LCP/Orsay-LISA), et simulations en laboratoire (PAMPRE). Ces dernières études sont également abordées dans le thème « Origine des planètes et de la vie ».

Modélisation

Comme dans les cas de Mars et Vénus, l'interprétation des données spatiales récentes nécessite l'utilisation d'un modèle climatique complet. L'IPSL possède le modèle de climat de Titan le plus performant au monde, mais qui a désormais atteint ses limites. La poursuite du développement de ce GCM est indispensable pour maintenir la position de l'IPSL au niveau international, et amener la compréhension des processus gérant ce système climatique complexe à un nouveau degré. Les évolutions concernent :

- Le passage du modèle 2D actuel à un modèle 3D, ce qui permettra une étude plus approfondie des processus troposphériques, et du cycle du méthane, en lien avec tout ce que la surface de Titan nous révèle actuellement.
- L'extension du modèle en altitude, jusqu'à la mésosphère. Ceci requiert entre autres une refonte des codes de transfert radiatif, ainsi que des améliorations techniques. Cette région joue certainement un rôle clé, en tant que région source des composés traces et des aérosols. La formation de ces derniers est une question cruciale pour la compréhension du climat.

2.1.4 Pluton-Triton

On trouve aux confins du système solaire deux objets fascinants possédant une fine atmosphère d'azote (pression au sol : 1 à 5 Pa) en équilibre solide-gaz avec une calotte d'azote : Triton (survolé et examiné par la mission Voyager 2 en 1989) et Pluton, cible de la sonde NASA New Horizons lancée le 19 janvier 2006 pour un survol le 14 juillet 2015. Les observations disponibles ont révélé des "planètes" actives, où la surface est modelée par les vents et, où l'atmosphère est localement obscurcie par des brumes. Nous proposons de développer les premiers modèles de circulation générale pour Triton et Pluton. Là encore, en appliquant les GCMs de type terrestre à des objets aussi différents de la Terre, nous pouvons tester ces outils jusqu'à leurs limites, tout en créant un outil indispensable pour interpréter les données, notamment celle de la mission New Horizons. Fort de notre expérience sur les autres planètes, un tel modèle sera bâti en couplant le GCM planétaire du LMD avec une paramétrisation de la microphysique développée dans le cadre d'une collaboration GSMA/LATMOS/LMD.

2.1.5 Planètes extrasolaires / atmosphères primitives / régimes de circulation atmosphériques

Dans les communautés des sciences astronomiques et planétaires, le besoin de généraliser les théories du climat, et de comprendre les différents régimes climatiques que peuvent connaître les planètes de type terrestre est plus fort que jamais. Il est notamment motivé par la découverte de multiples planètes extrasolaires, la perspective de découvrir bientôt des planètes de taille terrestre, et de pouvoir à terme caractériser leur atmosphère. Chaque nouvelle observation d'une planète autour de telle ou telle étoile suscite déjà de très nombreuses questions. Un objectif majeur de ces études est de pouvoir mieux comprendre les conditions requises pour qu'une planète puisse être « habitable », c'est à dire supporter de l'eau liquide à sa surface, et donc être propice à la vie telle que nous la connaissons.

Ces réflexions renforcent aussi le besoin de comprendre l'origine et l'évolution des planètes telluriques du système solaire, et en particulier de comprendre les climats possibles qui ont pu régner à la surface de la Terre, Mars et Vénus dans un lointain passé. Ces trois planètes semblent avoir été compatibles avec l'existence d'eau liquide à leur surface il y a 4 milliards d'années. Comment interpréter les archives géologiques du climat primitif martien ? Quel été l'environnement sur la Terre primitive ? Pourquoi Vénus a-t-elle connu un destin aussi différent de celui de la Terre ?

Modélisation

L'étude paramétrique des différents régimes de circulation envisageables sur les planètes telluriques est dès à présent possible au LMD grâce à l'exploitation d'un GCM simplifié « à 20 paramètres », que nous souhaitons exploiter dans cet esprit dans les années à venir. Pour pouvoir pleinement simuler les climats planétaires, cependant, nous souhaitons développer un modèle de circulation général « universel » basé sur un code de transfert radiatif complet capable de simuler des atmosphères épaisses et de multiples compositions (CO₂, H₂O, CH₄, N₂ etc...) couplé avec des paramétrisations simplifiées de la convection, de la microphysique des nuages, voire d'un océan et de la glace de mer (« slab ocean »).

Observations

A court terme, le LATMOS sera engagée dans la détection des exo-planètes, à travers sa participation dans le consortium HARPS dirigé par M. Mayor, l'une des principales équipes impliquées dans la découverte de planètes extrasolaires. A plus long terme, les agences spatiales visent à caractériser l'environnement et les atmosphères des exoplanètes par spectroscopie (projets TPF, Darwin). L'IPSL est déjà présent dans les réflexions menées en préparation des ces programmes difficiles, et le restera naturellement à l'avenir.

2.1.6 Planètes géantes

La modélisation numérique des atmosphères des planètes géantes avec un Modèle de Circulation Générale a longtemps semblé hors de portée de nos capacités. Parmi les difficultés : l'absence de surface solide et la méconnaissance des "conditions limites" au bas de l'atmosphère, le nombre de points de grille à utiliser pour représenter les atmosphères avec une résolution suffisante sur des sphères 100 fois plus vaste que la Terre, et le manque de données quantitatives pour valider les modèles. Grâce aux capacités de calculs toujours croissantes des ordinateurs, et aux observations de missions spatiales comme Cassini (stratosphère de Saturne), certaines de ces difficultés deviennent surmontables. Nous comptons aborder progressivement le sujet, en commençant par des premières études théoriques avec le modèle de climat simplifié « à 20 paramètres » mentionné ci-dessus, avant de tenter de simuler la réalité grâce à des paramétrisations physiques plus complexes. Le problème sera abordé de « haut en bas » (dans un premier temps modélisation de la stratosphère où la physique est plus simple et où l'on dispose d'observations, avant de descendre vers les plus basses couches), en commençant par Saturne, dans le cadre d'une collaboration avec le LESIA (Observatoire de Paris). En parallèle seront menées des simulations numériques et expérimentales des aérosols photochimiques des planètes géantes (LATMOS-LMD).

A terme, de tels travaux pourraient être particulièrement motivés dans le cadre de la préparation de la mission EJSM/LAPLACE dédiée à l'étude du système Jovien, pré-sélectionnée par l'Agence Spatiale Européenne pour un lancement en 2018 dans le cadre du programme « Cosmic Vision ».

2.2 Origine des planètes et de la vie

LISA : P. Coll (100%), H. Cottin (100%), N. Fray (100%), M.-C. Gazeau (100%), F. Raulin (100%), R. Sternberg (100%), Y. Bénilan (100%), A. Jolly (100%), LATMOS : M. Cabane (100%), C. Szopa (100%), N. Carrasco (30%), G. Cernogora (30%), E.

Chassefière (20%), E. Hadamcik (100%), A.-C. Levasseur-Regourd (100%), LPMAA : J.-H. Fillion (30%), M.-L. Dubernet (30%), X. Michaut (30%), soit 13,7 ETP (+10 doc/postdoc $\square \approx 24$ ETP)

Les grands enjeux de cette thématique s'insèrent dans la compréhension de l'origine et de l'évolution des planètes et du système solaire.

La prospective présentée ici est connectée à la question de l'origine et de l'évolution de la vie (et de sa co-évolution avec l'environnement géologique et atmosphérique). En effet des travaux sont menés par nos équipes pour comprendre notamment la formation des planètes, les processus de synthèse, d'évolution et de dégradation de la matière organique dans des environnements planétaires pertinents (Mars, Titan, comètes...).

Ces objets d'étude sont d'ailleurs justifiés par leur importance exobiologique et par la perspective de plusieurs missions spatiales d'exploration.

2.2.1 Formation des corps solides

L'étude de la composition cométaire, depuis l'échelle macroscopique (noyau, grains) jusqu'à l'échelle microscopique (molécules, ions) est une étape nécessaire dans la compréhension des processus de formation des planètes dans la nébuleuse protosolaire. Ce thème a pour objectifs la détermination de la nature et du devenir des matériaux cométaires, et la caractérisation de l'interaction des comètes avec le rayonnement et le vent solaire. On s'intéresse en particulier à l'étude théorique de la diffusion de la lumière par les poussières cométaires et interplanétaires, appuyée par des simulateurs expérimentaux (PROGRA2, ICAPS/IMPF). Ces travaux permettront d'interpréter les résultats de plusieurs instruments de la mission Rosetta. Une modélisation du noyau cométaire, étayée par les résultats du radar CONSERT (réalisation LPG/LATMOS), en liaison avec les mesures in situ à la surface et dans la coma, est en cours de développement.

Cet axe s'est jusqu'à présent concentré sur l'étude des propriétés de diffusion et de polarisation de la lumière par des particules solides irrégulières, de façon à interpréter les observations sol (OHP, VLT) et spatiales (Rosetta) de chevelures cométaires, des objets de Kuiper et des surfaces astéroïdales. Les simulations numériques développées au LATMOS pour les chevelures cométaires devraient être étendues (avec diffusion multiple) aux surfaces régolithiques, en particulier pour les noyaux cométaires, et ce en liaison avec des simulations expérimentales menées avec l'expérience PROGRA2 dans une version améliorée. Des simulateurs expérimentaux de laboratoire (PAMPRE, prochainement équipé d'un système de mesure de diffusion et de polarisation des particules, en collaboration avec le GREMI/Orléans), embarqués sur avion en vol parabolique (PROGRA), sur vol fusée, et dans un proche avenir sur la Station Spatiale (ICAPS/IMPF), doivent permettre de valider les modèles. Une collaboration a été entamée avec le LPG à Grenoble et l'IFSI à Rome pour modéliser la structure interne du noyau cométaire, ce qui va ouvrir de nombreuses voies pour l'avenir : interprétation des données de CONSERT, relations noyau-coma... Un thème transversal «comètes» a été identifié, incluant également le développement d'un modèle d'interaction coma-vent solaire. Une collaboration entre le LATMOS et l'Osservatorio Astronomico 58 di Trieste a débuté sur l'étude des queues cométaires après l'observation de la comète McNaught 2006P1 lors de son passage à 0,17 UA par le télescope solaire Themis et l'analyse des données d'observation de STEREO/SECCHI. Le LATMOS et le LISA sont impliqués en tant que labos Co-I

sur 8 expériences de Rosetta qui caractériseront le noyau (CONSERT), la physicochimie de surface (COSAC, MIDAS) et de la coma (ALICE, OSIRIS, ROSINA, COSIMA), et l'interaction coma-vent solaire (ROSINA). Dans ce cadre, il est urgent de développer un programme de modélisation.

Un support d'études est dans ce cadre la mission Marco Polo, une mission de retour-d'échantillons depuis un astéroïde (programme Cosmic-Vision 2015-2025). Cette mission vise à caractériser à différentes échelles un objet proche de la Terre, et à en rapporter des échantillons prélevés en surface. Si elle est approuvée, cette mission étudiera les origines et l'évolution du Système Solaire, le rôle des petits corps dans ce processus, ainsi que les origines et l'évolution de la Terre et de la vie. Elle devrait consister en un satellite qui pourrait emmener un lander, des sous-systèmes d'échantillonnage, une capsule de ré-entrée ainsi qu'une charge utile scientifique. Elle devrait être développée conjointement avec la JAXA (agence spatiale japonaise).

2.2.2 Distribution des structures moléculaires : études par télédétection et mesures *in-situ*

Quels composés, en particulier organiques, sont présents dans les environnements extraterrestres d'intérêt exo/astrobiologiques? Comment les rechercher? Quelles sont leurs signatures spectrales? Deux approches principales permettent de répondre à ces questions. Il s'agit d'une part de l'observation par télédétection à partir d'observatoires terrestres, en orbite terrestre ou à bord de sondes spatiales, dans une large gamme spectrale incluant VUV, UV, infrarouge et micro-ondes. La deuxième approche correspond à l'analyse *in situ*.

L'exploration du système de Saturne par la mission Cassini-Huygens (NASA/ESA) a été un grand succès. En terme exo/astrobiologique, la mission Cassini-Huygens a largement confirmé l'importance de Titan et a permis de mettre en évidence – de façon complètement inattendue – l'importance pour ce même domaine d'un autre satellite de Saturne, Encelade. Ces deux objets planétaires font à présent partie des cibles privilégiées des exo/astrobiologistes dans le système solaire.

La mission Cassini-Huygens va bientôt passer dans sa phase de mission étendue, à partir de juillet 2008, jusqu'en 2010. Cette « eXtended Mission » (« XM ») sera très probablement prolongée par une « eXtended-eXtended Mission » (« XXM »), soutenue par la NASA et par l'ESA. Plusieurs membres de l'IPSL y sont largement engagés.

La communauté scientifique qui s'intéresse au système de Saturne est d'ores et déjà convaincue de la nécessité – à plus long terme – d'une mission dédiée à l'étude de ce système, et tout particulièrement de Titan et Encelade. C'est dans ce cadre que le projet « Tandem » a été proposé à l'ESA, en réponse à l'appel à proposition « Cosmic Vision ». Ce projet ambitieux est coordonné par Athena Coustenis, du LESIA. Il est proposé d'envoyer en 2017 un vaisseau qui se mettra en orbite autour de Saturne, puis de Titan, larguera des modules de surface sur Encelade, un ballon-montgolfière dans l'atmosphère de Titan et des sondes à sa surface.

Une des priorités de la communauté scientifique s'intéressant à l'étude de Mars, et des agences spatiales internationales, au travers des missions MSL 2009 (Mars Science Laboratory) de la NASA et ExoMars/Pasteur et Mars Express de l'ESA, est la recherche d'une trace de vie, présente ou passée, ou d'une forme d'activité chimie prébiotique sur Mars. Les participants de cette prospective sont d'ailleurs fortement impliqués dans le développement des expériences spatiales SAM (Sample Analysis at Mars) de la mission MSL 2009, et MOMA (Mars Organic Molecules

Analyser) de la mission ExoMars, toutes deux dédiées principalement à la mise en évidence d'une série de biomarqueurs (molécules organiques, rapports isotopiques, gaz émis par une activité biologique, biominéraux...) à la surface et dans le proche sous-sol de Mars.

En complément de l'étude in situ de Mars, l'IPSL est impliqué dans la charge utile de la mission Phobos-Grunt à destination de Phobos, un satellite de Mars. Cette sonde, dont le lancement est prévu pour 2009, doit assurer le retour sur Terre d'échantillons provenant du sol de Phobos. Ce satellite de Mars a une densité trop faible pour être composé uniquement de roches, et il pourrait être un astéroïde de type C (chondrite carbonée) piégé par la gravité martienne. Son étude présente donc un intérêt certain aussi bien pour la connaissance du système solaire que pour l'exo/astrobiologie, via l'étude des molécules organiques complexes des petits corps du système solaire, en lien avec le domaine de la chimie prébiotique.

2.2.3 Réactivité et évolution moléculaire de la matière organique

Cet axe a pour finalité de comprendre quels sont les processus qui permettent à la matière organique de se complexifier dans des environnements extraterrestres. En effet il est essentiel de déterminer jusqu'à quel stade de complexification la matière organique peut évoluer abiotiquement, et quels sont les paramètres déterminants pour cette évolution. Bien entendu, ces études doivent être menées dans le cadre des divers environnements que nous étudions, à savoir aujourd'hui Titan, Mars, les comètes et les astéroïdes... Pour appréhender ces grandes questions, des développements expérimentaux doivent être menés au laboratoire afin de mesurer de paramètres physico-chimiques nécessaires à la construction et au développement de modèles théoriques, et d'évaluer l'impact de ces paramètres dans les modèles. Aujourd'hui, le LATMOS et le LISA collaborent sur ces thèmes.

Plusieurs programmes expérimentaux ont déjà été développés par le passé au LATMOS aussi bien qu'au LISA. Ceux-ci sont liés à l'étude de trois objets essentiels dans le contexte exo/astrobiologique, et qui sont des cibles privilégiées de missions spatiales en cours :

- Titan, siège d'une chimie organique atmosphérique active, qui est l'un des principaux objets d'étude de la mission Cassini-Huygens et de la potentielle mission TSSM/TANDEM.
- Les comètes, réservoirs de matière organique primitive complexe dont la nature reste encore à déterminer et qui sera, entre autres, étudiée par la mission Rosetta.
- Mars, cible privilégiée des agences spatiales pour la recherche d'indices de traces de vie passée (mission MSL 2009, ESA/ExoMars,...).

Il existe notamment une expertise dans l'utilisation de dispositifs d'irradiation classique (lampes photochimiques) ou pulsée (laser) ainsi que par la maîtrise de nombreuses techniques d'analyses résolues en temps (spectroscopies LIF ou CDRS) ou non (CPG, CPG-SM, SM, IRTF, ...). C'est donc naturellement que ces outils expérimentaux seront utilisés pour l'étude des différents objets évoqués plus haut dont nous cherchons à comprendre l'évolution chimique et les processus qui régissent celle-ci.

Ainsi, le programme de Simulation Expérimentale et Théorique Utiles pour la Planétologie (SETUP), initié il y a 3 ans, concerne toutes les études qui doivent permettre l'analyse, in situ, quantitative et résolue en temps, de phases gazeuses. C'est dans ce cadre que seront développées, par exemple, des simulations réalistes de

l'atmosphère de Titan qui nous apporteront des informations cruciales sur les processus responsables de l'évolution de ce système complexe.

Ce dispositif est pour l'instant complété par le simulateur expérimental PAMPRE, actuellement utilisé pour l'étude de la formation des aérosols solides de Titan, et qui pourra par la suite être utilisé pour la simulation d'autres atmosphères planétaires comme par exemple l'atmosphère primitive de la Terre ou des exoplanètes.

Par ailleurs, dans le cadre du programme MOMIE (Martian Organic Material Irradiation and Evolution), en simulant les conditions martiennes, nous nous intéressons au temps de vie de molécules d'intérêt exo/astrobiologique à la surface de cette planète. L'objectif de ce programme est la détermination de la nature des molécules pouvant exister sous forme solide à la surface ou dans la sous-surface de Mars suite à l'évolution de molécules organiques d'origine endogène ou exogène. Une autre piste à étudier, dans le cadre de la recherche de vie sur Mars, consiste à mettre en évidence la signature des biominéraux, c'est-à-dire des minéraux formés par des organismes vivants.

Avec pour objectif scientifique similaire, c'est-à-dire tester la survie de molécules organiques (gazeuses ou solides, organiques ou biologiques) dans les conditions interplanétaires ou interstellaires, des expériences d'irradiation par le flux solaire seront réalisées en orbite basse terrestre (expériences AMINO, PROCESS et UVolution). En effet le rayonnement ultraviolet solaire est le principal moteur de l'évolution chimique dans le système solaire. De nombreux programmes expérimentaux au sol sont consacrés à l'étude de la photochimie de molécules en phases gazeuses, solides ou encore de molécules volatiles condensées à très basse température. Néanmoins, la validité de tels travaux et leur extrapolation aux environnements extraterrestres peuvent être mis en cause tant qu'ils n'ont pas été confrontés à des expériences similaires menées dans l'espace, avec exposition au spectre solaire étendu, tout particulièrement dans le domaine des courtes longueurs d'onde (inférieures à 200 nm) difficilement reproductible en laboratoire. Pourtant, la compréhension de l'évolution chimique dans des environnements astrophysiques contenant de la matière organique (comètes, astéroïdes, météorites, Titan, milieu interstellaire) ou susceptibles d'en contenir (Mars, Phobos) requiert de telles études.

C'est pourquoi nous avons et allons développer des facilités d'exposition en orbite terrestre qui permettent la photolyse d'une grande quantité d'échantillons simultanément. Ces facilités seront intégrées aux plateformes expérimentales suivantes : BIOPAN sur les capsules automatiques russes FOTON, et EXPOSE-E et -R sur la Station Spatiale Internationale.

Dans le cadre de ce type d'études, un nouveau projet pourrait voir le jour à l'échelle de quelques années : le projet VITRINE (ValidItY Test for Remotely controlled INstrument for Exobiology). L'objectif de ce projet est de mieux appréhender la nature et l'évolution de la matière organique présente dans les environnements extraterrestres, en particulier à la surface de petits corps tels que les astéroïdes et les comètes. Cette matière organique étant considérée comme prébiotique, certaines applications de ce type d'études intéressent potentiellement le domaine interdisciplinaire de l'exo/astrobiologie.

Le programme de Simulation Expérimentale et de Modélisation Appliquée aux Phénomènes Organiques dans l'Environnement Cométaire (SEMPhOrE Cométaire), quant à lui, a été développé pour la caractérisation de processus de conversion solide-gaz qui interviennent dans l'évolution chimique de la coma des comètes, et qui doivent in fine nous permettre de faire des hypothèses quant à la composition du noyau du point de vue de ses composants organiques.

Ces études cométaires seront élargies dès 2009 grâce à un ambitieux projet nommé « OREGOC » (Origine et Evolution des Glaces et des composés Organiques Cométaires). Dans une problématique liée aux origines du système solaire et à celle de la vie sur Terre, la détermination de la nature physico-chimique des noyaux cométaires revêt un intérêt particulier. En effet, les noyaux cométaires sont les objets les plus primitifs du système solaire. Ainsi, connaître la composition actuelle des noyaux cométaires est une étape indispensable à la compréhension des conditions qui régnaient dans la nébuleuse solaire. D'autre part, les noyaux cométaires étant riches en composés organiques complexes, ils ont pu avoir un rôle important dans le processus qui a permis l'émergence de la vie sur Terre, en apportant sur la Terre primitive des composés chimiques clés pour la réalisation de la chimie prébiotique.

Le projet OREGOC s'inscrit dans un programme de recherche couplant expérimentation, modélisation et interprétations d'observations. Il élargira le champ d'investigation car il permettra d'étudier non seulement les mécanismes de production de gaz à partir de mélange de glaces complexes mais aussi que l'histoire complète des composés organiques complexes depuis leur formation jusqu'à leur dégradation. Ainsi, l'ensemble des mécanismes de production d'espèces gazeuses stables, ayant lieu soit dans les noyaux cométaires soit dans leur environnement, sera étudié. Ces études nous permettront de proposer des corrélations entre les phases solides et gazeuses des comètes, et ainsi de préciser la nature physico-chimique des composés organiques réfractaires et des glaces.

Ce dispositif nous permettra aussi de synthétiser des analogues de matériau organique cométaire. Ces produits seront comparés à la composante organique présente dans des échantillons extraterrestres disponibles en laboratoire (météorites, particules de poussières interplanétaires, grains collectés par la mission Stardust...), ce qui nous conduira à préciser la nature chimique des composés organiques réfractaires contenus dans les noyaux cométaires. Ces échantillons d'analogues de matière organique cométaire serviront aussi à la calibration d'instruments qui sont à bord de Rosetta.

2.2.4 Origine de la complexité moléculaire

De manière générale, on accepte maintenant l'idée que les conditions de l'émergence de la vie (sur Terre) font intervenir de l'eau liquide contenant des molécules organiques modérément complexes et solubles (formaldehyde, méthanol, etc...). L'eau a probablement été incorporée dans la proto-Terre durant sa formation grâce à l'accrétion d'objets primitifs riche en glace, pour ensuite former des océans et l'atmosphère par évaporation. On peut lier l'origine de l'eau et des molécules organiques à la nébuleuse solaire primitive à travers leur présence dans les comètes et les météorites. En effet, on accepte l'idée que les systèmes planétaires autour des étoiles de type solaire sont les produits finaux d'une évolution complexe des molécules en phase gazeuse et des grains de poussière, évolution qui commence avec l'effondrement gravitationnel de coeurs froids et denses à l'intérieur des nuages moléculaires (coeurs pré-stellaires). C'est pourquoi l'étude de l'origine de ces molécules organiques dans des objets situés en dehors du système solaire constitue une part importante de la problématique « Origine des planètes et de la vie ».

Cet axe a pour but de comprendre comment des molécules modérément complexes (eau, formaldehyde, méthanol, acide formique, etc...) peuvent être formées, transformées ou préservées depuis les premières étapes de leur formation dans le milieu interstellaire jusqu'à leur incorporation dans des comètes ou des météorites.

Les milieux concernés sont le milieu interstellaire, diverses régions de formation d'étoiles, les disques protoplanétaires, les comètes. La confrontation des analyses de spectres observés avec les résultats de modélisation de ces milieux conduit à affiner notre compréhension de l'évolution chimique des espèces moléculaires observées, à contraindre les modèles de formation et d'évolution des structures astrophysiques étudiées et enfin à découvrir et identifier de nouvelles espèces chimiques présentes dans ces régions. En particulier, de par leur lien évident avec la compréhension de l'origine de la vie, on espère fortement comprendre les modes de formation et d'évolution de molécules complexes organiques connues et pouvoir identifier de nouvelles espèces organiques. L'interprétation des spectres requiert une connaissance approfondie de la spectroscopie et de paramètres moléculaire fondamentaux comme les constantes de vitesse d'excitation (ou des élargissements de raies) ou la détermination des temps caractéristiques de conversion du spin nucléaire de petites molécules hydrogénées.

2.3 Evolution des atmosphères et interactions magnéto-héliosphériques

LATMOS : E. Chassefiere (40%), J.-L. Bertaux (30%), F. Leblanc (70%), J.-J. Berthelier (60%), R. Lallement (80%), B. Lembège (60%), E. Quémerais (IAS, chercheur associé, 30%), M. Menvielle (50%), E. Seran (50%), P. Galopeau (100%), H. de Feraudy (40%), R. Modolo (80%), D. Delcourt (LPP, chercheur associé, 15%), G. Chanteur (LPP, chercheur associé, 30%), P. Savoini (LPP, chercheur associé, 30%), soit 7,7 ETP (+4 doc/postdoc $\square \approx 12$ ETP)

Les grands enjeux sont ici de comprendre le fonctionnement des enveloppes aux interfaces plasma-planètes, conditionnant la dynamique de l'échappement des atmosphères qui peut avoir un effet déterminant sur leurs évolutions, et les mécanismes d'accélération, d'expansion et d'interaction avec le milieu interstellaire du vent solaire, dont la dynamique globale conditionne les relations soleil-planètes. Le groupe s'est en particulier spécialisé dans la modélisation de l'interaction vent solaire-planète et de son impact sur l'exosphère et/ou l'ionosphère et l'échappement atmosphérique des planètes (Mars, Titan, Mercure), avec l'objectif de parvenir à une description de l'évolution de ces planètes soumises au bombardement du vent solaire et des plasmas magnétosphériques. Celle-ci, dans le cas de Mars ou de Titan, nécessite un couplage avec les modèles d'évolution climatique (cf. section « Climat et météorologie des planètes »). L'équipe est également au tout premier plan international pour l'étude de l'interaction héliosphère - milieu interstellaire, qui conditionne l'état physique du vent solaire et du gaz interstellaire dans l'héliosphère, et les modalités des interactions plasma-neutre. Le vent solaire est également contrôlé par les mécanismes d'accélération dans la couronne solaire. L'étude des plasmas du système solaire, dans l'ionosphère et la magnétosphère terrestre, et dans les environnements ionisés des planètes (notamment Jupiter et Saturne), c'est-à-dire de leur source, de leur dynamique, et de leurs interactions, constitue un volet tout aussi fondamental et indissociable de l'étude des interactions héliosphériques au sens large.

2.3.1 Evolution atmosphère – exosphères planétaires

La formation des exosphères planétaires est un élément clef pour l'évolution des atmosphères au contact avec le vent solaire ou un plasma magnétosphérique. C'est

autour de leur modélisation appliquée aux cas de Mars et Titan (mécanismes thermiques et non thermiques comme le criblage, la photochimie ou le bombardement météoritique), et également à l'exosphère de Mercure, le LATMOS étant responsable du spectromètre ultraviolet PHEBUS sur la mission BepiColombo de l'ESA, que s'est nouée une collaboration étroite entre le SA et le CESTP.

L'activité est centrée sur l'étude de la formation des exosphères planétaires et de l'évolution des atmosphères (Mars, Titan, Vénus), en s'appuyant sur les résultats des missions spatiales actuelles (Cassini, Mars-Express, Venus-Express) et futures (mission NASA/Scout 2011). D'autre part, l'étude de la génération de l'exosphère de Mercure et de son interaction avec la magnétosphère sera tirée par les projets PHEBUS et PICAM/SERENA sur l'orbiteur planétaire européen MPO, et MSA sur l'orbiteur magnétosphérique japonais MMO (mission BepiColombo), tout comme par un programme d'observations de Mercure depuis la Terre. Au plan expérimental, le projet HNA de spectromètre de neutres chauds qui sera proposé sur un futur orbiter martien (perspective de la mission ESA MSR-NET). Un thème transversal «Liens entre l'atmosphère neutre, l'ionosphère et le vent solaire sur Mars, Venus, et Titan» a été par ailleurs identifié au séminaire de Trouville en 2005. Il a été suggéré de renforcer la synergie des équipes, notamment avec le LMD qui développe un modèle de circulation générale de la thermosphère martienne et ce projet est en train de se concrétiser (cf. section « Climat et météorologie des planètes »). Les travaux futurs porteront sur l'analyse de cas scientifiques spécifiques (par exemple les observations de chauffage dans les zones à fort champ magnétique sur Mars).

2.3.2 Héliosphère

Ce thème porte sur la dynamique globale de l'héliosphère et sur son interface avec le milieu interstellaire local. Une partie de l'activité se concentre sur l'étude de l'interaction vent solaire-gaz interstellaire grâce à l'exploitation de l'expérience SWAN sur la mission SOHO (sous responsabilité LATMOS). Des simulations numériques à grande échelle effectuées au LATMOS sont actuellement centrées sur la dynamique des chocs non collisionnels pour analyser le choc terrestre. Cette étude sera adaptée et étendue au choc terminal héliosphérique pour lequel la mise en commun des expertises CESTP-SA, au sein du nouveau LATMOS, permettra d'analyser les mécanismes locaux d'accélération des particules.

Les travaux en cours, basés sur les résultats issus des observations de SWAN, vont se poursuivre et seront actualisés par l'arrivée des données de la mission américaine IBEX, qui va mesurer depuis l'orbite terrestre en 2008 les neutres énergétiques créés par échange de charge à l'héliopause. Les simulations mono- et multi-dimensionnelles de type PIC (Particle in Cell, i.e. "auto cohérentes") et particules test (PT, i.e. "non autocohérentes") portant sur la dynamique des chocs non-collisionnels vont se poursuivre et seront étendues aux frontières héliosphériques (choc). L'étude de l'accélération des particules à une telle frontière, qui a été évoquée comme un thème transversal porteur, est au coeur de la problématique (stabilité/turbulence du front du choc et impact sur l'accélération particulaire). Par ailleurs, la contribution à l'émission X diffuse due aux collisions avec les particules accélérées pourra être estimée et confrontée aux observations afin de mieux connaître les mécanismes d'accélération (choc héliosphérique, de Saturne, de Mars ou des comètes...).

2.3.3 Interaction atmosphère /vent solaire – plasmas du système solaire

Ce thème porte sur l'étude des effets des grands événements de la couronne et du vent solaire sur l'environnement terrestre et plus largement sur les environnements planétaires et la dynamique des magnétosphères associées (en particulier Jupiter et Saturne). La physique des plasmas est l'outil d'analyse premier. Cette activité repose sur une double approche, d'observation et de simulation numérique. L'approche « expérimentale » correspond à une responsabilité dans plusieurs expériences embarquées ou au sol. L'activité d'observation est complétée par un travail d'analyse théorique et en simulation numérique, qui sera renforcé par la mise en commun d'outils de modélisation.

L'étude de la dynamique des enveloppes ionisées terrestre et planétaires et de leurs émissions électromagnétiques constituera un volet essentiel de l'activité. Le LATMOS développera également une activité sur l'étude expérimentale du rayonnement kilométrique auroral de la Terre et des planètes géantes magnétisées, comme outil de diagnostic des processus magnétosphériques violents. On s'intéressera aux relations entre l'activité magnétosphérique locale et globale, et les émissions naturelles radio-planétaires de Jupiter, de Saturne et de la Terre. Celles-ci seront étudiées sous deux aspects : la compréhension de leurs mécanismes de génération et de propagation, et l'outil qu'elles constituent comme moyen de télédétection de la dynamique globale des magnétosphères. Les activités scientifiques développées autour du service SIIG, qui a pour missions le calcul, la diffusion et l'archivage des indices géomagnétiques, porteront sur l'étude de la signature magnétique de la dynamique du système Soleil-Terre, et des systèmes Soleil-Planète. Des extensions à l'étude du magnétisme, externe et interne, des planètes, entamées à l'occasion de la préparation de la mission Netlander en coopération avec l'IPGP, sont en cours de développement (sondage électromagnétique du manteau martien). Par ailleurs, l'expérience Atmospheric Relaxation and Electric Field Sensor (ARES) sélectionnée pour la mission Exomars a pour objectif la mesure de phénomènes électriques atmosphériques et caractérisera notamment l'état d'ionisation de l'atmosphère martienne, les champs électriques ELF et VLF, les décharges électriques et les ondes électromagnétiques de l'environnement ionisé martien. Cette expérience aborde les problèmes d'électricité atmosphérique planétaire et des interfaces entre surface, atmosphère et ionosphère et doit donc être mentionnée dans le présent chapitre. Cependant les processus physiques qui sont à la base de l'électricité atmosphérique sur Mars ont des implications importantes pour le transport des poussières, la circulation générale et la chimie atmosphérique (cf. section « Climat et météorologie des planètes »).

L'analyse des écoulements de plasma dans la magnétosphère de Saturne et au voisinage de ses satellites (Titan, Encelade) –mission CASSINI- aura pour but d'améliorer le modèle du halo ionosphérique des anneaux, en prenant en compte notamment, les interactions du plasma et des petits corps des anneaux. Enfin, sur le plan expérimental, le LATMOS est fortement impliqué au sein de la mission BepiColombo, à travers les instruments PICAM, spectromètre de masse pour l'analyse de l'enveloppe gazeuse de Mercure, et PHEBUS, spectromètre UV qui mesurera les émissions de l'exosphère de Mercure.

Les simulations « à très grande échelle » (vent solaire –magnétosphère) actuellement réalisés au LATMOS et au LPP/X-P6 sur l'environnement terrestre présentent un triple intérêt: (i) analyse des mécanismes de production de particules de très forte énergie dans le voisinage proche des planètes, (ii) analyse des couplages multi-échelles et/ou intermittents intervenant dans différentes régions de la magnétosphère via des processus-clé, (iii) validation et amélioration de ces outils de

modélisation et simulation permettant d'interpréter les observations. Par ailleurs, les simulations « locales » dédiées aux études de frontières naturelles seront poursuivies de façon à servir de support à l'interprétation des données des missions spatiales (CLUSTER, THEMIS) et contribueront à la préparation en cours de nouvelles missions (X-SCALE, MMS, BepiColombo). Enfin, l'étude théorique des mécanismes d'émission des ondes radio qui s'échappent des magnétosphères et des processus d'accélération qui sont impliqués dans la génération des ondes vient compléter les travaux d'analyse et de modélisation. Il s'agit en particulier de comprendre les spectres des émissions radio aurorales, leur variabilité, leur polarisation, les sources du rayonnement mais également l'influence du vent solaire qui agit sur la magnétosphère et le rôle du champ magnétique interne de la planète. L'instrument optique ALFA développé au LATMOS participera à des campagnes d'observation des zones aurorales (ALFA – Demeter – radars) afin d'étudier la dynamique méso, petites échelles des arcs. ALFA devrait être installé dans le futur au Dôme C (études des arcs transpolaires).

2.4 Synergies entre planétologie et environnement

De nombreuses synergies existent déjà de fait. L'accent est mis sur deux aspects particuliers, qui devront faire l'objet d'un effort coordonné au cours du prochain quadriennal.

Relations soleil-planètes

La mission PICARD et l'instrument SOLSPEC monté sur l'ISS, dont le LATMOS a la responsabilité, vont fournir des renseignements sur les entrées d'énergie lumineuse dans la thermosphère, la mésosphère et la stratosphère. Il est possible que la variabilité solaire se traduise par une variabilité climatique via les couplages dynamiques entre la stratosphère, qui répond à la variabilité solaire (puisque le flux UV solaire varie au cours du cycle de onze ans), et la troposphère. Une activité importante de modélisation est en cours dans l'équipe « Stratosphère » du LATMOS sur ces questions.

Plus généralement, la caractérisation des entrées d'énergie dans les atmosphères de la Terre et des planètes, qu'elles soient lumineuses ou particulières, et l'étude de la réponse des climats terrestre et planétaires aux évolutions solaires, constitue un thème qui peut fédérer les activités de modélisation climatique en environnement et en planétologie.

Retombées des développements spatiaux pour la surveillance de l'environnement

Certains capteurs, développés pour l'étude des planètes, comme par exemple ODS (Optical Depth Sensor) pour Netlander, sont d'ores et déjà utilisés lors de campagnes de terrain destinées au suivi du climat (campagne AMMA par exemple dans le cas d'ODS). Inversement, des capteurs tels que SDLA (Spectroscopie par Diodes Laser Accordables), utilisés pour la mesure du méthane et de la vapeur d'eau stratosphériques, sont miniaturisés et embarqués à bord de missions spatiales planétaires (Phobos Grunt dans le cas de SDLA). D'une façon générale, la miniaturisation et l'automatisation de capteurs pour les missions planétaires pourraient être valorisées avec profit au bénéfice de la surveillance de notre environnement, que ce soit au sein de réseaux automatisés, ou au cours de campagnes de terrain exigeant des instruments facilement transportables.

3. Nature des besoins au cours du prochain quadriennal

Le Pôle Système Solaire a en tout premier lieu besoin de laboratoires spatiaux (LATMOS, LMD) capables de soutenir le développement d'instruments d'observation spatiale. Pour certains projets très fédératifs, le Pôle d'Innovation Instrumentale et Spatiale (PI2S) de l'IPSL constituera un lieu important de développement, en R&T (« structure incubateur ») et dans la phase de réalisation (« structure projet »). On peut signaler en guise d'exemples :

- La mise en route d'une ligne de lidars miniaturisés terrestre et planétaire, au sol ou en orbite, entamé sous financement de la R&T CNES en 2008 (LATMOS, LMD).
- Le développement de spectromètres de masse : (i) à neutres chauds capable de mesurer les énergies thermiques des particules neutres dans les hautes atmosphères (R&T CNES sur les sources d'ionisation avec ESTEC/ESA), (ii) couplés à un mécanisme de séparation-purification de gaz ou de désorption/ablation d'une surface pour l'étude des surfaces de la lune, des astéroïdes et des planètes (LATMOS, LISA).
- Le prototypage et le développement de spectromètres de masse à ultra-haute résolution –technique Orbitrap, $m/\Delta m=100000$ - (LPG, LATMOS, LISA), à la suite des efforts en cours sur différents types de spectromètre de masse qui ont été défendus et promus par le Pôle depuis presque dix ans (projet PALOMA).
- La GC-dérivatisation et autres techniques d'intérêt exobiologique (LISA, LATMOS)
- Le sondage radar et électrique basse fréquence des subsurfaces planétaires (LATMOS, IDES, SISYPHE)

En second lieu, le pôle soutiendra le développement de plateformes expérimentales de simulation des milieux d'intérêt planétologique, car la simulation numérique n'est pas toujours suffisante pour interpréter les résultats des expériences spatiales, par exemple au travers de :

- La mise en place de dispositifs d'analyse des propriétés et histoires des glaces cométaires ou interstellaires (LPMAA, LATMOS).
- Le développement de chambres de simulation (LISA, LATMOS) comme PAMPRE et MOMIE, qui ont été soutenues financièrement par l'IPSL.
- Le prototypage et le test de radars et sondeurs électriques basses fréquences (LATMOS, IDES, SISYPHE).

Les modèles numériques développés dans le cadre du Pôle Système Solaire (modèles couplés chimie-climat, vent solaire-exosphère...) sont la cheville ouvrière de l'analyse scientifique des données spatiales. La poursuite de l'effort demandera, d'une part des moyens informatiques importants (machines, ingénieurs informaticiens), d'autre part d'atteindre une « masse critique » de chercheurs impliqués par recrutement et rapprochements entre équipes de différents laboratoires, à l'image du Pôle de Modélisation du Climat. On peut citer plusieurs collaborations en émergence qui déboucheront probablement sur des développements lourds en modélisation, concernant les aspects suivants :

- La prise en compte du soulèvement des poussières martiennes dans le GCM (LMD, LATMOS, LISA).
- Le développement d'un modèle de circulation générale universel (LMD, LSCE, LATMOS).
- La mise a point de méthodes d'assimilation/gestion d'incertitudes dans les modèles de chimie atmosphérique (LISA, LATMOS).

Le développement de la Base de Données Atmosphères Planétaires (BDAP), dans le contexte du réseau d'infrastructure Europlanet (dont le nœud thématique

« atmosphère » est à l'IPSL), nécessitera le recrutement d'un ingénieur informaticien en soutien au développement.

4. Rôle de l'IPSL et place du Pôle Système Solaire dans l'IPSL

L'IPSL a un rôle fondamental à jouer comme intégrateur des activités scientifiques et spatiales en planétologie. Il constitue la plateforme institutionnelle qui nous permettra de poursuivre la dynamique de rapprochement et de fertilisation croisée des activités de planétologie des laboratoires membres de l'IPSL (LATMOS, LMD, LISA, LPMAA, GSMA –associé-), et ceci malgré la prise d'autonomie des universités de tutelle (au nombre de trois dans le cas de l'IPSL) qui ne permettra pas, du moins dans l'immédiat, de s'appuyer sur les structures universitaires. Par ailleurs, l'IPSL est seul à même de favoriser le rapprochement entre les équipes de planétologie travaillant dans les laboratoires d'«environnement» de l'IPSL et en Sciences de la Terre à l'UPMC Paris 6 (SISYPHE, MAGIE) et Orsay Paris 11 (IDES). Au plan spatial, le PI2S a un rôle fondamental à jouer pour permettre d'élargir à de nouvelles communautés, travaillant en étroite interaction avec les planétologues de l'IPSL, l'accès au spatial.

Le pôle Système Solaire attend de l'IPSL un support pérenne à la BDAP, dans le cadre de son Centre de Données, le financement et la labellisation de projets émergents, un affichage lisible du Parcours de Planétologie dans l'offre de formation de l'IPSL. Plus généralement, l'IPSL fournira au Pôle Système Solaire la visibilité qui est nécessaire à son développement aux niveaux national et international.

Le Pôle Système Solaire, compte tenu de sa diversité thématique, propose un fonctionnement en équipes thématiques transversales (typiquement trois, calquées sur le découpage thématique adopté pour l'exercice de prospective). Il sera doté d'un conseil scientifique en charge de le piloter et d'organiser l'évaluation des propositions qui seront soumises en réponse à l'AO incitatif annuel de l'IPSL, dans un schéma analogue au fonctionnement actuel.

Le Pôle Système Solaire souhaite participer en tant que tel aux Comités d'Utilisateurs du PI2S et aux Commissions « Formation et Enseignement » et « Observation »

Il constituera également le cadre pour une réflexion structurée sur la valorisation des instruments spatiaux de planétologie pour l'observation de l'environnement.

C : Synthèse des réflexions du groupe de travail « Instrumentation »

Groupe de travail animé par :

Pierre FLAMANT - Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire de Météorologie Dynamique - Palaiseau

Jean-Luc MARIA - Ingénieur de recherche CNRS, Service d'Aéronomie - Verrières-le-Buisson

Johannes ORPHAL - Professeur à l'Université de Créteil, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques - Créteil

Réflexion prospective en instrumentation à l'IPSL

Les chercheurs de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) utilisent des bases de données et des observations spatiales pour conduire leurs recherches. Ils contribuent à l'acquisition de nouvelles données par leur implication dans les campagnes de mesures, et plus en amont par la définition de missions spatiales en observation de la Terre et en planétologie. Le lien entre les deux thèmes conduit à un renforcement d'intérêt général pour des développements instrumentaux innovants coordonnés. Dans ce but, et pour répondre à sa vocation, la mise en place d'un pôle instrumental fort entre naturellement dans la stratégie de l'IPSL. Il s'agit d'une part de renforcer son organisation pour conduire des programmes instrumentaux d'envergure par la mise en place d'une structure « Groupes Projets », et d'autre part de structurer sa capacité à conduire des programmes en instrumentation innovante par la mise en place d'« incubateurs » dédiés, car si l'innovation ne se décrète pas, elle doit s'organiser avec une grande efficacité.

Le présent document a pour objectif d'établir une prospective à long terme des activités instrumentales à l'IPSL. Compte tenu des enjeux dans le domaine de l'instrumentation spatiale et de l'instrumentation innovante, il s'agit de capitaliser sur l'expertise indiscutable de l'IPSL à l'échelle nationale et internationale pour répondre aux défis posés dans le domaine du climat et de l'environnement.

Fort des succès passés, et conscient du rôle et du potentiel de l'IPSL, le groupe de travail et les trois animateurs qui ont mené cette réflexion en 2008, ont eu le souci d'élaborer un document de prospective pour renforcer la visibilité de l'IPSL et de ses laboratoires dans le domaine de l'instrumentation, tant en interne que vis-à-vis des tutelles et plus généralement vers les agences, les laboratoires partenaires et le monde industriel. À ce titre, le pôle « instrumentation » de l'IPSL se veut d'être un pôle d'excellence.

1.1. Activité instrumentale et rôle central tenu par l'instrumentation

Les activités instrumentales à l'IPSL s'exercent en géophysique externe. Il s'agit de conduire des études sur les enveloppes fluides dans les disciplines qui relèvent de l'observation de la terre et de la planétologie (système solaire). Dans son exercice de réflexion, le groupe de travail a considéré l'instrumentation - en vue d'observations - comme un outil essentiel au succès de l'IPSL au même titre que la modélisation et l'analyse des données.

Pour définir son périmètre d'investigation le groupe de travail a considéré la nécessité en innovation (nouvelles variables, meilleures précisions) et en continuité et complémentarité de mesures (campagne de mesures, séries pluri-annuelles voir décennales).

Toutes les méthodes de mesure ont été prises en compte : télédétections passives, actives (lidar, radar, sodar/sonar), tous les types de capteurs *in situ*, toutes les plateformes possibles suivant le milieu à investiguer et toutes les techniques d'analyse post expérience en laboratoire.

Le groupe de travail a utilisé la définition suivante pour l'instrumentation : « de la mesure jusqu'au traitement du signal ». Les développements instrumentaux traitent l'ensemble de la chaîne depuis la conception qui suit la première idée jusqu'à la validation sur le terrain. Les simulateurs instrumentaux sont inclus dans cette définition. Ils sont essentiels à la conduite de projets, petits et grands. Ils sont utilisés pour définir les spécifications instrumentales à partir des spécifications de mission qui découlent des objectifs scientifiques. Ils sont utilisés tout au long des projets pour optimiser les performances en fonctions des architectures retenues et des composants utilisés. En cela, la culture « groupe projet » est un élément fondateur de la réussite de l'IPSL.

1.2. Observation de la Terre

La figure 1 illustre les moyens de mesure et la collecte de données en observation de la terre, pour des applications à l'atmosphère, aux surfaces continentales et aux océans. Elle met en évidence les continuités thématiques et les complémentarités techniques et technologies :

- Les observations satellitaires sont utilisées pour les études atmosphériques, les surfaces continentales et océaniques. Les chercheurs et IT de l'IPSL sont très présents dans ce domaine d'activité, tant au près du CNES que de l'ASE et de la NASA.
- La constellation « Iridium » - recommandée par le CNES - est utilisée pour collecter des données issues des ballons atmosphériques, des AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*), des bouées et des réseaux sol.
- Les vecteurs libres : ballons, bouées et AUV, emportent des charges utiles miniaturisées. Les concepteurs et les utilisateurs de ces vecteurs, et quelles que soient leurs disciplines, partagent les mêmes objectifs de miniaturisation et les mêmes préoccupations pour déterminer *a priori* les trajectoires qui répondent à des choix pré-établis. La mise en commun des savoirs faire entre tous est une des clés du succès de l'IPSL dans ce domaine.
- L'instrumentation embarquée sur avions et bateaux de recherche pour laquelle les laboratoires de l'IPSL sont été très actifs. On peut citer le programme « lidar et radar aéroporté » Français, à partir de 1985. Une nouvelle définition et un renforcement du rôle de l'IPSL dans ce domaine, en concertation avec les agences nationales, est à conduire à partir de 2009.

- L'instrumentation mobile : sol et Avion Ultra Léger, et les vecteurs libres permettent d'effectuer les mesures quand et où c'est nécessaire et plus fréquemment. Ce domaine de recherche très actif à l'IPSL devrait tenir un rôle encore plus essentiel au cours des prochaines décennies si l'IPSL en maîtrise les coûts et les aspects logistiques.
- Les moyens mobiles développés par l'IPSL ont démontré tout leur potentiel au cours des campagnes de mesures passées et en particulier AMMA en 2006. En préparation du futur chantier d'études sur la Méditerranée, il appartient à l'IPSL de regrouper son potentiel en moyens mobiles pour mettre en œuvre un ou plusieurs observatoires mobiles (télétection, mesures physiques et chimiques), au même titre que la « ARM Facility » qui fait référence dans ce domaine.
- Les réseaux au sol et océaniques forment le socle d'observations régulières (au même titre que le réseau de radiosondage international) avec lesquelles sont conduites les études de surveillance et les nouvelles recherches. À ce titre, la collecte des données à distance et leur mise à disposition par internet doivent être renforcées pour répondre aux responsabilités de l'IPSL vis à vis des communautés nationale et internationale. Les réseaux inclus de fait les observatoires déjà labellisés de l'IPSL et ceux qui sont en discussion. Toutes ces activités sont à conduire avec le soutien des OSU partenaires de l'IPSL.

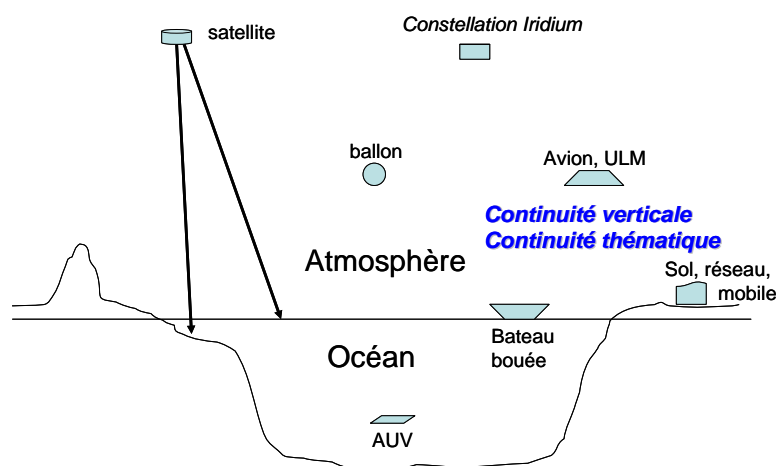


Figure 1 : domaine d'applications des méthodes de télédétection et des capteurs *in situ* embarqués ou en réseaux pour les études sur l'atmosphère, les surfaces continentales et les surfaces océaniques. La constellation Iridium est utilisée pour la collecte des données

1.3. Planétologie

Ce qui vient d'être dit pour l'observation de la terre peut être repris pour l'exploration des planètes du système solaire et de leurs satellites, en accentuant les aspects miniaturisation des charges utiles. Les développements en instrumentation innovante en observation de la Terre, sont bien souvent les premières démonstrations pour de futures missions en planétologie.

Le rôle de l'IPSL en planétologie est encore plus essentiel car la recherche dans ce domaine repose en grande partie sur les laboratoires de recherche. L'IPSL est appelé à conduire des projets instrumentaux de bout en bout dans le cadre de mission

coordonnées par les agences spatiales, alors que son rôle est de fait plus limité en observation de la Terre par l'importance des grands maîtres d'œuvre industriels.

Synthèse de l'instrumentation à l'IPSL

Voir le détail en **Annexe 1: Etat des lieux de l'instrumentation au sein de l'IPSL**

L'IPSL répond aux appels d'offre émis régulièrement par les agences spatiales, européennes et nationales, en accord avec sa politique scientifique. L'IPSL a pour vocation à traiter ses propres programmes instrumentaux. Il n'a pas vocation, sauf exception et en accord avec son rôle scientifique, à être un maître d'œuvre ou un sous traitant d'agences. Suivant ces termes, l'IPSL ne s'inscrit pas dans une concurrence industrielle.

○ **Forces**

L'ambition créatrice, l'expertise et la volonté de réussir ne manquent pas à l'IPSL. La force de l'IPSL c'est sa capacité à imaginer les solutions instrumentales souvent innovantes pour obtenir les observations nécessaires à l'avancé des connaissances, c'est aussi sa capacité à conduire des programmes complexes avec réactivité face aux difficultés qui surviennent, et le tout avec des coûts limités, ce qui est un atout dans une conjoncture de financements mesurés.

Dans le domaine instrumental, les contributions des laboratoires de l'IPSL s'inscrivent dans deux grands domaines : 1) instrumentations et méthodes innovantes d'une part et 2) instrumentations spatiales en observation de la terre et en planétologie, d'autre part, avec un lien fort entre les deux. Ce lien fort a été par exemple les développements en télédétection aéroportée (lidar et radar) qui ont permis de tester de nouveaux concepts en observation de la Terre et puis d'être présent dans les différentes missions spatiales qui embarquent le même type de capteurs : CALIPSO (CNES/NASA) et CLOUDSat (NASA) en 2006, ADM-Aeolus en 2010 (ASE), Earth-CARE (ASE) par la suite, etc.

Suivant cette ligne de force, il est proposé de constituer un pôle instrumental à l'IPSL qui soit articulé autour : 1) d'une structure « Groupes Projets », et 2) d'« Incubateurs » *ad hoc*.

○ **Faiblesses**

Si l'IPSL se doit de conduire des programmes ambitieux en adéquation avec ses moyens, il convient aussi d'ajuster les moyens aux demandes et au potentiel de l'IPSL, car c'est le plus souvent les personnels qui ont fait défaut dans chacun des laboratoires. La mise en place d'une structure « Groupes Projets » devrait y remédier en partie, mais il restera des défauts de masse critique aux quels il faudra remédier pour un fonctionnement efficace.

En effet, compte tenu d'une politique affichée de taux de renouvellement partiel des départs à la retraite, les laboratoires ont recours aux emplois sur CDD, avec les défauts inhérents à ce statut : personnels techniques en début de carrière compte tenu des salaires d'embauche, période de formation et surtout volatilité des expertises.

Aujourd'hui, un seul des laboratoires de l'IPSL (le Service d'Aéronomie, aujourd'hui le LATMOS) a su garder sa capacité à conduire des grands programmes instrumentaux, notamment spatiaux, avec une structure de groupe projet efficace. C'est là un acquis à préserver sur lequel doit s'appuyer l'IPSL pour évoluer et tenir sa place dans la communauté scientifique. Cependant, le LATMOS entre autres, se trouve confronté à un recours massif à l'emploi de CDD pour mener à bien des programmes décidés et financés, pour compenser les départs à la retraite et s'adapter à une gestion de projets dont les contraintes ont évolué au cours du temps : sous-traitances industrielles, rédaction des cahiers des charges, part grandissante des aspects Assurance Qualité et Documentation. La Documentation est indispensable pour tenir compte des changements d'intervenants techniques au cours d'un projet et pour le suivi par les agences. Les équipes projet ont su s'adapter à une sous-traitance industrielle quasi systématique, comme conséquence directe de l'émiettement des savoirs faire. Aujourd'hui, la ligne directrice pour la conduite des programmes est de ne conserver en interne que : a) la conception (complète ou partielle en optique, électronique, mécanique, thermique), b) l'intégration des sous-systèmes, c) l'étalonnage de l'instrument, et d) la validation des performances. C'est comme cela qu'un laboratoire comme le LATMOS conserve la maîtrise de ses projets jusque dans la phase d'exploitation. Ce type d'organisation limite les intervenants par projet, mais il reste qu'un ou plusieurs représentants dans chacun des métiers sont nécessaires, en plus du chef de projet qui gère l'ensemble. C'est à ce niveau qu'on peut identifier les principaux défauts de masse critique.

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, il est indispensable que l'IPSL dispose d'un pôle instrumental comme structure rationnelle de coordination structurante, pour utiliser au mieux les compétences des différents laboratoires en les mettant au service d'un ou plusieurs projets communs, et pour former les nouveaux ingénieurs et techniciens.

La situation qui vient d'être présentée pour les projets spatiaux s'applique tout aussi bien aux programmes en instrumentation innovante. Là encore, le problème de masse critique et de moyens est tout aussi central. Ce constat a conduit les chercheurs et IT concernés à former un incubateur en Télédétection Atmosphérique (POLIMI : Pôle en Instrumentation et Méthode Innovante) commun au LMD et au SA, en particulier pour la mesure du gaz carbonique par télédétection lidar DiAL. D'autres techniques de télédétection pour les gaz à effet de serre sont en cours d'évaluation, qui pourront tout aussi bien être développées au sein de l'IPSL.

○ ***L'instrumentation à l'IPSL : stratégie et ouverture***

Liens avec les stratégies d'agences : Les agences spatiales internationales (ESA, Eumetsat) et nationales (CNES) émettent régulièrement des appels à idées auxquels répondent les scientifiques de l'IPSL. Par là même, les scientifiques de l'IPSL interviennent dans leurs réflexions de prospectives pour identifier les besoins en observations, les traduire en besoins techniques et commencer à concevoir les futurs missions et instruments embarqués (par exemple les programme Sentinelles/GMES, pour >2018).

Liens avec les industriels : Tous les programmes instrumentaux en développement dans les laboratoires se font en lien direct avec :

- Les grands maîtres d'œuvre : EADS-Astrium, Thalès-Aléni
- Un ensemble de PME-PMI du tissu industriel local, français, européen voir mondial

La présence de Thalès sur le campus, et la présence de nombreuses PME-PMI en région Ile-de-France, plaide pour des actions dans ce sens.

Liens avec des coopérants scientifiques et techniques internationaux : De nombreux programmes instrumentaux en développement dans les laboratoires de l'IPSL, se font en coopération avec des équipes scientifiques et techniques internationales. Les laboratoires de l'IPSL peuvent être amenés à ne fournir que des sous-systèmes qui s'intégreront dans des instruments à responsabilité scientifique étrangère mais peuvent être également maîtres d'œuvre d'instruments complets.

Liens avec les OSU : l'IPSL dispose de plusieurs observatoires dans des OSU partenaires. Les observatoires sont dédiés à la conduite d'observations récurrentes par des moyens éprouvés et fiables, à la validation des observations spatiales, à la constitution de bases de données liées à l'ensemble de ces données, à l'animation et à la coordination scientifiques. Les développements en instrumentations innovantes sont du ressort des laboratoires et des incubateurs *ad hoc*. Après coup, et suivant les applications, certains instruments développés par les laboratoires et les incubateurs pourront être mis en œuvre dans les observatoires.

Liens avec l'enseignement supérieur et de 3^e cycle en particulier : Aujourd'hui, les étudiants qui s'intéressent à l'instrumentation et à l'expérimentation ont les plus grandes difficultés à trouver des magistères qui répondent à leurs volontés de s'impliquer dans le domaine des sciences expérimentales. L'IPSL est particulièrement bien placé dans ce domaine pour répondre à leurs aspirations. Depuis plusieurs années, le LMD prend à son compte des enseignements d'option pour les élèves polytechniciens et pour un DESS de l'UVSQ. L'IPSL pourrait tout aussi bien contribuer à la mise en place de Master et à des filières de formations permanentes. La présence de l'École Supérieure d'Optique sur le campus, les liens avec les universités : UVSQ, Paris-6, Créteil, plaide pour un rapprochement dans ce sens.

○ ***Du « leadership », des contributions et des participations***

Il est important de distinguer les différents niveaux d'investissement en matière de développements instrumentaux pour bien identifier ce qui est du ressort : de l'IPSL, des laboratoires, des personnes (chercheur, ingénieur ou technicien).

L'initiative première part toujours d'une demande scientifique, plutôt que l'inverse. Les demandes émanent d'une ou plusieurs personnes, qui peuvent former des petites structures (internes ou transverses aux laboratoires) ou proposer les projets au niveau des laboratoires. Certains de ces projets seront alors reconnus comme projets IPSL, en particulier chaque fois que le « leadership » de l'IPSL, au sein de la communauté française voir européenne ou internationale est clairement reconnu. Un critère supplémentaire de « labellisation » IPSL devra être que ces projets mettent à contribution des compétences de plusieurs laboratoires : scientifiques, personnels techniques, techniques de mesures ou d'analyse. En retour, chaque laboratoire intéressé par le projet labellisé devra y contribuer à hauteur d'un pourcentage à définir

de ses ressources humaines. Il s'agit pour l'IPSL, d'être moteur, cerveau et bras compris, dans le domaine des recherches et des développements instrumentaux. En tout état de cause, il conviendra de favoriser les domaines d'excellence dans lesquels l'IPSL a un « leadership » incontestable.

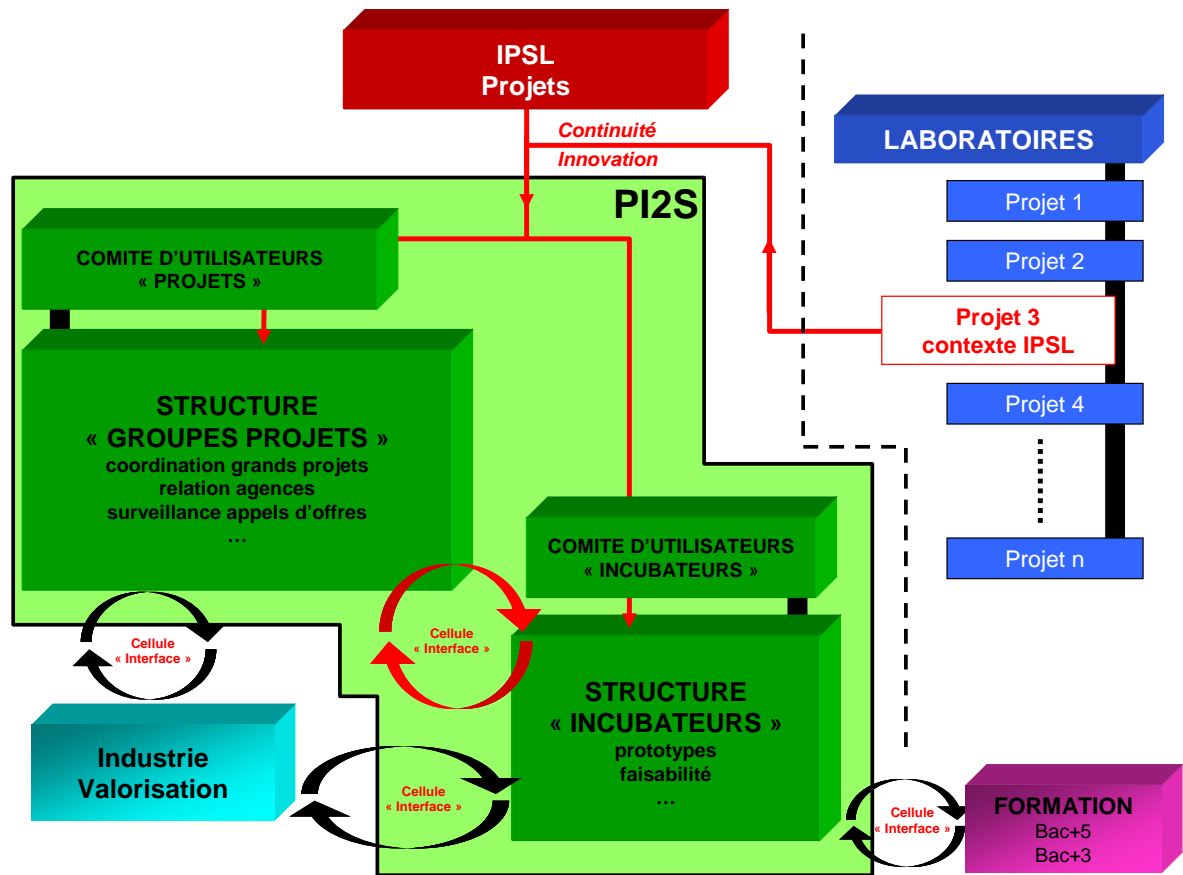
Proposition de définition et d'organisation du pôle instrumental de l'IPSL

○ ***Définition du pôle***

L'IPSL possède une expertise incontournable dans le domaine de l'instrumentation innovante et la réalisation de grands projets d'instruments spatiaux. Cette force instrumentale ne s'exprime aujourd'hui qu'à l'échelle des seuls laboratoires. Dans un contexte de rationalisation, d'efficacité et de meilleure visibilité, l'IPSL doit se positionner comme un acteur majeur en instrumentation innovante et spatiale dans la recherche française et internationale. L'idée consiste à mettre en place un pôle à caractère technique et technologique (appelé provisoirement « PI2S » : Pôle d'Innovation Instrumentale et Spatiale), qui s'appuie sur les thématiques et savoirs faire des laboratoires pour favoriser :

- le développement d'instrument « labellisés » IPSL (porté par plusieurs laboratoires), en recherchant la meilleure mutualisation des compétences,
- la définition et la préparation des futurs instruments sur des sujets d'innovations,
- la valorisation des travaux instrumentaux menés dans les laboratoires.

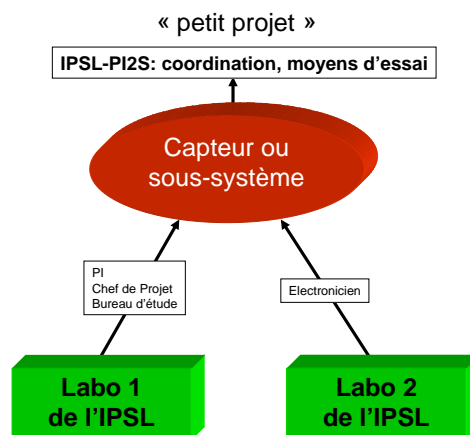
La figure ci-après présente une vue schématique du pôle.



Pour garantir le succès de cette structure, il sera dès le départ nécessaire de s'appuyer sur des compétences reconnues en gestion de projets techniques. En l'état, le LATMOS tiendra un rôle central puisqu'il est le seul à avoir gardé la capacité à mener des projets en maîtrise d'œuvre complète. C'est sur le site de Guyancourt, futur lieu d'implantation du LATMOS, que seront regroupés les moyens techniques lourds : salles blanches, cuve à vide thermique, pot vibrant, métrologie, salle anéchoïde.

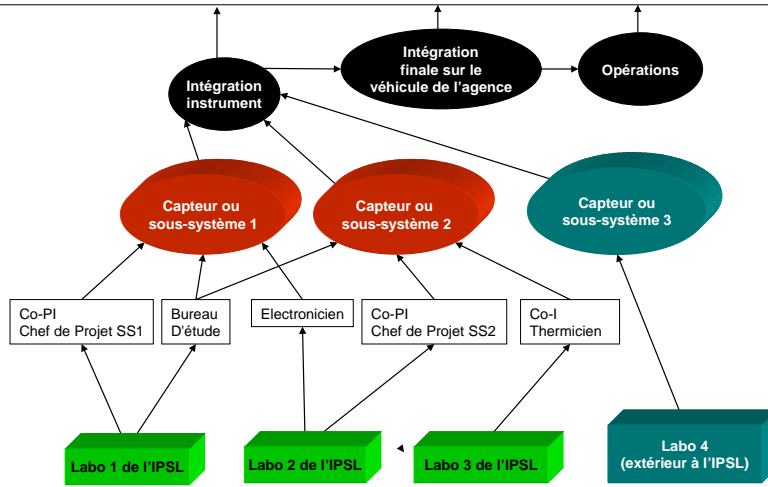
La structure Groupes Projets sera constituée majoritairement par des personnels issus des laboratoires. L'importance et le rôle des personnels IPSL est à définir. Mais on peut déjà dire qu'un responsable IPSL de « carrure internationale », dans la lignée des responsables techniques du Service d'Aéronomie est incontournable pour la réussite de l'opération. Le responsable IPSL de cette structure, au-delà de l'animation technique, aura également pour mission d'harmoniser les besoins propres du PI2S à ceux des laboratoires dans un esprit d'ouverture de ces moyens à une communauté plus large que celle de l'IPSL : autres laboratoires français ou étrangers, industriels. L'IPSL pourra sur cette question particulière de l'opération des moyens techniques lourds de Guyancourt s'inspirer de l'expérience et du fonctionnement de la station d'étalonnage de l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) d'Orsay.

Les figures suivantes présentent des exemples de projets types « structure Groupes Projets ».



« projet spatial en maitrise d'œuvre complète »

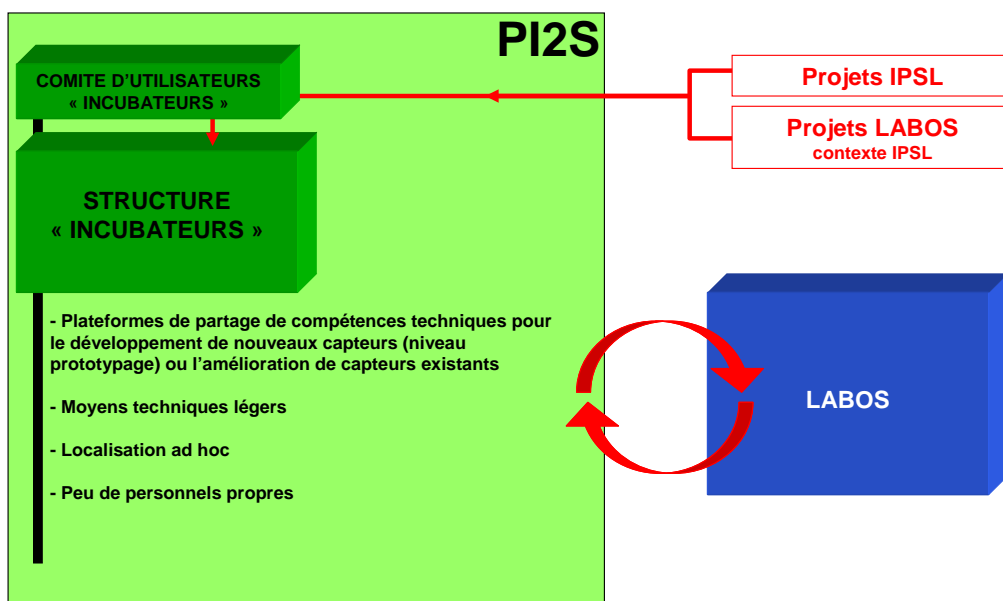
IPSL-PI2S: coordination, moyens d'essai, référent qualité, gestion documentation, PI général (interlocuteur préférentiel de l'agence spatiale qui a passé commande) représenté par le chef de projet général pour les aspects techniques



- le développement combiné de plusieurs capteurs sur une même plateforme (sol, bouée, avion, satellite ...),
- le développement de démonstrateurs pour la préparation et la validation des missions spatiales retenues par le CNES et l'Agence Spatiale Européenne.

L'implantation physique des incubateurs IPSL dans l'un ou l'autre des laboratoires sera fonction de l'expertise et de la volonté de responsables *leader* bien identifiés, et des moyens existants. Dans un premier temps, les activités de prototypages seront du ressort du laboratoire à l'initiative de l'incubateur. Les différents animateurs de la structure « Incubateurs » devront donc apporter un effort particulier pour rendre visible ses activités.

La figure suivante présente la structure Incubateurs.



Cette participation active à la formation constitue aussi un moyen d'élargir et de valoriser le travail des ingénieurs et techniciens des laboratoires (participation à certains modules d'enseignements techniques, encadrement de TP). Le PI2S pourrait donc coordonner ces participations.

Le pôle pourrait enfin organiser des Ecoles Thématiques destinées à un public large (recherche/applications) dans le domaine de l'instrumentation pour l'environnement.

▪ Industrie

Les liens du pôle avec le domaine industriel sont évidents à plusieurs niveaux. Tout d'abord, un partenariat industriel est vital afin de susciter des évolutions technologiques importantes, bases des futurs instruments de l'IPSL. En effet, les laboratoires le constituant n'ont généralement pas les capacités de mener seuls de telles évolutions technologiques. La structure Incubateurs pourrait ici offrir un cadre particulièrement bien adapté à ce partenariat. Cette structure pourrait en effet accueillir des thèses CIFRE, recevoir des financements directs d'industriels, répondre de façon conjointe à des appels d'offres instrumentaux. Certaines de ses initiatives se font aujourd'hui ponctuellement dans les laboratoires, mais il ne semble pas exister de réelle coordination de ces activités au sein de l'IPSL.

L'IPSL pourrait aussi être en mesure de répondre à des demandes extérieures en mettant à disposition ses compétences et ses moyens, qu'ils soient humains ou techniques, matériel ou logiciel.

Enfin, le PI2S pourrait largement participer et améliorer la valorisation des travaux d'instrumentation menés dans les laboratoires. En effet, trop d'instruments opérationnels ou simplement de concepts d'instruments dorment dans les placards des laboratoires, peu ou pas exploités. Sur ce dernier point, l'implantation d'une partie du pôle instrumental de l'IPSL à Guyancourt pourrait favoriser les liens avec le service de valorisation de l'Université de Versailles St Quentin en Yvelines. Le PI2S pourrait donc être le lien entre les laboratoires de l'IPSL et ce service de valorisation qui pourrait amener son expertise des brevets et créations de spin-off ainsi que ses relations avec le tissu industriel régional.

Afin d'assurer le développement de tous ces aspects (partenariats divers, valorisations), le PI2S devra identifier des porteurs de projets, issus des laboratoires. Rapidement, une ou plusieurs cellules « interface » pourraient se constituer afin de répondre à ces besoins. Ces cellules permettraient la mise en relation des demandes intérieures ou extérieures avec les équipes, services ou institutions compétentes.

○ **Recrutements prioritaires pour le PI2S**

Afin de démarrer les activités du PI2S dans les meilleurs délais et de façon optimale, il semble opportun de lancer les recrutements suivants :

- 1 responsable du pôle PI2S, également responsable des moyens techniques lourds de Guyancourt, niveau IR. C'est la pièce maîtresse de la structure Groupes Projets !
- 1 ingénieur Référent Qualité, niveau IR ou IE.
- 1 ingénieur Gestion de Documentation Technique, niveau IE.

- 1 responsable de la structure Groupes Projets, niveau IR. Cette fonction pourrait dans un premier temps être assurée à temps partiel par un ingénieur issu d'un laboratoire de l'IPSL.
- 1 responsable de la structure Incubateurs niveau IR. Cette fonction pourrait aussi dans un premier temps être assurée à temps partiel par un ingénieur issu d'un laboratoire de l'IPSL.

Pour ce qui est de l'opération des moyens techniques lourds de Guyancourt, le minimum pour démarrer sera:

- 1 technicien ou ingénieur niveau IE spécialités vide / optique pour opérer les cuves à vide et les moyens optiques associés.
- 1 technicien ou ingénieur niveau IE spécialité mécanique pour opérer le pot vibrant et l'ensemble des moyens de métrologie.

Cela représente donc 5 postes prioritaires IPSL, et 2 postes à temps partiel laboratoires.

○ ***Conclusion sur le pôle instrumental***

Le PI2S sera une structure commune à l'IPSL, portée par l'ensemble des laboratoires de l'IPSL, au service de l'ensemble de l'IPSL et de ses partenaires. Il sera constitué de moyens matériels et de moyens en personnel (compétences, capacité à mettre en réseaux) qui devraient leur permettre de remplir son rôle de leader dans le domaine de la géophysique externe en observation de la Terre et en planétologie.

Le PI2S s'appuiera sur deux structures techniques pour la coordination des projets à réaliser et des nouvelles techniques à développer : structure « Groupes Projets » et structure « Incubateurs », et sur une ou plusieurs cellules d'interface qui devront assurer animation, cohésion, dialogue d'ensemble au sein du pôle et ouverture à l'extérieur par la synthèse et la diffusion des demandes internes et externes.

La plus-value du PI2S bénéficiera de :

- ses équipements techniques propres,
- ses capacités propres en moyens humains en termes de métier et de chefs de projet, et d'un dialogue suivi et fructueux entre personnel technique et scientifique,
- sa capacité à mobiliser et coordonner toutes les compétences scientifiques et techniques, les savoirs faire et les moyens des différents laboratoires autour de projets phares, labellisés par l'IPSL.

Le label devra être attribué sur un critère de projet d'intérêt pour l'IPSL (via les laboratoires), et sur un engagement des partenaires à jouer les règles du jeu : participation à la vie scientifique du projet et à son développement technique.

Annexe 1: Etat des lieux de l'instrumentation au sein de l'IPSL

○ ***Introduction***

Ce document s'attache à présenter un point de vue d'ensemble plutôt qu'une somme de contributions et d'intérêts par laboratoires. Il s'agit de canaliser et de structurer les activités en recherche instrumentale, d'amplifier les points forts et de réduire les points faibles. Le point de départ est l'ambition de l'IPSL à être un acteur académique essentiel, voire incontournable, à la politique scientifique française dans le domaine de l'instrumentation innovante et spatiale.

Le cadrage de la réflexion s'appuie donc en tout état de cause sur un état des lieux à l'IPSL : expertises, compétences, forces et faiblesses.

Dans le cadre de cette réflexion de prospective, en plus des discussions générales, il a été demandé aux laboratoires une auto-évaluation de leur caractère instrumental, tout d'abord de façon générale, puis par activité scientifique thématique, puis par type de technique instrumentale. Pour cet exercice, les activités instrumentales ont été divisées de la façon suivante : instruments spatiaux embarqués (« spatial »), instruments de laboratoire (« labo »), instruments dédiés à l'étude des surfaces et/ou déployés en réseau (« surfaces »), instruments mobiles et/ou installés sur bateaux (« Mobile, Bateau »), instruments embarqués sur avion (« Avion »), instruments embarqués sous ballons ou AUV (« Vecteur libre »).

○ ***Type de plateformes associées aux instruments développés par l'IPSL***

	LATMOS (CETP + SA)	LMD	LOCEAN	LSCE	LISA	LPMAA	Total
Spatial	3	2	2	1	2	1	11
Labo	1	2	2	3	3	1	12
Surface	3	3	0	3	2	2	13
Mobile Bateau	3	2	3	3	1	0	12
Avion	3	2	0	2	2	0	9
Vecteur Libre	2	2	3	1	0	3	11
TOTAL	15	13	10	13	10	7	

Spatial = observation Terre, planétologie
 Surface : sol, réseau
 Vecteur libre = ballon, AUV

Système de notation :
 0 = pas, 1 = peu, 2 = moyen, 3 = beaucoup

Note : reste à intégrer IDES, ESE

- **Quelle thématique instrumentale au sein des laboratoires ?**

	Planétologie	Climat	Pollution Troposphère	Stratosphère UTLS	Océan	Surface	Dynamique Atmosphère	Mésosphère Ionosphère
Spatial	LATMOS : 3 LISA : 3	LPMAA : 1 LSCE : 2 LATMOS : 2 LMD : 2 LISA : 1 LOCEAN : 1	LPMAA : 2 LISA : 2	LPMAA : 1 LATMOS : 2	LOCEAN : 2	LPMAA : 1 LSCE : 1	LATMOS : 3 LMD : 2 LISA : 3	LATMOS : 2
Labo	LATMOS : 2 LISA : 2	LSCE : 3 LMD : 2 LOCEAN : 3	LSCE : 3 LISA : 2	LMD : 2	LSCE : 3 LOCEAN : 3	LSCE : 2 LISA : 2	LMD : 2 LISA : 3	LPMAA : 1
Surface		LSCE : 1 LATMOS : 1 LMD : 3	LPMAA : 1 LSCE : 2 LISA : 2	LATMOS : 2		LSCE : 2 LATMOS : 1 LISA : 2	LATMOS : 3 LMD : 3 LISA : 2	LATMOS : 1
Mobile Bateau		LSCE : 3 LMD : 2 LOCEAN : 2	LSCE : 2 LATMOS : 1 LISA : 2		LSCE : 3 LATMOS : 2 LOCEAN : 3		LATMOS : 1 LMD : 3 LISA : 2	
Avion		LSCE : 2 LMD : 2	LSCE : 1 LATMOS : 1 LISA : 2		LATMOS : 2	LATMOS : 2	LATMOS : 3 LMD : 2 LISA : 2	
Vecteur Libre			LPMAA : 2 LSCE : 1	LPMAA : 2 LATMOS : 1 LMD : 2	LOCEAN : 2	LPMAA : 1	LATMOS : 1 LMD : 2	LATMOS : 1
TOTAL	10	33	26	12	20	14	37	5

Spatial = observation Terre, planétologie
 Surface : sol, réseau
 Vecteur libre = ballon, AUV

Système de notation :
 0 = pas, 1 = peu, 2 = moyen, 3 = beaucoup

Note : reste à détailler IDES, ESE

- **Quelles techniques instrumentales au sein des laboratoires ?**

	Optique	Hyper Radio	Chromato	Spectro optique (UV/Vis/IR)	Spectro masse	Capteur in situ
Spatial	LPMAA : 1 LSCE : 1 LMD : 3 LISA : 1	LATMOS : 2 LOCEAN : 2	LATMOS : 2 LISA : 3	LPMAA : 2 LATMOS : 3 LISA : 2	LATMOS : 2	
Labo	LSCE : 1 LMD : 3 LISA : 2		LSCE : 3 LATMOS : 1 LISA : 3 LOCEAN : 2	LPMAA : 1 LISA : 3	LPMAA : 1 LSCE : 3 LATMOS : 1 LOCEAN : 2	
Surface	LPMAA : 1 LSCE : 2 LATMOS : 1 LMD : 3 LISA : 2	LATMOS : 3	LSCE : 1 LISA : 2	LPMAA : 1 LATMOS : 2 LISA : 2		LPMAA : 1
Mobile Bateau	LMD : 3 LISA : 1		LISA : 2	LATMOS : 2	LATMOS : 1	LOCEAN : 3
Avion	LSCE : 2 LATMOS : 3 LMD : 3 LISA : 2	LATMOS : 3	LSCE : 1 LISA : 2			LPMAA : 1
Vecteur Libre	LPMAA : 1 LSCE : 1			LPMAA : 3 LATMOS : 3		LPMAA : 1 LMD : 2 LOCEAN : 3
Total	37	10	22	24	10	11

Autres :
Microscopie électronique
Antennes électriques : LATMOS (2)
ICP-MS : LSCE (3)
AES
Magnétomètres : LSCE (2)
Compteurs gamma : LSCE (3)
SAW

Spatial = observation Terre, planétologie
Surface : sol, réseau
Vecteur libre = ballon, AUV

Système de notation :
0 = pas, 1 = peu, 2 = moyen, 3 = beaucoup

Note : reste à détailler IDES, ESE

Annexe 2 : Prospective instrumentale

Il s'agit dans cette partie de donner des exemples de développements instrumentaux possibles dans les structures décrites dans les paragraphes précédents. Le but n'est pas d'être exhaustif ni de définir déjà l'organisation nécessaire pour les mener, mais plutôt d'initier le dialogue de prospective sur la base de projets fédérateurs potentiels. Il s'agit aussi de montrer que des idées existent déjà et que leur définition est suffisamment aboutie pour dès maintenant faire l'objet de proposition au sein du PI2S.

Ce travail d'identification de projets potentiels devra être continué par le pôle.

○ **Projets potentiels pour la structure Groupes Projets du PI2S**

▪ **Exemple 1 : Combinaison chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse spatiale**

La détermination de la nature et de la distribution des molécules organiques dans le système solaire et dans l'Univers est d'un intérêt capital dans le cadre de la compréhension des processus qui ont mené à l'apparition de la vie sur Terre, voire sur d'autres planètes. Les succès récents au niveau du système solaire (Cassini-Huygens pour l'atmosphère de Titan et les panaches d'Encelade) et des exoplanètes (mise en évidence de méthane pour la première fois) nous laissent entrevoir des progrès importants dans ce domaine dans les années à venir. A ce stade, l'investigation in situ des environnements planétaires apparaît comme une étape décisive et incontournable de l'exploration future: les molécules organiques susceptibles d'être présentes sur Mars ne peuvent être détectées par télédétection depuis l'orbite; la chimie ionosphérique de Titan et les composés complexes qu'elle produit n'auraient jamais pu être mis en évidence sans le spectromètre de masse de la sonde Cassini. C'est pourquoi des missions spatiales aujourd'hui en projet intègrent comme un des objectifs principaux l'étude de la matière organique de ces environnements, avec la volonté de mener des analyses in situ (atmosphère, surface...) : Tandem pour Titan et Encelade, Laplace pour Europa et Jupiter, Marco-Polo, pour ne citer que des missions proposées dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA. L'IPSL veut s'impliquer dans ces missions, et joue un rôle important dans d'autres projets à fort potentiel : EVE (ballon pour Venus), ou missions martiennes du programme d'Exploration (Exomars, Mars-NEXT, mission de retour d'échantillons en 2020). Ces missions devront emporter des instruments capables d'analyser et de déterminer la nature de la matière organique présente dans des environnements variés, ce qui demande le développement d'analyseurs in-situ miniaturisés performants.

Le SA, le CETP et le LISA sont fortement impliqués dans le développement d'analyseurs in-situ : chromatographes en phase gazeuse (SA-LISA) (Huygens, MSL, Phobos-Grunt, Exomars), spectromètre de masse à temps de vol (CETP-SA, projet Paloma). Dans un premier temps (<2010), l'IPSL doit acquérir la capacité de fournir un système GCMS complet à résolution en masse moyenne (~300) pour des mesures au sol des planètes. L'étude d'un spectromètre de masse et d'énergie (HNA) destiné à sonder les hautes atmosphères planétaires (Mars, Europe...) est également

en cours. L'étape suivante (2010-2015), en cours de démarrage via une demande de R&T au CNES, sera de réaliser un spectromètre à ultra-haute résolution (≈ 100000) basé sur le principe de l'Orbitrap, dispositif récemment commercialisé, dont un exemplaire vient d'être acquis par un laboratoire partenaire (LPG). Dans la même période (2010-2015), le MS à moyenne résolution sera couplé à d'autres systèmes de séparation (chimique, cryogénique) et/ou de production d'espèces à analyser (laser à ablation, à désorption). Dans la période 2010-2020, l'IPSL pourrait également s'associer à l'IDES, qui héberge un groupe de haut niveau de géochronologie, pour la fourniture d'un MS-laser destiné à la datation in-situ des roches martiennes. Par ailleurs, la technique de source d'ionisation utilisée pour l'instrument aéroporté SAMU (réactions ions-molécules), pourrait être adaptée à la mesure des espèces radicalaires dans l'atmosphère de Mars (OH, HO₂...) avec grand profit.

Un tel projet, associant le SA, le CETP et le LISA à l'IPSL, ainsi que l'IDES (Orsay) et le LPG (Grenoble), est d'une ampleur telle qu'il ne peut être mené qu'au niveau IPSL. Visant à développer des analyseurs miniaturisés et automatisés pour l'exploration des planètes, il aura également des retombées directes pour l'observation de la Terre. Des chercheurs du LSCE et de l'IDES ont d'ores et déjà manifesté leur intérêt pour ce type d'instrumentation, qui peut être déployée en réseau sur la Terre dans le cadre de campagnes de terrain (mesure des isotopes de l'eau, de la composition des émanations lacustres, etc...) en complément de l'instrumentation optique et hyperfréquence.

▪ **Exemple 2 : Etude multi-instrumentale de l'environnement martien**

La caractérisation fine du climat martien nécessite un saut qualitatif dans notre compréhension du cycle de l'eau sur cette planète, incluant la cartographie et le suivi des flux d'échange entre réservoirs (subsurface, calottes, atmosphère gazeuse, nuages), ainsi que le transport atmosphérique, intimement lié à la dynamique de la couche limite et à la circulation générale de l'atmosphère aux échelles régionale et globale. Bien que la mission Mars-Express et les missions orbitales américaines nous aient appris beaucoup sur la dynamique et la chimie de l'atmosphère martienne, nous ne savons encore quasiment rien du cycle de l'eau martien. La télédétection classique, dans les domaines infrarouge et micro-ondes, sur les prochaines missions orbitales (Scout de la NASA, Marx-NEXT de l'ESA), nous apportera des informations importantes sur la dynamique de la moyenne atmosphère et le cycle de l'eau deutérée. Mais la caractérisation de l'eau dans la subsurface, des flux de transfert dans la subsurface et d'échange avec la couche limite atmosphérique, de la dynamique de cette couche limite riche en poussières et du système de vents dans la troposphère va nécessiter le portage à Mars de techniques de détection active, qui jouent un rôle majeur dans le suivi de notre propre environnement : radar à pénétration et sondage électrique/magnétique de la subsurface (eau du sous-sol, porosités, phases oxydées), spectroscopie active par diodes laser –TDLAS– (espèces atmosphériques gazeuses et leurs isotopes), lidar au sol ou en orbite (poussières, nuages, vents). L'ampleur du programme d'exploration de l'ESA, et de l'investissement du SA et du CETP dans Exomars et, nous l'espérons, dans la mission Mars-NEXT, milite en faveur d'un développement coordonné de capteurs actifs, associant également la communauté des Sciences de la Terre.

Le SA et le LMD se sont engagés dans une R&T destinée à réaliser un lidar spatial avec la société Thalès-Laser. La mesure directe des vents sur Mars est un objectif scientifique prioritaire et n'a cependant que peu (anémomètres sur Viking et Pathfinder), voire pas, pu être réalisée. Le mini-lidar Doppler offre un attrait scientifique accru, ainsi qu'un retour technologique direct pour l'observation de la Terre (possibilité d'étendre le concept à des stations autonomes, type réseau AERONET). La connaissance de l'activité éolienne est une information cruciale en vue de la préparation des phases EDL (Entry-Descent-Landing) pour les futurs atterrisseurs martiens. Les efforts porteront dans un premier temps (<2010) sur la faisabilité d'un lidar Doppler, puis sur la réalisation d'un prototype spatial (2010-2015).

Le CETP est responsable d'un radar à pénétration embarqué sur Exomars, et un rapprochement est en cours avec les géologues des laboratoires IDES (Orsay) et SYSIPHE (UPMC) pour en optimiser la mise en œuvre et le retour scientifique. L'IPSL pourrait être impliqué à terme dans le radar orbital d'Europe (mission Laplace). On peut imaginer, à plus long terme, de transposer à Mars l'utilisation combinée d'un lidar et d'un radar (atmosphérique), en bénéficiant de l'expérience acquise avec le projet RALI d'étude de l'interaction dynamique-rayonnement dans les nuages de glace terrestres. En complément du GPR, le sondage de la permittivité diélectrique et de la susceptibilité magnétique, ainsi que le pratiquent les laboratoires de Sciences de la Terre (IDES à P11, SYSIPHE et MAGIE à P6, CEREGE à Aix), est d'un grand intérêt pour caractériser les propriétés structurales de la subsurface, et aider à l'interprétation des données radar. Une demande de R&T est en cours de soumission (SYSIPHE), en liaison avec le programme de l'IPSL en matière d'exploration martienne. Un tel développement est particulièrement pertinent pour la mission Mars-NEXT en cours de définition. A plus long terme (2020), un système intégré associant GPR et sondes de permittivité/susceptibilité serait probablement pertinent pour un gros rover martien (retour d'échantillons).

Enfin, le GSMA (Reims), laboratoire associé à l'IPSL, développe, à la suite de l'instrument SDLA-LAMA, un spectromètre à absorption par diodes laser, qui sera utilisé sur la mission russe Phobos-Grunt comme analyseur en sortie d'un four de pyrolyse. Les potentialités de TDLAS pour l'analyse des isotopes de l'eau au sol de Mars, et également dans des environnements terrestres spécifiques (zones glaciaires, émanations lacustres...) d'intérêt pour le LSCE et l'IDES par exemple, paraissent prometteuses. Un analyseur isotopique de la vapeur d'eau et du méthane atmosphériques martiens de type TDLAS pour une grosse mission martienne en 2020 (rover MSR) serait d'un grand intérêt, en complément d'un spectromètre de masse à haute résolution.

Ce projet, qui réunirait le SA, le CETP et le LMD dans l'IPSL, les géologues de l'IDES, de SYSIPHE et du MAGIE dans l'environnement francilien et le GSMA à Reims, ne peut être mené qu'au niveau de l'IPSL dans le cadre élargi de coopérations interdisciplinaires. Il aura des retombées intéressantes également pour le suivi de l'environnement terrestre, notamment au LSCE et à l'IDES.

- **Exemple 3 : Nouveau programme de télédétection aéroportée pour l'observation de l'atmosphère météorologique**

A partir de 1985 les laboratoires de l'IPSL ont développé un programme de Lidar et radar aéroporté ambitieux (dont RALI) qui a débouché sur des participations fortes aux programmes de Lidar et de radar dans l'espace CALIPSO (NASA/CNES) et CLOUDSAT en 2006, de même que les travaux conduits sur la mesure du champ de vent par Lidar ont conduit à la sélection du programme ADM/Aeolus par l'Agence Spatiale Européenne.

Le premier programme comprenait 4 volets : Lidar nuages aérosols (LEANDRE-1), vapeur d'eau (LEANDRE-2), ozone (ALTO), champ de vent (WIND en collaboration avec le DLR, Munich). Ce programme conçu au milieu des années 80 arrive à son terme et se doit d'être renouvelé.

Ce renouvellement est en cours avec le développement de Leandre Nouvelle Génération (LNG) et COWIN, un Lidar multi-fonctions pour la mesure simultanée du CO₂ et de la vitesse sur la ligne de visée. L'IPSL pourrait ainsi jouer un rôle majeur dans le développement des nouveaux Lidars vapeur d'eau et vent.

- **Exemple 4 : Observatoire mobile de l'IPSL**

En complément de sites fixes comme le SIRTa à Palaiseau ou d'initiatives de même nature dans différentes universités, notamment à Jussieu, il apparaît le besoin d'effectuer des observations en dehors et en complément des observatoires fixes. Pour cela il paraît indispensable de développer un observatoire mobile de l'IPSL qui soit l'équivalent du ARM Mobile américain. Comme certains laboratoires de l'IPSL ont déjà développé des moyens mobiles ou transportables importants en télédétection et en mesure in situ, il conviendrait de les répertorier et de les harmoniser pour une plus grande efficacité. L'observatoire Mobile IPSL pourrait aussi bénéficier à titre de démonstration des développements conduits dans les incubateurs.

- **Exemple 5 : Programmes Sentinelle 4/MTG et Sentinelle 5/Post-EPS**

Ces dernières années, les sondeurs embarqués à bord de plateformes satellites orientées vers la chimie troposphérique sont apparus et l'IPSL a fortement participé à la mise en place des programmes qui ont permis leur développement, ainsi qu'à leur exploitation. L'IPSL s'investit aussi dans la préparation des futures missions (>2018), en cours de préparation au CNES, à l'ESA et à EUMETSAT, en particulier dans le contexte GMES. L'initiative GMES a pour objet de fédérer les activités de l'Europe dans le domaine de l'observation par satellite et de la télédétection de façon à apporter un soutien aux politiques gouvernementales. L'expertise du LATMOS est utilisée notamment pour la définition des sentinelles 4 (MTG, orbite géostationnaire) et Sentinelle 5 (Post-EPS, orbite polaire).

○ **Projets potentiels pour la structure Incubateurs du PI2S**

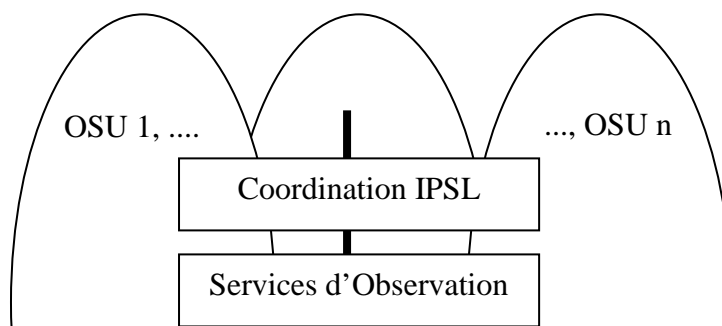
Compte tenu des thématiques développées par les laboratoires de l'IPSL, plusieurs incubateurs pourront être mis en place pour : l'atmosphère, les surfaces continentales et l'océan, la planétologie ...

Pour exemple, l'incubateur POLIMI qui réunit des compétences du LMD et du SA a été mis en place grâce au soutien de l'IPSL. Ses premiers objectifs sont de s'intéresser à la mesure de CO₂ par la méthode DIAL, au développement d'un lidar 3D à visée rotatoire pour la dynamique de la couche limite, à un nouveau radar ST 72 MHz pour la dynamique atmosphérique, à un radar de nouvelle génération pour l'étude des nuages peu précipitants, et à la radiométrie.

L'incubateur pour les surfaces continentales s'intéressera notamment aux techniques de fluorescence végétale (par radiométrie), de distribution de canopée végétale (par Lidar), d'estimation de l'humidité du sol par radiométrie micro-ondes.

D'autres exemples peuvent être cités :

- Les travaux en cours sur le développement de mesures en zone marginale de glace (arctiques) pour l'estimation des bilans de chaleur et de masse (glace de mer). Projet LOCEAN-CETP-DT INSU qui pose des problèmes techniques particuliers (givrage, pas d'énergie par énergie solaire, mise en œuvre sur flotteur pris temporairement dans la glace puis dérivant ...).
- Les travaux en cours ou prévus sur les méthodes d'estimation des termes intervenant dans le bilan d'énergie cinétique turbulente (fluctuations de pression, corrélation pression/vitesse verticale du vent, améliorer résolution et volume échantillonné pour la mesure des fluctuations d'humidité et température). Projet ANR soumis CETP-CNAM-IRPHE-DT INSU.
- Diverses propositions effectuées à l'appel à idées du CNES qui mériteront sans doute des études amont par simulateur in situ ou aéroporté, en particulier radiomètre micro-onde interférométrique pour la mesure des paramètres de surface depuis des satellites géostationnaires (participants à la proposition CETP-LOCEAN-METEO FRANCE ...), aussi les missions dans la continuité de celles existantes ou prévues à court terme mais apportant parfois des nouveautés instrumentales (post MeghaTropiques, post SMOS, post AquaTrain ...).



D : Prospective du Groupe SAMA **(Statistiques pour l'Analyse, la** **Modélisation et l'Assimilation) pour la** **période 2008-2012**

Les différents thèmes d'activité du Groupe SAMA ne peuvent que prendre une importance croissante dans les prochaines années. Les observations, particulièrement satellitaires, seront de plus en plus nombreuses, et demanderont des moyens de traitement de plus en plus fiables et puissants. La prévision, et l'identification de ses limites (même en faisant abstraction de la prévision du climat, qui ne relève pas, au moins en l'état présent, des méthodes et techniques développées dans SAMA) feront l'objet de développements importants. On peut mentionner particulièrement la prévisibilité des événements extrêmes, dont on pense qu'ils deviendront plus nombreux en conséquence du réchauffement climatique. Plus généralement, les enjeux scientifiques et sociétaux seront de plus en plus exigeants, d'un point de vue qualitatif et quantitatif, et nécessiteront le développement de méthodes appropriées de traitement, d'analyse et de prévision. Le groupe SAMA pense pouvoir accroître dans ces conditions son rôle de coordination et d'échanges, et pouvoir faire bénéficier la communauté scientifique (et, en conséquence, les utilisateurs finaux) des dernières innovations en matière d'outils et de méthodes statistiques.

L'activité du Groupe SAMA est essentiellement une activité de liaison et d'animation (séminaires, ateliers, échanges de logiciels, ...), indispensable à l'évidence pour une recherche de qualité et pour la diffusion de ses résultats. Mais elle n'est pas intrinsèquement une activité de recherche. On prévoit qu'il en restera de même dans les années qui viennent. La première partie de la prospective qui suit décrit les recherches qu'effectueront les différentes équipes de l'IPSL travaillant sur les thèmes d'intérêt de SAMA, recherches autour desquelles SAMA développera son activité spécifique de liaison et d'animation. Quelques actions spécifiques à SAMA sont présentées ensuite.

I. Prospective scientifique générale

Impacts :

Le groupe SAMA considère que le thème des impacts sociétaux du climat va prendre de l'ampleur dans les années à venir au sein de l'IPSL et compte s'investir dans cette thématique, notamment en apportant son expertise statistique aux activités du GIS "Climat et Environnement". Les apports du groupe peuvent être multiples ; mentionnons les techniques de changement d'échelle ("down/upscaling"), la modélisation des relations météo/activité économique, l'analyse des événements extrêmes, la gestion des risques.

Les études classiques sur l'analyse des événements extrêmes et du changement climatique ne suffisent pas à traiter l'ensemble des questions ayant un impact significatif sur les activités humaines, pas plus que la météorologie n'épuise le sujet. Il apparaît donc comme nécessaire de développer des activités axées sur le climat passé et surtout présent, afin d'identifier et d'étudier les variabilités (non nécessairement extrêmes) de forte importance sur la société.

Responsables : Filipe Aires et Philippe Naveau.

Métriques :

L'analyse des sorties de modèles climatiques est toujours davantage confrontée à l'augmentation de la taille des bases de données à traiter, avec une quantité d'observations toujours plus grande et la nécessité de confronter les modèles entre eux (cf. simulations IPCC, AMIP, CFMIP, etc...). Ces études de validation, de diagnostic ou d'analyse ont de plus en plus recours aux statistiques. Le besoin de disposer de critères objectifs quantifiant la « distance » entre deux jeux de données a donné naissance au concept de « métriques ». Il s'agit d'outils quantifiant la similarité ou les différences existant entre plusieurs modèles ou jeux d'observations. Elles peuvent se résumer à une information moyenne (i.e. reproduction du cycle saisonnier) ou peuvent être directement reliées aux processus physiques (i.e. quantification de la sensibilité d'une variable physique à une autre variable physique). De tels outils sont déjà employés dans certains centres opérationnels, de manière très semblable aux « scores » de qualité de prévision du temps, et des actions allant dans ce sens naissent actuellement à l'IPSL, ce qui doit permettre d'orienter la communauté scientifique vers l'utilisation de métriques pertinentes. Le groupe SAMA pense pouvoir jouer un rôle important dans la définition de métriques rigoureuses.

Outre la validation, le diagnostic et l'analyse des sorties de modèles numériques, ces métriques sont applicables aux simulations multi-modèles. Elles sont aussi étroitement liées aux problèmes de sélection de modèles et aux dernières avancées sur le "model merging".

Responsables : Philippe Naveau et Filipe Aires.

Téledétection :

Le nombre de satellites d'observation de la Terre toujours croissant, munis d'instruments de plus en plus sophistiqués et possédant un nombre de canaux plus élevés rendent cruciaux l'accès à des méthodes d'inversion innovantes. Les méthodologies de téledétection seront donc un thème essentiel de réflexion pour SAMA. Le schéma de fonctionnement actuel demeure valable pour la suite : les membres du groupe SAMA continueront à développer des techniques sur des applications particulières, et ces exemples alimenteront les discussions avec les membres de l'IPSL dans son ensemble. Des thèmes nouveaux apparaîtront en adéquation avec les préoccupations de la communauté. Un exemple parmi d'autres : le développement de méthodologies d'inversion utilisant conjointement les informations de plusieurs capteurs ou de différentes longueurs d'onde.

Responsable : Filipe Aires.

Incertitudes et valeurs extrêmes :

Quelle est la probabilité pour que le volume total des précipitations sur toute une région dépasse un seuil particulier ? Les événements extrêmes ont-ils tendance à survenir conjointement ?

Répondre à ce type de questions est difficile, car l'incertitude liée aux événements rares est élevée, des dépendances spatio-temporelles existent et l'hypothèse de stationnarité est rarement satisfaite en pratique. Les techniques classiques de prédiction fournies par les statistiques spatiales et temporelles ne sont pas d'un grand secours : elles ne visent en effet qu'à estimer un comportement moyen et calculer des variances. Celles-ci peuvent induire des biais importants lors de la quantification des incertitudes des événements les plus extrêmes. Mathématiquement, des récentes recherches en probabilité, en particulier en théorie des valeurs extrêmes multivariées fournissent aux statisticiens un cadre théorique pour proposer et analyser des nouveaux modèles de valeurs extrêmes.

Dans le contexte de sa prospective, SAMA a identifié quatre thèmes de recherche sur l'analyse des valeurs extrêmes.

1) Interpolation spatiale et extrapolation temporelle de valeurs extrêmes

D'un point de vue théorique, il apparaît comme nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'interpolation spatiale et d'extrapolation temporelle de valeurs extrêmes. Il faut pour cela surmonter les difficultés suivantes :

- les dépendances spatiales des extrêmes doivent être impérativement prises en compte ;
- plus généralement, la prédiction d'événements rares passe par une modélisation stochastique complète du phénomène étudié ;
- la gamme de modèles stochastiques spatiaux extrêmes doit être enrichie afin de pouvoir rendre compte de la diversité des phénomènes environnementaux étudiés ;
- des outils d'inférence appropriés doivent être mis au point de façon à restituer correctement la répartition spatiale des fortes valeurs observées

2) Downscaling des valeurs extrêmes

Passer d'une information grande (ou moyenne) échelle à une connaissance locale reste un problème difficile, mais dont le traitement s'avère indispensable pour les études d'impacts. Dans ce contexte, SAMA a organisé un groupe de lecture sur ce sujet afin de pouvoir mieux identifier les synergies au sein de l'IPSL et les possibles collaborations nationales et internationales concernant les recherches statistiques sur le downscaling. Pour aller plus loin dans son implication, SAMA propose de s'intéresser aux downscaling de valeurs extrêmes dans les prochaines années, en particulier de mieux identifier le transfert d'incertitudes entre les différentes échelles lié au comportement des extrêmes. Dans ce cadre, SAMA souhaite appuyer sur ses collaborations avec les statisticiens et probabilistes des valeurs extrêmes.

3) Sélection de modèles prenant en compte les valeurs extrêmes

La sélection de modèles est un problème récurrent et important en statistique, qui devrait prendre une place prépondérante au sein des sciences de la Terre durant les prochaines années. La théorie des valeurs extrêmes, lorsque les variables aléatoires étudiées sont des maxima, des minima ou des dépassements de seuil, peut permettre d'apporter un cadre probabiliste rigoureux au traitement de ces questions. Une collaboration forte avec la communauté mathématique universitaire est nécessaire pour avancer sur cette thématique.

4) Plan d'expérience pour les valeurs extrêmes

Une planification de campagne d'observations et de mesure, dont l'objet, par exemple, pourrait être l'étude de pics élevés, représente un problème difficile de recherche statistique. SAMA pourrait apporter sur cet aspect une expertise utile. La communauté statistique pourrait être intéressée par les développements théoriques de plans d'expérience consacrés aux valeurs extrêmes.

Responsable : Philippe Naveau

Développement d'un logiciel d'aide à l'assimilation de données (YAO) :

Depuis 8 ans l'équipe MMSA (Modélisation et Méthodes Statistiques, LOCEAN) développe YAO (Soutient CNES, DGA), un générateur de code d'aide à la simulation, à l'inversion et à l'assimilation des données. Ce thème, qui doit permettre de faire progresser d'une manière significative l'utilisation de l'assimilation des données en géophysique, fait partie des priorités de MMSA pour la période 2008-2012. En particulier, il s'agira de doter le simulateur de nouvelles fonctionnalités : parallélisation automatique des codes générés, couplage de modèles, introduction de nouvelles fonctions de coût.

Accompagnement : DGA (Sinobad) et demande LEFE.

Responsable : Sylvie Thiria

Assimilation d'observations et prévisibilité :

Autant que l'on puisse dire aujourd'hui, il restera toujours une incertitude significative sur l'état futur de l'atmosphère. Il restera aussi toujours une incertitude sur l'état présent qui, même numériquement 'petite', sera importante dans la mesure où elle conditionnera en grande partie l'incertitude future. C'est dans ce contexte général d'incertitude que seront poursuivies les recherches actuelles sur l'assimilation des observations et la prévisibilité. Plus précisément, ces recherches auront pour objectif, non pas tant la détermination de l'état de l'atmosphère, présent ou futur, mais surtout la détermination de l'incertitude associée. Cet objectif entre tout naturellement dans le cadre de l'*estimation*

bayésienne, dont le but est de déterminer la distribution de probabilité de l'état du système, conditionnée aux informations dont on dispose à son sujet. C'est dans la perspective générale de l'estimation bayésienne que seront menées les recherches envisagées ici.

En ce qui concerne la description d'une distribution de probabilité pour l'état de l'atmosphère, il ne semble pas qu'il y ait d'autre moyen pratique (et numériquement utilisable) qu'un ensemble d'états censé échantillonner la distribution en question. C'est donc sur le développement de *méthodes d'ensemble*, aussi bien pour l'assimilation que pour la prévision, que seront axées nos recherches. On sait que les méthodes d'ensemble existent déjà, pour la prévision météorologique (systèmes de prévision d'ensemble de nombreux services météorologiques) que pour l'assimilation (filtre de 'Kalman' d'ensemble et filtres particuliers, ceux-ci n'existant à ce jour qu'au stade de la recherche). Il peut être utile de rappeler ici que les dimensions des ensembles produits par ces différents systèmes d'assimilation et de prévision sont comprises entre quelques dizaines et quelques centaines. Aussi ridiculement petites que ces valeurs puissent paraître au regard de la dimension d'un modèle numérique, l'expérience prouve qu'elles suffisent à apporter des informations utiles et non triviales. Certains éléments conduisent même à penser que des dimensions plus grandes, à supposer qu'elles soient techniquement accessibles, n'apporteraient pas d'améliorations significatives dans la qualité des assimilations ni (encore moins) dans celle des prévisions.

Un premier thème de recherche sera le développement de méthodes d'ensemble pour l'assimilation variationnelle. L'assimilation variationnelle est utilisée opérationnellement dans plusieurs des grands services météorologiques mondiaux (CEPMMT, Météo-France, Meteorological Office britannique, ...). Elle permet de propager l'information contenue dans les observations à la fois vers le passé et l'avenir. Elle permet surtout de prendre en compte des dépendances statistiques temporelles entre les erreurs affectant les différentes données (observations, mais aussi modèle assimilateur). L'assimilation d'ensemble n'existe à présent que sous forme séquentielle, qui ne permet pas la propagation de l'information vers le passé (en l'état actuel du moins), et qui ne peut pas permettre, du fait même de son principe, la prise en compte de dépendances statistiques temporelles. On étudiera la possibilité de concilier les avantages de l'assimilation variationnelle et de l'estimation d'ensemble. Les travaux menés à l'IPSL, en liaison avec des services météorologiques, en particulier Météo-France, porteront surtout sur les aspects fondamentaux du problème, et tout d'abord la possibilité d'obtenir une estimation bayésienne par assimilation variationnelle.

Un second thème général sera celui de la validation et des limites des méthodes d'ensemble. La validation même d'une prévision probabiliste (par opposition à une prévision déterministe) soulève un certain nombre de questions conceptuelles. Celles-ci sont maintenant résolues pour l'essentiel, mais des questions restent quant aux meilleures méthodes à utiliser pour valider les méthodes d'estimation ensemblistes (qu'il s'agisse d'assimilation ou de prévision). Une autre question est celle des limites des méthodes d'ensemble. Plus la dimension des ensembles produits est grande (et plus grande est en conséquence la résolution numérique des probabilités prévues), plus grande est la dimension de l'échantillon de vérification nécessaire pour valider le processus ensembliste. Les limites sont ici réelles, et il faut trouver un compromis entre deux tendances antagonistes : une résolution numérique élevée pour les probabilités prévues, et un ensemble de validation suffisamment petit pour qu'on puisse l'obtenir en pratique.

D'autres questions, qui ne sont pas directement liées à l'ensemble ensembliste, ou bayésien, de l'assimilation, seront étudiées dans le cadre général de l'assimilation. L'une d'elles est les interactions entre les échelles spatiales de l'assimilation. Jusqu'à quel degré la connaissance des grandes échelles de l'écoulement, et de leur évolution temporelle, permet-elle la détermination des petites échelles ? Cette question a évidemment une importance capitale pour l'utilisation des observations, et la définition des systèmes d'observation. Elle constitue un complément, qui prend explicitement en compte la dynamique de l'écoulement, à

la question du ‘downscaling’ mentionnée plus haut. La question réciproque (jusqu’à quel degré la connaissance des petites échelles permet-elle la détermination des grandes échelles ?) est plus académique, mais son intérêt fondamental est tout aussi grand. Ces questions seront étudiées, par des études théoriques et par le moyen de simulations numériques effectuées sur des ‘observations’ synthétiques, dans le contexte qui est maintenant le plus significatif, celui de la météorologie à méso-échelle.

On étudiera également les possibilités d’extension de l’assimilation variationnelle à de longues périodes de temps, en augmentant progressivement la longueur de la fenêtre d’assimilation. Les résultats très prometteurs obtenus à ce sujet il y a plus de dix ans (Pires, Vautard, Swanson) n’ont jamais été valorisés, et le temps est venu de le faire.

Responsable : Olivier Talagrand

En dehors de ces travaux, de nature essentiellement méthodologique, on poursuivra les recherches menées sur différentes applications de l’assimilation. On mentionne particulièrement l’assimilation d’observations de la chimie atmosphérique (responsable S. Bekki), et l’identification de sources de traceurs (responsable F. Chevallier).

II. Actions SAMA spécifiques.

Réunions

Le groupe souhaite poursuivre la politique d’échanges intercommunautaires, en particulier en continuant à programmer des séminaires et groupes de lectures. Un partenariat prévu avec la Société Française de Statistiques (initiative de Philippe Naveau) permettra non seulement l’organisation de réunions croisées, mais aussi une diffusion de savoir bénéfique aux deux parties.

Enseignements

Le groupe compte organiser une ou deux écoles SAMA en quatre ans. Les thèmes ne sont pas encore arrêtés, bien que le sujet des *métriques* soit évoqué. Compte tenu du budget relativement élevé nécessaire à de telles manifestations, le groupe pourrait avoir recours aux enveloppes de l’IPSL dédiées aux thèmes éducatifs.

Par ailleurs, Philippe Naveau va poursuivre ses enseignements à l’École Centrale de Marseille et à Toulouse, tandis que Filipe Aires le fera encore à l’ENSTA. Olivier Talagrand va à nouveau donner un cours sur la modélisation numérique de la circulation atmosphérique et l’assimilation de données dans le cadre de l’École Doctorale des Sciences de l’Environnement d’Ile-de-France. Sylvie Thiria va participer à l’organisation et aux enseignements d’une nouvelle école ENVI/STAT, au Moyen Orient cette fois. Par ailleurs, une autre école d’été se prépare à l’échéance d’environ deux ans dans le cadre LEFE-ASSIM. Elle sera précédée en décembre prochain d’une réunion générale au niveau national.

Il est envisagé d’organiser une ou plusieurs sessions à l’Assemblée Générale annuelle de l’EGU (European Geosciences Union).

E : Prospective du groupe de travail IPSL, « Influence de la Stratosphère sur le Climat »

Jusqu'au milieu des années 1990, la communauté des scientifiques étudiant le climat, sa variabilité et son évolution future était largement distincte de celle étudiant la stratosphère. La vision commune justifiant le peu d'intérêt des climatologues était que la stratosphère ne représente que 10 à 20% de la masse atmosphérique, et ne pouvait avoir une influence substantielle sur la troposphère. De ce point de vue, la stratosphère ne représente un intérêt que parce qu'elle contient la plupart de l'Ozone qui nous protège du rayonnement ultraviolet émit par le soleil.

Il devient de plus en plus clair, cependant, que non seulement la variabilité dans la troposphère (due à la variabilité non-linéaire ou à la variabilité des températures de surface) force la variabilité de la stratosphère, mais aussi que les variations dans la stratosphère affectent la troposphère. Cet effet en retour a au moins deux origines. La première est radiative et provient du fait que la stratosphère contient des gaz importants pour la chimie mais aussi pour le bilan radiatif de l'atmosphère, en particulier l'Ozone et la vapeur d'eau. La seconde est dynamique, et provient du fait que les changements de la circulation stratosphérique ayant une dynamique spécifique, comme l'Oscillation Quasi Biennale (OQB) ou les réchauffements stratosphériques soudains, peuvent se propager vers le bas et créer des changements significatifs dans la circulation troposphérique et le climat. Il faut souligner que la composition chimique et la dynamique sont fortement couplés dans la stratosphère.

Beaucoup d'institutions de recherche du climat dans le monde ont accru ces dernières années leurs efforts dans ce domaine. En accord avec cette évolution, le L'IPSL en a fait une de ces priorités pour les années à venir. Comme cette discipline requiert de fortes interactions entre spécialistes de la dynamique (surtout le LMD), du rayonnement et de la chimie atmosphérique (SA et LSCE), il est naturel de continuer à fédérer cet effort de recherche. A titre d'exemple des interactions mises en place, les études relatives au devenir de l'Ozone stratosphérique, en particulier via la modélisation de grande échelle et le développement de la version chimie-climat du GCM stratosphérique implique des chercheurs du LMD, du SA et du LSCE. De même, ce modèle va être utilisée conjointement par le LMD et le SA pour étudier l'influence du soleil sur le climat.

Cet effort de recherche est mené en interaction avec nombre de programmes internationaux, tels que SPARC ou CCMval, il est aussi financé en partie par des programmes Européens tels que SCOUT, et sera probablement financé par les programmes Européen du FP7 publiés en Nov. 2007 intitulés "New components in Earth System Modelling for Better Climat Projection" (ENV.2008.1.1.4.1) et "Climate Chemistry interaction in the Stratosphere related to Ozone depletion" (ENV.2008.1.1.2.1). A l'échelle nationale, sur le format de la collaboration sur les GCMs LMDz et Arpèges, des collaborations étroites se mettent en place avec Météo-

France pour comparer et valider les modules chimiques des modèles LMDz-Reprobus et d'Arpège-MOCAGE. Notre modèle couplé, utilisé pour étudier les interactions entre les cycles du Soleil et le Climat (Matthes et al. 2004), devrait renforcer la position de l'IPSL dans le projet SOLARIS (voir WMO-SPARC). Il est notable, que ce dernier point soit encore fortement débattu en France aujourd'hui, et qu'à l'échelle internationale le GIEC conclut à l'existence d'une possible amplification du forçage solaire durant certaines grandes transitions climatiques, même si le mécanisme amplificateur n'a toujours pas été élucidé.

D'un point de vue plus scientifique, les efforts en terme de modélisation dans les années à venir porteront sur différents volets qui relèvent d'une part de la dynamique et d'autre part de la chimie et du rayonnement. Les développements en terme de dynamique sont plutôt orientés vers l'analyse de processus. Les développements en terme de chimie/rayonnement sont plutôt orientés vers la réalisation de scénarios visant à estimer la reconstruction future de l'Ozone stratosphérique, et le rôle de la variabilité solaire.

Aspects dynamiques.

Les ondes équatoriales

La dynamique de la stratosphère équatoriale et les échanges de constituants mineurs à la tropopause équatoriale sont en grande partie contrôlés par les ondes planétaires équatoriales (Andrew et al. 1987). Bien que souvent observées (Hertzog et Vial 2002, Le Sommer et al. 2005), la caractérisation systématique du cycle de vie de ces ondes dans la stratosphère reste encore à faire. En combinant des analyses statistiques faites sur les réanalyses ERA-40 et sur les simulations avec LMDz-Strato nous comptons faire une climatologie du cycle de vie de ces ondes et nous en servir pour améliorer leur représentation dans LMDz. Une telle validation est un passage obligé vers une simulation réaliste de l'OQB par ce modèle. Un résultat préliminaire est donné sur la Figure 2.

L'Oscillation Quasi-Biennale

Le fait que l'oscillation quasi-biennale stratosphérique puisse jouer un rôle sur le climat troposphérique est assez bien établie. Pourtant, sa simulation par les modèles de circulation général reste souvent délicate. Il est essentiel que l'IPSL sache rapidement si le modèle LMDz est capable de reproduire ce mode de variabilité. Pour atteindre cet objectif, nous allons devoir augmenter encore plus la résolution verticale du modèle, tester les paramétrisations de la convection qui excitent le plus d'ondes équatoriales, et ajuster les paramétrisations des ondes de gravité.

Les ondes de Gravité

Si il est bien établi que les ondes de gravité transportent de la quantité de mouvement sur de grandes distances, et pilotent la circulation de Brewer Dobson, une partie de l'oscillation quasi-biennale, et la phase d'ouest de l'oscillation semi-annuelle, elles ne peuvent qu'être paramétrisées dans les GCM. A l'heure actuelle cela est fait de façon très schématiques en ce qui concerne l'identification des sources de ces ondes, et en ce qui concerne leur amplitude lorsqu'elles entrent dans la stratosphère. Pour remédier en partie à ces défauts, nous allons ré-écrire une paramétrisation de ces ondes contenant

un spectre beaucoup plus riche que la paramétrisation actuelle. Nous allons aussi utiliser de façon systématique les vols de ballons fait durant la campagne Vorcore et comparer directement à ces données, les flux prédits par cette paramétrisation.

Aspects chimiques et radiatifs

La reconstruction de l'Ozone Stratosphérique au 21ème Siècle

Tous les quatre ans, sous l'égide du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), la communauté prépare un rapport d'évaluation sur l'évolution à long terme de l'ozone stratosphérique. L'IPSL via ce groupe de travail a été le seul institut de recherche Français à pouvoir réaliser les longues simulations interactives de l'évolution de l'ozone dans un climat changeant pour la dernière évaluation PNUE/OMM de 2006. Une part importante de notre effort dans les prochaines années est de poursuivre ces simulations, en couvrant de façon encore plus exhaustive le 20ème siècle. Mais aussi en fournissant à l'IPSL et à la communauté internationale, les simulations pour le 21ème siècle de l'évolution de l'Ozone. Ces simulations nécessitent de corriger un certain nombre de biais du modèle en améliorant un certain nombre de paramétrisations, en particulier celles du schéma radiatif, et d'améliorer le module chimique et la paramétrisation des ondes. ,

Soleil et le climat

La question de l'influence de l'activité solaire sur l'atmosphère terrestre revient régulièrement dans le débat sur les changements climatiques. Les mécanismes exacts de l'action solaire sur l'atmosphère sont complexes et mal connus, et pour l'instant, aucun consensus général n'existe. Le dernier rapport GIEC conclut à l'existence d'une possible rétroaction fortement positive mais le mécanisme amplificateur n'a toujours pas été élucidé. Si le rôle des gaz à effet de serre dans le réchauffement actuel semble bien avéré, le signal solaire domine dans les archives climatiques. Nous allons considérer le problème dans sa généralité, en étudiant à la fois les forçages externes (Soleil et volcanisme) et les forçages anthropiques.

L'atmosphère est influencée par le Soleil à différentes échelles de temps, de quelques secondes à quelques siècles, en passant par le cycle de 11 ans. Par la présence de l'Ozone, la stratosphère est la région où ces effets radiatifs et photochimiques se font sentir le plus directement et fortement. Cependant, ils s'y combinent à la dynamique et c'est à travers cette combinaison que le climat au sol peut être affectée. Il est aussi fort possible que la réponse climatique à la variabilité solaire (variations de l'irradiance totale, variations spectrales, variations dans la distribution spatio-temporelle d'énergie solaire reçue par la Terre) puisse être amplifiée par la réponse de la photochimie de la stratosphère. Il va donc nous falloir inclure ces effets dans le modèle couplé de chimie-climat LMDZ-REPROBUS avec pour commencer un schéma radiatif avec des bandes plus nombreuses dans le domaine de l'UV-visible et un schéma affiné de photolyse pour la photochimie

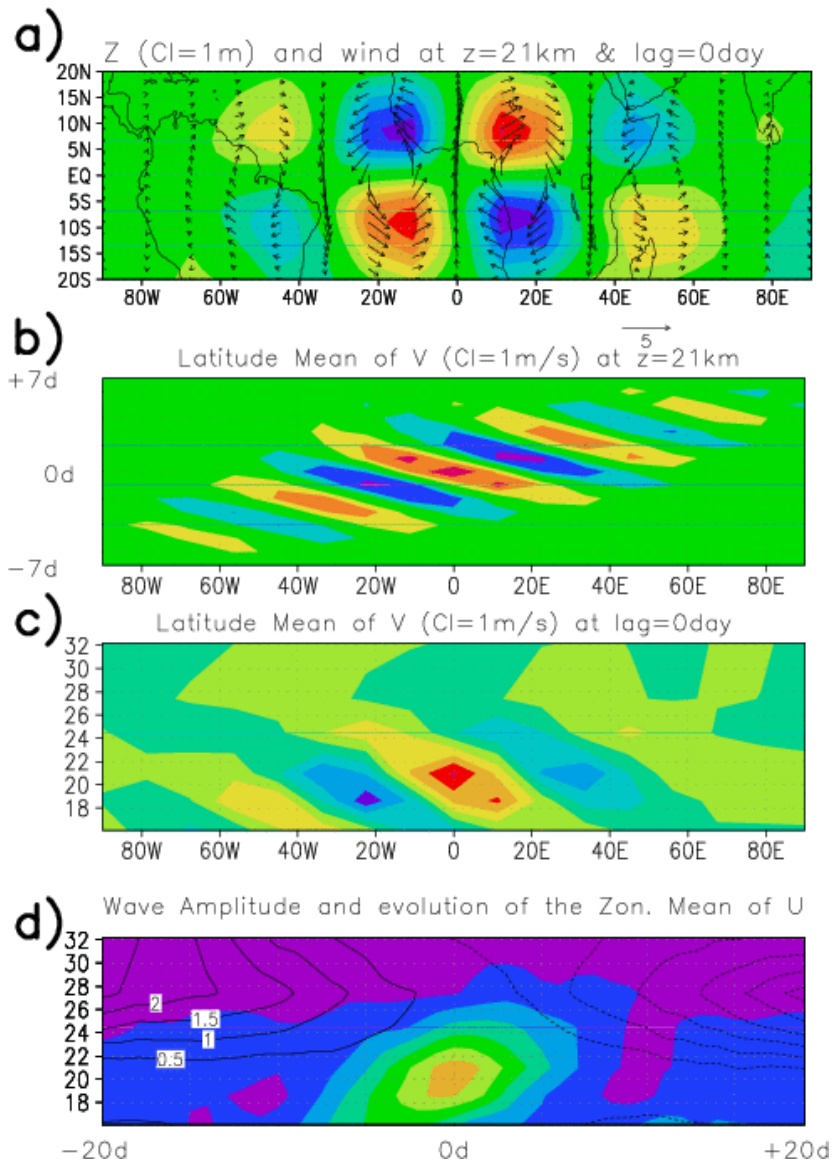


Figure 2: Structure caractéristique des paquets d'ondes de Rossby-gravité pénétrant dans la basse stratosphère équatoriale et d'après les réanalyses ERA40. Les cartes sont des composites sur des dates sélectionnées à partir d'un index à 22km inspiré de la théorie des ondes équatoriales. Cette index mesure l'entrée des ondes de Rossby-gravité dans la basse stratosphère.

Interactions Climat-Environnement-Société (ICES)

Rédacteurs : Benjamin Sultan (LOCEAN) et Pascal Yiou (LSCE)

○ **Préambule**

Ce groupe de travail était intitulé « Impacts » à l'origine. Ce mot est très connoté suivant ses utilisateurs, et peut posséder des sens très précis et différents suivant les communautés présentes à l'IPSL. Si on s'en tient à une définition du Larousse, qui peut servir d'étalon pour établir un langage commun, un impact est « une collision de deux ou plusieurs corps. Au figuré : tout effet direct, contrecoup d'une action ». La définition du Petit Robert n'est pas très différente. Dans tous les cas, les discussions qui ont eu lieu autour de ce groupe de travail ont mis en lumière des effets beaucoup plus nuancés et complexes que la définition impartiale du dictionnaire. Nous préférons donc parler d'interactions (ou interfaces) climat-environnement-société (ICES). Cette notion d'interface met plus en avant la force de l'IPSL avec des compétences pluridisciplinaires (biogéochimie, processus de surface, dynamique atmosphérique et océanique, etc.) et grâce aux collaborations extérieures (économie, agronomie, écologie, etc.) qui permettent d'aborder la problématique de façon totalement couplée.

Ce document a été réalisé à la suite d'un sondage auprès des personnes de l'IPSL qui ont manifesté leur intérêt auprès de ce groupe de travail. Une réunion a été organisée le 28 février 2008 au LSCE.

○ **Les questions de recherche pour demain**

▪ Thèmes généraux

Nous avons dégagé trois types de thèmes scientifiques et fondamentaux qui constituent le socle de la communauté ICES de l'IPSL. Ces thèmes ont émergé lors de réunions et d'échanges entre les personnes qui se sont inscrites à ce groupe de travail.

- Les interactions entre société et climat/environnement. Dans ce thème, l'homme est central et l'environnement n'est qu'un facteur parmi les autres déterminants sociétaux. De nombreuses questions y émergent abordant notamment la manière dont (i) le climat et ses extrêmes peuvent être affectés par l'occupation des sols, en modifiant les propriétés d'albédo, de rugosité et d'échanges hydriques ; (ii) l'effet de l'aménagement des sols et des rivières peut changer la dispersion de polluants et l'érosion jusqu'aux écosystèmes côtiers ; (iii) la pression démographique affecte les ressources en eau du sol ; (iv) les changements climatique et environnemental influencent la santé. Un autre aspect important de ce thème est l'évaluation de la valeur de l'information climatique pour la prise de décision agricole aussi bien au cours de la saison agricole (prévision saisonnière) qu'à long terme (changement climatique). Son traitement nécessite un travail pluridisciplinaire en collaboration avec des sociologues (enquêtes de terrain auprès des acteurs, diffusion de l'information climatique) et des économistes (assurances, analyses coûts-bénéfices). L'évaluation de la valeur de l'information climatique est aussi importante pour l'adhésion du public aux consignes de diminution des émissions de gaz à effet de serre en général et le lien avec les

sociologues (sondages...) et les économistes est très important. Ce travail est déjà fait dans d'autres pays (USA, Canada, Angleterre...).

- Extrêmes et résilience des écosystèmes et des sociétés. Par exemple, des événements comme la canicule de 2003 en Europe font diminuer la résilience (et la résistance) des arbres aux maladies, parasites, et sécheresses, qui deviennent donc plus vulnérables au cours du temps. Il est donc important de savoir évaluer et modéliser la faculté et le temps des écosystèmes à se remettre d'un extrême. Cette question se décline avec la résilience (i) d'écosystèmes terrestres et leur biodiversité, (ii) des écosystèmes marins et les ressources halieutiques avec en particulier l'acidification des océans, (iii) des sociétés avec par exemple les problèmes de production d'énergie et de protection contre la montée des océans.
- Pour une meilleure appréciation des influences et implications des facteurs climatiques sur l'environnement (et les sociétés) il est nécessaire de prendre en compte le long terme (siècles, millénaires, cycles climatiques). Dans cette perspective de reconstruction des effets du climat sur les environnements passés, et notamment pour traiter des périodes marquées par des conditions climatiques non-actuelles (y compris Petit Age Glaciaire, Episode chaud médiéval, « optimum climatique » de l'Holocène moyen), il est nécessaire d'affiner les proxies paléoclimatiques (e.g. pollens, diatomées, foraminifères, isotopes stables, géochimie des traces, matière organique fossile,...) au-delà des « calibrations » que l'on peut faire sur l'Actuel. Par ailleurs, les reconstructions des climats du passé reposent principalement sur des indicateurs indirects (proxies) dont la réponse à un changement climatique est évaluée sur des changements moyens, alors qu'on sait assez peu de choses sur leur réponse aux extrêmes. Ce point apparaît dans les discussions d'autres groupes de travail, mais soulève une question fondamentale d'interaction entre climat et écosystèmes.

▪ Chantiers géographiques

Les thèmes scientifiques généraux énoncés ci-dessus se déclinent et se précisent suivant plusieurs chantiers géographiques dans lesquels sont impliqués les personnels de l'IPSL. Cette liste n'est pas exhaustive, mais reflète l'état des échanges entre les membres du groupe de travail.

Méditerranée

Le chantier méditerranéen regroupe un grand nombre de projets et d'acteurs de l'IPSL. Les questions spécifiques aux compétences de l'IPSL qui ont émergé sont :

- L'impact des crues et des tempêtes sur la biogéochimie côtière. Ceci comprend l'évaluation de l'érosion, des flux de matière et la production primaire.
- L'écologie côtière et impacts sur les écosystèmes marins, en particulier la dispersion de polluants métalliques.
- L'occupation du sol et climat. Une partie du versant méditerranéen de l'Europe est en voie de désertification avec une exacerbation liée à l'irrigation massive pour l'agriculture.
- La dynamique des populations au cours de l'histoire et sa relation avec le climat.

Ces questions motivent la multiplication de projets sur le bassin méditerranéen qui examinent toutes les facettes des changements environnementaux de cette région. Ces questions débordent largement du cadre de l'IPSL (même s'il est souvent moteur) puisqu'il s'agit souvent de projets qui mobilisent la communauté nationale.

Afrique

Le chantier africain se cristallise autour des sites ateliers AMMA, et sur d'autres sites étant également l'objet d'études de longue haleine (Sénégal, Sahara, etc.). AMMA, l'ANR et le GIS-CES appuient ces recherches, de façon plus ou moins croisée. Les questions abordées en lien direct avec le GT ICES concernent notamment:

- L'impact de la pression démographique sur les ressources en eau souterraines et sur la pérennité des écosystèmes qui en dépendent.
- Les impacts du climat (variabilité et changement climatique) sur l'agriculture, les ressources en eau et la santé.
- L'étude de la valeur de l'information climatique pour l'aide à la décision agricole
- L'impact des changements d'occupation du sol sur le climat.

La suite du projet AMMA est en cours de discussion, et devrait engager l'IPSL dans cette région pour les années à venir. Les aspects ICES seront très vraisemblablement le cœur de la suite qui sera donnée au projet AMMA avec une importance particulière sur les prévisions saisonnières et décennales et leur appropriation par les acteurs locaux.

D'autres projets conduits notamment en Afrique orientale (ANR ESCARSEL, CORUS RESON) incluent une composante long terme sur le dernier millier d'années, et visent à mieux comprendre divers types d'impacts du climat sur le milieu et les populations.

Amérique du Sud

Le chantier sur l'Amérique du Sud se focalise sur les interactions entre l'occupation des sols, le climat et l'hydrologie. Il est porté notamment par le projet FP7 CLARIS LPB, piloté par l'IPSL, qui a pour objectifs de prévoir les impacts régionaux du changement climatique sur le bassin de la Plata (LPB-La Plata Basin) et de suggérer des stratégies d'adaptation pour l'usage des sols, l'agriculture, le développement rural, la production hydroélectrique, le transport fluvial et les écosystèmes en plaines inondées. Sur les mêmes thématiques, l'IPSL est également moteur dans le projet de création de deux Laboratoire Mixte International (LMI) l'un basé en Argentine sur l'étude du climat et de ses impacts (le LECI), et l'autre s'appuyant essentiellement sur le Brésil et le Chili, et portant sur Paléoclimatologie tropicale : Traceurs et variabilités (PALEOTRACES).

Une collaboration a également été mise en place entre l'IPSL, l'Argentine et le Chili pour l'étude de l'augmentation du rayonnement UV lors du passage de masses d'air appauvries en ozone au sud du continent pendant le printemps austral.

L'étude des rétroactions entre l'occupation du sol et le climat est particulièrement importante dans cette région. En effet elle subit une déforestation massive en Amazonie, ce qui peut modifier les modes de variabilité du climat, en particulier ENSO. Cette modification semble avoir des répercussions négatives sur les rendements agricoles, et donc les économies locales. En outre, les changements du climat peuvent aussi avoir une influence sur l'érosion et les transferts de matière à diverses échelles spatiales et temporelles.

Le chantier Amérique du Sud ne se limite pas au continent mais concerne également l'océan et notamment l'upwelling du Pérou-Chili qui est une région clé dotée d'un écosystème très riche (1% de la surface des océans pour 20% des captures globales de poissons). Dans ce cadre, plusieurs projets ANR financés ou soumis, dans lesquels l'IPSL est fortement impliqué, se focalisent sur l'étude du forçage atmosphérique et océanique de grande échelle dans le Pacifique Sud Est dans des scénarios IPCC, de son influence sur la circulation océanique à des échelles spatio-temporelles pertinentes pour le recrutement de petits pélagiques (sardines, anchois) et de son impact sur les ressources halieutiques.

Europe

Le chantier européen rassemble une grande diversité de questions scientifiques. L'influence de l'usage des sols sur les climats régionaux et leurs extrêmes (vagues de chaleur et sécheresses) est un défi scientifique sociétal majeur. Les impacts étudiés de ces événements incluent la production d'énergie (via le refroidissement des centrales nucléaires ou l'énergie éolienne), la productivité primaire des forêts (et leur aptitude à absorber le CO₂ atmosphérique), la productivité agricole. La limitation possible de l'irrigation par épuisement des nappes phréatiques (sous l'effet combiné des pressions démographiques, industrielles et agricoles et du changement climatique) peut également avoir un impact sur cette dernière, avec une rétroaction éventuelle sur le climat.

La seconde priorité identifiée est celle de la qualité de l'eau et de la dispersion de polluants, en réponse au changement climatique et l'usage des sols. Le chantier du bassin de la Seine est particulièrement fédérateur pour ces projets d'hydrologie, et possède beaucoup d'intersections avec la fédération FIRE.

La troisième priorité concerne les impacts sur la santé du changement climatique. Nous avons identifié trois thématiques liées à la santé : l'évaluation du risque d'allergies liées aux modifications de la phénologie de plantes graminées, le risque de cancer de la peau avec l'évolution des périodes de ciel clair et de la charge en aérosols, et les risques de problèmes prénataux liés à la pollution urbaine. Cette priorité fait largement appel à des compétences extérieures à l'IPSL (allergologues, dermatologues, obstétriciens...), et se base sur les travaux du GIS « Climat Environnement Société ».

Hautes latitudes (Arctique et Antarctique)

La zone arctique regroupe la calotte de glace du Groenland et un grand réservoir de méthane. C'est l'endroit où se jettent quelques uns des plus grands fleuves de la planète (Léna, Ienisseï, Amour). L'écologie des zones de hautes latitudes a donc de fortes interactions avec le climat de la planète. Ce chantier comporte des études de la stabilité de la calotte du Groenland et les interactions entre sa disparition et le climat planétaire. Le changement climatique peut affecter l'hydrologie des sols et des fleuves, et la stabilité du permafrost en Arctique, ce qui a des répercussions sur les infrastructures locales (déstabilisation des sols) et le dégagement potentiel de grandes quantités de méthane dans l'atmosphère.

○ **Les outils, les moyens et les compétences**

Les compétences

L'IPSL possède toutes les compétences en termes d'expertise sur le climat et les écosystèmes. Il est très bien placé dans les collaborations sur des projets en hydrologie (modélisation et expérimentation). En revanche, l'IPSL fait appel à des

collaborateurs « extérieurs » pour les interfaces avec l'économie et la société, et la santé. Dans le premier cas, ces collaborateurs (CIRED, INRA, CIRAD) ont une longue histoire de projets communs, en revanche, sur les thèmes de la santé, les collaborations sont assez nouvelles.

Les données

Ce thème a un grand besoin en expérimentation de terrain et demande souvent la mise en place de protocoles spécifiques, autant pour la caractérisation de marqueurs biologiques des conditions environnementales que pour la compréhension de phénomènes et processus qui gouvernent la relation climat-environnement. De ce point de vue, il est nécessaire de remettre à l'honneur des activités d'observation et de suivi de nombreux paramètres et indicateurs des conditions environnementales. Parmi ces indicateurs, les données satellitaires, avec pour certains capteurs spatiaux, des séries de données de plus de vingt années, peuvent fournir des informations essentielles pour les études d'impacts (usage des sols, dynamique de la végétation, caractérisation des sols à travers leur état hydrique et leur matière organique, incendies, risques d'inondation, etc...).

Il y a un besoin de faire converger les sites de mesures environnementales et ceux sur les impacts sur le long terme. Cela a été notamment exprimé pour la suite du projet AMMA via la création d'ORE pluridisciplinaires.

La création d'une base de données climatiques, environnementales et sociétales est souhaitable au sein de l'IPSL. Une telle base de données devrait en particulier inclure les simulations numériques régionales et l'ensemble des données sociétales, économiques et agronomiques collectées pendant les projets en cours.

Les modèles

Le thème est utilisateur de simulations numériques lourdes, dont certaines sont effectuées par ailleurs (en particulier en coordination avec le pôle de modélisation). Certaines simulations spécifiques sont envisagées dans ce thème en particulier pour tester l'influence de l'usage des sols avec des zooms sur des zones bien définies, mais elles ne sont pas nécessairement « dimensionnantes » pour les supercalculateurs mais plutôt sur le stockage des résultats (aux échelles quotidiennes). Il doit être possible d'utiliser une hiérarchie de modèles, entre le modèle de l'IPSL en version zoomée, et des modèles régionaux (de type MM5). Une coordination et un archivage des sorties de modèles est sans doute nécessaire.

Expertise transversale

Le groupe de travail ICES fait largement appel aux compétences synthétisées dans les autres groupes de travail. En particulier, le développement de modèles et techniques statistiques se fait en lien avec en lien avec le pôle SAMA et GT4 sur la régionalisation.

○ **Rôle et place pour l'IPSL dans la communauté nationale et européenne**

Les thèmes abordés dans le GT ICES sont repris dans des projets en cours, acceptés ou déposés dans les appels d'offre de la communauté européenne (FP6 & 7), l'ANR et le GIS « Climat-Environnement-Société ». Nous ne listerons pas les autres types de projets.

La constitution de ce GT est aussi motivée par le prochain rapport du GIEC et son volet sur les impacts du changement climatique. L'IPSL a été moteur dans le rapport

sur l'état de l'art scientifique, et peut prétendre contribuer à celui des impacts socio-économiques grâce à une synergie autour de sa pluridisciplinarité.

FP6 & 7:

AMMA (Mousson africaine et impacts socio-économiques), GEMS, MACC, GEOMON, CLARIS, CLARIS-LPB, CENSOR, E2-C2 (Modélisation statistique des événements extrêmes et leur impact sur l'économie), ACQWA (Extrêmes climatiques, hydrologie et avalanches dans les Alpes)

ANR:

AUTREMENT, Streams, BIOMET, CLIMAFLU, ESCARSEL (Climat depuis l'an mil), OPHELIE (Histoire et climat), DIVA (Interaction surfaces continentales & climat), SAHELP, ANR PCCC (Peru-Chile Climate Change), PEPS (Peru Ecosystem Projection Scenario, soumise mars 2008), ORACLE-O3 France (année polaire internationale).

GIS:

Regyna (Régionalisation et impacts agronomiques et hydrologiques), Renasec (Influences des fluctuations climatiques sur la société), Premapol (Risques prénataux et pollution atmosphérique), Afoclim (Résilience des arbres au changement climatique), RISC-UV (Risques de cancer de la peau et changement climatique), PAC (Allergies et changement climatique)

○

○ ***Mode de fonctionnement à adopter***

La plateforme ICES

Ce GT est né d'une nécessité de répondre à des questions sociétales liées au changement climatique. Ce chapitre met en valeur les questions scientifiques générales qui y sont liées. Toutes ces questions sont l'objet d'appels d'offres variés pour les projets nationaux et européens. La constitution d'une plateforme bien identifiée à l'IPSL et à l'extérieur permettrait de se structurer pour mieux répondre aux appels d'offre et augmenter la visibilité de l'IPSL. Ainsi un groupe de travail comme SAMA serait souhaitable. L'objectif de cette plateforme serait de créer et de structurer une recherche interdisciplinaire et trans-sectorielle autour du thème ICES en s'appuyant en partie sur les recherches environnementales réalisées au sein des laboratoires de l'IPSL et sur les compétences de chercheurs de différentes disciplines (« environnement » et « non environnement »). Cette plateforme servirait donc de catalyseur pour créer une dynamique de long terme de recherche pluridisciplinaire. Au cours des dix années à venir, elle aurait de fait pour objectif d'intégrer des chercheurs d'autres disciplines afin de renforcer une approche interdisciplinaire des interactions Climat-Environnement-Sociétés. Son fonctionnement inclurait des séminaires d'intérêt général (médecins, biologistes...), des discussions sur les projets et les appels d'offre, le partage des données et méthodes, etc. Cette plateforme veillerait également à discuter et au mieux à résoudre les difficultés rencontrées dans ce thème (accès aux données, intérêt limité des autres disciplines sur ce type d'études, etc.). Au delà de son intérêt pour l'IPSL, la plateforme ICES permettrait d'identifier et formaliser des collaborations avec des laboratoires extérieurs à l'IPSL, et ainsi accroître la réactivité aux futurs appels d'offre. Elle favoriserait également le lien

avec les partenaires privés tels que CLIMPACT qui sont intéressés par les produits issus de ce GT pouvant être utilisés comme dérivés climatiques pour élaborer des contrats d'assurances par exemple.

Ce groupe de travail ICES peut faire office de vivier pour répondre aux appels d'offre du GIS « Climat Environnement Société », en suscitant des discussions interdisciplinaires liées à des questions liées aux impacts sur la société et les environnements du changement climatique. Cette fonction permettra d'accroître la visibilité de l'IPSL vers les sciences humaines et sociales (SHS) et les sciences de la vie (SDV), et ainsi permettre une meilleure valorisation de la recherche fondamentale développée par ailleurs à l'IPSL.

Besoins prioritaires pour le thème

Comme cela a été évoqué à plusieurs reprises, ce GT est caractérisé par sa pluridisciplinarité. Dans de nombreux cas, certaines disciplines ne sont pas représentées au sein de l'IPSL (l'économie, la santé et l'écologie). Il serait souhaitable, dans le cadre d'une prospective à 10 ans et sur le modèle de grands instituts étrangers comme le PIK (Postdam Institute for Climate Impact Research) et l'IRI (International Research Institute for Climate and Society), de réfléchir à l'accueil et/ou au recrutement de chercheurs venant de ces communautés et ayant le désir de collaborer activement avec l'IPSL autour du thème ICES. Ce recrutement pouvant être décliné à deux niveaux : celui des jeunes chercheurs amenant des compétences neuves à l'IPSL (modèles de croissance de plante, modélisation épidémiologiques, etc...) et celui des chercheurs confirmés venant avec un réseau de projets et partenaires en étant capables de porter une thématique particulière au sein de l'IPSL.

Une page web sur ce thème sera bientôt mise en place par Catherine Sénior (sous la responsabilité de P. Yiou). À l'avenir, il serait utile de disposer d'un outil internet permettant le partage de données, de simulations et de méthodes des différents projets dédiés à la thématique ICES. Dans cette optique, il serait souhaitable de recruter un ingénieur, en articulation avec le pôle de données de l'IPSL.

F- Interactions Climat- Environnement-Société (ICES)

Rédacteurs : Benjamin Sultan (LOCEAN) et Pascal Yiou (LSCE)

○ ***Préambule***

Ce groupe de travail était intitulé « Impacts » à l'origine. Ce mot est très connoté suivant ses utilisateurs, et peut posséder des sens très précis et différents suivant les communautés présentes à l'IPSL. Si on s'en tient à une définition du Larousse, qui peut servir d'étalon pour établir un langage commun, un impact est « une collision de deux ou plusieurs corps. Au figuré : tout effet direct, contrecoup d'une action ». La définition du Petit Robert n'est pas très différente. Dans tous les cas, les discussions qui ont eu lieu autour de ce groupe de travail ont mis en lumière des effets beaucoup plus nuancés et complexes que la définition impartiale du dictionnaire. Nous préférons donc parler d'interactions (ou interfaces) climat-environnement-société (ICES). Cette notion d'interface met plus en avant la force de l'IPSL avec des compétences pluridisciplinaires (biogéochimie, processus de surface, dynamique atmosphérique et océanique, etc.) et grâce aux collaborations extérieures (économie, agronomie, écologie, etc.) qui permettent d'aborder la problématique de façon totalement couplée.

Ce document a été réalisé à la suite d'un sondage auprès des personnes de l'IPSL qui ont manifesté leur intérêt auprès de ce groupe de travail. Une réunion a été organisée le 28 février 2008 au LSCE.

○ ***Les questions de recherche pour demain***

▪ **Thèmes généraux**

Nous avons dégagé trois types de thèmes scientifiques et fondamentaux qui constituent le socle de la communauté ICES de l'IPSL. Ces thèmes ont émergé lors de réunions et d'échanges entre les personnes qui se sont inscrites à ce groupe de travail.

- Les interactions entre société et climat/environnement. Dans ce thème, l'homme est central et l'environnement n'est qu'un facteur parmi les autres déterminants sociétaux. De nombreuses questions y émergent abordant notamment la manière dont (i) le climat et ses extrêmes peuvent être affectés par l'occupation des sols, en modifiant les propriétés d'albédo, de rugosité et d'échanges hydriques ; (ii) l'effet de l'aménagement des sols et des rivières peut changer la dispersion de polluants et l'érosion jusqu'aux écosystèmes côtiers ; (iii) la pression démographique affecte les ressources en eau du sol ; (iv) les changements climatique et environnemental influencent la santé. Un autre aspect important de ce thème est l'évaluation de la valeur de l'information climatique pour la prise de décision agricole aussi bien au cours de la saison agricole (prévision saisonnière) qu'à long terme (changement climatique). Son traitement nécessite un travail pluridisciplinaire en collaboration avec des sociologues (enquêtes de terrain auprès des acteurs, diffusion de l'information climatique) et des économistes (assurances,

analyses coûts-bénéfices). L'évaluation de la valeur de l'information climatique est aussi importante pour l'adhésion du public aux consignes de diminution des émissions de gaz à effet de serre en général et le lien avec les sociologues (sondages...) et les économistes est très important. Ce travail est déjà fait dans d'autres pays (USA, Canada, Angleterre...).

- Extrêmes et résilience des écosystèmes et des sociétés. Par exemple, des événements comme la canicule de 2003 en Europe font diminuer la résilience (et la résistance) des arbres aux maladies, parasites, et sécheresses, qui deviennent donc plus vulnérables au cours du temps. Il est donc important de savoir évaluer et modéliser la faculté et le temps des écosystèmes à se remettre d'un extrême. Cette question se décline avec la résilience (i) d'écosystèmes terrestres et leur biodiversité, (ii) des écosystèmes marins et les ressources halieutiques avec en particulier l'acidification des océans, (iii) des sociétés avec par exemple les problèmes de production d'énergie et de protection contre la montée des océans.
- Pour une meilleure appréciation des influences et implications des facteurs climatiques sur l'environnement (et les sociétés) il est nécessaire de prendre en compte le long terme (siècles, millénaires, cycles climatiques). Dans cette perspective de reconstruction des effets du climat sur les environnements passés, et notamment pour traiter des périodes marquées par des conditions climatiques non-actuelles (y compris Petit Age Glaciaire, Episode chaud médiéval, « optimum climatique » de l'Holocène moyen), il est nécessaire d'affiner les proxies paléoclimatiques (e.g. pollens, diatomées, foraminifères, isotopes stables, géochimie des traces, matière organique fossile,...) au-delà des « calibrations » que l'on peut faire sur l'Actuel. Par ailleurs, les reconstructions des climats du passé reposent principalement sur des indicateurs indirects (proxies) dont la réponse à un changement climatique est évaluée sur des changements moyens, alors qu'on sait assez peu de choses sur leur réponse aux extrêmes. Ce point apparaît dans les discussions d'autres groupes de travail, mais soulève une question fondamentale d'interaction entre climat et écosystèmes.

▪ Chantiers géographiques

Les thèmes scientifiques généraux énoncés ci-dessus se déclinent et se précisent suivant plusieurs chantiers géographiques dans lesquels sont impliqués les personnels de l'IPSL. Cette liste n'est pas exhaustive, mais reflète l'état des échanges entre les membres du groupe de travail.

Méditerranée

Le chantier méditerranéen regroupe un grand nombre de projets et d'acteurs de l'IPSL. Les questions spécifiques aux compétences de l'IPSL qui ont émergé sont :

- L'impact des crues et des tempêtes sur la biogéochimie côtière. Ceci comprend l'évaluation de l'érosion, des flux de matière et la production primaire.
- L'écologie côtière et impacts sur les écosystèmes marins, en particulier la dispersion de polluants métalliques.
- L'occupation du sol et climat. Une partie du versant méditerranéen de l'Europe est en voie de désertification avec une exacerbation liée à l'irrigation massive pour l'agriculture.

- La dynamique des populations au cours de l'histoire et sa relation avec le climat.

Ces questions motivent la multiplication de projets sur le bassin méditerranéen qui examinent toutes les facettes des changements environnementaux de cette région. Ces questions débordent largement du cadre de l'IPSL (même s'il est souvent moteur) puisqu'il s'agit souvent de projets qui mobilisent la communauté nationale.

Afrique

Le chantier africain se cristallise autour des sites ateliers AMMA, et sur d'autres sites étant également l'objet d'études de longue haleine (Sénégal, Sahara, etc.). AMMA, l'ANR et le GIS-CES appuient ces recherches, de façon plus ou moins croisée. Les questions abordées en lien direct avec le GT ICES concernent notamment:

- L'impact de la pression démographique sur les ressources en eau souterraines et sur la pérennité des écosystèmes qui en dépendent.
- Les impacts du climat (variabilité et changement climatique) sur l'agriculture, les ressources en eau et la santé.
- L'étude de la valeur de l'information climatique pour l'aide à la décision agricole
- L'impact des changements d'occupation du sol sur le climat.

La suite du projet AMMA est en cours de discussion, et devrait engager l'IPSL dans cette région pour les années à venir. Les aspects ICES seront très vraisemblablement le cœur de la suite qui sera donnée au projet AMMA avec une importance particulière sur les prévisions saisonnières et décennales et leur appropriation par les acteurs locaux.

D'autres projets conduits notamment en Afrique orientale (ANR ESCARSEL, CORUS RESON) incluent une composante long terme sur le dernier millier d'années, et visent à mieux comprendre divers types d'impacts du climat sur le milieu et les populations.

Amérique du Sud

Le chantier sur l'Amérique du Sud se focalise sur les interactions entre l'occupation des sols, le climat et l'hydrologie. Il est porté notamment par le projet FP7 CLARIS LPB, piloté par l'IPSL, qui a pour objectifs de prévoir les impacts régionaux du changement climatique sur le bassin de la Plata (LPB-La Plata Basin) et de suggérer des stratégies d'adaptation pour l'usage des sols, l'agriculture, le développement rural, la production hydroélectrique, le transport fluvial et les écosystèmes en plaines inondées. Sur les mêmes thématiques, l'IPSL est également moteur dans le projet de création de deux Laboratoire Mixte International (LMI) l'un basé en Argentine sur l'étude du climat et de ses impacts (le LECI), et l'autre s'appuyant essentiellement sur le Brésil et le Chili, et portant sur Paléoclimatologie tropicale : Traceurs et variabilités (PALEOTRACES).

Une collaboration a également été mise en place entre l'IPSL, l'Argentine et le Chili pour l'étude de l'augmentation du rayonnement UV lors du passage de masses d'air appauvries en ozone au sud du continent pendant le printemps austral.

L'étude des rétroactions entre l'occupation du sol et le climat est particulièrement importante dans cette région. En effet elle subit une déforestation massive en Amazonie, ce qui peut modifier les modes de variabilité du climat, en particulier ENSO. Cette modification semble avoir des répercussions négatives sur les rendements agricoles, et donc les économies locales. En outre, les changements du

climat peuvent aussi avoir une influence sur l'érosion et les transferts de matière à diverses échelles spatiales et temporelles.

Le chantier Amérique du Sud ne se limite pas au continent mais concerne également l'océan et notamment l'upwelling du Pérou-Chili qui est une région clé dotée d'un écosystème très riche (1% de la surface des océans pour 20% des captures globales de poissons). Dans ce cadre, plusieurs projets ANR financés ou soumis, dans lesquels l'IPSL est fortement impliqué, se focalisent sur l'étude du forçage atmosphérique et océanique de grande échelle dans le Pacifique Sud Est dans des scénarios IPCC, de son influence sur la circulation océanique à des échelles spatio-temporelles pertinentes pour le recrutement de petits pélagiques (sardines, anchois) et de son impact sur les ressources halieutiques.

Europe

Le chantier européen rassemble une grande diversité de questions scientifiques. L'influence de l'usage des sols sur les climats régionaux et leurs extrêmes (vagues de chaleur et sécheresses) est un défi scientifique sociétal majeur. Les impacts étudiés de ces événements incluent la production d'énergie (via le refroidissement des centrales nucléaires ou l'énergie éolienne), la productivité primaire des forêts (et leur aptitude à absorber le CO₂ atmosphérique), la productivité agricole. La limitation possible de l'irrigation par épuisement des nappes phréatiques (sous l'effet combiné des pressions démographiques, industrielles et agricoles et du changement climatique) peut également avoir un impact sur cette dernière, avec une rétroaction éventuelle sur le climat.

La seconde priorité identifiée est celle de la qualité de l'eau et de la dispersion de polluants, en réponse au changement climatique et l'usage des sols. Le chantier du bassin de la Seine est particulièrement fédérateur pour ces projets d'hydrologie, et possède beaucoup d'intersections avec la fédération FIRE.

La troisième priorité concerne les impacts sur la santé du changement climatique. Nous avons identifié trois thématiques liées à la santé : l'évaluation du risque d'allergies liées aux modifications de la phénologie de plantes graminées, le risque de cancer de la peau avec l'évolution des périodes de ciel clair et de la charge en aérosols, et les risques de problèmes prénataux liés à la pollution urbaine. Cette priorité fait largement appel à des compétences extérieures à l'IPSL (allergologues, dermatologues, obstétriciens...), et se base sur les travaux du GIS « Climat Environnement Société ».

Hautes latitudes (Arctique et Antarctique)

La zone arctique regroupe la calotte de glace du Groenland et un grand réservoir de méthane. C'est l'endroit où se jettent quelques uns des plus grands fleuves de la planète (Léna, Ienisseï, Amour). L'écologie des zones de hautes latitudes a donc de fortes interactions avec le climat de la planète. Ce chantier comporte des études de la stabilité de la calotte du Groenland et les interactions entre sa disparition et le climat planétaire. Le changement climatique peut affecter l'hydrologie des sols et des fleuves, et la stabilité du permafrost en Arctique, ce qui a des répercussions sur les infrastructures locales (déstabilisation des sols) et le dégagement potentiel de grandes quantités de méthane dans l'atmosphère.

○ **Les outils, les moyens et les compétences**

Les compétences

L'IPSL possède toutes les compétences en termes d'expertise sur le climat et les écosystèmes. Il est très bien placé dans les collaborations sur des projets en hydrologie (modélisation et expérimentation). En revanche, l'IPSL fait appel à des collaborateurs « extérieurs » pour les interfaces avec l'économie et la société, et la santé. Dans le premier cas, ces collaborateurs (CIRED, INRA, CIRAD) ont une longue histoire de projets communs, en revanche, sur les thèmes de la santé, les collaborations sont assez nouvelles.

Les données

Ce thème a un grand besoin en expérimentation de terrain et demande souvent la mise en place de protocoles spécifiques, autant pour la caractérisation de marqueurs biologiques des conditions environnementales que pour la compréhension de phénomènes et processus qui gouvernent la relation climat-environnement. De ce point de vue, il est nécessaire de remettre à l'honneur des activités d'observation et de suivi de nombreux paramètres et indicateurs des conditions environnementales. Parmi ces indicateurs, les données satellitaires, avec pour certains capteurs spatiaux, des séries de données de plus de vingt années, peuvent fournir des informations essentielles pour les études d'impacts (usage des sols, dynamique de la végétation, caractérisation des sols à travers leur état hydrique et leur matière organique, incendies, risques d'inondation, etc...).

Il y a un besoin de faire converger les sites de mesures environnementales et ceux sur les impacts sur le long terme. Cela a été notamment exprimé pour la suite du projet AMMA via la création d'ORE pluridisciplinaires.

La création d'une base de données climatiques, environnementales et sociétales est souhaitable au sein de l'IPSL. Une telle base de données devrait en particulier inclure les simulations numériques régionales et l'ensemble des données sociétales, économiques et agronomiques collectées pendant les projets en cours.

Les modèles

Le thème est utilisateur de simulations numériques lourdes, dont certaines sont effectuées par ailleurs (en particulier en coordination avec le pôle de modélisation). Certaines simulations spécifiques sont envisagées dans ce thème en particulier pour tester l'influence de l'usage des sols avec des zooms sur des zones bien définies, mais elles ne sont pas nécessairement « dimensionnantes » pour les supercalculateurs mais plutôt sur le stockage des résultats (aux échelles quotidiennes). Il doit être possible d'utiliser une hiérarchie de modèles, entre le modèle de l'IPSL en version zoomée, et des modèles régionaux (de type MM5). Une coordination et un archivage des sorties de modèles est sans doute nécessaire.

Expertise transversale

Le groupe de travail ICES fait largement appel aux compétences synthétisées dans les autres groupes de travail. En particulier, le développement de modèles et techniques statistiques se fait en lien avec en lien avec le pôle SAMA et GT4 sur la régionalisation.

○ Rôle et place pour l'IPSL dans la communauté nationale et européenne

Les thèmes abordés dans le GT ICES sont repris dans des projets en cours, acceptés ou déposés dans les appels d'offre de la communauté européenne (FP6 & 7), l'ANR

et le GIS « Climat-Environnement-Société ». Nous ne listerons pas les autres types de projets.

La constitution de ce GT est aussi motivée par le prochain rapport du GIEC et son volet sur les impacts du changement climatique. L'IPSL a été moteur dans le rapport sur l'état de l'art scientifique, et peut prétendre contribuer à celui des impacts socio-économiques grâce à une synergie autour de sa pluridisciplinarité.

FP6 & 7:

AMMA (Mousson africaine et impacts socio-économiques), GEMS, MACC, GEOMON, CLARIS, CLARIS-LPB, CENSOR, E2-C2 (Modélisation statistique des événements extrêmes et leur impact sur l'économie), ACQWA (Extrêmes climatiques, hydrologie et avalanches dans les Alpes)

ANR:

AUTREMENT, Streams, BIOMET, CLIMAFLU, ESCARSEL (Climat depuis l'an mil), OPHELIE (Histoire et climat), DIVA (Interaction surfaces continentales & climat), SAHELP, ANR PCCC (Peru-Chile Climate Change), PEPS (Peru Ecosystem Projection Scenario, soumise mars 2008), ORACLE-O3 France (année polaire internationale).

GIS:

Regyna (Régionalisation et impacts agronomiques et hydrologiques), Renasec (Influences des fluctuations climatiques sur la société), Premapol (Risques prénataux et pollution atmosphérique), Afoclim (Résilience des arbres au changement climatique), RISC-UV (Risques de cancer de la peau et changement climatique), PAC (Allergies et changement climatique)

○

○ **Mode de fonctionnement à adopter**

La plateforme ICES

Ce GT est né d'une nécessité de répondre à des questions sociétales liées au changement climatique. Ce chapitre met en valeur les questions scientifiques générales qui y sont liées. Toutes ces questions sont l'objet d'appels d'offres variés pour les projets nationaux et européens. La constitution d'une plateforme bien identifiée à l'IPSL et à l'extérieur permettrait de se structurer pour mieux répondre aux appels d'offre et augmenter la visibilité de l'IPSL. Ainsi un groupe de travail comme SAMA serait souhaitable. L'objectif de cette plateforme serait de créer et de structurer une recherche interdisciplinaire et trans-sectorielle autour du thème ICES en s'appuyant en partie sur les recherches environnementales réalisées au sein des laboratoires de l'IPSL et sur les compétences de chercheurs de différentes disciplines (« environnement » et « non environnement »). Cette plateforme servirait donc de catalyseur pour créer une dynamique de long terme de recherche pluridisciplinaire. Au cours des dix années à venir, elle aurait de fait pour objectif d'intégrer des chercheurs d'autres disciplines afin de renforcer une approche interdisciplinaire des interactions Climat-Environnement-Sociétés. Son fonctionnement inclurait des séminaires d'intérêt général (médecins, biologistes...), des discussions sur les projets et les appels d'offre, le partage des données et méthodes, etc. Cette plateforme veillerait également à discuter et au mieux à résoudre les difficultés rencontrées dans

ce thème (accès aux données, intérêt limité des autres disciplines sur ce type d'études, etc.). Au delà de son intérêt pour l'IPSL, la plateforme ICES permettrait d'identifier et formaliser des collaborations avec des laboratoires extérieurs à l'IPSL, et ainsi accroître la réactivité aux futurs appels d'offre. Elle favoriserait également le lien avec les partenaires privés tels que CLIMPACT qui sont intéressés par les produits issus de ce GT pouvant être utilisés comme dérivés climatiques pour élaborer des contrats d'assurances par exemple.

Ce groupe de travail ICES peut faire office de vivier pour répondre aux appels d'offre du GIS « Climat Environnement Société », en suscitant des discussions interdisciplinaires liées à des questions liées aux impacts sur la société et les environnements du changement climatique. Cette fonction permettra d'accroître la visibilité de l'IPSL vers les sciences humaines et sociales (SHS) et les sciences de la vie (SDV), et ainsi permettre une meilleure valorisation de la recherche fondamentale développée par ailleurs à l'IPSL.

Besoins prioritaires pour le thème

Comme cela a été évoqué à plusieurs reprises, ce GT est caractérisé par sa pluridisciplinarité. Dans de nombreux cas, certaines disciplines ne sont pas représentées au sein de l'IPSL (l'économie, la santé et l'écologie). Il serait souhaitable, dans le cadre d'une prospective à 10 ans et sur le modèle de grands instituts étrangers comme le PIK (Postdam Institute for Climate Impact Research) et l'IRI (International Research Institute for Climate and Society), de réfléchir à l'accueil et/ou au recrutement de chercheurs venant de ces communautés et ayant le désir de collaborer activement avec l'IPSL autour du thème ICES. Ce recrutement pouvant être décliné à deux niveaux : celui des jeunes chercheurs amenant des compétences neuves à l'IPSL (modèles de croissance de plante, modélisation épidémiologiques, etc...) et celui des chercheurs confirmés venant avec un réseau de projets et partenaires en étant capables de porter une thématique particulière au sein de l'IPSL.

Une page web sur ce thème sera bientôt mise en place par Catherine Sénior (sous la responsabilité de P. Yiou). À l'avenir, il serait utile de disposer d'un outil internet permettant le partage de données, de simulations et de méthodes des différents projets dédiés à la thématique ICES. Dans cette optique, il serait souhaitable de recruter un ingénieur, en articulation avec le pôle de données de l'IPSL.

G : La transmission des connaissances

Contacts : B. Legras (LMD), P. Bousquet (LSCE)

Les activités de recherche fédérées au sein de l'IPSL doivent s'accompagner d'une offre de formation ambitieuse et cohérente qui s'appuie sur l'ensemble du potentiel intellectuel et technique de l'institut. Cette offre doit être ambitieuse car les enjeux scientifiques et sociétaux des recherches conduites à l'IPSL sont majeurs. Et ils gagneront en importance dans les décennies à venir.

Cette offre concerne en premier lieu l'enseignement universitaire dans les différents établissements associés à l'IPSL et la formation des ingénieurs. Elle doit être cohérente et lisible pour attirer des étudiants et répondre à des besoins de formation bien identifiés des employeurs, publics ou privés. Elle doit s'intégrer dans le paysage mouvant actuel dans l'enseignement supérieur et la recherche (PRES, OSU, ..)

L'offre de l'IPSL concerne aussi la formation permanente pour laquelle l'institut doit formuler des propositions capables de répondre aux besoins des entreprises et de la société, mais aussi à la formation des enseignants et autres intermédiaires de la transmission des connaissances.

Enfin, les forces de l'IPSL devraient s'unir pour assurer la diffusion des connaissances auprès du public et des étudiants, par la rédaction d'ouvrages de synthèse et la mise en place d'un contenu internet digne des enjeux sociétaux des travaux menés dans l'institut.

I - Répondre à des besoins de formation bien identifiés

Le besoin de formation dans le domaine d'activité de l'IPSL a pendant longtemps été centré sur l'avancement des connaissances en sciences de l'atmosphère, de l'océan et du climat et sur les applications en télédétection et en planétologie.

Sous la contrainte des réglementations et l'évolution de la conscience publique, l'intérêt pour une gestion raisonnée de l'environnement grandit, ce qui conduit à un élargissement considérable en termes de débouchés et de besoins.

Des débouchés dans et en dehors de la recherche

La recherche est un débouché naturel des formations IPSL. Nous devons donner à nos étudiants toutes les chances pour trouver un débouché à la hauteur de leurs ambitions, et les formations de l'IPSL se doivent d'assurer un flux significatif d'étudiants de qualité capables de poursuivre l'effort de recherche de ses laboratoires, qui jouissent d'une reconnaissance internationale. Pour autant, cette formation par la recherche doit permettre à ceux qui seront formés de trouver un emploi dans d'autres secteurs

d'activité, mais en bonne adéquation avec leurs compétences. Nous avons comme projet de former les futurs cadres qui participeront à la gestion raisonnée de l'environnement en apportant :

- Une connaissance approfondie de méthodes de mesure de l'état de l'environnement, in situ ou par télédétection, en particulier à partir de l'espace,
- Une grande familiarité avec les démarches d'interprétation de ces mesures pour en extraire une information pertinente, en particulier autour de l'utilisation des moyens d'analyse de données et de simulation numérique,
- Une capacité à comprendre l'information environnementale fournie en bout de chaîne de traitement et d'interprétation, en particulier s'agissant des hypothèses sur lesquelles elle est fondée et par conséquent ses limites.

Il est pressenti que la mise à disposition du plus grand nombre d'une information environnementale pertinente suscitera la croissance d'un tissu de PME et de TPE spécialisées. Ces entreprises auront besoin de personnes techniquement compétentes sur toute la chaîne de fabrication et de distribution de cette information. Des formations professionnalisantes au niveau licence et master, réalisées en étroite collaboration avec le tissu des industries et des services, pourront répondre à cet objectif. L'implication d'école d'ingénieurs à ce niveau paraît aussi essentielle. Les utilisateurs finaux, qu'ils soient institutionnels ou privés, devront également être en position de comprendre la nature et la portée de ces informations, pour qu'ils puissent en faire le meilleur usage. La présence dans ces communautés de personnes formées aux disciplines de l'IPSL sera un atout. La capacité de l'IPSL à former des chercheurs, ingénieurs et des techniciens dans ses disciplines de vocation peut largement y contribuer.

La formation pluridisciplinaire

L'application du protocole de Kyoto, l'imbrication entre problèmes environnementaux et ressources naturelles, le besoin d'élever le niveau de conscience environnementale sont des raisons qui poussent à développer à côté des formations initiales spécialisées une offre de formations complémentaires destinées à s'insérer dans des cursus d'autres formations. Cette offre doit fournir aux futurs ingénieurs et cadres les connaissances nécessaires pour appréhender quantitativement les impacts environnementaux et le couplage entre leur activité ou celle de leur entreprise avec l'environnement. S'adressant aussi à un public plus large, elle doit pouvoir fournir à tous, les bases nécessaires à la compréhension des enjeux environnementaux.

La formation continue

Les préoccupations d'environnement ouvrent aujourd'hui de véritables enjeux à la fois économiques et politiques. Ils impliquent une capacité de diagnostic et de mesure, une formation adéquate des aménageurs (politiques d'aménagement du territoire, maîtrise des développements des espaces urbains et espaces naturels) et décideurs, une perception des enjeux économiques et industriels (dispositifs d'économie d'énergie, mobilité durable, bâti économe, développement de sources d'énergie non fossiles). La palette de compétences, l'expertise en instrumentation et en modélisation développées à l'IPSL le mettent en mesure, si non dans l'obligation, de jouer un rôle moteur pour la formation des décideurs économiques et politiques,

des aménageurs du territoire et des industriels. Des formations de ce type, s'adressant à des personnes dans leur métier, se feront de manière privilégiée sous la modalité de la formation continue. L'IPSL proposera de mobiliser son savoir faire et ses compétences pour monter ces formations. Le besoin de formation continue sur le climat et l'environnement devrait donc se développer très rapidement dans les années à venir. L'IPSL doit se doter d'une structure de formation continue pour y répondre. Les formations initiales de master doivent être organisées pour être accessibles à la formation continue. La piste de l'alternance doit aussi être envisagée pour les formations professionnalisantes. Parallèlement, des sessions courtes de formations (3-5 jours) doivent être mises en place spécifiquement pour répondre aux besoins des entreprises, des administrations et des élus locaux. Pour ce faire il dispose d'un vaste réseau d'Universités et Ecoles auxquelles l'Institut est associé de près ou de loin : Universités de Versailles-Saint Quentin et Paris XI pour le Sud et Ouest Francilien, Paris 6 pour Paris Centre et Paris 12 pour l'Est, Ecoles Normales Supérieures d'Ulm et de Cachan, Ecole Polytechnique, et ENSTA. Comme véhicule pour collecter les demandes et afficher son offre, ainsi que pour le soutien financier de ces actions, il sollicitera la fondation FONDATERRA. L'ensemble du dispositif vise à renforcer la connaissance des enjeux scientifiques sur le climat et l'environnement dans le milieu professionnel, mais aussi à financer les formations initiales proposées par l'IPSL.

La formation technique

De part l'importance des observations, l'IPSL rassemble des compétences considérables sur le plan technique et expérimental. On peut citer (sans être exhaustif) les technologies marines, les technologies spatiales, radiométriques, radar et lidar mais aussi les compétences en géochimie, en analyse de la composition de l'air, en traitement massif des données, ou en modélisation. Ces compétences, pour certaines très recherchées, représentent aussi un potentiel de formation que l'IPSL doit valoriser, tant au niveau de la formation initiale des techniciens et ingénieurs, que pour la formation continue, ou la formation en apprentissage, en liaison étroite avec les chambres de commerce et d'industries.

Un effort soutenu de communication scientifique

La prise en compte des problèmes environnementaux dans nos sociétés passe aussi par la compréhension des phénomènes en jeu par le grand public et les scolaires. Un effort de communication scientifique est déjà réalisé par les personnels de l'IPSL, souvent à titre individuel. Le rôle de l'institut est de coordonner cet effort pour le rendre encore plus efficace. Il s'agit de former un réseau de correspondants volontaires qui pourraient communiquer vers les différents publics (primaire, collège/grand public, lycée). Ces volontaires doivent pouvoir s'appuyer sur une base de « présentations de référence », basées sur les thématiques de l'institut et plusieurs niveaux d'accessibilité. Les personnes couramment contactées par les journalistes doivent faire partie de ce dispositif. L'institut doit être systématiquement représenté dans toutes les manifestations scientifiques d'importance (expositions, fête de la science, faites de la science, débats, ..).

La communication s'appuie sur le site WEB de l'IPSL, qu'il faudra renforcer et où la documentation destinée au public pourra s'élaborer sur le mode contributif et être rendue facilement accessible.

Communication interne

La communication interne a pour vocation d'animer la recherche au sein de l'IPSL et de favoriser les échanges et projets collaboratifs et de renforcer l'esprit de communauté. Elle est pour l'essentiel prise en charge par les différents pôles et projets fédératifs. Elle est coordonnée par la direction de l'institut.

Un public important pour cette communication est celui des doctorants (une cinquantaine par an). Le cadre de travail naturel d'un doctorant est son équipe et son laboratoire, mais il est également important qu'il(elle) puisse situer son travail dans le cadre plus large et interdisciplinaire de l'IPSL. C'est pourquoi, l'IPSL organisera chaque année une réunion de rentrée des nouveaux doctorants qui sera l'occasion de leur présenter les différentes thématiques et activités de l'IPSL. Cette réunion sera agrémentée d'un cours d'intérêt général donné par une personnalité internationale. Elle sera coordonnée par l'école doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile de France.

La dispersion géographique des laboratoires de l'IPSL et la dispersion des thématiques ne permet pas d'organiser aisément un séminaire régulier de l'IPSL. L'IPSL offrira cependant l'occasion de réunions 2 ou 3 fois par an pour des séminaires de synthèse portant sur les grands projets scientifiques dont il est porteur ou sur les grands problèmes.

Des ouvrages de formation

La communication et la formation doivent s'appuyer sur des ouvrages publiés. Un certain nombre de livres de vulgarisation ont déjà été réalisés par les membres de l'IPSL, mais notre domaine manque d'ouvrages d'enseignement de base en français, accessibles pour un public formé scientifiquement, qui pourraient être utilisés dans les cours de licence et dans les écoles d'ingénieurs et pour former les professeurs de lycée. Il est certain que de tels ouvrages auraient un impact pour redresser le très faible niveau de connaissance des questions environnementales parmi le public éduqué et faciliteraient l'accès de notre domaine aux étudiants. Une telle lacune pourrait être assez facilement comblée en partant des cours actuellement disponibles, qui sont déjà partiellement rédigés sous forme de notes de cours ou de présentation électronique. L'IPSL doit encourager cette action en créant un comité d'édition chargé de recruter et stimuler les auteurs, trouver un éditeur et organiser la relecture collégiale des ouvrages au sein de l'IPSL. Cette initiative pourra prendre «éventuellement prendre la forme d'une nouvelle collection ou trouver sa place dans une collection existante.

Un autre type d'ouvrage pourrait être conçu pour s'adresser aux formations non-scientifiques, (économistes, géographes, médecins, gestionnaires, ...) pour rendre accessibles les notions clés et l'état moderne des connaissances issu des progrès récents et établir de nouveaux standards dans ces disciplines (notamment au niveau de l'agrégation de géographie).

Ecoles thématiques

Le rayonnement scientifique de l'IPSL appelle aussi à une diffusion des connaissances au niveau international dans le cadre d'une série régulière d'écoles thématiques. Le principe de telles écoles sera de faire le point sur un thème parmi ceux de l'IPSL et de dispenser un enseignement permettant de mettre les connaissances de l'assistance au niveau des plus récents développements. Les cours seront dispensés par des personnels de l'IPSL et d'autres spécialistes (français et étrangers). Elles s'adresseront à un public international en favorisant la participation d'étudiants en fin de thèse et jeunes post-doctorants.

II - S'appuyer sur une offre de formation universitaire ambitieuse

Le paysage universitaire de la région parisienne est actuellement en pleine évolution avec des regroupements sous forme de Pôles de Recherche et d'Enseignement Supérieur (PRES) et l'apparition de deux nouveaux Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU). Du fait de la distribution des laboratoires sur à peu près l'ensemble des pôles universitaires en cours de constitution, il en résulte actuellement un certain éclatement des initiatives au sein de l'IPSL, d'autant plus que la gouvernance des universités s'oriente vers une autonomie accrue. L'institut souhaite cependant rester une force de proposition et de coordination pour l'enseignement des sciences de l'environnement en région parisienne.

Des licences disciplinaires

L'étude du fonctionnement du système Terre est par essence multi-disciplinaire. La physique, la chimie, les sciences de la Terre et la biologie s'imbriquent pour fournir les théories, les méthodes d'observations et les modèles permettant d'analyser et de comprendre un tel système complexe. Appréhender cette complexité demande une très bonne connaissance d'une ou plusieurs de ces disciplines fondamentales. Même si la physique est la discipline historique et naturelle sur laquelle s'appuie l'IPSL, il est nécessaire de promouvoir aussi les autres disciplines ainsi que des licences bi-disciplinaires comme la physique-chimie.

Il est donc nécessaire à la fois d'être présent dans les enseignements fondamentaux des licences disciplinaires mais aussi d'introduire des modules de découvertes des thématiques de l'IPSL. Ces modules doivent avoir le double objectif de donner une culture générale scientifique sur les sciences de l'environnement à tous les étudiants, et d'en orienter un certain nombre vers les masters associés à l'IPSL. Une coordination des contenus entre les différents établissements est souhaitable. Elle devrait être facilitée par la rédaction d'ouvrages de cours communs.

Rationaliser l'offre de master

La mise en place de la réforme LMD et la nouvelle structuration des pôles universitaires ont conduit à une diversification de l'offre de masters sur les thématiques liées à l'IPSL en fonction des politiques propres des différents établissements de rattachement.

Aujourd'hui, sur les 17 universités d'Ile de France, 12 proposent des masters liés à l'environnement. Cette offre pléthorique entraîne déjà une concurrence entre les établissements, une dispersion des efforts, une qualité sous-optimale et nuit à l'attractivité et à la lisibilité des formations dans lesquelles l'institut intervient. Les problèmes nationaux actuels d'effectifs en sciences dures renforcent par ailleurs la fragilité d'une offre dispersée. Enfin, le marché de l'emploi peine à absorber l'ensemble des étudiants formés à l'échelle nationale. Il importe que l'IPSL joue un rôle majeur de proposition et de coordination pour rationaliser et améliorer l'offre de formation universitaire sur ses thématiques propres.

L'IPSL proposera la mise en place d'un groupe de travail inter-universitaire sur la rationalisation de l'offre de formation dans le domaine de l'environnement au niveau master. Ce groupe devra se constituer avec des représentants des universités, des PRES, des écoles d'ingénieurs, des OSU, des laboratoires, et des partenaires privés ou institutionnels des formations liées à l'institut. Il devra être une force de proposition cohérente et unique pour l'ensemble de l'Ile de France.

Les contraintes d'un tel groupe sont multiples, mais il pourra par exemple promouvoir le fait que :

- les étudiants, acquièrent une base cohérente de connaissances et de compétences.
- les redondances entre formations sont justifiées par des débouchés suffisants ou des spécificités enrichissantes
- les master recherche s'appuient sur les forces des laboratoires
- les masters professionnels s'appuient sur les forces du bassin d'emploi francilien
- il y a une ouverture à l'international via les masters européens par exemple.

L'attractivité des formations des master liées à l'IPSL dépend fortement de la capacité des acteurs de l'enseignement supérieur à rationaliser une offre dispersée et pour le moins confuse aujourd'hui dans le domaine de l'environnement.

Ecole doctorale

L'IPSL doit s'impliquer fortement dans la structuration des écoles doctorales relevant de ses thématiques. Comme pour les masters, une rationalisation est probablement nécessaire, sans pour autant tuer la diversité des disciplines portant les EDs et la multi-disciplinarité de certaines comme l'ED129 des sciences de l'environnement d'Ile de France, dans laquelle l'IPSL continuera d'avoir un rôle central et moteur. L'IPSL se propose de veiller à ce que des discussions s'engagent dans les prochaines années entre les ED du paysage francilien afin d'aller dans le sens d'un meilleur fonctionnement de ces structures, essentielles à un bon fonctionnement de la formation par la recherche dans les laboratoires de l'institut.

Un lien fort entre enseignement et recherche

Les thématiques IPSL sont jeunes au regard de l'histoire des sciences et elles évoluent rapidement. Plus que tout autre champ thématique, nous avons besoin d'un lien fort entre enseignement et recherche pour que les enseignements suivent l'évolution des connaissances. Il est fondamental que les enseignants qui interviennent dans les formations IPSL puissent aussi maintenir une activité de recherche soutenue. Pour cela, il faut maintenir un flux significatif de recrutement de jeunes enseignants-chercheurs dans les sections relevant de l'IPSL.

L'assouplissement de la frontière entre chercheur et enseignant-chercheur est aussi un point important : valoriser systématiquement l'implication des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens dans l'enseignement et réduire la charge horaire des enseignants-chercheurs, surtout les jeunes, permettra de re-équilibrer le système

d'enseignement supérieur et d'assurer au personnel de l'IPSL une carrière plus équilibrée.

H : Environnement et climat régional

Contacts:

Philippe Drobinski (IPSL/LMD), philippe.drobinski@lmd.polytechnique.fr,
Matthias Beekmann (LISA), beekmann@lisa.univ-paris12.fr

1. Contexte

L'analyse du climat et l'environnement régional comprend l'étude de leur fonctionnement (études de processus spécifiques y compris aux interfaces entre milieux et disciplines), leur description statistique (éléments caractéristiques, variabilité, extrêmes), leur observation et leur modélisation. Elle vise à contribuer à la compréhension intégrée du système global, constitué de sous-systèmes à aire limitée, interagissant entre eux. Cela devra permettre de prédire la sensibilité des systèmes face à des forçages extérieurs, et constituera la base aux études d'impact.

Les laboratoires de l'IPSL sont déjà très fortement engagés sur cette thématique. La prospective ici décrite s'inscrit dans une démarche fédérative au sein de l'IPSL, c.a.d. dans une vision complémentaire des prospectives individuelles de chacun des laboratoires constituant l'IPSL. Elle donnera une vision pour les travaux de recherche à accomplir pour les 10 ans à venir.

2. La prospective scientifique

La prospective ici présentée se décline en trois axes présentés chacun dans un sous-chapitre : l'étude des processus couplés à l'interface de l'atmosphère, de l'océan et du sol, en incluant la biosphère (2.1), l'interaction entre les échelles, en prêtant une attention particulière aux extrêmes (2.2); dans ces premiers deux axes, le caractère fondamental de la prospective proposée est mis en avant. La mise en œuvre intégrée des études, et en particulier de leur composante expérimentale est envisagée autour de plusieurs chantiers d'études qui représentent le troisième axe de cette prospective (2.3). Par ailleurs, une réflexion autour de l'innovation méthodologique sera menée afin d'identifier les développements majeurs en terme d'observation, modélisation et analyse statistique nécessaires pour mener à bien cette prospective (chapitre 3).

2.1 Etudes des processus couplés

Une spécificité forte de l'IPSL est de rassembler des équipes travaillant sur l'ensemble des processus (physique, bio-géo-chimie) des différents compartiments du système Terre (océan, continent, atmosphère). Un des axes forts dans les années à venir porte donc sur l'étude des processus couplés (physiques/bio-géo-chimiques) à l'échelle régionale et aux interfaces entre les différents compartiments (océan/atmosphère/continent). La compréhension intégrée de ces processus est aujourd'hui encore très lacunaire et présente un enjeu important pour la prospective de l'IPSL à l'échelle de 10 ans dont les principaux axes de recherche identifiés sont les suivants:

Etude des échelles caractéristiques des systèmes dynamiques couplés

La surface continentale (végétation, hydrologie) ou océanique et l'atmosphère constituent les composantes d'un système couplé, et chacune influence l'autre sur une très large gamme d'échelles de temps et d'espace. Le couplage entre compartiments possédant des échelles de variabilité spatiales et temporelles différentes peut engendrer par interactions non-linéaires des modes de variabilité propres à ces couplages. Il est donc important d'identifier les échelles de temps et d'espace des processus les plus énergétiques intervenant dans certains mécanismes couplés, en particulier ceux intervenant dans les événements intenses (cyclogénèses, précipitations intenses et crues, sécheresses, convection océanique,...). Cette problématique est au cœur de l'étude du cycle de l'eau dans certaines régions clés, décrites dans la section "Chantiers d'étude". Les interactions entre l'océan et l'atmosphère posent des questions spécifiques puisque mettant en jeu deux milieux fluides pour lesquels le couplage s'effectue de façon très naturelle.

Processus de formation des aérosols et interactions des processus dynamiques, chimiques et micro-physiques

La distribution des aérosols et ses propriétés physico-chimiques dans l'atmosphère est gouvernée par un ensemble de processus couplés et multiphasiques, dont la compréhension est primordiale afin de pouvoir prédire l'impact des aérosols sur la qualité de l'air, le climat et les cycles bio-géo-chimiques. Dans les prochains 10 ans, il s'agira d'abord de mieux quantifier les différentes sources des aérosols et en particulier de l'aérosol fin carboné dont l'impact sur la santé est le plus important. L'IPSL devra aussi se positionner plus fortement sur l'étude couplée des processus physico-chimiques, radiatifs et micro-physiques des nuages. Des nombreux mécanismes d'interaction entre aérosols et micro-physique des nuages sont actuellement proposées, qu'il faudra hiérarchiser en fonction de leur impact sur le bilan radiatif et sur les précipitations à l'échelle régionale, afin de permettre d'évaluer leur impact sur le climat régional.

Interaction entre processus dynamique et bio-géo-chimiques

Les mécanismes d'échange entre la surface et l'atmosphère concernent à la fois les émissions (COV, DMS, oxydes d'azote, aérosols), et le dépôt (ozone, aérosols, ...), ou encore, comme pour le cas du CO₂, des échanges réversibles dans les deux sens. La présence de végétation ou de microorganismes dans le sol et dans l'eau est souvent déterminante pour les flux de matière à l'interface avec l'atmosphère. Il est clair que l'hétérogénéité spatiale de la végétation, mais aussi des systèmes aquatiques, nécessite un travail à une échelle fine, afin de pouvoir comprendre les processus d'interaction avec l'atmosphère. L'enjeu pour les prochaines années sera aussi d'affiner la connaissance de la variabilité de ces échanges en fonction des conditions climatiques, affectant l'état de la biosphère. Par exemple, les périodes caniculaires que nous rencontrons ces dernières années conduisent à un assèchement du sol pouvant affecter la végétation et les populations des microorganismes et ainsi les processus de production et perte des espèces traces (gaz et particules). L'augmentation des teneurs en CO₂ et de l'ozone affecte l'activité photosynthétique et la vitesse de dépôt sur la végétation.

Pour aérosol minéral, l'enjeu pour les prochaines années sera d'étendre les paramétrisations établies pour le soulèvement sur un sol désertique aux sols partiellement couverts par la végétation, et évaluer l'impact des changements climatiques et le changement des pratiques agricoles sur ce soulèvement. Par ailleurs, le dépôt d'aérosols minéraux est une des sources prédominantes de nutriments (Fe, P,

Si...) pour le phytoplancton marin dans certaines zones océaniques éloignées, et qui jouent un rôle clé dans les processus d'exportation du carbone et donc sur le bilan global en CO₂. Dans ce contexte, les laboratoires de l'IPSL sont et seront fortement impliqués dans l'étude du cycle biogéochimique du fer de son dépôt atmosphérique à son impact sur le développement phytoplanctonique (en zone Atlantique, bassin méditerranéen, ...).

2.2 Interactions d'échelles, variabilité et extrêmes

Si de nombreuses études ont analysé les modes de variabilités du système Terre à l'échelle globale (variabilité climatique) ou au contraire à l'échelle locale (processus météorologiques), ces études ont été conduites en effectuant une séparation arbitraire de gammes d'échelles, initialement nécessaire pour maintenir raisonnable le degré de liberté des problèmes abordés.... Les outils d'analyse numérique nous permettent aujourd'hui de revisiter pour les 10 prochaines années les études sur les processus d'interaction d'échelles en couvrant une gamme d'échelles extrêmement large (de l'échelle synoptique à l'échelle de la turbulence), et en traitant également la problématique des téléconnexions entre différentes régions climatiques clés.

On sait que les différentes échelles de l'écoulement atmosphérique interagissent mutuellement, et qu'une incertitude initiale sur les petites échelles, suivant l'"effet papillon" bien connu, finit par contaminer les grandes échelles. Le mécanisme précis et détaillé de ces interactions entre échelles reste cependant mal compris. Ces questions sont évidemment de la plus grande importance dans une perspective de « downscaling » d'un écoulement atmosphérique ou océanique connu à grande échelle à une plus petite échelle, notamment dans le cadre de la modélisation/prévision non-hydrostatique à méso-échelle.

Bien que le comportement moyen (grande échelle) soit relativement bien représenté, la modélisation statistique des événements locaux (variabilité et tendance) implique en plus une modélisation efficace des événements extrêmes en temps et en espace. Principalement à cause de la rareté intrinsèque des événements extrêmes et des différentes échelles spatio-temporelles impliquées, la modélisation des événements extrêmes reste un problème très difficile. La grande variabilité spatiale et temporelle des variables locales (e.g. précipitations et vent), sa forte non-linéarité, rend très difficiles l'attribution et la quantification des incertitudes associées à leur caractérisation statistique (variabilité, tendance et extrêmes), pourtant indispensable, si on veut bien apprécier l'impact des événements extrêmes sur les sociétés.

La prise en compte des interactions entre différentes échelles spatiales est également cruciale pour comprendre la variabilité de la composition chimique de l'atmosphère. L'hétérogénéité des émissions et des surfaces impose la prise en compte d'une échelle spatiale très réduite, au niveau d'une rue pour des polluants primaires en zone urbaine, à plusieurs kilomètres en milieu rural pour des composés secondaires tels que l'ozone. En revanche, le transport à longue distance des composés, en fonction de leur temps de vie, exige un traitement global de la problématique. Il se pose donc le problème d'intégration d'échelles très variées, à la fois pour l'observation (combinaison observations satellitales et in-situ sol-aéroportées) et pour la modélisation. Ce problème se pose par exemple, si l'on veut bien comprendre et prédire l'évolution des polluants en Europe (interaction entre émissions régionales et advection depuis la large échelle), l'interaction des mégacités avec leur environnement plus rural, ou encore l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air.

2.3 Chantiers d'études

Les grands axes de recherche énoncés dans les deux précédentes sections constituent les problématiques clé dans la compréhension de certains systèmes climatiques particulièrement vulnérables. En effet, la vulnérabilité des populations humaines et des systèmes naturels face aux forçages anthropiques et changements climatiques varie beaucoup d'une région -et d'une population- à l'autre. Les systèmes sociaux et naturels de chaque région sont différents et créent des écarts dans la capacité d'adaptation aux impacts des changements climatiques actuels et futurs. Notre objectif est d'aborder ces questions pour quelques régions clés particulièrement vulnérables de façon à analyser le rôle les boucles de rétroaction entre climat et milieux, évaluer les effets des interactions d'échelles spatio-temporelles et caractériser les impacts du changement climatique. Ces études intégrées portent sur l'étude de la vulnérabilité de systèmes tels que la façade Atlantique Européenne, la Méditerranée, les régions polaires et les zones de mousson (africaine et indienne), par des campagnes expérimentales dédiées, l'utilisation de la modélisation régionale (dynamique et/ou statistique) permettant d'accéder à des échelles spatiales et temporelles en meilleure adéquation avec la demande sociétale sur l'impact du réchauffement globale à l'échelle régionale (en particulier les ressources en eau, le lien entre agriculture et climat,...) ou sur l'adaptation aux événements intenses (tempêtes, précipitations intenses et crues, pollution).

Les régions de mousson (Afrique, Asie)

L'Afrique comme l'Asie sont très vulnérables en termes de ressources en eau (désertification), de production alimentaire, de santé humaine, à la désertification particulièrement en rapport avec les événements extrêmes (particulièrement dans les zones côtières) dans un contexte de climat en évolution. Des études de cas nécessaires à une meilleure compréhension des systèmes de mousson en relation avec la circulation générale (téléconnexions), les états de surface (couvert végétal et l'humidité de surface), et les conséquences de flux d'érosion dans les zones soumises à la mousson.

L'Europe du Nord et méridionale (bassin Méditerranéen)

Les conditions météorologiques actuelles affectent les systèmes naturels, sociaux et économiques européens sous des aspects qui révèlent des sensibilités et des vulnérabilités aux changements climatiques. En Europe de l'ouest, un des défis majeurs est la possibilité que la circulation thermohaline, et surtout la formation d'eau profonde nord Atlantique, décline, suite à une fonte massive des surfaces englacées (glace de mer, calotte groenlandaise dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord).

Une autre région très vulnérable est l'Europe méridionale et de façon plus générale, le bassin méditerranéen caractérisé par un bassin océanique quasi-fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté et une forte urbanisation. La prévision des événements extrêmes tels que pluies intenses et crues en automne, surcôtes, vents violents, fortes houles et convection océanique associées ou non aux cyclogenèses méditerranéennes, sécheresse et feux de forêt en été demeure délicate en raison d'un manque d'information sur leur préconditionnement qui met en jeu toute une hiérarchie de processus intervenant de manière non linéaire aux échelles les plus fines. Enfin, cette région est le lieu d'une intense activité photo-chimique (dû à la forte insolation) et d'une production importante d'aérosols

(désertiques et de pollution) qui affecte la qualité de l'air, module le bilan radiatif régional et les précipitations et fertilise la mer Méditerranée. Les enregistrements du climat passé en Méditerranée et sur son pourtour montrent une très grande variabilité de son climat et de sa végétation, sur des échelles de temps parfois très rapides, variabilité dont le lien avec les changements climatiques des régions avoisinantes (Atlantique Nord, Afrique, systèmes de moussons) reste à comprendre. Les équipes de l'IPSL disposent des outils numériques et expérimentaux appropriés pour l'étude du climat et environnement Méditerranéen et contribuent actuellement à l'élaboration de programmes expérimentaux d'envergure internationale du climat méditerranéen (dans un sens large) coordonnées en grande partie par des chercheurs de l'IPSL [projets HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment), ChArMeX (Chemistry and Aerosols in the Mediterranean Experiment), MerMeX (Marine Ecosystems Response in the Mediterranean Experiment)] dans le cadre du Chantier Méditerranée soutenu par l'INSU.

Régions polaires

L'évolution du climat dans la région polaire devrait être l'une des plus accentuée du globe. Les données du 20^{ème} siècle concernant l'Arctique montrent une tendance au réchauffement d'au moins 5°C sur de grands territoires, tandis que les précipitations ont augmenté. L'étendue de la glace de mer a diminué de 2,9 % par décennie et son épaisseur s'est réduite au cours de la période 1978-1996, une diminution spectaculaire ayant eu lieu en été 2007. L'objectif principal des travaux à mener est de mieux prévoir les changements climatiques pouvant se produire dans l'Arctique et de fournir ainsi des éléments à la société pour en atténuer les conséquences et les impacts, comme par exemple la diminution ou la disparition de la banquise en été Arctique. D'autres questions abordées seront la quantification de l'impact climatique de gaz à effet de serre à courte durée de vie (ozone, méthane, suie, ...) en région Arctique, au travers de campagnes d'observations et la modélisation associée et la spécificité des régions polaires (exemple des pergélisols) pour les échanges du CO₂. Les équipes de l'IPSL sont engagés de mettre en place un système avancé d'observations de l'Océan Glacial Arctique permettant la collecte de données (spatiales et in situ) sur les interactions entre la basse atmosphère, la glace et l'océan ; ces données seront assimilées dans des modèles numériques de prévision et d'analyse de phénomènes climatiques et météorologiques.

Mégacités

Durant les cent dernières années, les populations humaines n'ont cessé de se concentrer dans les grands centres urbains. Une fraction importante des activités humaines de leurs pays respectifs est concentrée dans ces « mégacités », ce qui pose un défi majeur, mais encore mal évalué, pour la gestion urbanistique (ressources, transports, déchets, services, ...), et pour la qualité de l'air et santé publique. Les travaux à entreprendre viseront à : (i) évaluer l'impact des mégacités sur la qualité de l'air en leur sein et sur la composition chimique de l'atmosphère à plus large échelle et de quantifier les rétroactions entre la composition chimique à l'échelle régionale et le changement climatique aux échelles régionale à globale

3. Outils, moyens et compétences nécessaires

Les avancées récentes et futures des recherches sur le climat et environnement régional sont rendues possible par des développements méthodologiques innovants, en terme d'observation, de modélisation et d'analyse numérique. Ces développements méthodologiques envisagés à l'IPSL et pour certains déjà initiés, portent en particulier sur la modélisation statistique, sur la modélisation dynamique couplée à méso-échelle ou sur la prévision et assimilation. L'ensemble de ces travaux de développements s'inscrit dans un cadre collaboratif aux niveaux national (e.g. CNRM/Météo-France, le LA, le CERFACS, le LGGE) et international. Sur le plan de l'observation, les développements porteront surtout sur l'exploitation d'une synergie entre différents systèmes d'observation au sol (in situ, par télédétection) et spatiaux, déployés à long terme dans des sites ou rassemblés lors de campagnes spécifiques. Les développements de ces outils sont des actions structurantes à l'IPSL pouvant permettre de répondre aux questions scientifiques clés identifiées dans cette prospective, pertinentes pour l'étude du climat et l'environnement des régions vulnérables décrites dans cette prospective.

3.1. Développements méthodologiques structurants au sein de l'IPSL

Modélisation statistique

La prise en compte des avancées récentes en statistiques, en particulier dans l'étude des valeurs extrêmes et dans le domaine de l'analyse spatio-temporel, doit permettre de mieux répondre à la très forte demande sociale tournée vers les phénomènes hydrométéorologiques qui présentent une grande part d'aléa et d'incertitude. Plusieurs projets au sein de l'ANR, du GIS "climat-environnement-société" et du FP6/7, ainsi que des groupes de travail de l'IPSL (par exemple, SAMA) ont permis aux scientifiques de l'IPSL d'aborder ces problèmes de régionalisation, de modélisation et d'analyse des valeurs extrêmes. La collaboration récente entre les spécialistes de la théorie des valeurs extrêmes (probabilistes et statisticiens), les experts du climat et environnement global et régional (assimilation, modélisations) doit être renforcée afin de permettre d'atteindre les objectifs proposés dans cette prospective.

Modélisation régionale couplée

Les travaux sur la compréhension du système terre à méso-échelle et sur la régionalisation du climat (passé, présent, futur) passent par le développement d'une plateforme de modélisation régionale couplée, complémentaires aux méthodes statistiques évoquées précédemment, et permettant de quantifier la réponse régionale du système Terre à un forçage de grande échelle. L'IPSL de part son expertise sur la modélisation globale, peut s'engager dans le développement d'une plateforme générique de modélisation régionale couplée dans les différents compartiments. L'originalité de la démarche engagée, avec le soutien du GIS "climat-environnement-société", porte sur la variété des processus considérés (physique, bio-géo-chimie), les compartiments couplés du système Terre (continent, atmosphère, océan) et l'interfaçage avec le modèle de climat de l'IPSL (le modèle global et la plateforme régionale disposant d'ores et déjà des mêmes modèles de surface continentale ORCHIDEE, d'océan NEMO et d'atmosphère avec LMDZ associé à un modèle non-hydrostatique pour les plus petites échelles). Cette plateforme, incluant le modèle régional de chimie transport CHIMERE et du modèle de biogéochimie marine ECO3M, permettra une approche unique dans les études de régionalisation du climat

d'une part, et la prise en compte des multiples rétroactions entre différents processus évoquées dans la section 1, d'autre part.

Prévisibilité et assimilation

Les questions discutées en section 2 sont très étroitement liées au problème général de la prévisibilité de l'écoulement. Les besoins de la météorologie et de l'océanographie à grande échelle ont conduit au développement d'outils et de méthodes permettant de d'identifier et de quantifier, dans des situations spécifiques, le degré de prévisibilité de l'écoulement : modes singuliers, modes "cultivés", assimilation d'ensemble (filtre de Kalman d'ensemble), prévision d'ensemble. Il faut bien entendu continuer le développement de ces différents outils et méthodes, tout particulièrement dans le contexte de la météorologie et l'océanographie à méso-échelle, pour laquelle ils n'ont pas encore été mis en œuvre. Ici encore, les modèles existants constituent les outils de base appropriés. Ces techniques seront aussi appliquées à d'autres domaines telles que la chimie de l'atmosphère,

3.2. Moyens d'observation pérennes de l'IPSL

Les moyens d'observation pérennes de l'IPSL couvrent plusieurs services permettant une surveillance de nombreux paramètres du système couplé océan - atmosphère dans certains régions clés (NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change), RAMCES (Réseau Atmosphérique de Mesure des composés à Effet de serre), OISO (Service d'Observations de l'Océan Indien). Ici , nous développons spécifiquement la prospective pour une observation pérenne de l'Ile de France, compte tenu de la richesse et synergie entre différentes (services d')observations, et compte tenu de l'implantation social de l'IPSL en Ile de France.

Les moyens d'observation pérennes de l'IPSL en région parisienne couvrent le suivi des gaz à effet de serre (RAMCES/ICOS - Saclay), le suivi des propriétés physiques des aérosols (AERONET/EARLINET – Paris et Palaiseau), le suivi des propriétés physiques des nuages (CLOUDNET – Palaiseau), le suivi du bilan radiatif à la surface (BSRN – Palaiseau) et l'étude des interactions des processus dynamiques, chimiques et micro-physiques dans l'atmosphère (SIRTA – Palaiseau). Ces moyens pérennes sont complétés par des moyens existants dans les laboratoires de l'IPSL qui seront utilisés pour des campagnes de mesures (par ex. mesures de chimie atmosphérique au LSCE, LISA, SA). Les observations de l'IPSL s'inscrivent dans un contexte régional riche en observations routinières (par ex. paramètres météorologiques par Météo-France, vapeur d'eau par l'IGN, particules PM10 polluants gazeux par AirParif) qui constituent des jeux de données très complet pour l'étude du climat régional.

Pour les études d'interactions entre processus, les données in-situ et par télédétection active et passive déployées au SIRTA ont permis des avancées significatives dans la compréhension de la dynamique de la couche limite atmosphérique, des propriétés optiques et microphysique des aérosols et des nuages, et plus récemment des processus d'interactions dynamiques, chimiques et micro-physiques sur la formation du brouillard. Afin étendre ces études, il faut poursuivre l'effort de fédération des moyens d'observation, et compléter le dispositif de mesures, avec notamment des capteurs chimiques.

3.3. Applications, impacts, transfert de savoir et savoir- faire

Au cours des dernières années, plusieurs résultats d'une recherche plus fondamentale menée au sein de l'IPSL ont trouvé des applications opérationnelles, en répondant à des demandes fortes de la société ou du monde économique. Ce transfert de savoir du monde de la recherche vers la société a fortement accru la visibilité de l'IPSL dans les domaines concernés, due à la notoriété des outils ou services opérationnels développés (cas du système OPA pour l'océanologie et de PREVAIR pour la qualité de l'air). En plus, les problèmes liés à une utilisation opérationnelle de produits de recherche alimentent sans cesse le questionnement scientifique même. Pour ces raisons, ce volet doit être fortement développé dans la prospective de l'IPSL.

Pour l'océan, dans la suite des travaux effectués avec OPA (Ocean Parallele) (Madec et al. 1997), le récent code numérique de circulation générale océanique NEMO (Madec 2008) est devenu un outil national. Il est même devenu un outil choisi pour divers projets européens (CIRCE, MOON, MyOcean, VANIMEDAT, MFSTEP) par différentes équipes internationales. Concernant la régionalisation du climat en Méditerranée, des actions sont prévues pour mutualiser les efforts de modélisation autour d'une plateforme commune de référence (soumission prévue à l'AO GMMC 2008 PPR Méditerranée), basée sur le code numérique NEMO et la grille ORCA associée à ce code. Cette mutualisation des outils est envisagée entre l'IPSL, le CNRM/Météo-France et Mercator, dans le but également de pérenniser les travaux. Les études entreprises sur cette plateforme concerneront la modélisation de la circulation générale, des processus et de la biogéochimie marine et l'assimilation de données. Cette plateforme servira de référence dans le cadre des programmes HyMex, MerMex et GIS. A plus long terme, de cette plateforme pourraient découler d'autres plateformes répondant à d'autres besoins identifiés pour le Chantier Méditerranée.

Pour la chimie atmosphérique, le modèle CHIMERE, développé en majeure partie par les équipes de l'IPSL, est utilisé depuis l'été 2003 pour la prévision opérationnelle de la qualité de l'air à l'échelle nationale dans le système PREVAIR à l'INERIS (www.prevoir.org). La prochaine étape, déjà entamé dans le cadre de plusieurs projets Européens et ESA, notamment en collaboration avec le CNRM/Météo-France et l'INERIS, consiste à intégrer ce système dans un système à l'échelle Européenne, avec l'objectif de disposer d'un outil fiable et précis pour la prévision de la qualité de l'air et de la composition chimique (« temps chimique ») de l'atmosphère aux différentes échelles spatiales (régionale à globale) et temporelles (climatologie, prévision à courtes échéance de quelques jours et prévision prospective à quelques décennies). Des efforts de recherche considérables seront nécessaires afin (i) de réduire l'incertitude dans certains processus encore mal représentés (ii) d'exploiter de façon optimale les synergies d'une modélisation d'ensemble et (iii) d'utiliser les techniques d'assimilation de données pour intégrer champs simulés et observés. A cet égard, il sera crucial de compléter les bases de données de mesures au sol, dont la couverture spatiale restera toujours lacunaire, par des observations satellitales. L'IPSL sera appelé à contribuer au développement de nouvelles missions satellitales capables de fournir les concentrations des polluants majeurs avec une répétitivité temporelle élevée et une bonne précision notamment dans les basses couches de l'atmosphère. A terme un tel système opérationnel de prévision devra également inclure les gaz à effet de serre.

La relation entre l'évolution des climats et environnements régionaux et le cycle de vie des écosystèmes continentaux ou marins est au cœur des préoccupations pour les années à venir et nécessite de mettre en place des coopérations judicieuses, déjà bien engagés au sein du "Chantier Méditerranée" (interfaces

HyMeX/CharMeX/MerMeX pour l'étude des processus physiques et bio-géochimiques) et au sein du GIS "climat-environnement-société".

4. Rôle de l'IPSL

L'IPSL a un rôle fondamental à jouer pour fédérer les différentes équipes travaillant sur l'étude du climat et l'environnement régional. La variété des processus en jeu – dynamiques, physico-chimiques, géochimiques, biologiques, nécessite encore davantage de développer des synergies entre les différentes équipes de l'IPSL détenant des compétences très complémentaires. Dans ce contexte, l'arrivée du LISA et du LPMA au sein de l'IPSL permettra certainement de renforcer les compétences en matière de physico-chimie, bio-géochimie (observation, modélisation, ...). De même, seule une fédération des différents laboratoires présents au sein de l'IPSL permettra d'atteindre l'objectif d'une analyse couplée des différents compartiments du système Terre (océan, surface continentale, atmosphère) et de leurs interfaces, mise en avant dans cette prospective.

Par ailleurs, cette fédération des équipes a permis aujourd'hui d'atteindre une visibilité marquée de l'IPSL dans le domaine de l'environnement et du climat régional. Sur le plan international cette visibilité se traduit par un nombre très important de projets Européens (6. ou 7. PCRD) réunissant plusieurs laboratoires de l'IPSL. Sur le plan national et international, cette force et visibilité confèrent à l'IPSL, ensemble avec ces partenaires nationaux et internationaux, un rôle tout à fait structurant dans l'élaboration des nouveaux grands chantiers pour la décennie à venir.

5. Fonctionnement de l'IPSL

La compréhension du climat et de l'environnement régional est devenue un axe de recherche très transverse au sein de l'IPSL, avec un souci de mieux comprendre les processus dynamiques et bio-géochimiques à fine échelle dans les différents compartiments du système Terre, et d'interpréter les projections régionales du climat global, dans un contexte de changement climatique. Ces travaux se structurent autour du développement d'outils de régionalisation par approches statistique et dynamique et d'assimilation de données à fine échelle, nécessitant des expertises forte en simulation numérique et observation. Le soutien de cette structuration au sein de l'IPSL dans le cadre d'un pôle apparaît une nécessité. Des interactions fortes et naturelles devraient se faire entre ce pôle et les pôles ou groupe de travail sur l'instrumentation innovante, la modélisation du climat global, la planétologie (météorologie des planètes) et les impacts. Par ailleurs ce pôle offre un cadre de réflexion pour l'offre d'enseignement et de formation sur les problématiques environnementales à l'échelle régionale.

L'IPSL devra se ménager les moyens de profiter, de façon concrète et souple, de l'expertise disponible à l'extérieur. Des ponts facilitant les collaborations avec, par exemple, les autres fédérations de recherche en Île de France devront être mis en place pour le meilleur profit des uns et des autres.

I : Prospective du Pôle Prométée

(Yvon Lemaitre, LATMOS)

Cette prospective s'appuie sur le bilan des deux premières années de vie du Pôle (« ANNEXE-BILAN-PROMETEE ») et sur les réflexions réalisées depuis quelques mois par le Pôle et dans le cadre de l'exercice de prospective réalisé au sein du groupe ad hoc « Environnement et climat régional » (ANNEXE-REFLEXION-PROSPECTIVE-PROMETEE).

L'un des grands enjeux des dix prochaines années est une meilleure compréhension du fonctionnement du climat et de l'environnement à l'échelle régionale. La compréhension intégrée des processus (physiques, bio-géo-chimiques) des différents compartiments du système Terre (océan, continent, atmosphère) à cette échelle est encore aujourd'hui lacunaire. Elle nécessite en particulier une meilleure connaissance des processus couplés (physiques/bio-géo-chimiques) et des processus aux interfaces (océan/atmosphère/continent) participant au fonctionnement de régions clés ("aire limitée") reconnues comme particulièrement vulnérables aux changements climatiques.

Cette meilleure compréhension intégrée nécessite des actions coordonnées tant du point de vue de l'observation que de la modélisation (stochastique, statistique ou dynamique) pour lequel l'IPSL possède une expertise reconnue. Dans ce cadre, le pôle a organisé une réflexion sur la mutualisation des efforts dans ce domaine qui a conduit à proposer la mise en place d'une plateforme de modélisation régionale couplée permettant de traduire à l'échelle régionale les études interdisciplinaires qu'elle a menée à grande échelle (en particulier au sein du Pôle de Modélisation), impliquant aussi bien les couplages entre milieux (océan/atmosphère, sol/atmosphère,...) qu'entre processus (dynamique, chimie atmosphérique, bio-géochimie océanique,...). Plusieurs modèles et outils développés à l'IPSL constituent déjà des apports originaux : le code LMDZ dans sa version zoomée, les modèles labellisés CHIMERE et NEMO dans sa version régionale (en particulier sur la Méditerranée), des codes liés à des approches probabilistes en analyse, modélisation et assimilation (applicables par exemple à l'étude des phénomènes à seuil ou des événements extrêmes et de leur variabilité), le lien entre modélisation et observation établi lors de plusieurs grandes campagnes (dernièrement : AMMA).

La prospective du Pôle PROMETTE porte sur: (i) la régionalisation du climat ii) l'étude des processus couplés, iii) l'étude des interactions entre les échelles, en s'appuyant sur la réalisation de développements en observation, modélisation (en particulier statistique et dynamique) dans lesquels la mésoéchelle est au cœur des problématiques. Dans ce contexte, l'organisation interne du Pôle va changer afin de répondre à ces enjeux scientifiques. Elle se présentera sous forme de 3 groupes de travail structurés autour de développements méthodologiques nécessitant le rapprochement d'expertises complémentaires sur les aspects de couplage mesures/observations, méthodologies d'analyse/inversion/modélisation (conceptuelle, diagnostique, pronostique) et nécessaires pour aborder les 3 thématiques scientifiques identifiées: « Modélisation régionale couplée », « Modélisation statistique » et « Assimilation à méso-échelle ». Ces études seront conduites dans le cadre de

"chantiers régionaux" (e.g. Méditerranée dans le cadre des projets HyMeX, CharMeX, MerMeX où l'IPSL est fortement engagé) ou en relation avec les études conduites sur les sites d'observations de l'IPSL (e.g. OHP, SIRTA,...). Les travaux réalisés dans ces trois groupes de travail s'appuieront sur l'expertise des GdT et services de l'IPSL en particulier le Pôle Modélisation du Climat pour la modélisation régionale couplée, le GdT SAMA pour les méthodes, les stations sol (SIRTA, OHP) et le Centre de données pour les observations.

Le premier groupe a pour projet le développement d'une plateforme de modélisation régionale multidisciplinaire (atmosphère-océan-sol, interactions physiques, chimiques et biologiques), fortement articulé avec le modèle du « Système Terre » développé à grande échelle par le Groupe de Modélisation . Il se concentre sur le développement de modules de couplage gérant les échanges aux interfaces entre un modèle dynamique (LMDZ et WRF) et les modèles NEMO (océan), ORCHIDEE (surface continentale), CHIMERE (chimie-transport). Ces travaux se feront en coopération avec Météo-France et le CERFACS. Les activités du deuxième groupe sont consacrées aux méthodes statistiques. La prise en compte des avancées récentes en statistiques, en particulier dans l'étude des valeurs extrêmes et dans le domaine de l'analyse spatio-temporelle, doit permettre de mieux répondre au besoins concernant la régionalisation, l'analyse des événements extrêmes, l'analyse des processus à fort impact, l'étude des modes de variabilité des couplages en sachant que ces couplages possèdent des échelles de variabilité spatio-temporelles distinctes des processus impliqués (interactions non-linéaires). Enfin le dernier groupe se consacre aux développements et/ou mise en œuvre d'outils d'assimilation autour des modèles méso-échelles, outils nécessaire à l'interprétation des campagnes. Tous ces projets ont reçu un début de réalisation. La plateforme de modélisation a été initiée dans le cadre d'un projet soumis au GIS. Les groupes 2 et 3 proposent des applications précises de développements méthodologiques discutées dans le cadre du groupe SAMA qui assure une « veille technologique » dans ces domaines au sein de l'IPSL.

Dans les quatre prochaines années le GdT « Modélisation régionale couplée » aura pour mission le développement, la validation et l'utilisation d'une plateforme de modélisation régionale couplée pour les thématiques scientifiques indiquées précédemment. Le GdT « Modélisation statistique » aura pour mission l'exploitation de méthodes statistiques d'analyse de données d'observations et de simulation pour l'étude des modes de variabilité des couplages en sachant que ces couplages possèdent des échelles de variabilité spatio-temporelles distinctes des processus impliqués (interactions non-linéaires), l'identification des processus les plus énergétiques (ou impactant) intervenant dans ces couplages, la variabilité de ces échanges selon les conditions de grande échelle. Les deux premiers GdT seront au cœur des études conduites sur la régionalisation du climat. Le GdT « Assimilation à méso-échelle » aura pour mission le développement d'outils permettant la réalisation de réanalyses régionales, mais également d'études plus amont concernant par exemple l'évaluation de l'apport d'informations géophysiques par un système d'observation, la sensibilité d'une grandeur physique à d'autres grandeurs physiques (sensibilité d'un transport au type de surface, ...) pour des études de processus ou l'inversion de mesures pour accéder à des paramètres clés non mesurés.

Les actions entreprises dans ces trois groupes pour les quatre prochaines années seront principalement réalisées dans le cadre du chantier « Méditerranée ». Ce

chantier présente l'intérêt de concerner l'une des régions reconnues comme particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Il est l'objet de plusieurs actions déjà lancées ou programmées, portées fortement par l'IPSL, incluant pour certaines des campagnes de mesures associées à la modélisation régionale couplée permettant d'étudier le climat et l'environnement régional dans le contexte du réchauffement global, incluant tendance, variabilité et extrêmes (tempêtes, précipitations extrême, crues, pollution,...), constituant des questions sociétales clé. Ces actions intègrent des études de fonctionnement (études de processus spécifiques y compris aux interfaces entre milieux et disciplines), la description statistique (éléments caractéristiques, variabilité, extrêmes), ainsi que l'observation et la modélisation du climat régional méditerranéen.

Ces travaux seront l'objet de « livrables » à l'ensemble de la communauté tels que les outils (plateforme de modélisation, algorithme statistique, etc..), des réanalyses régionales ou des champs climatiques régionalisés (climats présents ou futurs), des actions de formation et séminaires sur ces outils et études, et pour les aspects « impact » la production d'indices à définir avec le groupe de travail concerné.

Animateur GdT « Modélisation méso-échelle couplée » : Sophie Bastin

Animateur GdT « Modélisation statistique » : Mathieu Vrac

Animateur GdT « Assimilation à méso-échelle » : Contacts en cours