

# Climat – Environnement – Société

## *Réseau Thématique de Recherche Avancée sur le climat et les impacts du changement climatique*

Proposé par les membres fondateurs

Centre National de la Recherche Scientifique  
Commissariat à l'Énergie Atomique  
Ecole Polytechnique  
Université de Versailles – Saint – Quentin en Yvelines

### *Conception scientifique :*

*Robert Vautard*

Directeur de recherche au CNRS, Directeur du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

*Sylvie Joussaume*

Directeur de recherche au CNRS, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

*Jean Jouzel*

Directeur de recherches au CEA, Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace

*Hervé LeTreut*

Directeur de recherche au CNRS, Directeur du Laboratoire de Météorologie Dynamique

**Contact et portage du projet : Sylvie Joussaume, DR1 CNRS**

*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Bâtiment 712, Orme des Merisiers  
91191 Gif sur Yvette CEDEX*

[sylvie.joussaume@cea.fr](mailto:sylvie.joussaume@cea.fr)

**Tel : 01 69 08 56 74 ou 06 85 41 55 48**

**Secrétariat LSCE, 01 69 08 77 11**

8 Septembre 2006



## **Aux membres du Comité d'Evaluation des RTRA**

### **Nota Bene précisant les modifications apportées entre la version finale du 8 septembre et la version préliminaire déposée le 20 juillet 2006**

La version finale inclut quelques révisions par rapport à la version déposée le 20 juillet pour une première évaluation. Celles-ci portent principalement sur :

- la partie I.4 décrivant les partenaires du RTRA et le potentiel de recherche associé
- les parties I.5, I.6, I.7 et le résumé, avec des changements de rédaction
- les thèmes scientifiques décrits dans l'annexe I qui ont été complétés. Un nouveau thème transverse a été inclus sur le développement de nouvelles méthodologies de communication avec la société dans le domaine du climat.
- l'annexe II décrivant les laboratoires partenaires a été complétée afin de présenter l'ensemble des laboratoires impliqués.

Cette version inclut également les lettres de soutien des 4 organismes fondateurs du RTRA : CNRS, CEA, Ecole Polytechnique et Université Versailles-Saint-Quentin.

Nous nous tenons à votre disposition pour de plus amples précisions si besoin était.

<b>RESUME DU PROJET</b>	<b>2</b>
<b>1. LES ENJEUX</b>	<b>4</b>
<b>2. LA RECHERCHE ACTUELLE SUR LE CLIMAT EN ILE-DE-FRANCE</b>	<b>6</b>
<b>3. LE RESEAU CLIMAT – ENVIRONNEMENT – SOCIETE</b>	<b>9</b>
<b>4. LE PARTENARIAT DU RTRA</b>	<b>13</b>
4.1 LES UNITES FONDATRICES DU RTRA ET LES RESSOURCES HUMAINES	13
4.2 LES STRUCTURES TRANSVERSES ET MUTUALISEES	15
4.3 LIENS ENTRE LE RTRA ET LES AUTRES RESEAUX ET AVEC LE PRES	16
<b>5. GOUVERNANCE</b>	<b>18</b>
<b>6. FINANCEMENT DU RTRA</b>	<b>20</b>
6.1 PROJETS FINANCES PAR LE RTRA	20
6.2 BUDGET ANNUEL	21
6.3 FINANCEMENT DU RTRA	21
<b>ANNEXE I : THEMES DE RECHERCHE DU RTRA</b>	<b>22</b>
<b>I.1 CLIMAT GLOBAL, POLITIQUES ENERGETIQUES ET CROISSANCE ECONOMIQUE</b>	<b>22</b>
I.1.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	22
I.1.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	25
I.1.3 EXPERIENCE DES EQUIPES DU RESEAU	25
I.1.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	25
<b>I.2 EXTREMES CLIMATIQUES ET IMPACTS</b>	<b>27</b>
I.2.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	27
I.2.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	29
I.2.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	30
I.2.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	30
<b>I.3 CLIMAT, UTILISATION DES SOLS ET RESSOURCES EN EAU</b>	<b>31</b>
I.3.1. ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	31
I.3.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	34
I.3.3. EXPERIENCES DES EQUIPES	34
I.3.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	35

<b>I.4 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES SEMI-NATURELS ET AGRICOLES</b>	<b>36</b>
I.4.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	36
I.4.2 RESULTATS ATTENDUS	36
I.4.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	39
I.4.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	39
<b>I.5 CLIMAT ET QUALITE DE L’AIR</b>	<b>40</b>
I.5.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	40
I.5.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	40
I.5.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	42
I.5.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	43
<b>I.6 CLIMAT ET SANTE</b>	<b>44</b>
I.6.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	44
I.6.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 PROCHAINES ANNEES	46
I.6.3 EXPERIENCES DES EQUIPES	47
I.6.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	48
<b>I.7 CLIMATS DE REGIONS VULNERABLES PRESENTS, PASSES, FUTURS</b>	<b>50</b>
I.7.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	50
I.7.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANS A VENIR	54
I.7.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	55
I.7.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	56
<b>I.8 MODELISATION NUMERIQUE DU SYSTEME TERRE</b>	<b>57</b>
I.8.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	57
I.8.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	57
I.8.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	58
I.8.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	59
<b>I.9 OBSERVATION DE LA TERRE ET DES PARAMETRES CLIMATIQUES</b>	<b>61</b>
I.9.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	61
I.9.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	62
I.9.3 EXPERIENCE DES EQUIPES	63
I.9.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	65
<b>I.10 MOBILISATION DES CONNAISSANCES SUR LES INTERFACES CLIMAT-SOCIETE</b>	<b>67</b>
I.10.1 ENJEUX SCIENTIFIQUES ET SOCIETAUX	67
I.10.2 RESULTATS ATTENDUS DANS LES 5 ANNEES A VENIR	70
I.10.3 EXPERIENCE DES EQUIPES DU RESEAU	71
I.10.4 ATTRACTIVITE INTERNATIONALE	72

---

**ANNEXE II : DESCRIPTION DES UNITES FONDATRICES ET FEDERATIONS DE RECHERCHE DU RTRA** **73**

<b>II.1 L’INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE (IPSL)</b>	<b>73</b>
<b>II.2 LES LABORATOIRES DE L’IPSL</b>	<b>74</b>
II.2.1 LE CENTRE D’ETUDES DES ENVIRONNEMENTS TERRESTRE ET PLANETAIRES (CETP)	74
II.2.2 LE LABORATOIRE DE METEOROLOGIE DYNAMIQUE (LMD)	75
II.2.3 LE LABORATOIRE D’OCEANOGRAPHIE ET DU CLIMAT : EXPERIMENTATION ET APPROCHES NUMERIQUES (LOCEAN)	76
II.2.4 LE LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT ET DE L’ENVIRONNEMENT (LSCE)	77
II.2.5 LE SERVICE D’AERONOMIE (SA)	78
<b>II.3 LES UNITES FONDATRICES HORS IPSL</b>	<b>79</b>
II.3.1 LABORATOIRE D’ECOLOGIE, SYSTEMATIQUE ET EVOLUTION (ESE)	79
II.3.2 SISYPHE	79
II.3.3 CENTRE INTERNATIONAL DE RECHERCHE SUR L’ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPEMENT (CIRED)	80
II.3.4 BioEMCO	80

II.3.5 PIFO ; UFR DE MEDECINE DE UVSQ : FACULTE DE MEDECINE PARIS-ILE DE FRANCE-OUEST	81
II.3.6 LABORATOIRE INTERUNIVERSITAIRE DES SYSTEMES ATMOSPHERIQUES (LISA)	82
II.3.7 LABORATOIRE D'ECONOMETRIE DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE (CECO)	83
II.3.8 C3ED – EQUIPE IACA	84

---

**ANNEXE III : STRUCTURES MUTUALISEES DE L'INSTITUT PIERRE-SIMON LAPLACE** **86**

---

<b>III.1 LE POLE DE MODELISATION DU CLIMAT ET LA PLATEFORME DE MODELISATION ASSOCIEE</b>	<b>86</b>
<b>III.2 LE POLE PROMETEE (PROCESSUS DE MOYENNE ECHELLE: TRANSFERT D'ENERGIE ET D'EAU)</b>	<b>86</b>
<b>III.3 LE POLE SPATIAL ET INSTRUMENTAL</b>	<b>87</b>
<b>III.4 LES MISSIONS D'OBSERVATION</b>	<b>87</b>
<b>III.5 LE CENTRE DE DONNEES</b>	<b>87</b>
<b>III.6 LES OUTILS NUMERIQUES PARTAGES</b>	<b>88</b>
LE MODELE INTEGRE DU SYSTEME TERRE DE L'IPSL	88
LE MODELE DE CHIMIE-TRANSPORT CHIMERE	89

---

**ANNEXE IV : FORMATION** **90**

---



## Résumé du projet

La création d'un RTRA en région parisienne sur le thème « Climat-Environnement-Société » répond au besoin de renforcer et d'étendre les recherches sur le changement climatique et ses impacts sur la société.

L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Fédération de Recherche du CNRS et Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) rattaché à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, regroupe en région parisienne 5 laboratoires (CETP, LMD, LOCEAN, LSCE, SA). Son objectif principal est l'étude de l'environnement global de la Terre. Il s'appuie sur le développement commun d'outils de modélisation et d'observation. Ces outils sont appliqués à la reconstitution des climats passés (paléoclimats), à la documentation et à la compréhension des fluctuations climatiques récentes, à la simulation numérique de ces fluctuations passées ou présentes, et à la prévision de son évolution future. L'IPSL a su étendre cette démarche à l'ensemble des composantes du « système Terre » : atmosphère, océan, glaces en y intégrant les aspects liés à l'hydrologie, à l'étude de la végétation continentale et à celle des composantes chimiques ou biogéochimiques de notre environnement. Sous l'impulsion de Gérard Mégie depuis 1990, l'IPSL a permis d'organiser les recherches sur les composantes physiques du climat.

D'autres laboratoires de la région parisienne abordent des thématiques liées au changement climatique complémentaires à celles de l'IPSL, dans le domaine de l'écologie (ESE, BioEMCO), de l'économie et des négociations internationales (CIRED, CECO, C3ED), à travers les problèmes de pollution et de qualité de l'air et leur impact sur la santé (LISA, PIFO), ou encore dans le domaine de l'hydrologie (SISYPHE).

Créer un lien fort entre les études à dominante physique et celles à dominante écologique ou sociétale est indispensable pour décrire les impacts du changement climatique à venir. Les recherches dans ces différents domaines ont une maturité suffisante pour permettre de créer ce lien, mais un effort important d'incitation et de coordination est indispensable pour y arriver. C'est l'objectif de ce RTRA, qui s'inscrit aussi dans un réseau de collaborations françaises, européennes ou internationales, et doit donner à la France un avantage compétitif réel dans ce domaine.

Les unités concernées par les thématiques du RTRA rassemblent plus de 1500 personnes en Ile de France, dont 625 chercheurs. Environ la moitié des personnels sont concernés directement par les thématiques du RTRA.

Une série de projets coordonnés est mise en avant pour illustrer les questions de société auxquelles le réseau permettra d'apporter des réponses dans les années à venir :

1. Climat global, politiques énergétiques et croissance économique
2. Extrêmes climatiques et impacts
3. Climat, utilisation des sols et ressources en eau
4. Impact du changement climatique sur les écosystèmes semi-naturels et agricoles
5. Climat et qualité de l'air
6. Climat, composition atmosphérique et santé
7. Climats de régions vulnérables, présents, passés et futurs

Trois projets, plus méthodologiques, portent sur les développements coordonnés de modèles climatiques, de systèmes d'observation et de mobilisation des connaissances :

8. Modélisation numérique du Système Terre
9. Observation de la Terre et des paramètres climatiques
10. Mobilisation des connaissances sur les interfaces climat-société

L'objet du RTRA est d'organiser et de renforcer ces thématiques émergentes en utilisant un dispositif permettant :

- l'accueil de chercheurs étrangers de haut niveau sur des chaires d'excellence ;
- l'accueil de jeunes chercheurs ou de groupes de jeunes chercheurs étrangers sur la base de projets innovants nécessitant la constitution rapide d'une petite équipe ;
- financement du développement de projets structurants autour des plates-formes intégrées à destination opérationnelle ;
- la mise en place d'actions de communication et de formation à vocation internationales (colloques, écoles thématiques)

Le budget annuel demandé est de 1,7 M€, soit un budget total de 9 M€ sur 5 ans.

# 1. Les enjeux

Le réchauffement global de la planète est un sujet de préoccupation majeure pour notre société. Ce réchauffement n'est plus à démontrer, les années 90 sont la décennie la plus chaude du siècle et l'année 2005 est globalement la plus chaude jamais enregistrée. La responsabilité des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines est aussi désormais très claire. Cependant des incertitudes demeurent quant à l'amplitude de la modification climatique à venir qui dépend de l'interaction de processus complexes et du niveau futur d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre. L'incertitude est encore plus forte si on considère les changements à l'échelle régionale et l'évolution des événements que l'on qualifie « d'extrêmes » parce qu'il sont rares et ont un impact fort sur les activités humaines : sécheresses prolongées, canicules, tempêtes, etc..... Même si le diagnostic général est établi, un effort de recherche spécifique est encore nécessaire pour passer d'une appréciation globale de la situation à l'analyse des interactions fines à l'échelle de secteurs ou de territoires et, in fine, à la mise en place de mesures adaptées. Les conséquences du réchauffement sur l'environnement, sur les ressources et sur l'économie restent encore incertaines, bien qu'elles puissent être majeures voire catastrophiques. Dans le même temps, la pression anthropique sur l'environnement s'intensifie, alimentée par l'accroissement de la démographie, le regroupement de populations dans des mégapoles et l'exploitation intense de l'espace et des ressources naturelles associée aux modes de développement actuels. Pression anthropique et changement climatique combinent leurs effets, compliquant la prise de décision publique et l'adoption de stratégies socio-économiques de développement durable.

De nombreux sujets d'étude et de recherches pluridisciplinaires sur le « système Terre » émergent aujourd'hui. Ils touchent le climat ou l'environnement global, leurs changements et les impacts associés, les liens entre climat et sphère socio-économique, entre climat, utilisation des sols et ressources en eau, entre climat et santé, entre climat et gouvernance mondiale. Ces questions appellent une expertise dédiée, et néanmoins diverse, ancrée sur une connaissance solide des problèmes environnementaux planétaires. Cette dernière doit permettre l'accès, pour des citoyens, des décideurs, des négociateurs dans les instances internationales à une information scientifique de premier plan et mise à jour sur ces questions qui font nécessairement l'objet de débats, d'hésitations, et de controverses portant aussi bien sur les connaissances de base que sur les stratégies d'action à engager.

L'étude du climat et de ses liens avec la société réclame le développement d'actions de recherche résolument multidisciplinaires. Cependant la multidisciplinarité ne garantit pas le succès, à elle seule. Les recherches doivent également être coordonnées autour de quelques pôles d'intégration permettant un usage transdisciplinaire des données et résultats, et une circulation efficace des méthodes et outils. Les forces en présence en Ile de France, en particulier sur le Plateau de Saclay, couvrent une grande partie des disciplines mentionnées.

Le projet présenté vise la création d'un RTRA, le « Réseau Climat-Environnement-Société ». Ce Réseau s'appuiera sur la recherche fondamentale sur le climat, d'envergure internationale, conduite au sein de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et sur l'expertise de laboratoires partenaires permettant d'ouvrir plus largement sur les questions sociétales liées aux changements climatiques et environnementaux. Il constituera, pour la France et l'Europe, un centre d'expertise incontournable alimenté par une recherche d'excellence.

De tels centres émergent aujourd’hui dans le paysage européen, comme le « Tyndall Centre for Climate Change Research » au Royaume Uni qui est un consortium de 6 universités ou le « Potsdam Institute for Climate Impact Research » (PIK) en Allemagne. Ils bénéficient d’une interaction forte avec des centres spécialisés dans l’étude du climat comme le consortium des Max-Planck-Institute, Hambourg-Mayence et Jena, pour le PIK ou le Hadley Centre pour le Tyndall Centre. Mais ni le Royaume-Uni, ni l’Allemagne, ne rassemblent dans une même région géographique un réseau de compétences sur le changement climatique et ses impacts aussi important que celui qui sera permis par le RTRA « Climat-Environnement-Société ». Ce RTRA peut donc donner à la France une avance importante, en permettant la mise en œuvre de stratégies de recherche coordonnées s’appuyant sur une intégration très large, unique au monde, qui aborde l’étude de l’environnement planétaire, en allant des sciences du climat et des paléoclimats aux impacts environnementaux. Ce large espace interdisciplinaire inclut des domaines tels que la biogéochimie, l’hydrologie, l’observation spatiale de la Terre ainsi que l’étude des processus socio-économiques liés aux interactions avec le climat, soit parce qu’ils sous-tendent les trajectoires d’émissions, soit parce qu’ils déterminent la vulnérabilité aux événements et évolutions climatiques, soit enfin qu’ils forment la trame des stratégies et instruments de prévention du risque climatique.

La visibilité internationale du RTRA s’appuiera à la fois sur l’engagement fort des chercheurs déjà en place dans les organismes concernés, dans les programmes nationaux, européens et internationaux de recherche fondamentale, et sur une capacité d’accueil de chercheurs étrangers. Il offrira aussi des services opérationnels comme plusieurs « observatoires » ou plates-formes de prévision du climat, d’observation de la Terre, de la composition atmosphérique (gaz, aérosols, ozone, vapeur d’eau et nuages), de la pollution, des flux de carbone, de la productivité végétale. A travers le Pôle Spatial et Instrumental de l’IPSL, il participera au développement d’instruments spatiaux de nouvelle génération destinés à l’observation des environnements neutres et ionisés de la Terre. Ces services seront partie intégrante de programmes européens comme « Global Monitoring of Environment and Security » (GMES), de la stratégie mondiale Global Earth Observation System of Systems (GEOSS), du programme joint ESA-Communauté Européenne « European Space Technology Master Plan » (ESTMP).

La création de ce réseau bénéficie du soutien initial de plusieurs établissements de tutelle des laboratoires concernés : le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Commissariat à l’Energie Atomique (CEA), l’Ecole Polytechnique (X), l’Université de Versailles – Saint Quentin en Yvelines (UVSQ). Le réseau fonctionnera en étroit partenariat avec les autres établissements tutelles des unités de recherches et de l’IPSL : l’Université Pierre et Marie Curie (UPMC), l’Ecole Normale Supérieure (ENS), l’Université Paris-Sud (PXI), le Centre National d’Etudes Spatiales (CNES), l’Institut de Recherche pour le Développement (IRD), le Museum National d’Histoire Naturelle, l’Institut National de Recherche en Agronomie, l’Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA-PG), l’Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, l’Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), l’Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF), l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), l’Université PARIS 7, l’Université PARIS 12, l’Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP), l’Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE).

## 2. La recherche actuelle en Ile-de-France sur le climat

Les forces de recherche sur le climat et l'environnement global présentes en Ile-de-France regroupent plus de 800 personnes dans plusieurs unités de recherche, au sein de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) - le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), le Service d'Aéronomie (SA), le Centre d'Etudes Terrestres et Planétaires (CETP) et le Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN). La direction de l'IPSL est implantée sur le site de Guyancourt et ses unités sont (ou seront très prochainement) situées majoritairement sur le Plateau de Saclay-Guyancourt (LMD, LSCE, SA, CETP). L'IPSL est également structuré autour d'un centre d'activités à l'UPMC (LOCEAN, SA, LMD) et à l'Ecole Normale Supérieure (LMD). La physique fondamentale des mécanismes du climat et des environnements terrestre et planétaires est au centre des recherches qui y sont menées.

Les principaux thèmes de recherche de l'IPSL liés aux objectifs du réseau sont :

- les mécanismes des variations climatiques passées, présentes, et futures et la prévision des climats futurs, en prenant en compte des causes naturelles et de celles liées aux activités humaines – croissance de l'effet de serre, déforestation, maîtrise des systèmes d'eau ou d'irrigation, ...
- le fonctionnement du système Terre impliquant l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère et leur couplage à travers les grands cycles biogéochimiques (eau, carbone, azote, ozone) ;
- l'observation de la Terre au travers d'observatoires in situ, de moyens aéroportés et en tirant partie d'une forte composante spatiale ; le développement de nouvelles méthodes et l'exploitation des données afin de mieux suivre l'évolution du climat
- le suivi de la composition atmosphérique et de son impact sur le bilan radiatif de la planète (nuages, aérosols, gaz) ;

A ces unités de recherche sur le climat et l'environnement s'ajoutent des unités dont l'expertise complètera celle de l'IPSL aux interfaces entre climat et société dans les domaines:

- de l'écologie avec le laboratoire Ecologie Systématique Evolution (ESE) et le laboratoire BioEMCO,
- de l'économie avec le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), le Laboratoire d'Econométrie de l'Ecole Polytechnique (CECO), et le Centre d'économie et d'éthique pour l'environnement et le développement (C3ED) de l'UVSQ et de l'IRD,
- de la qualité de l'air, avec le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA),
- de l'hydrologie avec le laboratoire Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux (SISYPHE) de l'UPMC.
- de la santé avec les laboratoires de l'UFR de Médecine de l'UVSQ-Paris Ile de France Ouest (PIFO).

Une collaboration forte sera établie avec d'autres unités d'Ile de France pour compléter le réseau comme le Laboratoire Environnement et Grandes Cultures (EGC) de l'INRA, le laboratoire «Interactions Dynamiques des Environnements de Surface» (IDES) de Paris XI, et le Centre pour l'Enseignement et la Recherche sur l'Environnement et la Société (CERES,

Environmental Research and Teaching Institute) de l'Ecole Normale Supérieure. Des collaborations existent déjà avec des laboratoires d'autres régions, d'autres organismes, en particulier avec le pôle toulousain « Terre Vivante et Espace » et Météo France. Ces collaborations bénéficieront de l'existence du RTRA qui sera amené à jouer un rôle national fort.

Le travail de recherche au sein du RTRA sera donc pluridisciplinaire et partenarial entre les différents laboratoires et entre leurs organismes de tutelle.

Des résultats pionniers dans les disciplines du climat et de l'environnement global sont déjà apparus, comme l'analyse des archives climatiques issues des carottages sédimentaires et des forages polaires mettant en évidence le lien entre climat et gaz à effet de serre dans le passé ainsi que la valeur inégalée des teneurs actuelles en gaz à effet de serre, ou les simulations de prévision du changement climatique montrant que l'évolution du carbone est susceptible de réduire les puits de carbone accélérant d'autant le réchauffement du climat. Les équipes concernées ont également été à l'origine de développements de méthodes de mesure par télédétection de la composition atmosphérique par lidar, radar, radiomètres, spectromètres optiques et à plasma embarqués sur des satellites et des sondes spatiales interplanétaires. Un certain nombre de personnalités scientifiques portent ou ont fortement porté le développement de ces disciplines du climat, parmi lesquelles Gérard Mégie, ancien Président du CNRS, et premier directeur de l'IPSL. Les équipes accueillent plusieurs scientifiques identifiés, selon l'index « ISI web of science », parmi les auteurs les « plus cités » internationalement dans les domaines du RTRA ; un chercheur a reçu la médaille d'or du CNRS (J. Jouzel), deux autres sont membres de l'Académie des Sciences (G. de Marsily, H. Le Treut), quatre sont membres de l'Academia Europae (J. Jouzel, M. Ghil, H. Le Treut et J.C. Duplessy).

L'accueil de chercheurs étrangers de grande renommée au sein des unités de recherche est déjà une pratique courante. Les collaborations internationales sont très solides, au travers de nombreux projets européens, de programmes ambitieux dédiés à l'observation de la Terre avec les agences spatiales, de projets avec des universités américaines, de campagnes internationales de mesure, sur la pollution atmosphérique ou les paléoclimats avec la Chine, sur la radiométrie satellitaire avec l'Inde, sur le cycle du carbone et sur l'exploration du Système Solaire avec la Russie, le Japon et les Etats-Unis. Les équipes ont aussi participé aux expériences internationales de simulation du réchauffement climatique dans le cadre du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), en collaboration avec Météo-France, et sont en pointe, au niveau mondial, dans la simulation comparée des climats de la Terre et des paléoclimats.

En 2005, les chercheurs de ces unités ont publié plusieurs centaines de publications dans des revues internationales à comité de lecture. Par la coordination de plusieurs projets de l'Agence Nationale de la Recherche (appel de 2005), par leur rôle fort dans les programmes nationaux de l'Institut National des Sciences de l'Univers (plusieurs responsables de programme), les scientifiques de ce réseau jouent un rôle structurant pour la recherche sur le climat en France. Ce rôle est reconnu à travers la labellisation par l'INSU de systèmes d'observation et de tâches de service nationales, comme le modèle d'océan (NEMO), les pôles thématiques de données (Ether et Icare), les systèmes d'observation sur le carbone et l'ozone stratosphérique (RAMCES, CARAUS et NDSC). L'IPSL joue un rôle moteur sur la simulation du changement climatique au sein du projet ESCRIME en partenariat avec Météo France et avec le CERFACS. En collaboration avec la MIES et l'ONERC, Les résultats

obtenus sont mis à disposition de la communauté nationale pour l'étude des impacts du changement climatique.

Cette volonté structurante se retrouve également au niveau européen puisque plusieurs dizaines de projets ont été menés dans les 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> programmes cadre européens, souvent à un niveau de coordination élevé (ex : projets intégrés AMMA, DAMOCLES, GEOMON). Une dizaine de chercheurs participent à haut niveau à la structuration de la recherche internationale au travers du Programme Climatique Mondial de l'OMM, et du Programme International Géosphère-Biosphère de l'ICSU. Les équipes sont fortement impliquées dans de nombreuses missions spatiales d'observation de la Terre (CALIPSO, MEGHA-TROPIQUES, JASON, ENVISAT, etc...).

L'enseignement et la transmission des connaissances sont également une composante forte de l'activité, avec plus d'une centaine de personnes impliquées dans l'enseignement, à l'Université ou dans les Grandes Ecoles (UVSQ, UPMC, Paris 7, Paris 11, Paris 12, Ecole Polytechnique, ENS Ulm, ENS Cachan, ENSTA, Centrale Paris, ENPC, Mines de Paris, ENGREF, ...).

L'implication des équipes dans les questions de société liées au climat est notoire. Une dizaine de chercheurs participent à la rédaction du quatrième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais) qui sera publié en 2007. Huit chercheurs sont impliqués dans la rédaction de l'*Ozone Assessment 2006* du PNUE et de l'OMM. Le modèle océanographique NEMO développé au sein de l'IPSL est désormais un outil européen, aujourd'hui indispensable pour l'océanographie opérationnelle, notamment dans le cadre du projet MERCATOR-Océan. Une équipe a développé le système opérationnel français de prévision de la pollution atmosphérique (PREV'AIR) utilisé par le ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et par plusieurs autres pays (Italie, Pays-Bas, Portugal, ...). Plusieurs chercheurs sont impliqués dans des collaborations fortes avec les organismes publics français (ADEME, METEO-FRANCE, INERIS, ONERA, CNES) et Européens (ESA), mais aussi dans la valorisation des instruments (télédétection terrestre ou spatiale) et des méthodes auprès d'entreprises.

### 3. Le Réseau Climat – Environnement – Société

Un RTRA mettant treize unités franciliennes en réseau autour de l'Institut Pierre-Simon Laplace, avec un ancrage fort sur le plateau de Saclay, constituera un **centre d'excellence** sur l'étude des phénomènes climatiques et de leur interaction avec l'homme et la société. Il constituera aussi un **centre d'expertise** sur lequel pourront s'appuyer les décideurs français ou européens, concernant les interactions entre le climat et la société. Les objectifs du RTRA seront donc :

- de renforcer l'excellence et l'attractivité des recherches sur le climat en concrétisant le capital d'intégration des connaissances par la coordination de projets ambitieux et la structuration de l'accueil des chercheurs étrangers ;
- de développer fortement et rapidement les études liées aux questions de société, en renforçant le noyau existant de collaborations avec les unités plus spécialisées sur ces questions, alors que la composante « physique » est bien établie au sein de l'IPSL ;

L'objectif thématique principal en vue d'appréhender les changements du climat, sera de développer des approches intégrées et transversales aux différents compartiments, habituellement disjoints. L'ensemble de ces approches permettra de recomposer un tableau plus unifié de tous les aspects en jeu dans la dynamique du changement climatique et de ses impacts. Cela concerne des échelles temporelles très différentes, aux époques passées, présentes et futures, et requiert de s'intéresser aussi bien au climat global qu'à ses aspects régionaux, en intégrant toutes les composantes du système (océan, atmosphère, continent, calottes, pergélisols) et en s'appuyant à la fois sur des outils d'observation et de modélisation. Les objets concernent les paléoclimats, le climat global actuel, le climat futur, et les processus associés. Leur étude s'appuie sur l'analyse des archives climatiques, des observations de l'océan et de l'atmosphère et de leur composition, des relations climat/ozone-stratosphérique/rayonnement UV au sol, et sur la modélisation du climat global et de celui de régions identifiées (bassin méditerranéen, mousson). Ces activités s'appuieront fortement sur les activités de modélisation développées au sein de l'Institut Pierre-Simon Laplace et de son pôle de modélisation, et bénéficieront des autres efforts interdisciplinaires comme la « plateforme environnement » de l'ENS, ou les réseaux R2D2 (Réseau francilien de recherche sur le développement soutenable) et Environnement-Santé.

Ce RTRA contribuera à développer l'interface avec les décideurs sur ces enjeux de société, en bénéficiant en particulier du rôle médiateur de l'Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI) avec lequel les équipes du RTRA ont déjà commencé à tisser des liens. En partenariat avec de nouvelles équipes de recherche, cette vision intégrée englobera également les interactions entre le climat et les grandes questions sociétales liées à l'environnement climatique, l'énergie, l'économie, la santé, l'utilisation et l'érosion des sols. Cette vision inclura aussi les relations de l'atmosphère avec les autres composantes du système : planète solide (lithosphère et érosion continentale), couches externes (ionosphère, magnétosphère), flux d'irradiation solaire (rayonnement, particules).

Le RTRA proposé bénéficie du soutien initial des organismes de tutelle des laboratoires présents sur le Plateau de Saclay, CNRS, CEA, X, UVSQ. Il agira de concert avec les actions formulées dans le PRES UniverSud, et en partenariat avec les autres tutelles des laboratoires,

ainsi qu'avec les Ecoles participantes à ParisTech. Il permettra notamment l'accueil d'étudiants des disciplines du PRES.

Le réseau Climat-Environnement-Société s'appuiera sur les forces impliquées dans l'étude du climat et de l'environnement global. Il développera un certain nombre de thématiques de recherche situées aux interfaces entre ces disciplines centrales et les sciences de la société

Parmi ces thématiques figurent:

- les relations entre changement climatique et politiques énergétiques avec l'objectif de fournir une aide à la décision à partir d'une plateforme de modélisation intégrant climat et systèmes économiques ;
- la prévision du changement climatique et de ses impacts sur la société, notamment sur les ressources en eau, les écosystèmes, la qualité de l'air et la santé, en s'attachant à améliorer l'étude des phénomènes climatiques extrêmes et celle des climats des régions vulnérables.

Sur ces thématiques, le réseau permettra le financement de projets de recherche ou de chaires d'excellence, ou l'association des deux. La mise en réseau des équipes de recherche permettra aussi la consolidation de la recherche et la R&D autour de plates-formes intégrées destinées d'abord à la recherche mais aussi au développement de services opérationnels, sur deux grandes classes de plates-formes, numériques ou observationnelles :

- **Modélisation du système Terre** : les plates-formes numériques de prévision du climat de l'échelle globale à celle de régions-clé, des sécheresses, de la productivité végétale, des flux de carbone, de la qualité de l'air ;
- **Observation de la Terre et des paramètres du climat** : les plates-formes d'observation, in situ ou par télédétection terrestre ou spatiale des paramètres du climat et de la composition atmosphérique (état des surfaces, nuages et précipitations, gaz réactifs, gaz à effet de serre, aérosols) ;

Le RTRA est conçu comme un outil permettant de donner attractivité et visibilité aux travaux régionaux sur le climat et la société, via les différents types de projets suivants :

- l'accueil de chercheurs étrangers de haut niveau sur des chaires d'excellence, environnées ou non ;
- l'accueil de jeunes chercheurs ou de groupes de jeunes chercheurs étrangers sur la base de projets innovants nécessitant la constitution rapide d'une petite équipe, éventuellement associée à une chaire d'excellence ;
- le financement du développement de projets structurants autour des plates-formes intégrées à destination opérationnelle
- les actions de communication internationales (colloques)

Les dix thèmes de recherche couverts par le RTRA sont décrits en détail dans l'Annexe I. En résumé, ces thèmes sont intitulés :

1. **Climat global, politiques énergétiques et croissance économique** : il s'agit d'une part d'étudier les relations entre ces trois composantes couplées par le développement, notamment, d'une plate-forme de modélisation intégrée Cycles Biogéochimiques-Economie-Climat ; les

porteurs du thème sont : Philippe Ciais (LSCE), Jean-Charles Hourcade (CIRED), Martin O'Connor (C3ED), Vincent Gitz (CIRED),

**2. Extrêmes climatiques et impacts** : Dans ce volet, l'étude porte sur la distribution des extrêmes climatiques et sur leurs impacts économiques et sociétaux.; elle s'appuie sur différents modèles : des modèles statistiques décrivant les lois d'apparition des extrêmes, des modèles conceptuels décrivant la non-linéarité des systèmes, des modèles d'impact économique. Les porteurs du thème sont Michael Ghil (ENS), Pascal Yiou (LSCE), Bernard Legras (LMD).

**3. Climat, utilisation des sols et ressources en eau** : Il s'agit d'étudier les liens entre le changement climatique et l'anthropisation des surfaces, sous différents aspects, notamment la contribution de l'usage des terres aux émissions polluantes et au changement climatique. Les climats passés et présents sont étudiés simultanément. Les porteurs du thème sont Nathalie de Noblet (LSCE), Agnès Ducharne (SISYPHE), Benjamin Sultan (LOCEAN), Catherine Ottlé (LSCE).

**4. Impact du changement climatique sur les écosystèmes semi-naturels et agricoles** : on étudiera l'effet du changement climatique sur les écosystèmes, la biodiversité, les cycles du carbone et de l'azote, la croissance des arbres. Les porteurs du thème sont Paul Leadley (ESE), Luc Abbadie (BioEMCO), Nicolas Viovy (LSCE).

**5. Climat et qualité de l'air** : la problématique est d'examiner le double effet de la modification du climat et des émissions polluantes sur la composition chimique de l'air respiré par la plupart des populations. Les porteurs du thème sont Didier Hauglustaine (LSCE), Laurent Menut (LMD), Matthias Beekmann (LISA), Gilles Bergametti (LISA)

**6. Climat, composition atmosphérique et santé** : il s'agit d'étudier les effets sur la santé du changement global du climat, des modifications de l'ozone stratosphérique et de la qualité de l'air, de l'évolution des écosystèmes sur les épidémies. Les porteurs du thème sont Philippe Saïag (PIFO), Laurence Eymard (LOCEAN), Alain Weill (CETP), Alain Hauchecorne (SA), Yves Balkanski (LSCE).

**7. Climats de régions vulnérables, présents, passés et futurs** : Les changements climatiques globaux se traduisent par des modifications importantes au niveau régional. Il s'agira d'étudier les changements du climat présent, futur et passé dans deux régions clé : la Méditerranée et l'Europe de l'Ouest. Les porteurs du thème sont Philippe Drobinski (SA), Gilles Ramstein (LSCE), Pascale Braconnot (LSCE), Christophe rabouille (LSCE).

**8. Modélisation numérique du Système Terre** : la modélisation du système Terre nécessite d'intégrer différents processus (chimie atmosphérique, cycles biogéochimiques) afin d'améliorer notre compréhension de l'évolution récente du climat au cours du siècle dernier et les évolutions probables du climat futur. Ce thème utilise les structures de calcul intensif présentes en Ile-de-France. Les porteurs du thème sont Pascale Braconnot (IPSL/LSCE), Didier Hauglustaine (LSCE).

**9. Observation de la Terre et des paramètres climatiques** : il s'agit de développer les plates-formes communes d'observations (gaz à effet de serre, flux de carbone, ozone stratosphérique, nuages, aérosols et rayonnement), afin de permettre l'accroissement des

connaissances sur l'environnement global. Les porteurs du thème sont Jacques Pelon (SA), Philippe Keckhut (SA), Alain Protat (CETP).

**10. Mobilisation des connaissances sur les interfaces climat-société** : l'interface science-société dans le domaine du changement climatique sera développée par la construction d'outils multimédias et interdisciplinaires d'aide à la délibération pour, sur et autour des politiques climat-environnement-société. Le porteur de ce thème est Martin O'Connor (C3ED).

## 4. Le partenariat du RTRA

### 4.1 Les unités fondatrices du RTRA et les ressources humaines

Les unités concernées par les thématiques du RTRA rassemblent plus de **1500 personnes** en Ile de France, dont **625 chercheurs**, **269 étant de « rang A »**, c'est-à-dire soit Directeur de Recherche ou équivalent (CNRS) ou Professeur (Université), **393 ITA** et plus de 300 thésitifs. **Environ la moitié des personnels sont concernés directement par les thématiques du RTRA**, avec la même proportion d'un peu plus de 40% de chercheurs rang A. L'IPSL représente 62% de l'effectif de chercheurs concernés par le RTRA, ce qui représente 70% de ses effectifs chercheurs, alors que dans l'ensemble des autres unités ce pourcentage atteint 33% en moyenne avec cependant de grandes disparités entre les laboratoires (cf Tableau ci-dessous).

La dynamique scientifique du réseau est fondée sur un ensemble de partenariats déjà existants mais partiellement coordonnés. La construction du réseau s'effectue sur les interfaces entre climat, environnement global et d'autres disciplines, ce qui place la structure fédérative de l'IPSL au centre du partenariat. Au sein de cet institut de nombreuses structures et outils de collaborations existent déjà et sont rappelées au chapitre 4.2. Au-delà des collaborations fortes au sein de l'IPSL, de nombreuses collaborations entre les autres unités se sont organisées au fil du temps autour de projets communs. Le RTRA permettra d'avoir un lieu de vie scientifique commun pour toutes ces collaborations, d'en partager tous les résultats.

Le réseau est constitué de 13 unités fondatrices, dont la description détaillée figure en Annexe II. Le tableau ci-dessous donne une description résumée de ces 13 unités et de la fédération de recherche de l'Institut Pierre-Simon Laplace.

L'excellence des unités fondatrices du RTRA est démontrée par plusieurs indicateurs bibliométriques, ou par les projets qui ont été récemment engagés :

Nous avons pu recenser **680 publications** en sommant les contributions de chaque laboratoire des sciences de l'univers ou du vivant (**430 chercheurs**). A partir de la base bibliométrique ISI,

- le nombre de chercheurs ayant **plus de 25 publications** est estimé à **170**,
- le nombre de chercheurs ayant **plus de 50 publications** est estimé à **55**,
- le nombre de chercheurs ayant **plus de 100 publications** est estimé à **14**,
- le nombre de chercheurs ayant **un facteur H supérieur à 10** est estimé à **162**,
- le nombre de chercheurs ayant **un facteur H supérieur à 20** est estimé à **29**,
- le nombre de chercheurs ayant **un facteur H supérieur à 30** est estimé à **8**,
- le nombre de chercheurs ayant **un facteur H supérieur à 40** est estimé à **2**,

En ce qui concerne les projets scientifiques,

- le nombre de **projets européens** (5ème et 6ème PCRD) en cours dans les équipes (somme par unités) en 2005 est estimé à **60**,
- le nombre de **projets ANR** en cours début 2006 est estimé à **30**.

Les estimations bibliométriques basées sur une seule base de données sous-estiment nécessairement les vraies valeurs des indicateurs, à cause des erreurs de référencement

notamment. Certains chercheurs n'ont pas pu être comptés. Les chiffres de nombres de publications et projets sont des estimations basées sur un recensement incomplet. Ils sont donc également sous-estimés. Par ailleurs une redondance de certains projets existe certainement car le total des projets est obtenu en sommant les contributions de chaque unité.

Intitulé	Tutelles	Chercheurs enseignants permanents	Chercheurs Rang A DR PR E5	Chercheurs Rang B	Chercheurs concernés par le RTRA	Ingénieurs Techniciens Administratifs	Post-docs et CDD	Thèses
CETP	CNRS UVSQ	44	18	26	19	49	11	20
LMD	CNRS X UPMC ENS	52	24	28	40	46	25	25
LOCEAN	CNRS UPMC IRD MUSEUM	50	15	35	44	40	13	26
LSCE	CEA CNRS UVSQ	88	38	50	61	64	13	42
SA	CNRS UPMC UVSQ	42	15	27	29	55	22	20
IPSL	Fédération des 5 unités ci-dessus	—				20	10	—
BioEMCO	UPMC CNRS INRA ENS ENSCP INA-PG	25	8	17	23	25	3	25
CIREN	CNRS EHESS ENGREF ENPC CIRAD	20	3	17	12	5		12
C3ED	UVSQ IRD	40	15	25	10	5	20	45
ESE	CNRS PARIS-11	43	10	33	17	27	12	21
LISA	CNRS PARIS-7 PARIS-12	40	12	28	11	15	12	17
UFR PIFO Médecine	UVSQ	120	81	39	13	24	76	20
SISYPHE	UPMC CNRS ENSMP EPHE IRD	42	16	26	27	18	3	38
CECO	X CNRS	19	14	5	3			
<b>Total</b>		<b>625</b>	<b>269</b>	<b>356</b>	<b>309</b>	<b>393</b>	<b>217</b>	<b>311</b>

Ces unités fondatrices travailleront en étroite collaboration avec le laboratoire Environnement et Grandes Cultures de l'INRA, et de concert avec le Centre pour l'Enseignement et la Recherche sur l'Environnement et la Société (CERES, Environmental Research and Teaching Institute), ainsi qu'avec le laboratoire « Interactions Dynamiques des Environnements de Surface » (IDES) de l'Université de Paris 11.

*Participation des unités aux thématiques du RTRA (intitulé au chapitre 3 et description détaillée en Annexe I)*

Unité/thème	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LMD	*	*	*		*	*	*	*	*	*
CETP			*			*		*	*	*
SA					*	*		*	*	*
LSCE	*	*	*	*	*		*	*	*	*
LOCEAN			*			*	*	*	*	*
ESE			*	*					*	*
BioEMCO			*	*						*
SISYPHE			*						*	*
PIFO						*				*
CIREN	*	*								*
LISA			*		*	*			*	*
C3ED	*									*
CECO	*									*

## 4.2 Les structures transverses et mutualisées

L'animation scientifique transversale s'appuiera sur l'expérience acquise par les structures existantes au sein de l'IPSL. Cette fédération de recherche fonde sa stratégie scientifique sur plusieurs structures fédératives transverses qui permettent une coordination du travail des équipes localisées sur plusieurs sites. Le RTRA bénéficiera de ce travail d'animation et de mutualisation d'outils dont il ouvrira l'accès plus largement aux autres unités dans le cadre des axes scientifiques du RTRA. Ces structures existantes sont :

- Le Pôle de Modélisation du Climat et la plateforme de modélisation associée, qui a permis le développement d'un modèle intégré du « **Système Terre** » ;
- Le Pôle PROMETEE (PROcessus de Moyenne Echelle: Transfert d'Energie et d'Eau), ayant pour objectif de favoriser le regroupement des efforts engagés à l'IPSL sur l'étude du **Cycle de l'eau** ;
- Le pôle « spatial et instrumental » qui apportera non seulement une capacité de développement de projets dans le domaine de l'observation de la Terre mais également une capacité de développement de nouvelles instrumentations d'observation sol ;
- Les missions d'observation, avec 3 services d'observation labellisés par l'INSU qui ont été développés depuis de nombreuses années :
  - NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change), dédié à l'ozone stratosphérique et aux variables associées,
  - RAMCES (Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre),

- CARAUS (CARbone AUstral) qui concerne la mesure des échanges de gaz carbonique entre l'océan et l'atmosphère ;
- les activités du Site de Télédétection Atmosphérique (SIRTA) qui regroupe une instrumentation de pointe (lidars, radars, radiomètres) pour conduire des études coordonnées sur le cycle de l'eau, la dynamique atmosphérique, la pollution urbaine et le bilan radiatif ;
- le service **NEMO**, outil national dédié à la modélisation numérique de l'océan (dynamique et biogéochimie) utilisé dans le cadre du modèle couplé atmosphère-océan mais également plus largement pour l'étude de l'océan et le développement de l'océanographie opérationnelle,
- le service national de mesure du carbone marin (SNAPOCO2) qui effectue des analyses d'échantillons d'eau de mer pour la communauté nationale dans le domaine du cycle du carbone,
- le **Centre de Données** qui a pour première mission de répondre aux besoins des laboratoires de l'IPSL en matière de collecte, gestion, et mise à disposition de données et qui héberge le Pôle thématique national de données de chimie atmosphérique ETHER et contribue au pôle thématique sur les interactions eau-aérosols-nuages-rayonnement ICARE, basé à Lille,
- **les modèles partagés et développés à l'IPSL** : Le modèle intégré du système Terre de l'IPSL, le modèle de chimie-transport CHIMERE.

### **4.3 Liens entre le RTRA et les autres réseaux et avec le PRES**

En Ile de France, différentes structures se sont mises en place dans le domaine du développement durable, pris au sens large, avec des aspects environnementaux plus ou moins marqués. Certains des organismes et unités impliqués dans le projet de RTRA ont déjà des liens de partenariat avec ces structures parmi lesquelles nous mentionnerons :

- la FONDDRI (Fondation de Recherche pour le Développement durable et les relations internationales) qui, en particulier, a pour but de promouvoir des travaux de recherche dans le domaine de la gestion des problèmes globaux d'environnement et de la gouvernance.
- FOND@TERRA qui vise à devenir un pôle d'excellence interdisciplinaire majeur de l'espace européen sur le champ du développement durable des territoires.
- R2D2, réseau francilien de recherche sur le développement durable, dont un des objectifs est d'augmenter la capacité d'intervention de la recherche francilienne à l'échelle européenne et mondiale dans le domaine du développement durable en favorisant l'interdisciplinarité et les échanges.
- une structure en gestation, le réseau Santé-Environnement en Ile de France.

Le projet de RTRA, largement orienté sur les aspects globaux et les impacts du changement climatique a une forte spécificité par rapport à ces structures existantes ou en projet, dont les travaux sont pour une part importants guidés par des questions d'environnement ayant trait à la région francilienne. Le RTRA s'appuiera sur les collaborations qui se sont mises en place lors de l'émergence de ces structures.

Le RTRA s'appuiera également sur le Pôle de Recherche et d'Enseignement Supérieur, dont un des axes fondateurs concerne le développement durable. Les recherches effectuées dans le

RTRA se feront en interaction avec les enseignements dispensés dans les formations universitaires du PRES et les écoles doctorales.

## 5. Gouvernance

Comme le prévoit la loi, le RTRA Climat-Environnement-Société sera associé à une fondation de coopération scientifique. Les équipes travaillant au sein du RTRA sont toutes localisées en Ile-de-France, avec un ancrage particulièrement fort sur le plateau de Saclay et sur Guyancourt ou dans sa proximité immédiate (LSCE, LMD, SA, CETP, ESE, PIFO, C3ED, CECO). Ce territoire figure actuellement parmi les priorités de l'état en terme d'aménagement du territoire (déclaration d'Opération d'Intérêt National du CIACT du 6/3/2006). Le renforcement de sa capacité d'attractivité scientifique est particulièrement visé, et la réflexion sur l'environnement y figure comme une priorité. L'ancrage du RTRA Climat-Environnement-Société sur Saclay/Versaille-Saint-Quentin-en-Yvelines (labellisé opération d'intérêt national par le CIACT) pourra être matérialisé par l'association avec d'autres RTRA sur ce territoire au sein d'une fondation de coopération scientifique unique, permettant la mutualisation de tâches administratives, de communication ou de valorisation de la fondation. Cette association renforcerait également la visibilité de l'ensemble des activités scientifiques du territoire et de la région. Le RTRA pourra également être associé à une fondation de coopération scientifique indépendante.

Les organismes fondateurs du RTRA Climat-Environnement-Société sont le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), l'Ecole Polytechnique (X) et l'Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ). Ces établissements fondateurs travailleront en partenariat avec les autres organismes tutelles des unités de recherche et de l'IPSL : l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), l'Ecole Normale Supérieure (ENS), l'Institut pour le Recherche sur le Développement (IRD), l'Université Paris-Sud (PXI), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), le Museum National d'Histoire Naturelle, l'Institut National de Recherche en Agronomie, l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (INA-PG), l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris, l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF), l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), l'Université PARIS 7, l'Université PARIS 12, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSM), l'Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). Un partenariat particulièrement étroit sera établi avec l'UPMC, tutelle de plusieurs partenaires du réseau.

Le Conseil d'Administration (CA) de la fondation sera composé d'un représentant de chaque établissement fondateur (4 membres), de représentants du personnel du RTRA (2 membres), ainsi que des personnalités qualifiées (2 membres), nommés par les établissements fondateurs. Il élira son Président, qui représente la Fondation dans tous les actes de la vie civile, ainsi qu'un Vice-président et un Trésorier. Il se réunira semestriellement.

Le Conseil Scientifique (CS) sera la structure, au sein de la Fondation, en charge de l'évaluation et du contrôle de la politique scientifique du RTRA. Il sera composé de neuf membres, trois personnalités scientifiques françaises extérieures au RTRA, trois chercheurs étrangers à la compétence reconnue internationalement, et trois représentants du monde socio-économique. Il se réunira annuellement.

Le CA nommera, après consultation de l'assemblée des directeurs des unités fondatrices, le directeur général du RTRA, son adjoint et les quatre autres membres de son comité de pilotage (CP). Ce comité de pilotage aura la responsabilité de mettre en œuvre la politique scientifique du RTRA, qui sera soumise annuellement au CA pour approbation. Il aura également la responsabilité de toutes les actions du réseau, de l'administration, la gestion du personnel financé par la fondation. Le directeur général du RTRA sera directement responsable de sa politique de gouvernance devant le président de la Fondation. L'harmonisation entre les politiques scientifiques du RTRA et celles des unités sera faite par des réunions de concertations trimestrielles entre le CP et l'assemblée des directeurs d'unité. Le CP aura pour rôle de proposer au CA un arbitrage des projets prioritaires qui lui seront soumis. L'assemblée des directeurs d'unités aura un rôle consultatif sur la politique scientifique du réseau.

Le CA nommera, également après consultation de l'assemblée des directeurs d'unités, un responsable de thème pour chacun des dix thèmes de recherche décrits en Annexe I. Le directeur général du RTRA, avec l'assemblée des responsables des thèmes, animera la vie scientifique du réseau et son rayonnement extérieur, en proposant l'organisation de journées scientifiques internes, de colloques, d'actions de communications. Les responsables de thème proposeront les projets « au fil de l'eau ». Le CP fera appel à des scientifiques extérieurs au RTRA pour l'évaluation des projets proposés.

Les critères de sélection des projets seront :

- la qualité et l'originalité du projet
- l'insertion du projet dans les thèmes du RTRA
- la pluridisciplinarité du projet
- les collaborations internationales développées

Le mandat des instances de la fondation est de deux ans, renouvelable deux fois.

## 6. Financement du RTRA

### 6.1 Projets financés par le RTRA

Le RTRA permettra le financement de plusieurs types d'action, dont l'objet sera simultanément l'avancement des connaissances et le renforcement de la visibilité des actions de recherche des partenaires.

Quatre types d'actions seront financés :

1) Les **chaires d'excellence** pour chercheurs étrangers. Ces chaires, dont la durée est variable, auront pour objectif l'initiation de nouveaux projets originaux. Le RTRA financera le salaire, les charges et l'environnement du chercheur afin que son projet puisse s'effectuer dans des conditions optimales. L'arrivée de ce chercheur pourra être accompagnée de celle d'un ou plusieurs chercheurs, ingénieurs ou techniciens, afin de constituer une « équipe projet » efficace. Les projets pourront également être accompagnés d'acquisition d'équipements nécessaires. L'équipe ainsi constituée sera placée dans une ou plusieurs des unités partenaire du RTRA.

2) L'**accueil de groupes de jeunes chercheurs**, éventuellement accompagné d'ingénieurs ou de techniciens afin de développer rapidement un projet original et innovant dans les thématiques du RTRA. Le RTRA pourra financer le projet dans son ensemble, incluant les salaires, le financement et l'équipement.

3) Les projets développant, consolidant, ou utilisant une **plate-forme mutualisée** de travail, numérique ou expérimentale, un réseau d'observation. Ces projets devront positionner la plate-forme utilisée dans un cadre international. Le RTRA financera ou co-financera l'équipement, le fonctionnement ou le personnel nécessaire à la réalisation du projet.

4) Les **actions de communication et formation** de portée internationale. Le RTRA pourra financer des workshops, écoles thématiques destinées aux jeunes chercheurs, colloques internationaux visant à développer et promouvoir les activités scientifiques du réseau.

Le RTRA financera également son propre fonctionnement. Le directeur du RTRA sera accompagné d'un assistant de direction, d'un gestionnaire (finances et ressources humaines). Le RTRA financera également les coûts additionnels de gestion des personnels des unités de recherche, qui seront inclus dans le coût des projets.

## **6.2 Budget annuel**

Le budget annuel est décomposé, à titre indicatif, selon le type de projets :

Nous prévoyons pouvoir financer à titre indicatif

- attribution d'une chaire d'excellence par an, pour 2 ans, soit  $2 \times 150 = 300$  k€, environnées de 2 post-docs ( $4 \times 50 = 200$  k€), avec 100 k€ de fonctionnement et équipement, soit au total 600 k€ ;
- attribution d'un projet de groupe de 3 jeunes chercheurs pour 2 ans, salaire postdoc,  $6 \times 50 = 300$  k€ avec 100 k€ d'équipement/fonctionnement, soit 400 k€ ;
- attribution de soutien aux plates-formes mutualisées, 500 k€ ;
- actions de communication et formation, 100 k€ ;
- salaire du personnel du RTRA, support, gestion, 200 k€.

Le budget annuel est donc, à titre indicatif, de **1,7 M€**. Sur les 5 premières années le budget sera donc de **9 M€**.

## **6.3 Financement du RTRA**

Le **soutien initial** du ministère de la recherche demandé (9 M€) pour le RTRA permettra de couvrir le financement des 5 premières années. Dès la première année une recherche de **financements externes** sera initiée, chez les collectivités, les industriels, les agences. La recherche systématique de cofinancements pour les projets - via l'ANR, les projets européens, la région Ile-de-France (réseau R2D2), les pôles de compétitivité (notamment « Ville et Développement Durable »), les fondations (Fond@terra, IDDRI)- sera effectuée, permettant aux projets de prendre une plus grande ampleur. Les organismes fondateurs pourront apporter de nombreux financements par l'hébergement, l'apport de postes dans le RTRA, le financement ou cofinancement d'équipement. Le financement de projets immobiliers sera effectué via les CPER.

# Annexe I : Thèmes de recherche du RTRA

## ***I.1 Climat global, politiques énergétiques et croissance économique***

**Rédacteurs :** Philippe Ciais (LSCE), Jean-Charles Hourcade (CIRED), Martin O'Connor (C3ED), Vincent Gitz (CIRED)

### **I.1.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

Depuis le début de la révolution industrielle, on assiste à une augmentation sans précédent de la consommation énergétique. La demande énergétique globale a été multipliée par 100 entre la fin du 18<sup>ième</sup> siècle et la période actuelle. La plus grande partie de cette demande a été satisfaite par la combustion de carbone fossile. Il reste encore d'immenses gisements de charbon dans le monde, de sorte que les prochains siècles pourraient être les témoins d'une utilisation soutenue du carbone fossile. La combustion de carbone fossile libère du CO<sub>2</sub> et des aérosols dans l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub> a augmenté de 30% depuis 200 ans pour atteindre un niveau inégalé depuis des dizaines de millions d'années, et sa vitesse d'accroissement n'a pas d'équivalent dans l'histoire de la Terre. Toujours à cause des activités humaines, la concentration du méthane dans l'air a pratiquement triplé pendant les derniers siècles. L'activité industrielle produit aussi de l'ozone de pollution, qui est à la fois un polluant dangereux pour la santé, et un puissant gaz à effet de serre. L'ozone naturel stratosphérique (protecteur des UV) est quant à lui dépendant du changement climatique et de l'injection de gaz d'origine anthropique (notamment par le trafic aérien). L'ensemble de ces changements de composition atmosphérique globaux réchauffe le climat, avec une myriade d'impacts régionaux sur l'homme et les écosystèmes (voir Thèmes 2 et 3 ci-dessous).

Nous proposons d'étudier en termes socio-économiques les perspectives de la **prévention des dommages du changement climatique**, visant, plus particulièrement, une analyse à plusieurs échelles des **coûts (et des bénéfices) des politiques de réduction des émissions et de séquestration du carbone**, en présence d'incertitudes. Nous proposons, in fine, de définir des **modes d'usage de l'analyse économique** comme aide à l'apprentissage social et aide à la décision face au risque climat. Quatre axes de recherche seront développés :

#### **Axe §1.1. Développer une modélisation intégrée et cohérente de l'économie globale en interaction avec le climat.**

Une architecture de modélisation a été mise en place, dans laquelle la représentation du système économique peut incorporer des informations, des représentations techniques et des dynamiques propres de différents secteurs influencés directement par l'état du climat et de l'environnement : énergie, agriculture, forêt, transport, habitat et formes urbaines. Ces représentations sectorielles peuvent être, de nature et de "statut" très différents: soit basées sur un contenu empirique largement paramétrable, ou au contraire dérivés de formalismes bien encadrés par des théories, mais dans lesquels on peut introduire la possibilité d'apparition de déséquilibres, de comportements sous-optimaux, et d'irréversibilités.

Ce type de nouveau modèle économique intégré permet un couplage original entre représentation macro-économique et "monde réel". Cela permet de mieux rendre compte de l'existence de frictions transitoires et de l'apparition de chocs dans les conséquences des

changements climatiques. Il est aussi possible d'explorer les effets de long-terme sur des trajectoires non nécessairement "optimales" et résultant de choix économiques et techniques plus ou moins irréversibles, et leurs conséquences sur le climat et les cycles biogéochimiques.

Par rapport aux approches traditionnelles liées à la théorie économique de l'équilibre général et conditionnant les arbitrages de court et long terme à des paramètres dont le contenu n'est pas toujours tangible, l'enjeu est de construire de nouveaux outils capables d'organiser concrètement un "dialogue" entre prospective économique, expertises locales et sectorielles dans le cadre de la réponse des systèmes socio-économiques aux modifications du climat et des écosystèmes (Thème 2 et 3).

### **Axe §1.2 : Quantifier et comprendre les rétroactions entre croissance économique et climat**

Les impacts globaux du changement climatique sur les sociétés et les économies ont été essentiellement représentés, dans la littérature, comme une petite perturbation d'un sentier inchangé de croissance économique. Il est rapidement apparu que les contraintes environnementales et climatiques peuvent exercer une influence significative sur le développement dans certaines régions du monde, et que l'hypothèse d'un scénario de croissance perturbé seulement à la marge par le changement climatique pourrait se révéler intenable.

Pour aller plus loin sur ces questions, il sera nécessaire de progresser sur la modélisation des interactions entre développement économique et contraintes environnementales. Cet axe de recherche se propose donc de développer des modèles de croissance dans lesquels l'épuisement des ressources ou, dans le cas de ressources renouvelables, les contraintes sur le niveau de production peuvent impacter de manière significative le sentier de croissance.

Ce type de modèle permettra d'interroger l'existence de différents « modes » de croissance, plus ou moins consommateurs en énergie et en ressources, et la possibilité, pour les pays en voie de développement, de bifurquer vers plusieurs de ces modes. Ces modèles permettront aussi de s'intéresser à la rétroaction globale entre le climat et l'économie, dans la ligne de Hallegatte (2005), et d'identifier les caractéristiques de cette rétroaction qui peuvent influencer la décision publique et les politiques énergétiques.

Enfin, ces modèles compléteront utilement les modèles plus complexes développés dans l'axe précédent, car ils interrogent leurs hypothèses de base et permettent de mieux cerner leur domaine de validité. Aussi, on attend de ces modèles, plus simples, des pistes de développement pour les modèles multi-régionaux et multi-sectoriels.

### **Axe §1.3 : Simuler l'efficacité des politiques climatiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle et au delà**

Afin de renseigner la décision publique à court, moyen et long terme pour un développement soutenable, il s'agit de produire une variété de simulations futures des forçages anthropiques et de leurs conséquences climatiques, tenant compte des multiples lieux de couplages existant entre les changements du climat et les systèmes économiques. On analysera le comportement dynamique de l'ensemble économie-climat (bifurcations, inerties, production dommages à long terme comme l'élévation du niveau des mers...).

L'objectif est de rendre compte quantitativement des interactions entre développement économique, évolution du forçage radiatif et dommages climatiques, servant de base au calcul des scénarios de réduction des émissions. Le caractère 'multi-gaz' du forçage radiatif futur sera pris en compte à partir des simulations des modèles 3D du cycle du carbone et de chimie atmosphérique développés à l'IPSL.

Une plateforme de modélisation intégrée qui traite explicitement du climat, de l'usage des sols, des émissions des différents secteurs de l'économie, et d'un portfolio de séquestration du carbone (plantations, piégeage et séquestration océanique et géologique) sera développée, en partant des travaux initiés en commun au CIRED, LMD et LSCE. Une des applications de court terme consistera à évaluer les profils d'émissions soit sous contrainte atmosphérique (stabilisation du CO<sub>2</sub>) ou climatique (seuil de température à ne pas franchir), soit permettant un équilibre entre coût (marginal) de la politique climatique et coût (marginal) des dommages espérés.

La date de référence retenue par l'IPCC pour produire un ensemble de simulations pertinentes de rejets de gaz à effet de serre et d'évolution du climat global est 2100, avec un intérêt pour un futur plus proche lié à l'exploitation continue du pétrole (2020-2040). Etant données les réserves de carbone fossile 'non conventionnel' et de charbon disponibles (plus de 40 fois les ressources actuelles de pétrole) il est important de comprendre et de scénariser la dynamique du cycle du carbone et du climat et pour des constantes de temps au-delà de 2100. On étudiera en particulier les points de bifurcation du climat sous la contrainte de différents scénarios d'émission, et les dommages futurs qu'impliquent les émissions des générations passées au delà d'un siècle (fonte des glaces polaires, acidification de l'océan, niveau des mers, migration des écosystèmes). Cette compréhension du futur plus lointain permettra de définir des politiques climatiques visant à éviter des changements irréversibles trop importants.

#### **Axe §1.4 : Evaluations Multi-échelle Socio-économiques de Risques Climatiques et Politiques de Réponse**

Afin de compléter et valoriser les résultats des axes précédents, nous proposons de développer un cadre d'analyse multivarié permettant d'intégrer les enjeux des risques climatiques aux préoccupations de divers acteurs socio-économiques.

En complément avec la modélisation des Axes 1-3 visant à réduire les incertitudes sur le poids objectif du changement climatique, il faut aussi progresser sur l'explicitation des éléments de justification sociétale des politiques de précaution et de réponse aux risques climatiques, et sur l'identification des convergences et divergences entre divers acteurs. Nous proposons de développer de nouvelles méthodes et pratiques permettant d'évaluer la signification pour la société des risques associés au changement climatique et la vision ou l'acceptabilité de différentes stratégies de réponse conditionnées par des politiques climatiques macroéconomiques.

Les impacts du changement climatique étant très différents selon l'échelle d'analyse et la vulnérabilité des différents acteurs, il est nécessaire d'élaborer des passerelles concrètes entre la simulation à grande échelle des Axes 1-3 et un argumentaire local adapté à une entreprise, une administration territoriale, ou un consommateur. Cela implique des changements d'échelle et surtout des changements de point de vue. Pour que des politiques climatiques soient motivées et légitimes aux yeux des décideurs et des stakeholders au niveau territorial, national... il faut que les opportunités d'action soient mieux caractérisées en termes adaptés à

ces contextes et que les informations quantitatives soient exprimées dans des cadres conceptuels accessibles.

Pour répondre à cette question, nous proposons d'élaborer un cadre d'évaluation multicritères des politiques de réponse climatiques ainsi que des « études de cas » concrètes et didactiques — ou cas d'école — aux multiples échelles et dans des pays différents. Cette démarche pourra établir les conditions et des méthodes efficaces de la traduction de l'intelligence formelle de l'analyse intégrée économique-environnementale proposée dans les autres Axes, aux contextes spécifiques et pragmatiques d'action sociétale.

### **I.1.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

Le thème 1 sera mené en interaction étroite avec les thèmes 2 à 5. En plus de sa cohérence propre, ce thème 1 peut être vu comme un lieu de consolidation des résultats produits par l'ensemble des thèmes 2 à 5, au niveau de l'économie, de la prospective (réalisation de scénarios) et de l'étude des leviers de politique publique. Les principaux résultats attendus sont :

- Analyse coût-bénéfice des politiques climatiques des prochaines décennies,
- Scénarios d'émission de gaz à effet de serre fonction de données économiques et sociétales,
- Trajectoires optimales de plantation des forêts et de séquestration géologique de carbone compatibles avec une stabilisation future du CO<sub>2</sub>,
- Prise en compte des rétroactions climat-cycles sur la stabilisation du climat futur,
- Evitement des changements irréversibles du climat au delà du prochain siècle,
- Participation accrue au Groupe III de l'IPCC,
- Un développement de l'attractivité internationale des laboratoires concernés.
- Le développement d'une interface innovante pour établir un dialogue au sein des acteurs concernés par les impacts des politiques climatiques,
- Le développement d'outils d'analyse multi-critères et multi-échelles autour de la perception des changements environnementaux globaux.

### **I.1.3 Expérience des équipes du réseau**

Dans les unités du RTRA concernées par la thématique (CIRED, LSCE, LMD, X, C3ED), les équipes possèdent de nombreuses collaborations internationales. Elles sont impliquées dans plusieurs projets européens (MATISSE, ENSEMBLE, INSEA, SRDTOOLS, ALARM par exemple), nationaux (ANR, GICC) et régionaux (R2D2). Elles comptent plusieurs auteurs principaux du GIEC, plusieurs membres de la délégation française dans le cadre des négociations internationales pré- et post-Kyoto.

La recherche effectuée dans ce thème sera portée par une quinzaine de chercheurs de rang A, au sein de 5 unités : le CIRED, le LMD, le LSCE, le laboratoire d'économétrie de l'Ecole Polytechnique et le C3ED. Le thème concerne au total une vingtaine de chercheurs dans ces unités, ainsi que des collègues des institutions collaboratrices. Dans cette perspective, nous mettons l'accent sur la complémentarité des capacités des partenaires du RTRA.

### **I.1.4 Attractivité internationale**

Le LMD et le LSCE ont d'ores et déjà développé un partenariat avec plusieurs groupes d'économistes de haut niveau, en particulier au CIRED. Leurs travaux communs sur l'étude

des dommages du climat, de la valeur de l'information sur la sensibilité climatique et les dommages, et les couplages entre cycle du carbone et stabilisation du CO<sub>2</sub> ont fait l'objet de plusieurs publications internationales. Cette stratégie scientifique relativement ambitieuse est actuellement l'objet de nombreux partenariats internationaux, liés à des commandes externes (GIEC, Banque Mondiale, Réseaux d'excellence européens comme MATISSE, ENSEMBLE, INSEA), ou à des coopérations précises avec des laboratoires étrangers partenaires historiques du CIRED et du C3ED, impliqués sur les questions à l'interface entre politiques environnementales et politiques de développement: Institut Batelle aux USA, Université Fédérale de Rio de Janeiro au Brésil, Université d'Amedabad en Inde, PIK en Allemagne.

De même, l'équipe IACA du C3ED participe depuis plus de dix ans aux programmes de recherche européens sur l'interface économie-environnement-société, notamment des projets en économie écologique et analyse intégrée environnementale. Des membres de l'équipe ont participé aux études sur l'interface science-économie-société avant et pendant les négociations Kyoto et, cette même équipe est actuellement impliquée dans plusieurs projets majeurs européens d'analyse intégrée économie-environnementale. Parmi les axes forts de cette ouverture internationale en partenariat, citons les relations étroites entretenues entre le C3ED-UVSQ et des chercheurs du NZCEE (Nouvelle-Zélande), de l'espace européen, notamment du Copernicus Institute (Utrecht University, Pays-bas), du groupe KAM (Knowledge Assessment Methodology), de l'IPSC (Institut for the Protection and Security of the Citizen), du Centre de Recherche Commun de la Commission européenne à Ispra (Italie). Ces collaborations portent sur les questions de l'incertitude, de l'analyse intégrée environnementale et de la qualité de connaissances scientifiques.

## **1.2 Extrêmes climatiques et impacts**

Rédacteurs : Michael Ghil (ENS, LMD), Pascal Yiou (LSCE), Bernard Legras (LMD)

### **1.2.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

Les événements extrêmes sont une manifestation des systèmes complexes que forment la société et la nature. Leurs conséquences socio-économiques concentrent les efforts de plusieurs communautés scientifiques depuis quelques années. Ces événements extrêmes sont, presque par définition, des surprises, si bien que notre société est généralement mal préparée à y faire face. Des exemples climatiques de tels événements incluent des vagues de chaleur, tempêtes, cyclones ou inondations. La principale caractéristique de ces événements est que leur probabilité décroît rapidement avec leur amplitude, mais que les dommages causés augmentent rapidement, ainsi que le coût de la protection contre eux. L'histoire de notre planète ainsi que celle de nos sociétés est riche en crises de toutes sortes. Cependant l'évolution vers une société réclamant sécurité et prévoyance crée une demande très forte envers la prévision des événements extrêmes. L'étude des causes et des propriétés des événements extrêmes peut permettre de développer des méthodes de prédiction fiables et est donc d'une grande importance pour l'économie et la société.

Une approche classique d'étude de la probabilité des événements extrêmes, et donc de la détermination du niveau de protection contre ces événements, consiste à se baser sur une distribution gaussienne (ou « normale ») de leur amplitude, et sur l'indépendance temporelle des événements entre eux. Il y a de plus en plus de raisons de penser que (a) les distributions de fréquences et de taille de l'observation d'événements extrêmes, qu'ils soient naturels ou socio-économiques, dévient de manière significative de la loi gaussienne et possèdent des « queues lourdes » avec des fréquences anormales de larges excès ; et (b) que les événements individuels sont souvent corrélés entre eux. Ces deux signatures indiquent que l'hypothèse sous-jacente de normalité et d'indépendance n'est pas satisfaisante pour étudier et comprendre les extrêmes.

Les récents records de température (été 2003), vitesses de vent (tempêtes de 1999), d'inondations (été 2002 en Europe centrale) ou le nombre de cyclone tropicaux (été 2005) ont eu des conséquences phénoménales sur l'environnement, la société et l'économie des pays touchés. La concomitance de ces records semble corrélée avec l'augmentation régulière des températures de la planète depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. L'étude de cas précis (canicules de 1976 ou 2003, inondations en 2002) permettra de comprendre la dynamique climatique qui conduit à ces extrêmes. L'enjeu scientifique majeur qui découle de cette coïncidence consiste à comprendre si les événements extrêmes sont reliés (et comment) à des variables climatiques qui varient relativement lentement.

L'influence du climat sur l'économie concerne généralement des processus de déséquilibres à court terme : impacts sur la production, conduisant à des déséquilibres entre l'offre et la demande ou impacts sur le capital productif avec des effets sur le marché et l'emploi. Jusqu'à présent, la compréhension de l'économie se fait essentiellement avec une représentation statique des échanges. On fait donc souvent l'hypothèse que tout déséquilibre est transitoire et est absorbé avec un coût global négligeable. Evidemment, ce ne peut pas être le cas dans le cadre d'un changement climatique : si les infrastructures doivent être modifiées (par exemple si le permafrost sibérien disparaît, il faudra reconstruire les routes et les bâtiments), si les événements extrêmes sont responsables de dommages significatifs au niveau macro-économique ou si des populations doivent émigrer à cause de changements de conditions climatiques, l'hypothèse standard doit être révisée et l'enjeu est de prendre en compte ces aléas brutaux dans la conception de modèles économiques. Un effort de modélisation dans

cette direction a été conduit au CIRED (Hallegatte et al., 2006a, 2006b ; Hallegatte, 2006a). Il a été montré comment les dommages liés à un changement donné des extrêmes météorologiques dépendaient largement (i) de la répartition temporelle de ces extrêmes, (ii) de la capacité des économies à répondre à ces chocs, et (iii) de processus de court-terme qui sont négligés dans les modèles économiques mais dont l'influence est essentielle. En particulier, ce travail a permis d'identifier des phénomènes de bifurcation entre des régimes où l'impact économique des extrêmes reste négligeable et des régimes où ces extrêmes peuvent engendrer des « trappes à pauvreté ».

Depuis les travaux pionniers de Le Roy Ladurie, il est clair que même si la variabilité du climat n'est pas nécessairement la cause des crises politiques et sociales du passé, un certain nombre d'événements météorologiques exceptionnels a coïncidé avec nombre de catastrophes sociétales au cours des siècles derniers. Les historiens du climat arrivent donc à remonter aux événements extrêmes climatiques du passé, grâce aux notes consignées par les érudits et notables au cours des siècles. Le recensement de ces événements est une étape cruciale pour établir une statistique sur le long terme qui permettrait de déterminer si la fréquence et l'amplitude des extrêmes de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle est exceptionnelle au regard du dernier millénaire. Cette collecte d'observations des aléas climatiques passés, à travers leurs conséquences sur la société, constitue un troisième enjeu pour la thématique.

Ces problèmes sont abordés en partie par le projet européen FP6 « Extreme Events : Causes and Consequences » (E2C2), qui traite des événements extrêmes géophysiques en général (climatiques, feux de forêts, glissements de terrain, tremblements de terres), de l'impact de tels événements sur l'économie, et des crises sociales (criminalité, chômage). Les systèmes étudiés possèdent des propriétés statistiques génériques de corrélation à long terme et de « queues lourdes », qui justifient leur étude conjointe. Le projet ANR « Vagues de CHAleur d'été : Mécanismes, Prévisibilité, Impacts » (CHAMPION) a pour but l'étude physique et statistique des vagues de chaleur en Europe de l'ouest et leur répercussion sur la biosphère. Le projet ANR « Observations PHEnologiques pour reconstruire le cLImat de l'Europe » (OPHELIE) a pour objet la reconstruction du climat et de ses extrêmes sur la période historique.

La stratégie scientifique pour traiter ces enjeux se décline suivant plusieurs axes :

1. Le développement de techniques statistiques ad hoc pour déterminer des diagnostics efficaces dans la description puis la prédiction des extrêmes. Plusieurs techniques déjà utilisées sont basées sur la théorie statistique des valeurs extrêmes. La généralisation de cette théorie à des champs non stationnaires est l'objet d'une partie du projet européen E2C2. Le point clé de cet axe est d'obtenir un lien statistique pertinent entre la variation des extrêmes et celle du champ moyen.
2. La modélisation dynamique des systèmes environnementaux et économiques, et leur couplage. Cette modélisation fait appel aux concepts de systèmes dynamiques. Dans le domaine économique, cette question demande une refonte importante des hypothèses de base de la modélisation, pour prendre en compte l'ensemble des processus de déséquilibre, jusqu'alors négligés : chômage, sous ou sur-capitalisation, pénurie de main-d'œuvre ou de matières premières. Le point clé de cet axe est de cerner des mécanismes essentiels pour décrire le comportement de ces systèmes complexes, la définition de méthodes de validation rigoureuses, et l'investigation de l'ensemble des incertitudes que ces nouveaux processus introduisent dans le problème. Ce point est aussi abordé dans le projet E2C2.
3. Les simulations des modèles climatiques complets, et l'évaluation de l'impact de forçages anthropiques (agriculture, aménagement du territoire, émissions de gaz à

effet de serre...) sur les extrêmes climatiques. A l'inverse, on pourra évaluer l'impact de ces extrêmes sur les systèmes « forçants » ou sur des ressources énergétiques. Il sera par exemple possible de déterminer si une politique agricole génère un climat qui lui est favorable, et donc de formuler des prévisions de coûts des actions humaines qui tiennent compte du changement climatique qu'elles provoquent. Ces études sont envisagées dans le cadre des projets ANR CHAMPION et « Dynamic Interactions between Vegetation and Atmosphere » (DIVA).

4. La reconstruction des extrêmes climatiques au cours de l'histoire et leurs impacts sur la société. Les statistiques d'extrêmes que l'on peut obtenir de ces observations seront comparées aux statistiques actuelles afin de placer l'apparente tendance dans un contexte temporel plus large. Le projet ANR OPHELIE rassemble historiens, climatologues et agronomes pour effectuer ces reconstructions.

## **I.2.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

Le RTRA constitue une chance unique pour la France de constituer un pôle d'étude des extrêmes climatiques et leurs impacts, en considérant les communautés des sciences de l'environnement, les statistiques, et les sciences humaines et sociales. Le RTRA permettra d'avoir une approche intégrée et pluridisciplinaire aux enjeux scientifiques délimités plus haut. La constitution du RTRA se fera autour d'un noyau « dur » mais interdisciplinaire entre l'IPSL et le CIRED. Sa visibilité nationale et internationale permettra de construire des collaborations avec :

- les communautés des sciences sociales et humaines, en particulier pour la détermination des impacts sociétaux du changement climatique et de l'évaluation de la vulnérabilité de nos sociétés. La collaboration avec les historiens est indispensable pour comprendre les impacts des événements climatiques passés. Des collaborations avec les domaines des transports ou de la construction seront tissées à travers le réseau R2D2.
- Les agronomes, afin d'estimer les rétroactions entre politiques agricoles et événements extrêmes, et évaluer les coûts associés.
- Les communautés des statistiques pour le développement des outils mathématiques de pointe nécessaires pour l'analyse et la modélisation des données.

Ces collaborations permettront l'élaboration de nouveaux projets transverses, avec les outils déjà existants (ANR, FP7...).

Cette thématique est naturellement solidaire des autres, avec de fortes interactions avec l'impact des gaz à effet de serre sur la climat, les reconstructions climatiques régionales, l'utilisation des sols et la santé.

Dans les 5 ans à venir, nous attendons des résultats importants dans les domaines suivants :

- Description statistique fine des extrêmes climatiques et leur prédiction.
- Modèles économiques permettant la représentation des économies sur le long-terme et la prise en compte des processus de court terme dont le rôle est essentiel dans la réponse aux extrêmes.
- Impacts de vagues de chaleur ou de sécheresses sur la production énergétique.
- Simulations climatiques avec extrêmes réalistes. Interactions entre occupation des sols et extrêmes climatiques.

- Base de données d'extrêmes climatiques (tempêtes, vagues de chaleur, orages, sécheresses, vagues de froid) en France depuis 1500.

### **I.2.3 Expérience des équipes**

Ce thème s'appuie largement sur les activités du projet européen E2C2. Ce projet est coordonné par Michael Ghil (Plateforme Environnement, ENS Paris) et Pascal Yiou (LSCE). Il est composé de 19 laboratoires européens dont, la plateforme Environnement de l'ENS, le LMD, le LSCE, le CIRED, le Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS et l'Institut Nonlinéaire de Nice. Il implique une dizaine de chercheurs permanents dans la région parisienne et autant de postdocs et étudiants.

L'étude des vagues de chaleur et sécheresse en Europe sera faite dans le cadre du projet ANR CHAMPION, coordonné par Fabio d'Andrea (LMD). Ce projet est composé du LMD, LSCE et CERFACS.

Les interactions entre les extrêmes climatiques et l'occupation des sols (par exemple l'agriculture) seront examinées dans le projet ANR DIVA, coordonné par Nathalie de Noblet (LSCE). Ce projet rassemble le LSCE, LMD, LOCEAN, INRA et ISEM.

Les reconstructions des extrêmes climatiques du dernier millénaire sont effectuées dans le cadre du projet ANR OPHELIE, coordonné par Pascal Yiou (LSCE). Ce projet rassemble le LSCE, CEFÉ, INRA, Collège de France et UFR d'Histoire de Caen.

Cette thématique est ancrée dans le Réseau de Recherche en Développement Durable (R2D2) et dans le réseau SECANTE. L'IPSL et le CIRED sont des acteurs majeurs de ces réseaux.

Les développements statistiques se font avec le soutien du groupe « SAMA » de l'IPSL, qui regroupe les experts en analyse statistique de l'institut. Nous tissons des collaborations avec des laboratoires de statistiques (Paris VI et XI) experts dans l'analyse des valeurs extrêmes.

Nous collaborons étroitement avec une entreprise de conseil en environnement (CLIMPACT), dirigée par Harilaos Loukos. CLIMPACT permet à l'IPSL de valoriser son savoir-faire auprès d'entreprises dont l'activité dépend de l'environnement. Cette entreprise a déjà cofinancé une thèse sur l'étude statistique des extrêmes de température autour de l'Atlantique nord. Au-delà d'une recherche purement académique, cette collaboration assure que les travaux menés par le RTRA sont utilisés de manière opérationnelle par la société.

La recherche effectuée dans ce thème sera portée par huit chercheurs de rang A, au sein de 3 unités : le LSCE, le LMD, le CIRED. Au total environ 25 chercheurs et 5 doctorants sont directement concernés par ce thème de recherche.

### **I.2.4 Attractivité internationale**

Au cours du projet E2C2, de nombreuses réunions ont été organisées autour des extrêmes climatiques, des impacts sur la société et de leur modélisation. Les partenaires européens de ce projet sont idéalement placés pour collaborer avec le RTRA.

Nous avons des contacts privilégiés avec des centres comme l'IRI (USA), le Tyndall Center (UK), IGPP-UCLA (USA), le Geophysical Statistics Project du NCAR (USA) qui sont des pionniers internationaux dans l'étude des impacts climatiques, la modélisation des crises, de la modélisation statistique pour les géosciences. Ces contacts constituent le socle des collaborations que nous envisageons dans le cadre du RTRA.

### ***1.3 Climat, utilisation des sols et ressources en eau***

**Rédacteurs :** Nathalie de Noblet (LSCE), Agnès Ducharme (SISYPHE), Benjamin Sultan (LOCEAN), Catherine Ottlé (LSCE)

#### **1.3.1. Enjeux scientifiques et sociétaux**

La biosphère terrestre (végétation naturelle, zones humides, systèmes de cultures, ...) est l'un des éléments les plus complexes du système climatique. Les échanges entre la biosphère et l'atmosphère font en effet intervenir une **multitude de processus** et une **gamme très large de temps de réponse** : de l'instantané (échanges d'énergie, de chaleur, d'eau, de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre, de composés organiques volatiles, de poussières), à la centaine (dynamique naturelle de la végétation, dynamique du carbone organique des sols) voire au millier d'années (formation des sols, érosion). Les échanges entre la biosphère terrestre et les océans se font à des échelles de temps de la dizaine à la centaine d'années, via un apport d'eau douce et de nutriments sur les marges continentales. **Les surfaces continentales** sont par conséquent une composante majeure du système climatique, **susceptible d'introduire d'éventuelles surprises** dans l'évolution du climat, à toutes les échelles de temps.

Les ressources en eau se définissent classiquement d'un point de vue quantitatif, comme le volume d'eau disponible pour les différents usages de l'eau, qu'ils soient naturels (utilisation par la biosphère terrestre, milieu pour la biosphère aquatique) ou liés aux activités humaines (eau potable, industries, agriculture, récréation, etc.). Elles sont sous la dépendance croisée du climat et de l'utilisation des sols (par le biais des échanges hydriques de surface) qu'elles influencent en retour. Elles sont menacées par l'anthropisation croissante du milieu, qu'elle soit directe (prélèvements en rivières et nappes aquifères, aménagements hydrauliques, modification de l'occupation du sol et conséquences sur le bilan hydrique) ou indirecte, via les émissions de polluants atmosphériques et leurs conséquences en terme de changement climatique. Mais les activités humaines ont aussi un impact sur les ressources en eau par la dégradation de la qualité de l'eau qu'elles entraînent, autrement dit les pollutions, diffuses comme celles liées à l'agriculture, ou ponctuelles comme celles qui sont liées à l'urbanisation. Les eaux souterraines, archives de la variabilité temporelle de l'usage des sols et de leur occupation représentent plus de 80% en volume de la fonction source des écoulements de surface actuels. La détermination des temps de séjour des eaux et du taux de recharge des aquifères est un des principaux enjeux de l'hydrogéologie du 21<sup>ème</sup> siècle.

La teneur en carbone organique des sols est à la fois une composante majeure de la fertilité des sols naturels et exploités et un stock de carbone environ trois fois plus élevé que celui de l'atmosphère. Elle dépend de la productivité végétale, de l'intensité de l'enfouissement des résidus végétaux et de l'activité respiratoire des microorganismes du sol. Ces processus biologiques sont sous la dépendance forte de la température et de la disponibilité de l'eau en relation directe avec le climat, mais aussi de la nature de la couverture végétale et des modalités d'exploitation du sol. L'action combinée de tous ces facteurs régénère ou au contraire dégrade la ressource sol et lui confère par ailleurs le statut de puits ou de source de carbone. La réponse des sols, en particulier de leur contenu en carbone organique, aux changements climatiques et anthropiques est donc à la fois un problème d'environnement local et un problème d'environnement global.

Le changement climatique en cours est attribué pour partie aux actions de l'Homme, et plus particulièrement, aux émissions de composés de gaz à effet de serre et autres composés

chimiques ou particulaires. Les actions de l'Homme *ne se limitent cependant pas à des émissions* en direction de l'atmosphère, *mais se traduisent également par de nombreuses modifications de la couverture végétale*. Depuis plus de 10 000 ans l'Homme modifie et exploite la Terre pour se protéger des intempéries (en construisant des abris), se chauffer, se nourrir (mises en culture très importantes depuis la sédentarisation de l'Homme), se déplacer (constructions de routes et de voies ferrées). A l'heure actuelle, près de 40% des terres émergées ont été conquises par l'Homme (Vitousek et al. 1997) ; dans moins d'un siècle certains scénarios projettent une disparition totale de la forêt équatoriale en Afrique et en Asie du Sud-Est (The-IMAGE-Project 1998), et une occupation des surfaces continentales par l'Homme dépassant 60%. *Ces modifications anthropiques de la couverture végétale ne sont pas sans conséquence* sur le bilan énergétique, thermique et hydrique de la Terre, sur la composition chimique de l'atmosphère, sur la productivité de l'ensemble des écosystèmes qu'ils soient naturels ou anthropiques, et donc sur *le climat et sur les ressources en eau et sur la qualité des sols*. Cependant, dans les scénarios de changement climatique réalisés pour le GIEC<sup>1</sup> jusqu'à présent, la couverture végétale est figée, et n'est donc pas considérée comme un élément de rétroaction au même titre que l'évolution de la température de surface des océans.

Les questions scientifiques auxquelles nous souhaitons répondre dans les 5 prochaines années sont :

- Pouvons-nous quantifier l'impact global du changement d'utilisation des sols (allocation et travail des terres) sur la dynamique du climat entre la période pré-industrielle et l'actuelle ? Quel impact pouvons-nous attendre des évolutions futures prévues par les économistes ?
- Peut-on, grâce aux modèles développés, anticiper la demande future en eau et en fertilisants des cultures et proposer des choix d'adaptation à l'échelle nationale voire mondiale ?
- Quelle est la contribution de l'usage des terres et de l'irrigation au changement climatique (via les flux biogéochimiques et d'énergie) ?
- Quel est le rôle de l'utilisation des sols et plus généralement de l'anthropisation des milieux sur le cycle hydrologique et donc la ressource en eau ?
- Quel est le rôle de l'utilisation des sols et plus généralement de l'anthropisation des milieux sur les émissions de polluants (atmosphère, sols, ressources en eau) ?
- Quelle est la contribution des zones humides, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, au climat global et à son évolution future, au bilan du méthane atmosphérique ?
- Comment la matière organique des sols répondra-t-elle à l'action combinée des changements de climat, de couverture végétale et de pratiques agricoles ? Peut-on optimiser la séquestration du carbone dans les sols et maintenir la fertilité naturelle des sols dans un contexte de changements rapides ? Quelles rétroactions le sol exercera-t-il sur la végétation ?

Les études menées actuellement par les équipes du RTRA sont de trois ordres :

- d'une part un travail sur les scénarios climatiques avec un début de prise en compte de l'évolution de la distribution de la végétation anthropique, de l'évolution de la qualité des

---

<sup>1</sup> Groupe Intergouvernemental pour l'Etude du Changement climatique (IPCC en Anglais)

sols et de leur potentiel de séquestration du carbone, et de diverses actions de l'Homme sur le paysage comme l'irrigation, ... (LSCE, LMD, SISYPHE, BIOEMCO) ;

- d'autre part des études plus régionales visent à évaluer le rôle de l'évolution du paysage sur les ressources en eau, l'écoulement des eaux et les recharges de nappes phréatiques, et sur les transferts de polluants (CETP, SISYPHE, LSCE, BIOEMCO, IDES) ;
- Des études visant à évaluer l'influence conjointe de l'évolution du climat et du changement d'usage des sols dans la zone sahélienne et leurs effets sur l'érosion éolienne des sols et la production d'aérosols désertiques, en particulier dans le cadre du programme AMMA (LISA) ;
- des études à l'échelle européenne couplant un modèle d'économie publique agricole à un modèle de biosphère terrestre, pour évaluer les impacts du changement climatique et de la Politique Agricole Commune sur l'allocation future des terres, leur réaménagement potentiel, et *in fine* un éventuel effet de ces réaménagements sur le climat (LSCE, INRA, CIRED).

La stratégie scientifique que nous proposons est basée sur l'imbrication de modèles et de données d'observations (in-situ, satellite, historiques, ...). La compréhension des relations entre surfaces continentales et climat, et *a fortiori* la prévision de leur évolution, nécessite l'observation à toutes les échelles (de l'échelle locale des processus à l'échelle globale) et le suivi à long terme des surfaces terrestres comme l'utilisation des sols. L'observation spatiale est un des outils privilégiés pour accéder à ces informations et détecter d'éventuels changements anthropiques ou climatiques. Son couplage avec la modélisation numérique du climat constitue un des enjeux importants de ces prochaines années. Nous proposons, dans le cadre de ce RTRA de :

- développer des modèles à l'échelle régionale couplant l'atmosphère, les surfaces continentales et l'hydrologie continentale (incluant les écoulements surfaciques et souterrains, ainsi que le transport des polluants) ;
- identifier les interactions entre climat, végétation et sol, passer de l'échelle des processus à celles de la parcelle et de l'écosystème au moyen de la simulation numérique ;
- développer de nouvelles méthodes d'observations. 1) poursuivre le développement de l'instrumentation ; 2) augmenter le nombre de sites d'observations ; 3) développer des méthodes d'interprétation des données spatiales ; 4) développer des méthodes de changement d'échelle ;
- développer de nouvelles techniques d'assimilation / utilisation des observations. Développement de méthodes de comparaison entre observations et variables simulées par les modèles, ainsi que de méthodes permettant d'assimiler les données observées dans les modèles pour mieux les contraindre.

La problématique de ce thème répond donc à des enjeux majeurs, tant cognitifs que sociétaux. Par sa pluridisciplinarité, elle demande une masse critique importante qui sera réunie au sein du RTRA, structure qui facilitera les collaborations entre physiciens et chimistes de l'atmosphère, hydrologues, géographes, économistes, expérimentateurs et spécialistes de télédétection. Beaucoup de ces équipes travaillent déjà ensemble au sein de programmes multidisciplinaires, nationaux et/ou internationaux comme le programme international AMMA coordonné au niveau européen par l'IPSL.

### **I.3.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

- Un modèle de la biosphère continentale qui, en plus du cycle de l'eau, des cycles biogéochimiques et de polluants prenne en compte l'hydrologie souterraine et les transferts vers les différents réservoirs (rivières, nappes, ...) et soit couplé à l'atmosphère. Ce modèle pourra être utilisé de l'échelle du bassin versant à l'échelle continentale et pourra être contraint par des observations multiéchelles.
- Un modèle couplé économie-surfaces continentales prenant en compte les effets du climat et des changements d'émissions de gaz à effet de serre sur la redistribution des terres et le fonctionnement des écosystèmes anthropiques (cultures, prairies, ...).
- Une évaluation robuste de l'impact des changements d'usage des sols passés sur a) l'évolution récente du climat, b) les ressources en eau, c) les émissions de polluants.
- Inversement une évaluation du rôle du changement climatique sur la stratégie d'utilisation des surfaces et des ressources.
- Une évaluation des interactions principales entre climat, sol et végétation et une identification des variables biologiques contrôlant la séquestration du carbone dans les sols (comme la chimie des résidus organiques, l'allocation du carbone photosynthétique, etc.).

### **I.3.3. Expériences des équipes**

Pour les recherches à l'échelle climatique, ce thème s'appuie sur les projets :

- Le projet Européen ENSEMBLES,
- le projet ANR DIVA qui vise à évaluer le rôle de la dynamique naturelle et anthropique des surfaces continentales sur le climat des 150 dernières années à l'échelle globale.
- un projet international d'intercomparaison des modèles de climat qui démarre cet été et qui vise à évaluer la robustesse de l'effet des changements d'usage des sols sur l'évolution du climat au cours des 150 dernières années.

De l'échelle du bassin versant à l'échelle continentale les travaux qui seront menés s'appuient sur :

- Le projet international AMMA qui vise à mieux comprendre le fonctionnement de la mousson en Afrique de l'Ouest et de ses impacts sur l'agriculture et les ressources en eau, notamment à travers le rôle particulier des surfaces continentales sur sa variabilité intra-saisonnière à interannuelle. Le RTRA pourra s'appuyer sur les observations hydrologiques, agronomiques et météorologiques collectées pendant les campagnes de terrain d'AMMA pour améliorer la représentation des surfaces continentales dans le modèle de biosphère continentale.
- Les projets nationaux et européens visant à l'exploitation et à l'interprétation des données spatiales (AMETHYSTE, SAF-Hydrology, SMOS, VENUS, etc.....).
- Des projets nationaux sur la modélisation des hydrosystèmes et de leur réponse au changement climatique (projet GICC2 « RexHySS » qui vise à caractériser l'influence du changement climatique sur la ressource en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme, projet de plateforme de modélisation intégrée des hydrosystèmes régionaux EAU-DYSSEE soumis à EC2CO et ANR, ...).
- Le projet national en cours de montage sur la Méditerranée.

Pour les liens avec l'économie publique dans le secteur agricole, ce travail prend la suite de ce qui a été fait dans le cadre du GICC entre le LSCE et l'INRA de Grignon.

- La recherche effectuée dans ce thème sera portée par huit chercheurs de rang A et concerne une vingtaine de chercheurs permanents ou post-doctorants, au sein de 6 unités : LOCEAN, LMD, LSCE, SISYPHE, CETP, LISA Des études visant à évaluer l'influence conjointe de l'évolution du climat et du changement d'usage des sols dans la zone sahélienne et leurs effets sur l'érosion éolienne des sols et la production d'aérosols désertiques, en particulier dans le cadre du programme AMMA (LISA) ;
- Le travail s'effectuera en collaboration avec le laboratoire Environnement et Grandes Cultures de l'INRA, et le laboratoire Interactions Dynamiques et Environnement de Surface (IDES) de l'Université Paris 11.

#### **I.3.4 Attractivité internationale**

Dans le cadre des projets décrits ci-dessus les acteurs de ce thème ont nombreuses collaborations européennes et internationales (Etats-Unis, Australie).

## ***1.4 Impact du changement climatique sur les écosystèmes semi-naturels et agricoles***

**Rédacteurs** : Paul Leadley (ESE), Luc Abbadie (BioEMCO), Nicolas Viovy (LSCE)

### **1.4.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

Les modifications de la composition atmosphérique et du climat liées aux activités de l'homme ont déjà modifié le fonctionnement et la biodiversité des écosystèmes terrestres et il est essentiel d'être en mesure de prédire les changements futurs des cycles biogéochimiques et de la biodiversité. Par exemple, il y aura très probablement une augmentation de la productivité végétale et un stockage accru du carbone dans les écosystèmes terrestres sous les effets combinés de l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique et de la déposition azotée (IPCC Third Assessment Report). Cependant, plusieurs études suggèrent que la capacité des écosystèmes à stocker du carbone dans le futur est probablement surévaluée à cause des limites imposées par la sécheresse (Ciais et al. 2005 Nature), la disponibilité en azote (Hungate et al. 2003, Science 302:1512-1513), etc... qui ne sont pas suffisamment prises en compte. En plus des effets sur les cycles biogéochimiques, la plupart des modèles suggèrent que les modifications futures de l'atmosphère et du climat auront des conséquences néfastes pour la biodiversité. Une étude récente prédit que la moitié des 1350 espèces végétales européennes étudiées sera considérée comme "vulnérable" ou "en danger" vers la fin du siècle (Thuiller et al. 2005. PNAS 102, 8245-8250). Ces modèles sont, cependant basés sur des simplifications extrêmes de processus très complexes, et, de ce fait, leurs prédictions sont contestées même au sein de la communauté scientifique.

L'amélioration des prédictions des effets de changements atmosphériques et climatiques sur les écosystèmes semi-naturels et agricoles dépendra d'une interaction étroite entre les observations, les expériences et les modèles à plusieurs échelles spatio-temporelles. Pourtant, ces interactions ne se mettent en place que lentement à l'échelle internationale. Les laboratoires impliqués dans ce thème du projet RTRA (ESE, LSCE, BioEMCO) possèdent un ensemble de compétences concernant l'impact des changements atmosphériques et climatiques allant de l'échelle de la feuille jusqu'au globe, sont géographiquement très proches et ont déjà de nombreuses collaborations en cours. Ces atouts, dans le cadre du RTRA, permettront l'établissement de prédictions des effets des changements atmosphériques et climatiques sur les écosystèmes à l'échelle régionale et planétaire qui soient solidement fondées sur une connaissance des mécanismes sous-jacents.

### **1.4.2 Résultats Attendus**

Dans les années à venir, des progrès réels sont attendus dans au moins cinq sous-projets/ ,

#### **Impact des événements extrêmes sur les écosystèmes**

Les événements extrêmes récents (par exemple la canicule de 2003 ou la tempête de 1999) ont eu un impact très fort sur les écosystèmes. Par exemple nous avons pu montrer que la perte de productivité des écosystèmes en 2003 avait eu comme résultat l'émission vers l'atmosphère de l'équivalent de 4 années de carbone stocké sur l'ensemble de l'Europe. Encore ne s'agit-il ici que de l'effet immédiat. Mais les conséquences de tels événements peuvent se faire sentir pendant de nombreuses années. Par exemple, la sécheresse de 1976 a conduit à un pic de

mortalité des arbres près de dix ans après. Les conséquences de tels événements sur l'économie de différents secteurs de l'agriculture peut donc être dramatique. Une meilleure compréhension de l'impact des événements extrêmes (amplitude et fréquence) est donc fondamentale pour évaluer la vulnérabilité des écosystèmes. La compétence des différentes équipes impliquées dans le réseau offre un cadre unique pour aborder cette problématique dans son ensemble. On disposera en effet des outils (modélisation, statistique) pour caractériser ces événements et leur fréquence dans le passé récent et le futur (cf chapitre 3 extrêmes climatiques et impacts) et évaluer leurs conséquences à l'échelle locale et régionale à l'aide d'outils de modélisation des écosystèmes terrestres (e.g., les modèles ORCHIDEE - LSCE et CASTANEA - ESE). Les différentes mesures sur le terrain seront effectuées soit par les équipes du RTRA, soit au travers de l'implication des équipes dans les projets Européens comme CARBOEUROPE et NITROEUROPE.

### **Changements climatiques et biodiversité**

Les changements globaux futurs pourraient devenir d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle l'un des principaux facteurs susceptibles de modifier la diversité végétale. Mais l'action des décideurs et des gestionnaires dans ce domaine dépendra de l'émergence d'un consensus au niveau de la communauté scientifique sur le bien fondé des prédictions d'une perte importante de la diversité végétale. L'objectif de la recherche en cours depuis peu dans le cadre du projet "QDiv" (ANR/IFB Biodiversité 2005) est de développer des outils quantitatifs de prédiction des effets des changements du climat et des teneurs en CO<sub>2</sub> atmosphérique sur la diversité et la répartition spatiale des plantes en France. Ce travail s'appuie sur un ensemble d'observations, d'expériences et de modèles. Les comparaisons entre plusieurs types de modèles (arbres - ESE, groupes fonctionnels des plantes - LSCE) d'une part, et entre modèles, expériences (ESE) et observations (ESE), d'autre part, permettront d'accroître la qualité de nos prédictions et de dégager un consensus sur les risques associés aux changements du climat et du CO<sub>2</sub>. Ce projet est le seul au niveau international regroupant les expertises nécessaires pour de telles comparaisons et le RTRA nous permettra d'appuyer ce domaine de collaboration émergente et de renforcer les liens avec le partenaire BioEMCO de façon à prendre en compte les effets du changement climatique sur la biodiversité des organismes du sol et les réseaux trophiques aquatiques.

### **Couplage entre les cycles du carbone et de l'azote**

Les cycles du carbone et de l'azote sont étroitement liés car la disponibilité en azote est souvent limitante pour la photosynthèse et le métabolisme du carbone des plantes et donc pour le stockage du carbone dans les sols des écosystèmes terrestres. De plus, le cycle d'azote joue un rôle majeur dans l'effet de serre via l'efflux du N<sub>2</sub>O des sols. Pour ces raisons, la prise en compte des couplages entre les cycles du carbone et de l'azote est identifiée comme l'un des enjeux majeurs pour les prochaines projections du IPCC. Les laboratoires du projet RTRA possèdent une gamme exceptionnelle des compétences pour travailler sur les effets des changements globaux sur le cycle de l'azote des échelles fines (BioEMCO, ESE) à l'échelle planétaire (LSCE), ce en couplant les observations (BioEMCO), les expériences au niveau de l'écosystème (BioEMCO, ESE) et le modélisation, théorique (BioEMCO) et mécaniste (BioEMCO, ESE, LSCE). Cependant à l'heure actuelle ces laboratoires ont peu de projets communs concernant le cycle de l'azote. Nous proposons un effort majeur d'évaluation des modèles des cycle du carbone et de l'azote aux échelles régionales et planétaires (ex : ORCHIDEE - LSCE) en utilisant des modèles aux échelles plus fines, les observations et les

expériences dédiés. Les laboratoires proches géographiquement - tels ceux de l'INRA Versailles - seront étroitement associés à ce projet.

### **Croissance des arbres dans un contexte de changement climatique**

Les forêts, représentent 80 % de la biomasse continentale et jouent un rôle majeur dans le stockage du carbone. Actuellement l'accroissement des stocks de carbone dans les forêts françaises est estimé à 10-20 millions de t C/an. Toutefois cet impact positif des changements globaux sur la croissance pourrait s'inverser. Améliorer notre prévision de la productivité des forêts nécessite à la fois une très bonne connaissance du rôle des facteurs contrôlant la croissance (climat, fertilité du sol mais également gestion sylvicole et diversité génétique) et leur prise en compte simultanée. Nous proposons de renforcer ces interactions par le biais du RTRA, entre, notamment, les écophysiologistes (arbres et sols), les dendrologistes, les modélisateurs et les bio-physiciens et ce, en couplant les approches flux et isotopes. Les isotopes stables (carbone et oxygène) sont des traceurs très puissants du fonctionnement des arbres et des écosystèmes, mais pour progresser dans leur utilisation, des verrous sont à lever sur les relations isotopes/processus biologiques et vis à vis de leur intégration dans les modèles bio-physiques de fonctionnement des forêts. Nous proposons de lever ces limites à travers deux approches. La première concerne l'étude des composantes du bilan de carbone à court et moyen terme (année, plusieurs années). Dans ce cadre, les mesures d'isotopes stables, associées à celles de flux à différentes échelles permettront (i) de séparer les différentes composantes du flux net de carbone des forêts et (ii) de déterminer le rôle des pools de carbone différant par leur temps de résidence. L'autre approche porte sur l'étude des dynamiques à long terme grâce aux longues séries temporelles enregistrées dans les cernes d'arbre. La construction d'une large base de données (en terme de climat, croissance, flux, isotopes de l'atmosphère et des cernes), combinée à connaissance accrue des processus flux et isotopes et le développement des modèles associés dans le cadre du RTRA aboutiront à une meilleure caractérisation du potentiel de séquestration du carbone par les forêts tempérées européennes.

### **Changement d'échelle : de la feuille jusqu'à la planète**

Une des caractéristiques des écosystèmes est leur très forte variabilité spatiale. Elle s'exprime à tous les niveaux depuis l'échelle locale (variabilité intra-parcelle) jusqu'aux échelles régionales et globales. Un des enjeux majeurs pour les scientifiques, qui veulent prédire la réponse des écosystèmes aux changements climatiques et leur rôle dans les flux des gaz à effet de serre, concerne la prise en compte de la variabilité spatiale aux différentes échelles considérées. Il s'agit, en fonction des questions posées et de la précision attendue dans les prédictions, de décider quel niveau de variabilité doit être considéré. Ces questions sont déjà abordées par les différents laboratoires impliqués dans le projet de RTRA. Toutefois chaque équipe travaille le plus souvent à une échelle donnée et avec un seul modèle. La validation et l'intercomparaison de modèles et observations à plusieurs échelles (feuille - ESE, arbre - ESE, région - ESE et LSCE, globe - LSCE) doivent permettre d'optimiser le niveau de simplification de chaque modèle en fonction de l'échelle de prédiction privilégiée. Ce partage d'outils et de savoir faire au sein du RTRA, permettra d'améliorer à moindre coût (données nécessaires, moyens de calcul, etc.) les prédictions des effets des changements climatiques et atmosphériques sur le fonctionnement des écosystèmes.

Une autre caractéristique des écosystèmes est leur complexité fonctionnelle. Des simplifications majeures sont essentielles pour construire des modèles du fonctionnement des

écosystèmes à l'échelle planétaire, mais il est fondamental de comprendre les bases physiologiques de ces simplifications. Par exemple, le rôle des écosystèmes terrestres dans la détermination de la signature isotopique du carbone dans l'atmosphère a été longtemps interprété comme n'étant modulé que par la discrimination isotopique de la photosynthèse. Nous savons depuis peu que la respiration influence cette discrimination isotopique (travail du laboratoire ESE). Dans le cadre du projet RTRA, le choix des processus et leur représentation dans les modèles globaux seront affinés via une comparaison des modèles et des observations à plusieurs échelles.

### **I.4.3 Expérience des équipes**

Dans les unités du RTRA concernées par la thématique (ESE, BioEMCO, LSCE), les équipes sont impliquées dans plusieurs projets européens (CARBOEUROPE, NITROEUROPE, NETCARB, REX EVOLTREE par exemple). Elles comptent un membre du « Forest Focus » (Réseaux Forestiers Européens) et un membre du comité scientifique du « Global land project ».

Le thème de recherche sera porté par une dizaine de chercheurs de rang A, une trentaine de chercheurs permanents ou post-doctorants, une quinzaine de thésitifs, et une quinzaine d'ITA au sein de 3 unités principalement impliquées : ESE, BioEMCO et LSCE. Le travail sera fait en forte collaboration avec le laboratoire Environnement et Grandes Cultures (EGC) de l'INRA.

### **I.4.4 Attractivité internationale**

Les collaborations internationales principales sont faites au sein des grands projets européens cités plus haut, mais aussi avec :

- Université U.C. Berkeley,
- Australian National University,
- Département de Biologie de l'Université d'Essex (U.K.),
- Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry de Yanglig, Shaanxi (Chine),
- Center for Ecology, Evolution and Behaviour, School of Biological Sciences, Royal Holloway University of London, UK
- Department of Biological Sciences, Imperial College at Silwood Park, UK
- Unité de microbiologie, Université Catholique de Louvain, Belgique
- Université de Séville, Estacion Biologica de Donana, CSIC, Espagne
- Département d'Ecologie et d'Evolution, Université de Lausanne, Suisse
- Mc Gill University, Montréal, Québec
- Colorado State University
- Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire
- Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso
- University of Witwatersrand, South Africa

## ***1.5 Climat et qualité de l'air***

**Rédacteurs** : Didier Hauglustaine (LSCE), Laurent Menut (LMD), Matthias Beekmann (LISA), Gilles Bergametti (LISA)

### **1.5.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

La pollution de l'air est la cause aujourd'hui démontrée de graves problèmes sanitaires et environnementaux. Elle résulte directement de la modification de la composition chimique gazeuse et particulaire de la basse atmosphère. Cette composition chimique dépend d'influences aussi variées et complexes que les émissions locales (les usines, le trafic, ...) ou régionales (les mégapoles) des polluants, les transformations chimiques, le transport (du panache de quelques kilomètres jusqu'aux transports intercontinentaux) ainsi que de la variation des conditions climatiques modifiant la chimie, altérant la dispersion des polluants et les échanges entre la basse atmosphère et la stratosphère.

Pour comprendre la pollution à l'échelle régionale, il faut savoir cerner correctement à la fois les plus petites échelles, incluant des sources ponctuelles fortes et les transports de grande échelle. Les équipes de recherche de l'IPSL et du LISA ont développé de fortes compétences pour la mesure et la modélisation des processus déterminant la composition chimique de l'atmosphère et la qualité de l'air.

Concernant les mesures, l'instrumentation, déployée par ces laboratoires depuis le sol (in situ et télédétection) ou sur des plates-formes aéroportées, permet aujourd'hui de caractériser l'ensemble des espèces chimiques d'intérêt pour la pollution. Un effort particulier est aussi mené actuellement afin d'exploiter au mieux les données satellitaires déjà existantes mais également pour préparer de nouvelles missions dédiées.

En parallèle, différentes plate-formes de modélisation sont aujourd'hui en place pour différentes échelles spatiales et temporelles d'étude et pour le suivi de différentes espèces chimiques : à l'échelle régionale avec CHIMERE et à l'échelle globale avec LMDz-INCA. Ces plateformes fonctionnent également dans un mode de prévision à échéance de quelques jours, ce qui permet de mieux connaître la variabilité des situations au jour le jour et les facteurs déterminant cette variabilité. En simulant des périodes passées, ces modèles permettent, par ailleurs, de caractériser les rétroactions existant entre la composition chimique de l'atmosphère et le climat. Enfin, l'étude des scénarios futurs permet d'évaluer l'influence des activités anthropiques sur le devenir du climat et la composition de l'atmosphère et l'influence du changement climatique sur l'évolution de la qualité de l'air.

### **1.5.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

Dans ce domaine, les avancées attendues lors des cinq prochaines années devraient résulter de développements que le RTRA proposé entend largement favoriser:

- sur le **plan expérimental**, l'émergence de nouvelles techniques plus fines de mesure in-situ permettant de mieux caractériser la chimie rapide et la composition chimique des aérosols, et l'exploitation des observations satellitaires permettant une couverture spatiale plus complète;

Plus précisément, l'amélioration des techniques de mesures chimiques in-situ, et notamment la possibilité de mesurer directement les radicaux, permettra de mieux quantifier la vitesse et la nature des transformations chimiques dans l'atmosphère. On cherchera aussi à mieux cerner la composition chimique des aérosols par des mesures de masse et de spéciation afin de

mieux évaluer leur toxicité potentielle et de bien cerner leur origine (anthropique ou naturelle). Ceci devrait déboucher sur des mesures de réductions d'émissions mieux ciblées et fondées sur une expertise scientifique forte.

Un effort important portera sur l'exploitation optimale des observations satellitaires, existantes ou prévues, afin d'obtenir des informations sur le contenu des polluants, plus spécifiquement dans les basses couches de l'atmosphère. Les algorithmes d'inversion seront améliorés, en particulier, en combinant l'exploitation des instruments travaillant dans le domaine spectral de l'UV-Visible (SCIAMACHY sur ENVISAT, GOME-2 sur METOP) et dans l'infrarouge (IASI sur METOP, lancement prévu en octobre 2006). En parallèle, des missions spécifiquement dédiées à la qualité de l'air doivent être préparées pour assurer un échantillonnage spatio-temporel des polluants majeurs (de l'ordre de la dizaine de kilomètres et de une à quelques heures), compatible avec les modèles de chimie et de transport.

- sur le **plan de la modélisation**, la construction de plates-formes couplant directement différentes échelles pertinentes, et intégrant modèles et bases de données d'observations. Par ailleurs, le développement de l'assimilation de données et la prévision d'ensemble devraient conduire à une nette amélioration de la qualité des simulations et à une meilleure connaissance des incertitudes associées. On cherchera donc à intégrer les informations déduites, à partir de plates-formes de modélisation indépendantes LMDz-INCA et CHIMERE et de leur couplage, en y intégrant aussi le modèle de végétation ORCHIDEE.

A l'échelle planétaire, le modèle LMDz-INCA permettra de :

\* Etudier le rôle du transport intercontinental de polluants sur la formation d'épisodes de pollution en Europe, par couplage LMDz-INCA et CHIMERE. Il s'agira, en particulier, d'estimer comment les émissions futures de polluants dans les pays émergents ou en Amérique du nord vont contribuer à l'évolution des concentrations d'ozone en Europe.

\* Réaliser des scénarios futurs d'émissions de polluants afin d'estimer l'évolution de la composition de l'atmosphère en polluants, gaz à effet de serre et particules et de quantifier l'impact sur le climat global. En retour l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air sera lui aussi examiné

\* Enrichir la plate-forme expérimentale de prévision en intégrant des processus encore mal connus comme les émissions par les feux et par la végétation, et en prenant en compte de données satellitaires en temps quasi-réel.

Aux échelles locale et régionale, la plate-forme de modélisation CHIMERE permettra d'appréhender la simulation de l'échelle de la ville à celle de l'Europe, à la fois pour les espèces gazeuses clés (ozone, oxydes d'azote) et les aérosols. Les avancées attendues sur ce domaine se situent à différents niveaux:

- Origine et devenir des aérosols: mieux comprendre des processus comme la production, le transport et la perte des aérosols, qu'ils soient d'origine naturelle (sources sahariennes, par exemple) ou anthropique (émissions primaires ou formation secondaire à partir d'espèces gazeuses). On pourra alors estimer le poids relatif de la production anthropique et donc les possibilités de réduction de cette pollution.
- Interactions d'échelles: mieux prendre en compte les interactions d'échelles: cela pourra être réalisé d'une part en affinant l'échelle spatiale (jusqu'à 1km avec CHIMERE); d'autre part en couplant CHIMERE à LMDz-INCA. A fine échelle, on

cherchera à quantifier la pollution de proximité en milieux urbains: de la grande ville, comme Paris, jusqu'aux mégacités (comme Mexico).

- Evènements extrêmes: mieux prendre en compte l'impact d'évènements extrêmes et al modification de leur fréquence et intensité (comme la canicule de 2003, les incendies estivaux de forêt en Europe du sud, les incendies accidentels industriels comme en Angleterre) sur la qualité de l'air.

### **I.5.3 Expérience des équipes**

Les équipes de ce domaine de recherche sont impliquées dans de nombreux projets (nationaux et internationaux). On peut citer pour le groupe de modélisation autour de LMDz-INCA:

- des études d'impact comme la collaboration avec l'ONERA et la DPAC ,
- le projet européen QUANTIFY visant à étudier l'impact du transport aériens et routier sur la composition de l'atmosphère et le climat,
- l'évolution récente de la composition chimique sous l'effet des activités humaines dans la basse atmosphère avec le projet européen RETRO
- l'étude de la formation du trou dans la couche d'ozone avec le projet européen SCOUT.

Une partie importante de nos activités concerne également l'évaluation des modèles par comparaison avec les observations. Ces évaluations couvrent à la fois la comparaison avec les mesures de surface, aéroportées, les campagnes de mesures et les données satellitaires. Le projet intégré GEOMON récemment accepté par la Commission Européenne sera coordonné par le LSCE et vise précisément à renforcer la synergie entre les mesures et les modèles de chimie. Par ailleurs, l'exercice d'intercomparaison AEROCOM initié et coordonné par l'IPSL nous a permis d'évaluer une vingtaine de modèles d'aérosols de toutes nationalités et de comparer ces résultats aux principales mesures disponibles. Nos équipes et nos modèles sont également fortement impliqués dans la rédaction et les simulations numériques alimentant les rapports du GIEC.

A l'échelle régionale, le modèle de chimie-transport CHIMERE a fait, ces dix dernières années, l'objet de développements importants à l'IPSL et au LISA. Dès le début de sa conception, l'accent a été mis sur la notion de prévision. Que ce soit à l'échelle de la ville (la région parisienne pour commencer) jusqu'à un système à aires emboîtées (l'Europe, donnant les conditions générales pour la France puis de régions données), le système a été pensé pour être utilisable aussi bien en recherche qu'en calcul opérationnel. Cette facilité de développement, de modification et d'utilisation, est certainement à l'origine de son essor actuel.

D'un point de vue recherche, le modèle est aussi mis en oeuvre dans le cadre de programmes de recherche internationaux comme: (i) L'évaluation de l'impact sur l'ozone des réductions à l'échelle européenne des émissions à l'horizon 2010, selon le protocole de Göteborg, à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, (ii) L'exercice CAFE/CITY-DELTA, où les impacts sur l'ozone, le dioxyde d'azote et les particules inférieures à 10 µm (PM10) de scénarios de réductions à l'horizon 2010 ont été évalués à l'aide de plusieurs modèles européens dont CHIMERE, et sur plusieurs villes européennes ; la diversité des réponses données par les différents modèles reflète l'incertitude sur ces impacts,

(iii) l'exercice CAFE/EURODELTA, identique dans son principe au précédent mais sur l'ensemble de l'Europe. Par ailleurs, le projet CIRCE permettra de réaliser un couplage de haute précision spatiale et temporelle entre des outils liant dynamique, chimie et végétation pour l'étude du climat Méditerranéen. Enfin, le projet NATAIR vise à développer des cadastres d'émissions naturelles à l'état de l'art et à quantifier l'impact de ces émissions sur la pollution à l'échelle de l'Europe.

Par ailleurs, le modèle CHIMERE est utilisé dans le cadre du système de prévision PREVAIR, co-développé et mis en oeuvre par l'INERIS. Ce système est aujourd'hui reconnu comme unique en Europe sur le plan de la prévision opérationnelle de la pollution et se place donc au coeur de nombreux projets de qualité de l'air. A l'échelle régionale, CHIMERE est utilisé aussi pour des prévisions opérationnelles en région parisienne (AIRPARIF), à Marseille (AIRMARAIX), Strasbourg (ASPA) et dans d'autres régions. Plus généralement en Europe, CHIMERE est mis en oeuvre de façon opérationnelle ou quasi-opérationnelle par des instituts et réseaux Européens, comme au Portugal, en Espagne, Italie, Pays-Bas, Belgique.

De même, les équipes sont fortement impliquées dans de nombreux projets européens. Dans le cadre du programme GMES, la mise en place de services intégrés d'observation et de simulation de la pollution atmosphérique est visée. Dans ce contexte, le projet GEMS a pour but la préparation des outils de prévision de la qualité de l'air à haute résolution pour les années à venir. Une version du modèle CHIMERE a récemment été développée afin d'être directement forcée par le modèle du Centre Européen ; le projet ESA/PROMOTE est destiné à mettre en place les produits issus des simulations de qualité de l'air pour différents types d'utilisateurs, en utilisant notamment les observations satellitaires déjà disponibles.

Le thème est porté par une dizaine de chercheurs de rang A, et concerne directement une trentaine de chercheurs permanents ou post-doctoraux au sein de 4 unités : le LISA, le LMD, le LSCE et le SA.

## **I.5.4 Attractivité internationale**

L'IPSL et le LISA sont leader de la modélisation de la chimie et du transport en Europe, couvrant l'ensemble des échelles globale, régionale et locale. Les équipes de l'IPSL et du LISA jouent également un rôle de premier plan en ce qui concerne l'inversion et l'exploitation des observations satellitaires et le développement de nouvelles missions. Ils jouissent d'une excellence internationalement reconnue pour le développement d'instrumentation novatrice de mesure in-situ de la pollution et son application dans de nombreuses campagnes (Esquif, Escompte, Berlioz, Indoex, AMMA...). Au travers des projets internationaux et européens que nous coordonnons (exemple GEOMON) et dans lesquels nous sommes impliqués ou au travers des intercomparaisons de modèles pilotées par l'IPSL (Programmes AEROCOM), les équipes exercent une attractivité importante pour nos collègues étrangers. La forte implication des équipes dans le programme européen Clean Air For Europe (CAFE) et dans les autres projets Européens cités ci-dessus donne aux équipes une visibilité internationale importante. La plupart des modèles de l'IPSL et du LISA sont des modèles en accès libre et de nombreux instituts de recherche, organisations institutionnelles, mais aussi sociétés privées mettent en oeuvre ces modèles pour leur applications propres. Des chercheurs étrangers sont amenés à séjourner très régulièrement à l'IPSL et au LISA pour l'installation et l'utilisation du modèle. Des journées de formation aux utilisateurs sont régulièrement organisées. Enfin, les différents chercheurs des laboratoires de l'IPSL et du LISA sont impliqués dans les groupes de réflexions internationaux.

## **I.6 Climat et santé**

**Rédacteurs** : Philippe Saïag (UFR Médecine, PIFO), Laurence Eymard (LOCEAN), Alain Weill (CETP), Alain Hauchecorne (SA), Yves Balkanski (LSCE)

### **I.6.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

La variabilité du climat à court, moyen terme et long terme, comme l'ont montré André Leroy-Gourhan et bien d'autres, a modifié l'environnement de l'homme et ses rapports avec les ressources naturelles. Il s'ensuit des relations « homme-milieu » susceptibles de se manifester sur la santé humaine.

Les variations rapides attendues de notre climat requièrent que les scientifiques disposent d'outils quantitatifs pertinents pour pouvoir imaginer, appréhender et anticiper les effets. Si la recherche sur les effets de la pollution atmosphérique sur la santé dans un contexte de « climat constant » se structure grâce aux efforts et la coordination des disciplines (physico-chimie, toxicologie et épidémiologie, sciences sociales), l'évolution climatique avérée implique à la fois de nouveaux besoins en termes de recherche et pose de nouvelles questions liées à la pollution atmosphérique dans le contexte de l'évolution de l'environnement. En effet, les relations entre variations environnementales et santé restent actuellement un domaine très ouvert, en raison de la grande diversité de ces relations, d'une part, et de la difficulté de les établir de façon fiable, de l'autre.

Cependant, les épidémiologistes et toxicologues s'intéressent de plus en plus aux facteurs environnementaux impliqués dans les problèmes de santé publique, et les climatologues disposent d'outils d'observation et de modélisation qui peuvent permettre de caractériser le contexte environnemental associé à un tel problème de santé. L'objectif de cette action est de développer des méthodes pour identifier et analyser quantitativement les relations entre santé et modifications de l'environnement, soit par effet anthropique direct (modification des écosystèmes et des divers compartiments de l'atmosphère (air, eau ou sol), soit du fait des variations climatiques ou du changement climatique prévisible.

#### *Approche proposée*

Jusqu'à maintenant la collaboration entre chercheurs dans le domaine de la santé (épidémiologie, toxicologie) et dans le domaine du climat et de l'environnement est restée très ponctuelle, faute d'une démarche commune pour aborder ce sujet. Nous proposons de commencer ce travail sur quelques sujets déjà identifiés comme impliquant l'environnement. Trois thèmes pourraient faire l'objet des premières études :

#### **1) Santé des populations vulnérables et environnement**

Les populations vulnérables (enfants, personnes âgées, malades, handicapés) sont souvent les premières victimes des modifications de l'environnement, qu'il s'agisse des extrêmes climatiques (15000 morts en France en août 2003, surtout des personnes âgées), de la pollution atmosphérique (augmentation des admissions en réanimation, en pneumologie et en cardiologie, augmentation des morts subites en cas de pic de pollution). Les « coups de soleils » survenant pendant l'enfance ou l'adolescence sont le facteur de risque principal du mélanome, redoutable cancer de la peau dont l'augmentation d'incidence est majeure en

Europe et aux Etats-Unis. Ces populations, plus sensibles aux effets de facteurs externes et moins aptes à développer des stratégies adaptatives, peuvent être considérées comme les révélateurs précoces de l'effet des modifications environnementales sur la population humaine. Il existe également un important besoin de recherche concernant les techniques d'adaptation de ces populations aux modifications du milieu de vie.

## **2) Impact des agressions physiques, chimiques et biologiques sur la santé humaine**

Les pollutions chimiques, biologiques et microbiologiques des trois compartiments de la biosphère (l'eau, l'air et les sols (végétation incluse)) ont des impacts connus et potentiels directs ou indirects sur la santé humaine. Si certains impacts sont réglementés et entrent dans le cadre d'une surveillance, d'autres sont inconnus et impliquent des recherches approfondies afin d'appréhender les risques à des fins d'aide à la décision. Parmi les agressions physiques, les relations UV/santé sont importantes et complexes (rôles du climat et des attitudes humaines) avec des conséquences sur l'œil (cataractes UV-induites) et la peau (augmentation actuelle très importante des cancers cutanés, déjà très prévalents, vieillissement cutané attribué à 90% aux UV).

## **3) Maladies émergentes**

Compte tenu de l'accroissement démographique, du vieillissement de la population dans les pays « développés », des évolutions de l'urbanisme et de l'architecture certaines pathologies émergent ou sont en ré-émergence et nécessitent des études particulières. Le rôle des variations climatiques qui s'ajoute aux facteurs précédents et complexifie la compréhension des mécanismes en jeu doit être pris en compte.

Lorsque les conditions météorologiques et environnementales deviennent sévères (canicule, alertes à la pollution, pollens...) le nombre d'admissions hospitalières pour maladies respiratoires, cardio-vasculaires ou allergiques augmente rapidement. Les liens de causalité n'ont pas été suffisamment explorés et comprendre comment ces conditions ont une incidence sur la santé reste une priorité d'autant que les populations sont sensibles : jeunes enfants, personnes âgées ou avec des difficultés pulmonaires sont particulièrement fragiles pendant ces périodes.

A plus long terme, le réchauffement climatique, en favorisant la migration du sud vers le nord de vecteurs comme certains moustiques (vecteurs entre autres du paludisme, du Chikungunya), exposera la population à des maladies infectieuses à vecteurs jusqu'alors inconnues dans notre région d'Europe de l'ouest. La transmission de risques infectieux nouveaux sera facilitée, avec des risques de développement d'épidémies humaines importantes.

En effet, les variations du climat dans le passé, et celles en cours, impliquent des modifications des conditions de température, pluviométrie / humidité de l'air ainsi que des modifications des écosystèmes (changement des espèces végétales et animales) soit en réponse au changement atmosphérique, soit en réponse aux besoins humains. Ces variations peuvent être cycliques (ex. saisonnières, en particulier aux tropiques). Dans cette catégorie on peut citer les épidémies de méningite en Afrique qui apparaissent principalement en saison sèche dans les régions sahéliennes, au moment des épisodes d'Harmattan. En revanche, l'extension actuelle des zones de dengue endémique en Amérique du Sud (Pérou, Brésil) n'est pas seulement saisonnière mais pourrait inclure une composante climatique (événements El

Niño) ainsi que de pratique locale (stockage de l'eau). La maladie de Chagas, sévissant en Amérique du Sud et menaçant le quart des populations d'Amérique latine a été identifiée comme la conjonction entre trois éléments un insecte, une structure sociale et un végétal. Les foyers ont été cartographiés, mais sa propagation n'a pu être prédite faute d'un modèle de propagation adéquat et surtout à cause d'une méconnaissance du rôle des facteurs climatiques. D'autres maladies infectieuses ou à vecteurs se répandent actuellement, comme la maladie de Lyme, sans qu'on explique actuellement son mode de propagation.

Parmi les maladies émergentes, on peut également inclure certaines allergies dues à la propagation d'espèces végétales en dehors de leur aire normale, du fait de conditions météorologiques favorables ou des effets synergiques éventuels entre particules anthropiques et particules biologiques dans un contexte climatique.

## I.6.2 Résultats attendus dans les 5 prochaines années

L'entrée de PIFO dans le RTRA permettra aux médecins d'apporter leur savoir-faire dans le domaine de l'étude des conséquences des modifications climatiques sur la santé. Le développement de cette thématique s'appuiera également sur les relations établies, au sein de l'IRD et d'autres organismes (INSERM), sur l'étude des maladies tropicales en Afrique et en Amérique du sud. Dans le cadre du réseau, des spécialistes de renommée internationale seront invités pour approfondir la démarche.

Ce domaine de recherche s'appuie sur les méthodes de l'épidémiologie mathématique (modélisation mathématique et simulation informatique des progrès thérapeutiques attendus) et sur différents outils informationnels et d'analyse permettant une **haute réactivité**.

Le pivot opérationnel et structurant de cette approche est la constitution de bases de données prospectives associant des informations de nature clinique, biologique, thérapeutique et évolutive par l'aide au développement :

- **des cohortes de malades** à partir des établissements hospitaliers de l'UFR PIFO et des réseaux de soins qui leur sont associés ;
- **de cohortes en population générale**
- **du croisement des données issues de systèmes informationnels** non initialement destinés à l'épidémiologie :
  - **systèmes informationnels hospitaliers** : PMSI, bases de données de gestion de l'activité et des dossiers cliniques des malades, bases de données des plateaux techniques de biologie, données issues de la prescription informatisée ;
  - **systèmes informationnels extra-hospitaliers** : caisses d'assurance maladie pour le remboursement des médicaments et les actes médicaux (SNIIR-AM), statut vital et causes de décès (CePiDC, INSERM)

A partir des éléments concernant les conditions de développement des pathologies, les chercheurs de l'IPSL et du LISA établiront le contexte météorologique ou climatologique, caractériseront les écosystèmes éventuellement impliqués. Ces informations seront exploitées pour élaborer des scénarios possibles et construire des modèles mathématiques pertinents.

L'évaluation des modèles sera faite sur des cas passés ou dans des régions non étudiées pour la construction des modèles. Ils permettront alors de faire des projections sur les risques futurs en établissant des jeux de scénarii prospectifs.

Les résultats attendus sur la qualité de l'air porteront sur :

- les conséquences sur la santé des polluants particuliers et en particulier les impacts bactériologiques (endotoxines) des fractions particulières.
- l'approfondissement des impacts des stress oxydants
- les impacts sanitaires des composés organiques
- l'impact sur la santé des transports de polluants à longue distance (aspect historique et prospectif)
- la connaissance de l'air intérieur dont les impacts sanitaires sont importants dans l'habitat insalubre mais aussi pour les constructions nouvelles (écoles et les crèches, ..)
- l'étude des facteurs de risque individuel

Sur l'interaction entre climat et santé, plusieurs axes scientifiques pour lesquels l'échange entre les médecins et les climatologues apportera des avancées significatives ont été dégagés. Ceux-ci devraient permettre d'apporter des éléments de réponses aux liens existant entre santé et conditions climatiques. Ces thèmes pour lesquels les bases de données, les mesures de terrain et les outils de modélisation sont disponibles sont les suivants :

- Variations du rayonnement UV et conséquences de la pollution particulaire sur les doses reçues par les humains, en particulier en l'Ile de France
- Influence de la pollution et des canicules sur les populations à risques particulièrement les personnes âgées
- Liens entre maladies infectieuses et climat
- Effet des changements climatiques sur les vecteurs de maladies à virus (moustiques)
- Etude de l'influence des facteurs d'environnement sur les maladies mentales

In fine, les résultats escomptés donneront des éléments de réflexion pour une aide à la décision dans le domaine des relations santé-climat.

### **I.6.3 Expériences des équipes**

Les principales expériences des équipes PIFO dans le domaine des études environnement-santé sont :

- Epidémiologiques. Unité INSERM de F Lert, dans le profil de laquelle travaillent 4 PU-PH en épidémiologie santé-publique du PIFO. Cette unité est à l'origine de grandes cohortes nationales (GAZEL, CONSTANCE, etc). Groupe de pharmaco-épidémiologie des maladies infectieuses de D Guillemot (INSERM, Pasteur) qui rejoint cette année PIFO, CUB-REA (Philippe Aegerter), qui centralise toutes les données des réanimations, etc....
- Cliniques, en particulier dans des disciplines où l'impact de l'environnement est majeur : pneumologie (perméabilité bronchique, pharmacologie bronchique)(Th Chinet, Philippe Devillers, Ch Advenier) dermatologie (cancers cutanés)(Philippe Saiag), maladies cardiovasculaires (Olivier Dubourg), microbiologie (Jean-Louis Gaillard)....
- Accès à des populations vulnérables particulièrement exposées aux impacts des variations environnementales (handicapés de l'hôpital R Poincaré de Garches, personnes âgées (Sainte Perinne, où sont étudiées plusieurs cohortes de patients âgés), pédiatrie et médecine périnatale de Poissy...)

Toutes ces équipes sont à la tête de projets nationaux (ANR, PHRC) ou internationaux (6<sup>ème</sup> PCRD)

Dans le cadre du programme AMMA, une étude préliminaire est en cours au LOCEAN, en partenariat avec des épidémiologistes, sur les épidémies de méningite en Afrique de l'ouest en saison sèche. Cette étude se poursuit dans le cadre du projet AMMA-Impacts du 6<sup>ème</sup> PCRD. L'épidémiologie de la dengue dans les régions tropicales fait l'objet de plusieurs études en coopération LOCEAN - Amérique du Sud (Brésil, Argentine, Pérou), et un modèle a été développé pour simuler l'impact de variations climatiques sur l'extension des régions touchées.

Dans le domaine de la qualité de l'air, les équipes de l'IPSL et du LISA ont développé une expertise internationale dans le domaine de la chimie atmosphérique (stratosphère et troposphère) et de la qualité de l'air, à la fois sur la modélisation, la prévision des épisodes de pollution, et la mesure très fine des constituants de l'atmosphère dans différents environnements (urbains, régionaux, globaux). La modélisation de la qualité de l'air à l'échelle urbaine ou régionale fait l'objet de nombreux développements opérationnels dans un cadre national (plate-forme nationale de prévision PREV'AIR et systèmes régionaux), international (systèmes de prévision des pointes de pollution dans plusieurs pays, dans le cadre du programme européen GMES), modélisation de l'impact de réductions d'émissions. L'organisation de campagnes de mesure de la qualité de l'air est également une grande spécialité des équipes de l'IPSL, développée dans un cadre international, notamment au travers de l'étude de la qualité de l'air des mégapoles (Pékin, Le Caire).

L'expertise sur l'ozone stratosphérique est également une des grandes forces de l'IPSL, qui maintient un réseau de surveillance international de ce constituant (NDSC), et la modélisation de l'ozone stratosphérique a fait l'objet de nombreuses études.

Les équipes de l'IPSL (CETP, LSCE, LOCEAN) ont de plus des compétences reconnues dans le développement et l'utilisation d'outils et modèles statistiques (méthodes bayésiennes, réseaux de neurones,...) et l'analyse géographique issue de la télédétection spatiale et de systèmes d'information géographique (agrégation / désagrégation), qui sont indispensables pour établir des modèles mathématiques représentatifs (de l'échelle globale à l'effet local).

La collaboration entre les sciences médicales et les sciences physiques maîtrisant les facteurs techniques s'est mise en place récemment, favorisée par l'intégration de PIFO dans UVSQ. Des réunions conjointes PIFO-IPSL ont lieu depuis un an. Plusieurs projets communs ont démarré (dosimétrie UV reçue réellement en Ile de France, prévention des expositions solaires en milieu scolaire, pollution et réactivité bronchique, impact et modélisation des admissions en réanimation et/ou en cardiologie à partir de modèles climatiques.... Ce groupe a été à l'origine et a piloté le projet de réseau à caractère essentiellement régional (Ile De France IDF santé-environnement) qui a été soumis à la région.

## **I.6.4 Attractivité internationale**

Dans le domaine médical, l'échelle des collaborations est restée très dépendante de la structuration des disciplines médicales, bien antérieure à l'irruption des conséquences du changement climatique dans le domaine de la santé. Il est donc difficile d'avoir une vision synthétique. Citons quelques exemples. En matière de cancers de la peau, participation active dans plusieurs groupes collaboratifs, dont l'European Organisation for research and treatment

of cancer, European academy of dermato-oncology, etc. En matière d'épidémiologie, renommés internationale des travaux de l'équipe de M Goldberg, ....

Deux programmes européens récents (CLARIS et AMMA) incluent un volet « climat – santé » explicite, qui a permis d'initier la collaboration de chercheurs européens et de pays tiers (Argentine, Brésil pour CLARIS, plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest pour AMMA). L'IRD soutient de telles collaborations et facilite les échanges entre les chercheurs français et les chercheurs des pays du Sud. Cette contribution permettra de développer les collaborations pertinentes sur les maladies d'origine tropicale.

Dans le domaine de la chimie atmosphérique, les équipes de l'IPSL ont de nombreuses collaborations internationales développées notamment au travers de projets européens, tant dans le domaine de la qualité de l'air que de l'ozone stratosphérique.

## ***1.7 Climats de régions vulnérables présents, passés, futurs***

**Rédacteurs** : Philippe Drobinski (SA), Gilles Ramstein (LSCE), Pascale Braconnot (LSCE), C. Rabouille (LSCE)

### **1.7.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

#### **Contexte**

La vulnérabilité des populations humaines et des systèmes naturels face aux 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. De plus, chaque système régional est à la fois affecté par des téléconnexions climatiques de grande échelle et des processus locaux particuliers. Des préoccupations clés découlent de ces différences pour chaque grande région du monde, qui nécessitent de mener des approches multidisciplinaires et d'améliorer la compréhension du rôle des différentes interactions spatio-temporelles intervenant à l'échelle d'une région. Un élément important de cette compréhension s'appuie sur notre connaissance de la variabilité et de la vulnérabilité passées de régions-clé en réponse à différentes contraintes.

Notre objectif est d'aborder ces questions pour quelques régions clés particulièrement vulnérables de façon à caractériser les impacts du changement climatique, analyser le rôle des boucles de rétroaction entre climat et milieux et d'évaluer les effets des interactions d'échelles spatio-temporelles. La représentation du climat global ne peut se faire, aujourd'hui, que grâce à des outils de modélisation de grande échelle, résolvant difficilement les phénomènes dont l'échelle approche celle de l'homme. Le pas que nous voudrions dès lors franchir est celui de la modélisation régionale pour explorer le climat aux échelles caractéristiques des systèmes considérés. Ces études intégrées transdisciplinaires 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). Les différentes approches de régionalisation envisagées devraient permettre de mener à bien des études d'impact aux échelles spatiales caractéristiques de ces systèmes, d'analyser

Au sein de ce RTRA, nous disposons d'une large palette d'outils de modélisation du climat à différentes échelles de temps allant des modèles conceptuels, aux modèles de complexité intermédiaire jusqu'à des modèles plus complexes qui représentent à la fois l'atmosphère, l'océan, la biosphère, la chimie et le cycle du carbone. Nous disposons de plus d'une solide expertise en analyse du signal climatique en termes de visibilité et de diagnostics d'événements extrêmes et d'évaluation des temps de retour. Enfin, la connaissance basée à la fois sur les données paléoclimatiques et sur la modélisation associée nous permet de disposer d'informations sur la sensibilité de ces différentes régions à des variations climatiques brutales.

Cette compétence s'est jusqu'alors appliquée à des problématiques liées aux changements climatiques passé, présent et futur. Le nombre d'experts en modélisation du climat participant à l'IPCC en est une preuve.

La régionalisation du climat passe par l'utilisation et/ou le développement de techniques de descente en échelles ("downscaling") permettant de quantifier la réponse régionale à un forçage de grande échelle. Pour ce faire, les équipes de l'IPSL composant le RTRA se dotent

de la maîtrise des techniques de modélisation dynamique régionale (atmosphère, océan), en étroite coopération avec le centre de recherche de Météo-France (CNRM), et développent des techniques novatrices en collaboration avec tes équipes de mathématiques appliquées (e.g. INRIA). L'effort de recherche que nous voulons engager sur la régionalisation du climat devraient parallèlement permettre d'évaluer à des échelles spatiales et temporelles en meilleure adéquation avec la demande sociétale l'impact du réchauffement globale à l'échelle régionale: cela concerne en particulier les ressources en eau, le lien entre agriculture et climat,... En effet, l'effet du changement climatique sur l'environnement régional ou local (ressources en eau, érosion, qualité des eaux naturelles, écosystème aquatique) est une des questions importante pour lesquelles le RTRA possède des atouts par l'utilisation couplée de mesures innovantes de traceurs et de modèles en cours de développement intégrant les flux de matière et d'eau dans les bassins versant. Cette thématique d'étude de l'impact local et régional du changement climatique peut être déclinée dans les différentes régions vulnérables et plus spécialement dans les zones méditerranéennes et de mousson

### **Les régions vulnérables**

Le dernier rapport des experts de l'IPCC rendu publique en 2001 prévoit pour le 21<sup>ème</sup> siècle une hausse de la température moyenne de la Terre comprise entre 1,4°C et 5,8°C et une augmentation du niveau des océans comprise entre 9 et 88 cm. Cette rapide modification du climat mondial accentuerait son instabilité et se traduirait par une augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles (cyclones, sécheresse, inondations, etc...) dans certaines régions du globe. L'agriculture y serait bouleversée et des déplacements massifs de population deviendraient inévitables entre les régions sinistrées (zones côtières inondées, accroissement des déserts, etc...) et les zones préservées entraînant nécessairement des tensions politiques. Certaines régions du globe particulièrement sensibles dans le cadre des bouleversements climatiques en cours et dont les variations climatiques passées témoignent de leur vulnérabilité font l'objet d'études au sein des équipes de l'IPSL mais l'évaluation de leur vulnérabilité dans un contexte de réchauffement global est encore très partiellement engagée et constitue un des axes prioritaires de recherche actuel au sein de l'Institut. Ces régions sont:

### ***Les régions de mousson (Afrique, Asie)***

L'Afrique comme l'Asie sont très vulnérables aux changements climatiques. Ces continents sont surtout préoccupés par l'incidence liée aux ressources en eau, à la production alimentaire, à la santé humaine, à la désertification et aux zones côtières, particulièrement en rapport avec les événements extrêmes. L'IPSL contribue largement à l'étude de ces régions par son implication dans les récents programmes de recherche internationaux sur les moussons indienne et africaine INDOEX (INDian Ocean EXperiment) en 1999 et AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis) en 2006 pour lequel l'IPSL coordonne la contribution européenne (projet FP6), ainsi que plusieurs projets paléoclimatiques liés au projet international PMIP. Ces programmes de recherche nous permettent d'effectuer des études de cas nécessaires à une meilleure compréhension des systèmes de mousson et d'évaluer les performances des simulations régionales des cas de mousson observés ces dernières années à partir des relevés instrumentaux ou dans le passés à partir des indications fournies par les données paléoclimatiques. D'autres études menées en collaboration avec l'IRD dans les zones de mousson asiatique visent à élucider et à modéliser les paramètres clés des flux d'érosion dans les zones de forte pente soumises à la mousson (Laos, Vietnam).

Dans le cadre du RTRA, il est important de travailler sur une approche systématique de modélisation régionale des systèmes de mousson dans le cadre d'un changement climatique

(passé ou futur) en s'appuyant sur les "étalonnages" effectués à l'aide des données collectées dans ces campagnes de mesure et en élaborant les techniques de régionalisation les plus adaptées à ces régions. Un premier chantier considère plus particulièrement l'Afrique de l'Ouest en s'appuyant sur les campagnes AMMA, et l'analyse du début et de la fin de la période humide entre le début et le milieu de l'Holocène, qui permettront de mieux caractériser les interactions entre la mousson africaine, la circulation de grande échelles et les modifications des conditions de surfaces induites par le couvert végétal et l'humidité de surface (lacs, eau des sols). L'impact du changement climatique pourra également être abordé sur des questions cruciales comme celle de l'érosion des sols avec des modèles de bassin versant calibrés par les données de terrain.

Le second chantier concerne les moussons indiennes et d'Asie du sud est pour lesquelles nous chercherons à établir les liens entre les fluctuations des régimes de mousson dans ces deux régions et les caractéristiques des modes de variabilité affectant l'océan Pacifique (ENSO) ou l'océan indien (dipôle indien). Pour ces régions l'analyse des variations intrasaisonniers, ainsi qu'une meilleure caractérisation à petites échelles des systèmes précipitants et du cycle diurne de la convection devrait permettre de mieux relier les caractéristiques des changements de climat et les caractéristiques des événements extrêmes dans les différentes sous-régions. La prévisibilité des systèmes sera aussi abordée pour contribuer à terme à améliorer les prévisions saisonnières dans ces régions dont l'agriculture dépend fortement des régimes de précipitation.

### ***L'Europe***

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 particulier, l'aridification de l'Europe méridionale et la fonte massive des surfaces englacées (glace de mer, calotte groenlandaise dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord) pourraient aggraver ces effets. La réorganisation à l'échelle régionale du cycle de l'eau, tant sur la façade Atlantique Ouest Européenne que sur le bassin méditerranéen, lors de variations climatiques intenses comme les Sapropels en Méditerranée ou l'écroulement de la circulation thermohaline en secteur Nord Atlantique montrent que ces deux régions ont une très grande fragilité.

En Europe de l'ouest, un des défis majeurs mis en évidence ces dernières années par différents groupes (en particulier, Andrey Ganopolski et Stefan Rahmstorf du PIK et Jonathan Gregory de Hadley Center) est la possibilité que la circulation thermohaline, et surtout la formation d'eau profonde nord Atlantique (NADW), dont les reconstructions passées nous apprennent que c'est le "talon d'Achille" de la circulation océanique globale, décline. De très récentes publications (Bryden, Nature 2006) ont montré que d'ores et déjà le transport de chaleur dans l'Atlantique Nord avait varié. Très récemment encore, deux articles publiés dans Nature (Groenland) et Science (Antarctique) ont montré que le flux des glaciers était bien plus élevé qu'initialement prévu et donc que la perturbation en terme de flux d'eau douce, en particulier dans les zones de formation d'eau profonde nord Atlantique pourrait subir des modifications importantes. De tels scénarios conduiraient à un refroidissement rapide de toute la façade nord Atlantique et donc de la France, avec une décroissance des températures de l'ordre de 4°C en un espace de temps court (à l'échelle d'une vie humaine). De tels scénarios se sont déjà déroulés dans un passé récent et ont conduit à une forte baisse de la circulation thermohaline qui affecterait toute la façade Atlantique jusqu'aux côtes hispano-portugaises. Disposer d'outils pertinents pour simuler de tels événements est donc un atout primordial. En couplant une hiérarchie de modèles climatiques au modèle de calotte de glace développé au

LGGE, le LSCE et l'IPSL à travers des projets européens comme NICE, sont des leaders européens dans ce domaine.

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. Les interactions et rétroactions des différents domaines de ce bassin jouent un rôle prépondérant sur les dynamiques géophysiques et biologiques. Des perturbations massives des écosystèmes des eaux méditerranéennes pendant les épisodes de Sapropels aux événements extrêmes plus ponctuels, le spectre des perturbations affectant le bassin est large et encore insuffisamment compris. La prévision des événements extrêmes tels que pluies intenses et crues en automne, surcôtes, vents violents et fortes houles 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. Une meilleure compréhension de cette hiérarchie dans la génération des événements extrêmes méditerranéens est nécessaire afin de mieux évaluer leur prévisibilité et de progresser dans leur prévision. Dans le domaine du changement climatique, la forte influence topographique du bassin implique également de développer des approches intégrées par régionalisation pour discerner les mécanismes de la réponse climatique de la Méditerranée au réchauffement global. Comprendre la combinaison des facteurs régionaux et globaux du climat est essentiel dans une région où les interactions du système couplé sont prépondérantes. 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 conséquences les plus visibles en France de la variabilité du climat en région méditerranéenne sont les crues dont les conséquences économiques et sociales sont dramatiques. Ces crues sont un des vecteurs principaux de la matière dans le réseau hydrographique jusqu'à la mer et contribuent de manière substantielle au flux de retour d'eau et de matière du continent vers le milieu marin. Les bilans de matière et les écosystèmes fluviaux et côtiers sont largement affectés par ces flux importants et brutaux sans qu'il soit possible à l'heure actuelle d'en évaluer les conséquences avec précision. Un effort de mesure et de modélisation dans le réseau hydrographique et les estuaires devra être entrepris afin d'évaluer les conséquences des crues sur les flux de matière (incluant le carbone) et sur les écosystèmes. Que ce soit pour le futur, le présent ou le passé, les équipes de l'IPSL, en utilisant le modèle zoomé LMDZ couplé au modèle (1/8) de LOCEAN pour la Méditerranée ont montré qu'elles disposaient de l'outil approprié. Ces équipes sont d'ailleurs impliquées dans des projets de l'étude du climat méditerranéen (e.g. projet FP6 CIRCE, projet ACI CYPRIM) et contribue actuellement à l'élaboration d'un programme expérimental d'envergure internationale du climat méditerranéen (projet HyMeX pour Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment - coordonnée par des chercheurs du SA/IPSL et du CNRM/Météo-France).

### ***Régions polaires***

L'évolution du climat dans la région polaire devrait être l'une des plus accentuée du globe. Les données du 20<sup>ème</sup> siècle concernant l'Arctique montrent une tendance au réchauffement d'au moins 5°C sur de grands territoires, tandis que les précipitations ont augmenté. Il existe certaines zones de refroidissement dans l'est du Canada. 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. On a observé une baisse statistiquement significative de l'étendue de la neige de

printemps en Eurasie depuis 1915. La zone de pergélisol a été réduite et s'est réchauffée. La couche de dégel saisonnier a gagné de la profondeur à certains endroits, et de nouvelles zones de fonte importante de pergélisol se sont développées. En Antarctique, on peut constater un réchauffement marqué de la péninsule, avec une perte spectaculaire des plates-formes de glace. L'étendue de la végétation terrestre supérieure augmente dans la péninsule. Ailleurs, le réchauffement est moins définitif. Il n'y a pas eu de changement significatif de la glace de mer antarctique depuis 1973, même si celle-ci a apparemment reculé de plus de 3° de latitude entre le milieu des années 50 et le début des années 70.

Dans l'Antarctique, les changements climatiques prévus entraîneront des effets qui surviendront lentement. Comme les incidences s'étendront sur une longue période, elles se poursuivront longtemps après que les émissions de gaz à effet de serre se soient stabilisées. Par exemple, il y aura des répercussions lentes mais constantes sur les glaciers continentaux et les régimes de circulation de l'océan mondial, qui seront irréversibles pendant de nombreux siècles à venir et qui provoqueront des changements ailleurs dans le monde, notamment une élévation du niveau de la mer. On s'attend à davantage de pertes de glacier continental dans la péninsule antarctique.

A l'IPSL, les chercheurs du LOCEAN tentent 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 ;
- l'assimilation de ces données dans des modèles numériques de prévision et d'analyse de phénomènes climatiques et météorologiques.

L'ensemble de ces données permettra d'évaluer et de mieux prévoir les changements climatiques (y compris des événements extrêmes) pouvant se produire dans l'Arctique et de fournir ainsi des éléments à la société pour en atténuer les conséquences et les impacts. Le LOCEAN est leader dans ce domaine (coordination de programmes européens tels que DAMOCLES).

### **1.7.2 Résultats attendus dans les 5 ans à venir**

Dans les années à venir et dans le cadre du RTRA, nous proposons d'une part de développer des techniques de "downscaling" innovantes et d'autre part de les appliquer à la modélisation du climat régional dans les zones du globe précédemment citées afin d'évaluer (1) la réponse régionale au climat global (qu'il soit passé, présent ou futur) et d'autre part de quantifier l'occurrence des événements extrêmes régionaux (précipitations intenses et crues, vents violents et cyclogénèse, sécheresses,...) ainsi que leur prévisibilité.

#### **Développement de techniques de "downscaling" pour la modélisation régionale du climat**

Les techniques que nous proposons d'élaborer au sein du RTRA consistent en des techniques de downscaling dynamique (couplage entre un modèle de climat global et des modèles dynamique régionaux), statistique (modélisation régionale de régimes de temps-type de grande échelle), stochastique (modélisation stochastique de la réponse régionale au climat global, i.e. la réponse régionale est modélisée comme une perturbation stochastique du forçage de grande échelle). Le développement de ces techniques se fait en collaboration avec des équipes de mathématiques appliquées (e.g. INRIA).

#### **Réponse régionale au climat global**

S'appuyant sur les développements faits sur les techniques de "downscaling" ainsi que sur de très longues séries de mesures, l'analyse multi-échelles de la circulation atmosphérique et océanique permettra d'identifier les régimes de circulation typiques des régions investiguées, et les facteurs clefs produisant des changements de ces régimes. Par exemple pour la façade Atlantique, il est prévu la réalisation de scénarios couplés CLIMAT CRYOSPHERE utilisant un large spectre de possibilités en terme de flux d'eau douce à partir de CLIMBER (modèles de climat) et GREMLINS (modèles de calotte) pour le passé (précédente déglaciation) et le futur afin de mieux contraindre les effets de seuils et de transition à la fois sur la fonte des calottes et son implication sur la circulation thermohaline. Cette approche est très limitée du point de vue de la résolution spatiale et nécessite une approche plus limitée en termes de scénarios, mais permet l'utilisation du modèle de l'IPSL éventuellement en mode zoomé pour cette fois décrire en terme d'impact sur le continent l'effet de modifications brutales de la thermohaline.

Pour la région méditerranéenne, la modification du climat du bassin sera analysée à l'aide de simulations couplant le modèle du LOCEAN pour la Méditerranée au modèle zoomé du LMD pour différents scénarios (passés et futurs). Ces résultats permettront de descendre en résolution spatiale encore davantage en utilisant des techniques de downscaling.

Une approche cette fois couplé climat/biosphère marine tentera des premières simulations des crises de type Sapropel et étudier pour le futur l'impact de changements climatiques sur la biosphère marine

### **Evénements extrêmes**

La détermination des distributions statistiques spatio-temporelles des événements extrêmes et leur évolution avec les changements du climat passé et futur constitue un axe de recherche central au sein du RTRA car au centre de la problématique de la vulnérabilité des régions au changement du climat. Les équipes au sein du RTRA proposent de dériver ces distributions statistiques aux moyens de méthodologies mathématiques innovantes reposant sur les théories des événements rares.

Un deuxième axe de recherche consiste en l'évaluation de la prévisibilité des événements extrêmes et de leurs impacts. Cela inclut le développement de modèles couplés pour l'estimation des incertitudes dans les régions concernées.

### **Evaluation des impacts régionaux**

L'ensemble des travaux précédemment cités devrait concourir à une meilleure caractérisation de l'impact régional du réchauffement globale. On peut citer par exemple pour les régions tropicales et méditerranéennes, une meilleure caractérisation des changements de ressources en eaux et de leur distribution (type événements), des rétroactions sur les conditions de surface (variations naturelles, agriculture, activité humaine) et pour le pourtour Atlantique, l'impact sur la circulation thermohaline et la fonte glacier en faisant le parallèle entre temps passé (Event Heinrich) et climat futur.

### **1.7.3 Expérience des équipes**

Les équipes de l'IPSL sont très largement impliquées dans les scénarios IPCC pour les climats du futur ainsi que dans la mise en oeuvre d'expériences d'ensemble (projet Européen ENSEMBLE) et d'étude d'impact et d'événements extrêmes (E2C2).

Les équipes ont un rôle de leader pour l'étude des interactions climat/cryosphère (RTN NICE). Elles sont aussi leader pour la modélisation des climats du passé dans ces régions à travers des projets Européens (MOTIF) et internationaux (PMIP).

#### **1.7.4 Attractivité internationale**

Les collaborations internationales sont très nombreuses de par l'implication importante des équipes de l'IPSL dans de nombreux projets européens et internationaux. Parmi les plus représentatives, on peut citer en France le CEREGE, le CNRM, l'INRIA, le LA, le LGGE, en Europe l'Université de Leeds, le CEH, l'Université de Louvain, l'Université de Bristol, le Hadley Center, aux Etats-Unis, le NCAR, l'Université de Chicago.

## ***1.8 Modélisation numérique du système Terre***

**Rédacteurs** : Pascale Braconnot (IPSL/LSCE), Didier Hauglustaine (LSCE)

### **1.8.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

Plus que jamais, il est nécessaire de comprendre les mécanismes essentiels qui gouverneront l'évolution des climats du futur et notamment le lien entre les émissions anthropiques, la dynamique des surfaces continentales, l'utilisation des sols et le changement de climat. Une difficulté majeure de ces études est que la perturbation anthropique, qui apparaît comme une dérive du système, se superpose et interfère avec la variabilité naturelle dont de nombreux aspects sont encore mal connus. Les résultats des projections climatiques réalisées pour le GIEC par 14 groupes de modélisation au niveau international (dont l'IPSL) montrent que de nombreuses incertitudes demeurent sur l'ampleur du réchauffement climatique pour un scénario socio-économique donné. De même l'estimation des modifications du cycle de l'eau et des précipitations demeure incertaine dans de nombreuses régions vulnérables. Ces incertitudes tiennent d'une part à la nature chaotique du système climatique et d'autre part à la difficulté de comprendre et représenter l'ensemble de phénomènes physiques et les interactions entre les différents éléments du système (océan, atmosphère, glace de mer, surface continentale).

La plupart des modèles de climat ne prennent pas encore en compte le couplage entre le climat et les cycles biogéochimiques. L'enjeu de la recherche climatique dans les prochaines années sera donc de déterminer les éléments clés du système en fonction des échelles de temps abordées, d'évaluer l'impact de l'homme (émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, utilisation des sols, déforestation, etc.) sur le changement climatique aux échelles globales et régionales et d'évaluer le risque de "surprises climatiques" dans le futur. Ces évolutions sont nécessaires pour donner aux décideurs une meilleure évaluation du rôle de l'action de l'homme sur le climat, en considérant les gaz à effet de serre, les différentes sources d'aérosols, et l'utilisation des sols. Elle permettront aussi de mieux appréhender des risques associés au changement climatique, en considérant le climat moyen, la variabilité climatique et les risque d'évènements extrêmes.

Seule une approche multidisciplinaire et intégrée du Système Terre peut permettre de relever ce défi. Elle doit nous permettre de répondre plus précisément aux questions suivantes dans les prochaines :

- Quels sont les rôles respectifs des différents gaz à effet de serre, des aérosols et de l'utilisation des sols dans les changements climatique ?
- Peut-on quantifier leurs effets directs sur le climat et les différentes rétroactions associées ?
- Quelle est la signature du changement climatique sur les caractéristiques du cycle diurne, de la variabilité climatique et les évènements extrêmes, aux échelles intra saisonnières à séculaires ?
- Quelles sont les conséquences à l'échelle régionales et pour la société ?

### **1.8.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

La modélisation des différents éléments du système climatique et de leurs interactions menée à l'IPSL est un élément indispensable pour répondre à ces questions, améliorer notre

connaissance de ce système complexe et pouvoir étudier le climat dans sa globalité. L'activité du pôle de modélisation s'articule sur un ensemble d'études et de développements qui nécessitent la poursuite du développement des composantes du système Terre de l'IPSL, leur validation sur la période actuelle, en mode découplé d'abord et couplé aux autres composantes ensuite. Cette démarche incrémentale sera également appliquée à l'étude de la période future et des périodes passées.

Les principaux objectifs en termes de modélisation numérique du climat pour les années à venir sont :

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

Le prochain exercice du GIEC nous amène à préparer dès à présent les versions de modèles qui permettront de réaliser les prochains scénarios climatiques à partir de 2009. Les objectifs scientifiques nécessitent le développement en parallèle de deux versions de référence du modèle couplé de l'IPSL. La première version est proche du modèle actuel, en ce qui concerne les processus dynamiques et physiques incluent dans le modèle. Les différences porteront sur l'implémentation des couplages entre le climat et les cycles biogéochimiques au fur et à mesure de la maturité des modèles de cycles. Cette évolution demande:

- d'améliorer la représentation du cycle du carbone
- de préparer les nouveaux couplages (autres cycles, aérosols)
- de définir les expériences de référence permettant d'évaluer les rétroactions

La seconde version comprendra l'ensemble des développements dynamiques et physiques nécessaires pour améliorer la représentation du cycle diurne et des interactions de petites échelles spatiales et temporelles. Ces objectifs nécessitent en amont de poursuivre des études avec les composantes individuelles. Les principaux aspects concernent

- l'amélioration de la représentation du cycle diurne dans les modèles d'atmosphère et d'océan, en développant les paramétrisations adaptées.
- L'amélioration des de la représentation des flux de chaleur et d'eau aux interfaces et des caractéristiques de couplage.
- l'augmentation de la résolution spatiales et verticales permettant de mieux représenter les interfaces et les échanges (physiques et chimiques) entre la troposphère et la stratosphère dont l'impact sur le climat est encore mal évalué.

### **1.8.3 Expérience des équipes**

Le pôle de modélisation du climat de l'IPSL rassemble environ 80 chercheurs de l'IPSL. A ces personnels s'ajoutent des personnels du LOA (Lille), LGGE (Grenoble), UCL-ASTR (Louvain-la-Neuve) qui apportent leurs compétences respectivement sur la modélisation des aérosols, le climat des hautes latitudes et la glace de mer. Les résultats des simulations sont plus largement utilisés par des scientifiques de l'IPSL ou par des collaborateurs extérieurs,

soit 200 personnes environ. Nous interagissons régulièrement avec des collègues européens et internationaux et participons à de nombreux exercices de comparaison de modèles. Le pôle de modélisation se structure autour d'un conseil scientifique. Plusieurs groupes de travail (scientifiques et techniques) animent le pôle. Du point de vue du développement et de la mise en œuvre des modèles, nous distinguons les compétences entre les développeurs de modèles (une quinzaine de personnes), les utilisateurs avertis (qui adaptent et améliorent les modèles et lancent des simulations originales, soit une cinquantaine de personnes) et les scientifiques utilisateurs, IPSL ou non, qui analysent les résultats (environ 200).

Un ensemble de simulations de référence sert de base de travail pour cette large communauté. Ce sont les simulations longues du climat actuel ou pré-industriel, les projections climatiques futures selon les recommandations du GIEC auxquelles s'ajoutent quelques périodes clés dans le passé. Ces simulations ont en commun de demander des ressources importantes en calcul et de servir de référence pour de nombreuses études scientifiques. A titre d'exemple, les simulations du GIEC représentent 80000 heures de calcul, 60To de stockage et sont exploitées par les scientifiques du monde entier au travers des 240 projets scientifiques du projet international CMIP (coupled model intercomparison project) et de 15 sous projets français regroupés dans projet national ESCRIME (étude des scénarios réalisés par l'IPSL et Météo-France). Elles offrent également un support à de nombreuses études de sensibilité ou des éléments particuliers (paramétrisations, couplage, effet d'un paramètre) sont étudiés. Ces thématiques font l'objet de projets nationaux (MISSTERR) et européens (ENSEMBLES).

Les simulations des paléoclimats et l'évaluation des résultats des modèles par rapport aux données offrent aussi une source indispensable d'information permettant de mieux identifier les éléments clés du système climatique et d'évaluer si les modèles développés pour le climat actuel incorporent le degré de complexité nécessaire pour représenter un climat différent. Ces études se font en partie dans le cadre du « paleoclimate modeling intercomparison project » (PMIP2). PMIP2 est un projet international, coordonné au LSCE, et soutenu par le WCRP et l'IGBP. Ces simulations des climats passés utilisent les versions de modèles mises au point pour les simulations GIEC. Elles seront complétées dans les années à venir par des simulations des 1000 dernières années qui offrent la base de comparaison permettant de détecter et attribuer le changement climatique aux différentes sources naturelles et anthropiques. Le thème de recherche "paléoclimats" est porté par une dizaine de chercheurs de rang A, et concerne une quarantaine de chercheurs permanents ou post-doctoraux, ainsi qu'une dizaine d'ingénieurs en support pour la modélisation.

#### **1.8.4 Attractivité internationale**

L'IPSL est l'un des plus gros groupes de modélisation en Europe. Au travers des projets internationaux et européens que nous coordonnons et dans lesquels nous sommes impliqués ou au travers des intercomparaisons de modèles pilotées par l'IPSL, cet institut exerce une attractivité importante pour nos collègues étrangers. La plupart des modèles de l'IPSL sont des modèles en accès libre et de nombreux instituts de recherche, organisations institutionnelles, mais aussi sociétés privées mettent en œuvre ces modèles pour leurs applications propres. Ces chercheurs étrangers sont amenés à séjourner très régulièrement à l'IPSL pour l'installation et l'utilisation du modèle. Des journées de formation aux utilisateurs sont régulièrement organisées. De plus différents chercheurs des laboratoires de l'IPSL sont impliqués dans les groupes de réflexions internationaux. En ce qui concerne la modélisation il s'agit principalement du WGCM (working group on coupled models, WCRP/PAGES) et de AIMS (IGBP). L'IPSL abrite aussi le bureau du projet international COPES (WCRP) et à ce

titre, les membres IPSL de ce bureau servent de relais auprès du groupe de modélisation du WCRP.

## ***1.9 Observation de la Terre et des paramètres climatiques***

Rédacteurs : Jacques Pelon (SA), Philippe Keckhut (SA), Alain Protat (CETP)

### **1.9.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

La stratégie d'observation développée à l'IPSL regroupe plusieurs composantes liées à l'évolution du climat (interaction surface-atmosphère, interactions dynamique-microphysique-rayonnement, étude des grands cycles, ...). Elle prend en compte également l'impact de ces modifications sur la société. Cette stratégie contribue à une meilleure connaissance des processus et à l'amélioration de leur représentation dans les modèles de prévision et de climat. Elle est à ce titre indissociable de l'activité de modélisation engagée et de même que la modélisation, elle vise plusieurs échelles d'observations. Elle implique également le développement de moyens d'observation innovants en amont s'appuyant sur des méthodes d'analyse de la physique fondamentale (interaction lumière-matière, spectroscopie, ...).

La mise en œuvre de moyens d'observation complémentaires est un enjeu essentiel pour une meilleure compréhension des différents constituants de notre environnement et l'analyse des impacts du changement de l'environnement global. Des analyses continues sont permises par les moyens mis en œuvre sur des sites dédiés tandis que les observations récurrentes s'appuient sur des moyens spatiaux et des campagnes combinant moyens sol, aéroportés et spatiaux permettant de cibler l'étude de processus physiques spécifiques dans un temps donné. Le couplage de ces différentes approches et des intégrations d'échelles doivent permettre de mieux répondre à l'ensemble des besoins. En effet suivant le problème auquel on s'adresse, on est conduit à effectuer une analyse locale (mesures in situ ou télédétection à courte distance, pour la pollution urbaine), ou à mettre en jeu des moyens d'investigation plus complexes (analyse à méso-échelle à partir d'observations sol, aéroportées, et spatiales) pour des phénomènes intéressant des échelles plus grandes, mais souvent on ne dispose que de moyens d'investigation partiels dont la complémentarité doit être mieux exploitée pour atteindre l'objectif.

C'est le cas des stations de mesures au sol qui permettent de disposer de points de référence à partir desquels il est possible de mettre en évidence des variations interannuelles d'un ensemble large de constituants et de paramètres. Ces dernières sont indispensables pour compléter l'information aéroportée (couverture tridimensionnelle d'un domaine de méso-échelle et mesures très précises, mais limitées dans le temps) et satellitaire (couverture globale et sur de longues séries temporelles, mais avec des résolutions temporelles et spatiales et une précision forcément limitées) et pour assurer la continuité entre les expériences aéroportées et spatiales, de conception et de performance très différentes. Ainsi, en ce qui concerne la qualité de l'air, la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE, loi numéro 96-1236), a rendu obligatoire, en 1996, la surveillance de la qualité de l'air au niveau local, puis sur tout le territoire en 2000, ainsi que l'information du public et la prise de mesures d'urgence en cas de dépassement de seuil. A l'échelle européenne, cette prise de conscience conduit progressivement au développement d'outils efficaces et adaptés à la description et à la prédiction de la pollution à différentes échelles de temps et d'espace dans le but :

- d'anticiper les forts épisodes de pollution et leurs risques,

- d'avertir la population,
- d'évaluer l'impact des stratégies de prévention.

La mise en place de tels outils demande le développement de modèles performants simulant la chimie et le transport mais également la mise en synergie de ces modèles avec toutes les sources d'information pertinentes à savoir les observations (mesures au sol, mesures aéroportées, lidar, radiosondage, satellites), le but étant de développer un système de prévision de la qualité de l'air efficace. On peut noter qu'un tel système, le système prévisionnel PREV'AIR, piloté par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, existe déjà au niveau national.

La question d'environnement est une question mondiale, qu'il s'agisse de pollution par des gaz toxiques, d'éléments radioactifs ou bien de composés a priori moins dangereux, mais donc l'impact à long terme peut se révéler très critique. Ce constat est à l'origine de l'établissement de protocoles (Montréal, Kyoto) de réduction des émissions de chloro-fluorocarbures ou de gaz à effet de serre et du processus intergouvernemental GEO, à l'issue duquel 60 pays ont signé un accord historique pour développer et coordonner les moyens d'observation de la Terre. Dans cette stratégie, les données doivent également être analysées à partir d'outils numériques intégrateurs permettant de comparer les différents jeux de données entre eux, de déduire des tendances évolutives de la composition atmosphérique à différentes échelles spatiales tels que l'assimilation, ou d'inverser les données pour déduire des cartes de sources et de puits de polluants et permettre leur prévision.

Il est donc essentiel de suivre et de comprendre l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre, des changements de la composition atmosphérique, les aérosols, les nuages, l'ozone et le rôle des écosystèmes agricoles et forestiers dans les cycles de ces polluants et GES. Un premier élément de réponse se trouve dans le cadre du projet européen GMES (Global Monitoring of Environmental Security), dans lequel l'enjeu est de bâtir des systèmes équivalents mais d'échelle européenne, en couplant les données satellitales et sol aux modèles.

## **I.9.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir**

Dans les années à venir, et dans le cadre du RTRA qui groupera les équipes autour des thématiques évoquées précédemment, nous attendons un certain nombre de résultats importants à partir des observations nouvelles mises en place ou en développement. La stratégie d'observation regroupe ainsi différents moyens concernant:

- l'étude du cycle de l'eau, qui est le thème central d'une très grande campagne (AMMA) et de trois projets spatiaux qui seront lancés entre 2005 et 2010 : MEGHA-TROPICALES, SMOS (humidité des sols et salinité des océans) et l'A-Train. Citons également les projets en cours qui vont de l'étude et l'amélioration de la prévision du brouillard autour des aéroports à partir des moyens au sol mis en œuvre au SIRTA, à l'étude du climat du bassin Méditerranéen,
- l'étude des interactions entre aérosols, nuages et rayonnement, à l'aide des observations au sol (SIRTA notamment, et réseaux européen CloudNet et américain ARM), des moyens aéroportés (RALI) et de leur implication dans les projets européens, ainsi que des observations spatiales (avec une mention spéciale pour CALIPSO (lancé en 2006), et CloudSat (lancé simultanément) impliquant de

nouveaux instruments actifs lidar et radar au sein de l'observatoire spatial qu'est l'A-Train, auxquels plusieurs équipes de l'IPSL participent,

- l'étude des cycles biogéochimiques : chimie de la pollution atmosphérique, biomasse continentale et cycle du carbone.

En ce qui concerne la qualité de l'air, les mesures réalisées en routine par les réseaux de surveillance fournissent des contraintes fortes localement au niveau du sol sur les concentrations de certaines espèces-clés. Néanmoins, ces réseaux de surface ont une densité insuffisante pour apporter les contraintes nécessaires à une bonne inversion des sources et ils ne renseignent pas non plus sur d'éventuels transports de polluants s'effectuant à plus grande échelle, en particulier via la troposphère libre. Il est donc nécessaire de renforcer le nombre d'informations disponibles, ce qui passe par une utilisation optimale des données satellitales existantes ou prévues en complément des données de surface. Aussi, la réalisation de ce projet requiert l'obtention des meilleures données troposphériques possibles, pour la chimie atmosphérique, à partir des sondeurs spatiaux, essentiellement ceux visant au nadir (IASI, GOME, OMI...).

Pour les gaz à effet de serre, le suivi sur plusieurs sites est stratégique. Les observations effectuées dans le cadre des réseaux (RAMCES et CARAUS) sont complétées par des campagnes aéroportées et des mesures spatiales. Avec plusieurs partenaires européens, le réseau RAMCES s'intègre dans la « roadmap » des grandes infrastructures de recherche européenne grâce au projet ICOS. Ce projet constituera la contribution européenne à l'observation du CO<sub>2</sub>. Par ailleurs, l'étude de la distribution du CO<sub>2</sub> à partir des moyens spatiaux n'en est toutefois qu'à son début (le satellite OCO doit rejoindre l'A-Train en 2008-2009) ; plusieurs projets spatiaux ont été sélectionnés par l'Agence Spatiale Européenne pour des études de phase A (BIOMASS, FLEX et A-SCOPE). Le développement des mesures alternatives fournissant un profil vertical (lidar, diodes laser embarquées sous ballon, sondage infrarouge passif en visée nadir ou au limbe) doit permettre d'apporter des informations complémentaires sur la verticale et d'assurer la validation des mesures satellites (IASI, OCO, GOSAT). Etre capable de transmettre ces données en temps réels en coordination avec nos partenaires européens afin d'assurer une meilleure modélisation et une caractérisation des sources et des puits.

Pour l'évolution de l'ozone atmosphérique et physico-chimie de la haute atmosphère, des campagnes comme AMMA ou des observations comme celles de CALIPSO vont permettre d'apporter des éléments nouveaux concernant les transferts de constituants entre la troposphère et la stratosphère, et leur interaction à haute altitude. Citons également dans ce cadre TARANIS qui est actuellement en phase A au CNES. Son aspect multidisciplinaire est particulièrement intéressant pour l'IPSL puisque l'objectif est d'étudier les phénomènes associés au couplage électrique entre les foyers orageux dans la haute troposphère et l'ionosphère inférieure. TARANIS dont l'objet d'étude va se situer à cette interface permettra une caractérisation plus précise de l'impact des particules solaires.

Enfin pour l'évolution de la biosphère sous l'effet du stress ou de l'augmentation de polluants, le RTRA bénéficiera du cadre de l'observatoire F-ORE-T piloté par ESE.

### **I.9.3 Expérience des équipes**

L'activité spatiale constitue un des axes majeurs de la coopération entre les laboratoires de l'IPSL. Les cinq laboratoires qui le composent ont, depuis de nombreuses années, consacré un potentiel humain et technique considérable à la réalisation d'expériences embarquées. Dans un grand nombre de cas, les observations spatiales sont indissociables des observations faites

à partir du sol, de plates-formes aéroportées ou de ballons. Celles-ci interviennent en effet à plusieurs étapes du développement des instruments spatiaux : la réalisation et la mise en œuvre de démonstrateurs, souvent aéroportés ou sur ballons permettent, notamment dans le cas de l'observation de la Terre, une étude approfondie de la physique de la mesure et l'optimisation des performances des instruments spatiaux. Au cours de la phase initiale des missions spatiales, la validation des mesures en orbite bénéficie directement des comparaisons avec les mesures fournies par ces démonstrateurs ou par d'autres instruments spécifiques mis en œuvre au cours des campagnes sur le terrain. Les expériences au sol ou aéroportées apportent des données complémentaires, qui s'inscrivent dans la durée (analyse climatologique) ou sur des périodes plus ciblées dans le temps (campagnes sur le terrain pour l'étude de processus ou la validation de mesures) et s'avèrent souvent indispensables pendant la phase d'exploitation scientifique. Ce sont très souvent des techniques communes qui sont mises en œuvre, et dans de nombreux cas, ce sont les mêmes équipes qui interviennent dans la recherche et des développements en amont et sont chargées des développements instrumentaux pour les différentes catégories d'expériences, spatiales, à partir de plates-formes aéroportées ou de ballons ou à partir du sol.

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

Sans vouloir établir une liste exhaustive, nous pouvons citer :

- les capteurs pour les mesures in situ au sol, sur avion et sous ballon (mesure de CO<sub>2</sub> ; capteurs de température pour l'analyse de la turbulence à petite échelle, hygromètre à point de rosée, ...). Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) a développé un réseau de mesure de 12 stations dans le monde de gaz à effet de serre (Réseau RAMCES) et mesures des profils verticaux à partir de tours et de vols avions,

- les systèmes optiques développés au LMD et au SA (lidars rétrodiffusion LEANDRE1 – similaire à celui lancé sur la mission spatiale CALIPSO en 2006-, à absorption différentielle LEANDRE2 utilisé dans AMMA pour la mesure aéroportée de vapeur d'eau ou ALTO pour la mesure d'ozone, à détection hétérodyne WIND pour la mesure du champ de vent, radiomètres imageurs visible et IR (ARIES, DIRAC dans l'IR), spectromètres –SAOZ par exemple pour la mesure des espèces trace-, ...) pour les mesures au sol, sous ballon et aéroportées,

- les systèmes hyperfréquence (radars, radiomètres) pour les mesures au sol et aéroportées des propriétés des nuages et des systèmes précipitants développés au CETP (RASTA : radar nuage 95 GHz proche de celui mis en œuvre sur la mission spatiale CloudSat lancée en 2006 ; ELDORA/ASTRAIA : radar Doppler aéroporté en bande X à balayage volumique développé en collaboration avec le NCAR pour l'étude des systèmes précipitants, RONSARD : radar Doppler polarimétrique à balayage volumique 5 GHz au sol, qui a participé à de nombreuses campagnes depuis 1974 et se trouve actuellement en Afrique de l'Ouest pour étudier les systèmes précipitants pendant AMMA) ou le contenu en vapeur d'eau et en eau liquide (radiomètres DRAKKAR et RESCOM). Citons également les radars pour l'étude des surfaces continentales ou océaniques (radars RENE, RESSAC, STORM), ainsi que la nouvelle

génération de radars pour l'hydrologie ou la dynamique de la couche limite (HYDRIX et CURIE : radars Doppler 10 GHz au sol).

- les capteurs pour la mesure des champs électriques, magnétiques et des courants, la spectrométrie de masse dans les plasmas et milieux peu denses. et les analyseurs de particules énergiques développés au CETP,

- les capteurs pour la mesure in situ dans l'océan (sur mouillages, bouées dérivantes, navires) comme les bouées CARIOCA pour la mesure des flux de CO<sub>2</sub>, ou le réseau SURFACT pour la salinité en préparation de la mission spatiale SMOS. Le LOCEAN est également en charge d'un service d'observation OISO/CARAUS de mesure du dioxyde de carbone dans l'océan Indien et Australe à partir des transits des navires des TAFF dans ces régions (Marion Dufresne et Astrolabe),

- les mesures en laboratoire (chimie, spectroscopie,...), préalable aux observations sur le terrain, pour lesquelles le LISA dispose d'une très grande expérience,

- l'analyse des mesures spatiales, sous ballon ou sur avion effectuées en visée au nadir, ou au limbe pour la restitution des paramètres physiques et des concentrations des espèces minoritaires, et pour l'amélioration et l'évaluation des mesures des sondeurs spatiaux dans l'infrarouge (SCIAMACHY, AURA, IASI, ...) ou le visible (GOME, GOMOS, AURA ...) développée au SA, LMD et au GSMA et LPMAA (partenaires de l'IPSL) notamment.

De leur côté, les laboratoires d'Ecologie Systématique Evolution (ESE-CNRS/Univ. Paris Sud) et Environnement et Grandes Cultures (EGC-INRA Grignon) ont mis en place depuis plusieurs années des mesures quasi-continues de bilan de carbone et de flux de divers GES (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>) et polluants (O<sub>3</sub>, NO/NO<sub>2</sub>) entre des écosystèmes forestiers et agricoles et l'atmosphère en périphérie de région parisienne.

Le thème de l'observation de la Terre et des paramètres climatiques est porté par une vingtaine de chercheurs de rang A, une quarantaine de chercheurs sont directement impliqués. Ces chercheurs se répartissent sur 8 unités du RTRA : les unités de l'IPSL, le LISA, ESE, SISYPHE.

#### **I.9.4 Attractivité internationale**

Le développement de systèmes d'observation performants et opérationnels nécessite une forte synergie entre les équipes au niveau international. L'Europe a mis en place plusieurs projets dans lesquels les membres du RTRA sont ou vont être activement impliqués en partenariat avec les laboratoires et industriels européens. Ainsi GMES (Global Monitoring for Environmental Security) dont un volet important traite de la surveillance atmosphérique, s'insère-t-il dans une stratégie plus large dans le cadre du programme fédératif GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) regroupant plus de 50 pays. Citons quelques uns des projets Européens acceptés (2007-2011) : GEOMON (observations au sol), POLARCAT pour l'étude du milieu arctique. EUCAARI sur les interactions aérosols-nuages-chimie, ... Notons que dans le cadre de ces projets, des campagnes internationales (AMMA, YAK, POLARCAT) vont se dérouler qui vont constituer des pôles spécifiques de collaboration.

Les projets spatiaux constituent bien sûr une forte attractivité au niveau international aussi bien dans le cadre de leur réalisation, que pour la validation des observations ou l'analyse des

résultats. Citons ici ceux déjà engagés au niveau européen (agence spatiale européenne et Eumetsat en phase finale de préparation comme AEOLUS, SMOS ou devant être lancé comme IASI), ou en collaboration franco-américaine (CALIPSO, OCO), franco-Indienne (MEGHA-TROPIQUES) ; ou la validation des observations de la plate-forme AURA.

Citons enfin les réseaux de mesure comme CARAUS, RAMCES ou NDACC qui permettent de mettre en place des bases de données représentant un potentiel unique au niveau international.

Il est également intéressant de signaler que certains développements instrumentaux novateurs réalisés par les différents laboratoires de l'IPSL conduisent maintenant à des développements de petites entreprises (NOVIMET au CETP, Leosphere au SA/LMD, etc ...) ainsi qu'à des partenariats avec le monde de l'industrie, partenariats qui constituent désormais une nouvelle forme d'attractivité de nos travaux (développements lidar avec entreprises CIMEL, Leosphere, développements radar avec Meteo-France, Thalès, travaux d'expertise).

## ***I.10 Mobilisation des connaissances sur les interfaces climat-société***

Rédacteur : Martin O'Connor (C3ED)

### **I.10.1 Enjeux scientifiques et sociétaux**

A travers ce thème transverse du RTRA « Climat Environnement Société » (CES), nous envisageons, sur une base multimédia et interdisciplinaire, de franchir un seuil important dans la ***mobilisation de connaissances*** et dans le développement d'une gamme d'outils d'aide à la délibération pour, sur et autour des politiques climat-environnement-société. Les actions de ce thème seront conduites en collaboration avec les équipes des autres thèmes. Notre objectif est certes de *contribuer à la connaissance scientifique CES* (notamment la caractérisation en termes épistémologiques et sociologiques de cette « interface » science-société elle-même), mais aussi et surtout de contribuer à la *mobilisation de la connaissance au sein de nos sociétés*. Ceci implique de travailler à la construction voire à la *reconstruction des interfaces* entre scientifiques, acteurs du monde économique, décideurs et administration publique, et la société civile. Il s'agit de l'action-recherche et aussi d'une expérience d'apprentissage collectif en temps réel.

Dans le cadre global du RTRA CES, toutes les équipes préconisent des actions « classiques » de restitution et de valorisation de la recherche, notamment sous forme d'articles académiques destinés à être publiés dans des revues ou autres, d'interventions lors de colloque, etc. De telles actions de valorisation sont envisagées de manière permanente tout au long du programme du RTRA, ainsi que des actions de compte rendu et de vulgarisation (rapports d'étape tous les 12 mois ; brochures intermédiaires, informations diverses en newsletters de laboratoire, etc., etc.).

Dans ce thème transverse nous proposons, au-delà de cette restitution « classique », une démarche originale moyennant les techniques de pointe multimédia interactives, de construction d'une *vision composite du nexus Climat-Environnement-Société (c'est-à-dire, du « risque climat » et des enjeux de réponse sociétale) comme objet interdisciplinaire*. La documentation, restitution et mobilisation de connaissances CES seront effectuées dans trois mouvements interdépendants :

- Le Volet 1 va fournir un système de méta-information pour la documentation de concepts, de catégories de données et d'indicateurs produits et mobilisés au sein du programme RTRA « CES » et va démontrer l'application d'outils de l'évaluation de la qualité de connaissances scientifiques sur le « risque climat ».
- Le Volet 2 va assurer l'intégration au sein du SEEA 2010 des Nations-Unies d'une grille de classement et d'organisation d'informations, susceptible de répondre aux besoins d'utilisateurs dans le domaine politique CES.
- Le Volet 3 est la réalisation d'une plate-forme multimédia modulaire d'accès aux informations, d'opportunités d'apprentissage, d'analyses et d'aide à la délibération (ici dénommée « KER-CLIMA DST »), avec manuels d'utilisateur orientés aux mondes de la recherche, de l'éducation supérieure et de la formation professionnelle, de l'entreprise, de l'administration territoriale et de la société civile.

Le système multimédia envisagé — ici dénommé **KER-CLIMES** ou « **CES DST** » — va, au-delà de ses rôles de documentation (méta-information, catalogue d'indicateurs, bibliothèque virtuelle, etc.), offrir plusieurs types d'interactions et de « fonctionnalités » grâce auxquelles l'utilisateur peut explorer et contribuer lui-même aux analyses et au partage de connaissances sur la question multi-échelle du « risque climat ». En effet, le système multimédia exploitera les potentialités de « hiérarchie confondue » offertes par les technologies digitales pour l'interaction d'une communauté d'utilisateurs qui, participants à un monde virtuel, sont engagés simultanément dans un processus d'apprentissage collectif réel.

Le rôle du « multimédia » n'est pas limité à des formats de restitution PowerPoint, vidéo, website et CD (tout cela étant désormais incontournable) mais se situe surtout dans les phases constitutives du programme de travail. Cette composante du programme scientifique du RTRA présente ainsi un double caractère innovateur, d'une part par son exploitation méthodique des TICs interactifs pour la construction et la médiation de connaissances le long du programme de travail et, d'autre part par la réflexion en sciences sociales engagée le long de cette exploitation technologique.<sup>2</sup>

Si nos objectifs de documentation-restitution-mobilisation pour ce thème sont réalisés, la qualité et la pertinence des résultats du programme RTRA seront démontrées directement dans des innovations dans des pratiques des acteurs industriels, territoriaux, de la société civile (aux échelles locale, régionale, nationale, internationale) ainsi que dans nos propres établissements dans les pratiques de recherche, de communication et d'enseignement.<sup>3</sup> Ceci dit, nous précisons aussi *un caractère de recherche et de recherche-action* qui reste fondamental *au sein de notre démarche même de restitution*, qui consiste en (i) la caractérisation en termes épistémologiques et sociologiques de l'interface science-société et (ii) l'évaluation de l'efficacité (et des limites) de média digitaux interactifs comme véhicule d'apprentissage et de partage des connaissances CES sur l'interface science-société.

Bref, la démarche d'envisager globalement les résultats du programme RTRA « CES » comme autant de ressources pédagogiques en ligne et, plus généralement, les opportunités d'**apprentissage collectif** moyennant les outils multimédias, est innovant en soi. C'est pourquoi, l'évaluation de la réussite (et des limites) de cet engagement sera l'objet d'une attention toute particulière (par mouvement réflexif au sein de ce thème) sur les conditions, le

---

<sup>2</sup> Nous affirmons, sur le plan épistémologique, se rapprocher à une certaine pensée de la complexité associée aux auteurs aussi divers que Jorge Luis BORGES (*Labyrinths*, Penguin 1970), Michel SERRES (*Hermès I : La Communication*, 1969 ; *Hermès II, La Traduction*, 1974, Seuil, Paris) ; Isabelle STENGERS (*D'Une Science à l'Autre : Des concepts nomades*, Seuil, Paris, 1987), Cornélius CASTORIADIS (*L'Institution Imaginaire de la Société*, Seuil, 1975). Toutefois, la traduction de telles propositions d'épistémologie (sociale) de la complexité en médium digital s'avère à la fois trop évidente (l'internet en tant que labyrinthe sinon tour écrasée post-moderne de Babel...) et pas du tout gagnée d'avance...

<sup>3</sup> Un sous-effet important du travail du **THEME §10** sera la création de facto d'un corps important de ressources pédagogiques (sous format papier et en ligne) qui pourraient trouver de diverses utilisations dans le cadre de cours présentiels, en ligne pour des étudiants d'université ou de grandes écoles, pour des établissements publics de la formation professionnelle agricole, mais également lors de formation de formateurs (par exemple, dans les collectivités locales), d'enseignants (formation continue) ou autre. Toutefois, nous attribuons à d'autres programmes que le RTRA les travaux spécifiques de l'adaptation et de la présentation de ces « ressources pédagogiques » aux contextes particuliers de l'enseignement. (On peut se référer aux véhicules ayant pour vocation l'enseignement universitaire et la formation continue, par exemple le Master SETE à l'UVSQ, le programme inter-universitaire IMEE (UVSQ & Massey University en Nouvelle-Zélande), le système de déploiement de ressources pédagogiques en ligne « Brocéliande » de l'Equipe IACA du C3ED, l'UNT UVED (Université Virtuelle en Environnement et Développement durable) établi en France depuis 2005, etc.).

processus et les résultats de l'interaction chercheurs praticiens autour d'un objet commun (en partie et en permanence évolutif).

## I.10.2 Résultats attendus dans les 5 années à venir

Volet	THEME §10 — MOBILISATION DE CONNAISSANCES SUR L'INTERFACE SCIENCE-SOCIETE
<b>§10.1 — QUALITE</b>	<p><b>L'objectif du Volet 1 QUALITE est de fournir un système de méta-information pour la documentation de concepts, de catégories de données et d'indicateurs produits et mobilisés au sein du programme RTRA « CES » et de démontrer l'application d'outils KQA de l'évaluation de la qualité de connaissances scientifiques (Knowledge Quality Assessment) sur le « risque climat ». Nous envisageons les tâches suivantes :</b></p> <p>(i) Exploitation de la Foire aux Indicateurs [Kerbabel™ Indicator Kiosk] comme système de méta-information contextuel pour la documentation des catégories d'information et des indicateurs mobilisés dans les analyses CES ;            (ii) Construction des profils NUSAP des certitudes et incertitudes scientifiques pour une sélection des catégories d'information ;            (iii) Développement d'une grille d'interprétation de la signification sociétale des incertitudes, permettant l'évaluation dans un cadre multi-acteur de l'adéquation des connaissances [fitness for purpose] par rapport aux enjeux de décision (de jugement, de délibération) au sein de notre société ;            (iv) Intégration des composantes (i), (ii), (iii) ci-dessus dans des zones convenables du système multimédia « KER-CLIMA » ;            (v) Documentation papier (articles scientifiques, rapports, brochures, etc.) de tout cela.</p>
<b>§10.2 — SEEA-CES</b>	<p><b>L'objectif du Volet 2 SEEA-CES est d'assurer l'intégration au sein du SEEA 2010 des Nations-Unies d'une grille de classement et d'organisation d'informations susceptible de répondre aux besoins d'utilisateurs dans le domaine politique CES. Nous envisageons les tâches suivantes :</b></p> <p>(i) Travail collaboratif avec des partenaires internationaux pour définir les normes et fournir des exemples (cas d'école) pour l'intégration des informations C-E-S aux systèmes intégrés de comptes économiques et environnementaux nationaux dans le cadre de la mise en place de la norme « SEEA-2010 » de la Statistics Division des Nations Unies ;            (ii) Exploitation des résultats scientifiques du programme RTRA « CES » pour fournir des exemples de la production et l'utilisation des comptes économie-environnement dans le domaine CES ;            (iii) Rédaction des articles scientifiques sur les enjeux méthodologiques et empiriques de la production de comptes SEEA-CES et des enjeux de l'exploitation des comptes dans des divers domaines de politique climatique ;            (iv) Intégration des schémas de classement et d'organisation des données ainsi que des exemples, au sein du portail SEEA de la Statistics Division des Nations-Unies et, articulation de ces composantes du portail SEEA à la zone « Données &amp; Modèles » du système multimédia « Ker-CLIMA » ;            (v) Documentation papier (rapports, brochures, etc.) et électronique de tout cela.</p>
<b>§10.3 — KER-CLIMA</b>	<p><b>L'objectif du Volet 3 KER-CLIMA est la création d'une plate-forme multimédia modulaire d'accès aux informations, d'opportunités d'apprentissage, d'analyses et d'aide à la délibération (ici dénommée « KER-CLIMA DST »), avec manuels d'utilisateur orientés aux mondes de la recherche, de l'éducation supérieure et de la formation professionnelle, de l'entreprise, de l'administration territoriale et de la société civile. Nous envisageons les tâches suivantes :</b></p> <p>(i) Exposition initiale du design 'dodécaédrique' pour ker-CLIMA en douze zones articulées en hiérarchie enchevêtrée (voir présentation succincte des 12 zones envisagée, en annexe) ainsi que des choix technologiques de réalisation ;            (ii) Développement du prototype-Alpha qui permettra une navigation entre zones ainsi qu'un aperçu des 'fonctionnalités' principales ;            (iii) Développement du prototype-Beta qui offrira toutes les 'fonctionnalités' principales ainsi qu'un accès aux membres de la communauté RTRA pour l'exploitation d'outils et pour leurs contributions à la documentation scientifique ;            (iv) Documentation papier (articles scientifiques, rapports, brochures, etc.) et électronique de tout cela.</p>

### I.10.3 Expérience des équipes du réseau

La recherche a être effectuée dans le **THEME §10** du RTRA « Climat-Environnement-Société » sera coordonnée par un noyau d'enseignants-chercheurs titulaires de l'Equipe IACA du C3ED à l'UVSQ (O'Connor, Vanderlinden, Job, Douguet, Nicolaï, Dalmas, Allal) qui, chacun d'après leur façon, porte une expérience et une expertise d'analyse interdisciplinaire dans des domaines de l'économie écologique, risque, prospective, indicateurs du développement durable, méthodes participatives et évaluation environnementale. Les compétences en analyse intégrée environnementale des membres de l'Equipe IACA du C3ED seront complétées par les capacités de modélisation et d'analyse quantitative des associés de l'Equipe à l'étranger (du NZCEE : Patterson, Jollands, McDonald ; en Europe : Ekins, Munda, Spangenberg). Toutefois, si le C3ED est réputé spécialiste (en France, en Europe et internationalement) dans le domaine interdisciplinaire du développement durable, il convient de mettre en évidence quelques facettes particulière des compétences de l'Equipe IACA et de ses partenaires du programme RTRA.

**Evaluation de la Qualité de Connaissances (Volet 1).** Les questions de la qualité de connaissances engagent aussi bien les domaines de la philosophie de science et l'épistémologie que de la statistique, les sciences politiques et la sociologie. Dans ce contexte, il est peut-être utile de préciser que les compétences en sciences sociales sont bien présentes au sein de l'Equipe IACA du C3ED. Tout d'abord, **Martin O'Connor**, professeur en sciences économiques à l'UVSQ et responsable pour l'Equipe IACA (Incertitudes Analyses Concertations Aménagements) du C3ED), est formé aussi bien en sciences sociales (sociologie et philosophie) qu'en sciences de la nature (physique). De même, **Jean-Paul Vanderlinden**, professeur en sciences économiques à l'UVSQ et membre depuis peu de l'Equipe IACA, se spécialise depuis longue date aux démarches et questions interdisciplinaires. (Citons, à titre d'exemple, sa responsabilité au Canada pour un programme intitulé « Contribution à la compréhension de l'organisation de la recherche interdisciplinaire sur les risques climatiques », contrat d'environ 60 K\$CDN, financé par le Conseil de recherche en sciences humaines du Canada). Les capacités de l'Equipe IACA seront renforcées par la participation des spécialistes européens, notamment **Dr. Jeroen van der Sluijs** (Copernicus Institute à Utrecht University, et professeur-invité à l'UVSQ : incertitude scientifique et qualité de connaissances), **Dr. Silvio Funtowicz** (JRC, Ispra : évaluation de risques, philosophie de science), **Dr. Jerry Ravetz** (RMC, Royaume Uni : science et société) et **Bruna de Marchi** (ISIG, Italie : sociologie de risques).

**Système de Comptes Intégrés Economie-Environnement (Volet 2).** Le réalisme de l'objectif de l'intégration des principes d'organisation pour des systèmes d'information au SEEA-2010, est assuré par la participation de Martin O'Connor au sein du **UNCEEA (United Nations Committee of Experts on Environmental-Economic Accounting)** constitué en 2005 pour le pilotage de l'actualisation du SEEA 2003 en vue de l'établir comme norme statistique internationale en 2010. En effet, Prof. O'Connor a travaillé pendant plus de dix ans, dans des projets et réseaux européens et internationaux, sur des questions méthodologiques d'évaluation environnementale et de qualité de connaissances pour les systèmes de comptes nationaux économie-environnement.

— A noter aussi que l'Equipe IACA du C3ED est bien placée pour développer des analyses

SEEA « cas d'école » avec des partenaires industriels et administratifs en France (partenariat FONDaTERRA), en Europe (intérêt des bureaux nationaux de statistiques de plusieurs pays, de l'Agence européenne pour l'environnement) et sur le plan international encore dans le cadre des études de cas comparatives (partenaires institutionnels au Maghreb, au Canada, en Australie et la Nouvelle-Zélande...).

**Design et développement multimédia (Volet 3).** Tout le monde expérimente les « NTIC » dans la recherche comme dans la vie quotidienne. Pour l'Equipe IACA du C3ED, il s'agit aussi d'un choix méthodologique. Signalons à titre d'exemple, sans en exclure d'autres, la gamme d'outils Kerbabel™ d'aide à la délibération multimédia développée depuis 1999 par les membres de l'équipe Kerbabel Productions/IACA du C3ED R063 (IRD-UVSQ) et leurs nombreux partenaires dans le cadre des projets GOUVERNe, PEGASE, VIRTUALIS, ALARM financés par la Commission européenne.

#### **I.10.4 Attractivité internationale**

Le programme de travail proposé pour le **Thème §10** repose sur un ensemble de partenariats existants en France, à travers l'espace européen et à l'échelle mondiale. La mise en place du programme RTRA va donner un nouvel élan aux opportunités de ces acteurs à l'étranger d'ores et déjà motivés de travailler en partenariat ou en réseau.<sup>4</sup>

De même, le programme RTRA « CES » va côtoyer des projets européens d'analyse intégrée où participe actuellement l'Equipe IACA du C3ED (ALARM sur la biodiversité, ECOST / SPICOSA / PASARELAS sur la médiation des connaissances dans les domaines de la biodiversité, des politiques territoriales et la gestion intégrée des zones côtières). La mise en place du programme RTRA va établir un riche terrain d'échanges méthodologiques et empiriques. Cette attractivité internationale s'exprime également dans la perspective de collaborations sur l'interface entre recherche et formation. Plus particulièrement, dans la perspective des ressources pédagogiques mises en ligne et des formations universitaires en économie écologique et politiques du développement durable, nous travaillons d'ores et déjà en partenariat avec un réseau de partenaires autour du NZCEE à Massey University (Nouvelle-Zélande), une ouverture importante sur le monde anglo-saxon.

---

<sup>4</sup> Outre la collaboration scientifique avec des partenaires RTRA et FONDaTERRA en Ile de France, les axes principaux de collaboration permanente de l'Equipe IACA du C3ED sont [1] en Europe, notamment pour les démarches d'analyse intégrée, l'Université d'Utrecht (Pays-Bas) et le Joint Research Center IPSC (Ispira, Italie) ; et [2] sur le plan international, dans le cadre d'un programme comparative, des partenaires universitaires du Magreb (Tunisie, Maroc), du Canada et de la Nouvelle Zélande.

## **Annexe II : Description des unités fondatrices et fédérations de recherche du RTRA**

### ***II.1 L'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)***

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

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

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

L'IPSL regroupe actuellement près de 800 personnes, dont 270 chercheurs et enseignants-chercheurs, 260 ingénieurs, techniciens et agents administratifs, et environ 260 doctorants, post-doctorants et stagiaires. L'institut et ses laboratoires sont aujourd'hui implantés sur plusieurs sites en région parisienne, à Paris (Jussieu et ENS) et en banlieue sud (Verrières, Vélizy, Saint-Maur, Plateau de Saclay / Gif-sur-Yvette et Guyancourt). L'implantation à

Guyancourt des équipes de Verrières, Vélizy et Saint-Maur, programmée sur le site de la ferme de Troux dans le périmètre du campus universitaire de l'UVSQ, devrait être effective au cours de l'année 2008.

L'activité de l'Institut est fondée, d'une part sur les orientations scientifiques propres des laboratoires qui le composent, d'autre part sur la mise en œuvre au niveau fédératif de services scientifiques communs, qui permettent une rationalisation des moyens et une meilleure efficacité dans la conduite des activités de recherche. La stratégie de développement de l'IPSL s'appuie directement sur ces différentes structures fédératives, décrites au chapitre 6.

- **Le Pôle de Modélisation du Climat**
- **Le Pôle Système Solaire**
- **Le Pôle PROMETEE** (PROcessus de Moyenne Echelle: Transfert d'Energie et d'Eau)
- **Le Pôle Spatial et Instrumental**
- **Les missions d'observation**
- **Le Centre de Données**

Les **Groupes de Travail** constituent un des moyens privilégiés d'animation et de réflexion au sein de l'IPSL. Ouverts sur l'extérieur, ces groupes se réunissent régulièrement sous forme de séminaires et de journées scientifiques qui conduisent in fine à la définition de projets communs portés ensuite soit par la structure fédérative, soit par les laboratoires eux-mêmes.

## ***II.2 Les laboratoires de l'IPSL***

### **II.2.1 Le Centre d'études des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP)**

Le laboratoire est sous la double tutelle de l'Université de Versailles – St Quentin (UVSQ) et du CNRS. Il est localisé actuellement au Centre Universitaire de Vélizy et à l'Observatoire de St Maur des Fossés. Il s'implantera en 2008 sur le nouveau site de Guyancourt à proximité du campus de l'UVSQ.

Le CETP s'intéresse principalement à trois grandes thématiques :

- La première est centrée sur le cycle de l'eau, sur l'interaction et les échanges entre l'atmosphère et les surfaces continentales et océaniques, sur la formation, la structure, et l'évolution des systèmes précipitants, et des nuages en couche mince.
- La seconde thématique porte sur l'étude de l'interaction du vent solaire (expansion de l'atmosphère ionisée du soleil) et les objets du système solaire: les planètes, dont la Terre, et les comètes. Elle inclut des travaux en physique des plasmas et en planétologie.
- En complément aux recherches thématiques, le CETP développe des recherches en modélisation électromagnétique et en analyse et traitement de signal, avec notamment des travaux sur le traitement des images produites par télédétection.

Pour ces recherches, le CETP développe des approches expérimentales originales, principalement basées sur des techniques radioélectriques : mesures de champs électrique et magnétique dans les plasmas, observations par télédétection active (radars) et passive

(radiomètres micro-ondes) de l'atmosphère, des surfaces et du sous-sol.

L'ensemble de ces travaux fournit des résultats importants pour l'étude du climat et des processus météorologiques, ainsi que pour la compréhension des interactions entre le soleil et la Terre.

Numériquement, et avec une bonne approximation, le CETP est constitué de 150 personnes, 100 permanents, dont 50 chercheurs et (un peu moins de) 50 personnels techniques et administratifs. Les 50 personnels non permanents incluent 22 Doctorants, des CDD, des post-docs et des visiteurs.

## **II.2.2 Le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)**

Le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) est une Unité Mixte de Recherche dont les tutelles sont le CNRS, l'Université Pierre et Marie Curie, l'Ecole Normale Supérieure et l'Ecole Polytechnique. Il est implanté sur trois sites : celui de l'Ecole Polytechnique sur le Plateau de Saclay, de l'Ecole Normale Supérieure et de l'Université Paris VI.

Le LMD a pour objet de recherche les mécanismes, l'évolution et la prévision des phénomènes météorologiques et du climat, en combinant études théoriques, modélisation numérique, instrumentation et analyse d'observations spatiales :

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

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

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

- Instrumentation spécifique : Conception, développement et construction d'instruments embarqués sur satellite (ScaRaB, IIR/CALIPSO, SAPHIR) ou aéroportés (lidar Doppler WIND) , ou au sol (lidar de mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique). Développement d'instruments embarqués sous ballons (mesure de la vapeur d'eau, des aérosols, de la turbulence, ...) et participation à des campagnes expérimentales (validation ENVISAT, projets VORCORE en Antarctique, Hibiscus en Amérique du Sud, VASCO sur l'Océan Indien, ....) Le LMD est actuellement partenaire de plusieurs grands projets spatiaux d'observation de la Terre

(CALIPSO, MEGHA-TROPIQUES/ SAPHIR, AIRS/IASI,, EARTHCARE) ainsi que de Mars. Mise en œuvre du Site d'Observation de l'IPSL (SIRTA) sur le site de Palaiseau.

Le LMD inclut 137 personnes dont 88 permanents (46 chercheurs, 42 ITA) et une trentaine de doctorants.

### **II.2.3 Le Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN)**

Le Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN) est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7159), créée au 1<sup>er</sup> janvier 2005, dépendant du CNRS, de l'IRD, de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, et du Museum National d'Histoire Naturelle.

Au 1er janvier 2006, le LOCEAN regroupe 133 personnes : 18 chercheurs CNRS, 17 chercheurs IRD, 16 enseignants-chercheurs et personnel CNAP, et 37 ingénieurs, techniciens et administratifs (22 CNRS, 4 IRD, 7 UPMC et 4 MNHN), 31 doctorants, 12 post-doctorants et ingénieurs sur contrat, auxquels il faut rajouter plus de 30 stagiaires par an (master2, élèves-ingénieurs, divers niveaux universitaires, ...).

Le LOCEAN s'intéresse au système couplé océan - atmosphère - cryosphère - biosphère et hydrosphère continentales, pour une meilleure compréhension de l'évolution de l'environnement et du climat, par l'étude de :

- la variabilité du système climatique terrestre et ses impacts
- l'évolution naturelle et forcée du système climatique et ses conséquences aux échelles globales et régionales ;
- la compréhension et le couplage des processus physiques et biogéochimiques océaniques
- l'évolution de l'environnement océanique (hydrologie et chimie) et de ses ressources biologiques (biodiversité, ressources halieutiques) aux échelles régionales en relation avec la variabilité du système naturelle ou forcé

Les travaux de recherche sont fondés sur les observations in situ (campagnes en mer), satellitales, la modélisation numérique et l'analyse statistique.

Le laboratoire est responsable du modèle de circulation océanique OPA. Ce modèle, utilisé par l'IPSL pour les simulations climatiques, est également le code utilisé pour les prévisions opérationnelles MERCATOR, et est maintenant partagé, au sein du consortium NEMO, avec plusieurs instituts et organismes français et européens pour la recherche en océanographie et climat. Ce modèle est reconnu comme « outil national » labellisé par l'INSU.

L'observation in situ se traduit par la participation à de nombreuses campagnes en mer en physique et biogéochimie marine, et l'organisation de grands programmes de mesures, tels que la campagne DRAKE (janvier 2006 dans le passage de Drake), ou le programme européen DAMOCLES sur l'océan arctique (PI 6<sup>ème</sup> PCRD). Le laboratoire est responsable du service d'observation OISO/CARAUS sur l'évolution du carbone océanique dans l'océan austral. Un parc d'instruments de mesures (courantomètres, capteurs de température et salinité) est géré par l'équipe technique marines pour les besoins des équipes scientifiques du laboratoire et de la communauté, en partenariat avec les autres laboratoires et la Division technique de l'INSU.

L'observation satellitale est focalisée principalement sur la mesure altimétrique (plusieurs Pis JASON, incluant des travaux sur l'assimilation de données), et la couleur de la mer. Le laboratoire est coordinateur scientifique du volet salinité de la mission SMOS.

Les travaux de recherche sur le climat et ses impacts combinent les informations de climatologies (in situ et satellite), de simulations numériques réalistes, et élaboration de modèles et calculs mathématiques ou statistiques dédiés. Le laboratoire participe au programme international AMMA (PI 6<sup>ème</sup> PCRD piloté par l'IPSL) sur la mousson africaine, tant sur le plan expérimental que pour les études de variabilité et impacts sur la santé et les ressources.

Sur l'ensemble des domaines thématiques du LOCEAN, environ 120 articles ont été publiés en 2005 dans des revues à comité de lecture.

## **II.2.4 Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)**

Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) est une unité mixte de recherche (UMR 1572) sous la tutelle du CEA, du CNRS et de l'UVSQ. Il est implanté sur le Plateau de Saclay, à Gif sur Yvette et à l'Orme des Merisiers.

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

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

Le LSCE a une activité internationale importante à travers de nombreux contrats européens et des collaborations avec la Max Planck Gesellschaft (Hambourg, Mainz, Jena), le PIK (Potsdam), des universités (Reading, Bristol), le Hadley Centre et le CEPMMT. Il coordonne ou participe activement à des grands projets internationaux : forages polaires (Vostok, GRIP, North GRIP, EPICA), campagnes océaniques de carottage (IMAGES), intercomparaison de modèles (PMIP, OCMIP), réseau de surveillance des composés à effet de serre RAMCES,

maîtrise d'ouvrage de l'algorithmique du segment sol de l'instrument spatial POLDER. Il est également un partenaire d'EDF pour le suivi radio écologique des sites de production. Il est laboratoire d'appui de l'UMS 2572 (LMC14).

Le LSCE regroupe environ 240 personnes dont 155 permanents (une centaine de chercheurs, une cinquantaine d'ingénieurs ou administratifs, une trentaine de doctorants, les personnels restants étant sous contrat.

## **II.2.5 Le Service d'Aéronomie (SA)**

Le Service d'Aéronomie est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7620) dont les tutelles sont le CNRS, l'Université Pierre et Marie Curie, l'Université Versailles-Saint-Quentin. Le SA est implanté sur deux sites : celui de Verrières le Buisson qui déménagera sur le campus de l'UVSQ à Guyancourt en 2009 et celui du campus de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris.

Il comprend environ 145 personnes : 50 chercheurs de statuts divers (CNRS, universitaires, membres des corps des astronomes et physiciens), 55 ingénieurs, techniciens et administratifs, et 40 non permanents (doctorants, chercheurs post-doctorants et ingénieurs sur contrats temporaires, stagiaires et vacataires). La répartition des effectifs est approximativement 2/3 à Verrières et 1/3 à Jussieu.

Le Service d'Aéronomie a été créé en 1958 pour étudier la haute atmosphère terrestre et la physique du soleil à l'aide d'expériences embarquées par fusées-sondes. Il s'est ensuite développé pour devenir un grand laboratoire spatial et instrumental spécialiste de la physico-chimie et la dynamique des atmosphères terrestres et planétaires. Les principaux thèmes de recherche sont :

- Vents astrophysiques et planètes extrasolaires
- Atmosphères planétaires et environnements cométaires
- Chimie de l'atmosphère
- Dynamique et climat de l'atmosphère moyenne
- Ondes et turbulences
- Météorologie appliquée et environnement
- Physico-chimie de la troposphère
- Service d'observation : NDACC (surveillance de l'ozone)

Sur le plan instrumental, le Service d'Aéronomie a été un des pionniers dans les domaines de la télédétection optique active et passive. Il a développé une compétence en lidar atmosphérique mondialement reconnue appliqué et il est devenu un des foyers mondiaux de la recherche spatiale avec l'appui constant du Centre National d'Etudes Spatiales.

## **II.3 Les unités fondatrices hors IPSL**

### **II.3.1 Laboratoire d'Ecologie, Systématique et Evolution (ESE)**

Le laboratoire ESE compte environ 110 personnes, dont environ 50 chercheurs et enseignants/chercheurs. Le laboratoire développe des recherches dans les différents domaines de l'écologie et de l'évolution. D'une part, nous étudions les flux d'informations génétiques et les interactions intra- et interspécifiques dans les domaines de l'évolution, la génétique des populations, la dynamique des populations et l'écologie des communautés. D'autre part, nous étudions les flux de matière et d'énergie aux échelles allant du subcellulaire jusqu'au paysage. Ces deux axes se croisent pour certaines équipes travaillant à l'interface entre les caractéristiques abiotiques des écosystèmes et la dynamique des populations ou des communautés. Pour l'ensemble de ces travaux, nous associons des compétences dans les domaines de l'observation des phénomènes naturels, de l'expérimentation au laboratoire et sur le terrain et de la modélisation. Les thèmes abordés dans le laboratoire concernent plus particulièrement :

- l'Ecophysiologie Végétale, du fonctionnement fin de la photosynthèse et de la respiration aux échanges gazeux d'un couvert végétal en réponse aux facteurs abiotiques, avec des implications sur l'étude des changements globaux et la modélisation des réactions des plantes et des écosystèmes,
- la Biologie Evolutive, de la biodiversité des grains de pollen, des chromosomes ou des systèmes de reproduction dans une espèce ou un genre, jusqu'à la reconstitution de l'histoire des complexes d'espèces cultivées en Afrique ou forestières en Europe, avec des implications dans les problèmes de biologie de la conservation ou dans l'étude des interactions entre les plantes et leurs pathogènes ou pollinisateurs,
- l'Ecologie des Communautés, de l'étude fine des interactions entre les plantes et les organismes du sol aux relations entre biodiversité et fonctionnement, en passant par la modélisation en dynamique des populations, avec des applications en biologie de la conservation

Les effets du changement climatique et atmosphérique sur les écosystèmes semi-naturels et/ou les mécanismes biotiques et abiotiques modifiant les flux des gaz à effet de serre de ces écosystèmes sont étudiés dans trois des quatre départements du laboratoire.

### **II.3.2 SISYPHE**

Le laboratoire SISYPHE (Structure et Fonctionnement des Hydrosystèmes Continentaux) est une unité mixte de recherche (UMR 7619) qui relève du CNRS et de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), associés à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et l'Ecole Pratique des Hautes Etudes. L'unité est implantée à l'UPMC (campus de Jussieu) et à l'Ecole des Mines de Paris (campus de Fontainebleau).

Les travaux de SISYPHE se focalisent sur les cycles de l'eau et des éléments qu'elle transporte. Ils intègrent l'ensemble des processus qui contrôlent ces cycles, qu'ils soient hydrologiques, géologiques, atmosphériques, géochimiques ou biogéochimiques, dans une démarche interdisciplinaire. La modélisation et les méthodes géophysiques constituent des outils privilégiés dans ce cadre.

Les problématiques portent plus spécifiquement sur :

- les ressources en eau et leur gestion,
- les altérations anthropiques des eaux, des milieux aquatiques
- la prospection géophysique et ses applications hydrologiques et archéologiques
- les ressources minérales et énergétiques et le stockage des déchets.

L'effectif total est de l'ordre d'environ 80 personnes dont 42 permanents et plus d'une trentaine de doctorants.

### **II.3.3 Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED)**

Le CIRED a été fondé en 1973 pour étudier les tensions entre environnement, gestion à long terme des ressources naturelles et développement économique. Il s'attacha, durant les années soixante-dix, à l'élaboration de la problématique de l'écodéveloppement qui vise à résorber et prévenir ces tensions par un jeu sur trois groupes de variables : les styles de consommation, les choix technologiques et l'aménagement de l'espace. Aujourd'hui les thèmes traités couvrent de nombreux domaines de l'économie et de la gestion de l'environnement.

Le CIRED dépend de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales, et est associé au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS - UMR 8568), à l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC) et à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), et au Centre de coopération en recherche agronomique pour le développement (CIRAD, UMR 56).

### **II.3.4 BioEMCO**

Bioemco regroupe depuis janvier 2005 quatre équipes de recherche issues de l'UMR 7618 « Biogéochimie des milieux continentaux », de l'UMR 7573 « Laboratoire de chimie bio-organique et organique physique », de l'UMR 7625 « Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques » et de l'UMR 7047 "Laboratoire de géochimie et métallogénie".

Cette unité pluridisciplinaire ambitionne de développer l'analyse de la structure, du fonctionnement et de la dynamique des environnements et des écosystèmes continentaux, terrestres et aquatiques, en combinant des approches physiques, chimiques et écologiques. L'objectif général est de faire émerger une véritable éco-géochimie de l'environnement en considérant que la dynamique de l'énergie et de la matière dans les écosystèmes résulte d'interactions entre les composantes physiques et chimiques de l'environnement (hydrosphère, atmosphère, sol), la physiologie des organismes, la diversité et l'organisation des communautés vivantes.

Afin de déboucher sur la construction d'une théorie du fonctionnement des écosystèmes continentaux, l'unité BioEMCO privilégie l'étude de questions générales, à forte base conceptuelle, et s'appuie sur des écosystèmes modèles (grandes cultures, prairies, savanes, écosystèmes aquatiques). Elle combine l'observation à long terme, la modélisation et l'expérimentation et développe une expertise de haut niveau en chimie isotopique, chimie moléculaire et technologie des micro- et méso-cosmes. Elle participe à l'effort international

d'amélioration de notre compréhension du fonctionnement des surfaces continentales et de mise au point de l'ingénierie écologique afin de mieux prévoir les effets des changements globaux, d'en atténuer les aspects négatifs et de proposer des méthodes alternatives de gestion et de réhabilitation des milieux.

BioEMCO est impliquée activement dans plusieurs organisations de développement de la recherche en environnement (Fédération Eger à Versailles-Grignon, Fédération Environnement à Paris 6, Plateforme Environnement à l'École Normale Supérieure), dans l'Observatoire de recherche sur les prairies et la Plateforme Ecotronique de Foljuif près de Fontainebleau. Elle participe à de nombreux programmes nationaux (programme Ecco par exemple), européens (carbone et azote en Afrique de l'Ouest par exemple) et internationaux.

### **II.3.5 PIFO ; UFR de médecine de UVSQ : faculté de médecine Paris-Ile de France-Ouest**

Cette Unité de Formation et de Recherche (UFR) est rattachée à UVSQ depuis 2001. Elle est associée au Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Paris, qui est l'Assistance Publique – Hôpitaux de Paris (AP-HP). Ses hôpitaux sont situés dans l'ouest de l'Île de France.<sup>5</sup> Ses capacités de recherche, actuellement éparpillées, seront regroupées grâce à la construction d'une nouvelle faculté à Montigny le Bretonneux, à proximité immédiate du regroupement de plusieurs laboratoires de l'IPSL, sur le campus, facilitant ainsi grandement les échanges. Les surfaces à construire à Saint-Quentin-en-Yvelines sont de 14 000 m<sup>2</sup> (SHON), se répartissant de la façon suivante : 80% locaux recherche et 20% locaux enseignement.

La recherche conduite par l'UFR de Médecine a été recentrée lors de son intégration à UVSQ sur le thème fort et original « Environnement et santé, populations vulnérables ». Le thème « santé des populations vulnérables » est original et fédérateur pour les hôpitaux de PIFO (cohortes de patients) : Sainte-Périne (personnes âgées), Raymond Poincaré (handicap), Ambroise Paré et Foch (pathologies chroniques cardiaques, respiratoires, cancéreuses...), Versailles - Le Chesnay (maladies psychiatriques), Poissy – Saint Germain-en-Laye (mère-enfant).

Sur le campus de Saint-Quentin-en-Yvelines seront créés un pôle recherche « épidémiologie » et un pôle de recherche « biologie » regroupant des équipes en interaction avec les autres composantes de l'UVSQ et se consacrant aux conséquences sur la santé humaine des modifications environnementales.

#### **Pôle « épidémiologie »**

<sup>5</sup> Les hôpitaux qui lui sont associés depuis sa création sont les suivants :

- 3 hôpitaux universitaires de l'AP-HP
  - P Ambroise Paré à Boulogne (92)
  - P Raymond Poincaré à Garches (92)
  - P Sainte Périne-Chardon Lagache-Rossini à Paris (16 e )
- 3 hôpitaux non-universitaires avec lesquels l'UFR et l'AP-HP ont passé convention :
  - P 2 hôpitaux généraux :
    - André Mignot au Chesnay (78)
    - le groupe hospitalier Poissy – Saint Germain en Laye (78)
- 1 hôpital privé participant au service public hospitalier (PSPH)
  - Foch à Suresnes (92)
- Un Centre de Lutte Contre le Cancer (CLCC) :

René Huguenin à Saint-Cloud (92)

Le siège de l'UFR a été établi dans l'enceinte de l'hôpital Raymond Poincaré à Garches (92).

Il regroupe plusieurs équipes de recherche thématiques sur 2 axes principaux : influence de l'environnement sur l'état de santé des populations et adaptation des populations vulnérables à leur environnement. Le « noyau dur » de ces équipes sera issu de la mobilité d'équipes déjà existantes, celles de l'Unité INSERM U687, de l'EA 2506 (santé et vieillissement), d'une partie de l'axe « Médicament et risque infectieux » de l'unité INSERM en réseau U657.

Enfin, des équipes émergentes seront créées afin de mettre en oeuvre la dimension épidémiologique d'activités de recherche déjà existantes au sein du CHU PIFO : environnement et pathologie chronique cardio-respiratoire et cancéreuse, environnement et maladies de la peau, pharmacoépidémiologie et handicap psychique, épidémiologie d'intervention dans les pays du sud.

### **Le pôle recherche « biologie »**

Ce pôle est constitué d'équipes déjà existantes au sein de l'UFR et de l'UVSQ dont les thématiques prédominantes actuelles portent sur l'interaction hôtes-environnement : génétique des maladies métaboliques, épidémiologie moléculaire des tumeurs digestives, apoptose-relations hôtes-virus-réponse au stress, bactérie de l'environnement et infections humaines. Les banques d'informations biologiques et clinico-thérapeutiques, seront gérées en commun par les 2 pôles de recherche.

L'implantation sur le site de Montigny-le-Bretonneux de telles unités doit s'enrichir d'une plate-forme de recherche biologique et expérimentale (diagnostic, étude d'impact et prévention des risques émergents liés à l'environnement pris au sens large).

## **II.3.6 Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA)**

Le Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA) qui est une UMR (CNRS-Paris12-Paris 7) comporte 64 personnels permanents (45 chercheurs et enseignants-chercheurs, 19 IATOS) et environ 35 thésards, stagiaires ou post-docs, soit au total une centaine de personnes. L'activité du LISA concerne d'une part l'étude de la composition chimique de la troposphère terrestre et les problèmes environnementaux qui y sont liés et d'autre part la planétologie en relation avec le domaine de l'exo/astrobiologie. Pour répondre à ces questions, le LISA est non seulement impliqué dans des campagnes de terrain et des expériences satellitaires mais aussi dans des études de processus de laboratoire (chimie, spectroscopie, ...) en support des activités précédentes. L'intégration de ces résultats se fait au travers d'outils de modélisation 0, 1 ou 3D. Plus précisément, l'activité scientifique du LISA est structurée en six thèmes :

1. Cycle de l'aérosol désertique
2. Capacité oxydante de l'atmosphère
3. Pollution oxydante de l'échelle locale à continentale
4. Interaction des retombées atmosphériques avec les matériaux des bâtiments et les écosystèmes
5. Exo/Astrobiologie : Physico-chimie organique d'environnements planétaires
6. Spectroscopie et atmosphères

Les études relatives à la troposphère terrestre sont directement liées à l'évolution du climat sous l'effet de la modification de la composition de l'atmosphère en espèces trace à courte durée de vie (gaz réactifs, aérosols), au rôle de l'atmosphère dans les cycles biogéochimiques

et à la pollution atmosphérique à l'échelle régionale et continentale. Dans ce cadre, le LISA coordonne et/ou participe à de nombreuses campagnes de terrain (ESQUIF, ESCOMPTE, CACHE, AMMA,...). De même, il est impliqué dans des expériences satellitales (MIPAS, IASI) et est PI d'un projet de mesure de la pollution à partir d'un satellite en orbite géostationnaire. Enfin, il est un partenaire actif de plusieurs projets européens (AMMA, GEMS, GEOMON, PROMOTE) et du ReX Accent.

Pour ce qui est des activités relatives à la planétologie, les programmes développés concernent Titan, les comètes et Mars. Ils sont liés respectivement aux missions Cassini-Huygens, Rosetta et MSL auxquelles le LISA participe en tant que Co-I de plusieurs expériences, ceci afin d'étudier la physico-chimie organique de différents environnements planétaires et in fine les origines de la distribution et de l'évolution des structures moléculaires et des processus liés à l'apparition de la vie.

Enfin en ce qui concerne les études de laboratoire, le LISA est maître d'oeuvre d'une chambre de simulation atmosphérique (phase gazeuse) et a en cours le développement d'expériences lourdes de laboratoire: expériences laser de sondage atmosphérique, Chambre Expérimentale de Simulation Atmosphérique Multiphasique, Single Particle Laser Ablation Mass Spectrometry et Simulation Expérimentale de Titan.

En terme de modélisation, le laboratoire a développé :

- De nouvelles méthodes aptes à modéliser les spectres d'espèces d'intérêt atmosphérique ou planétologique et à déterminer les paramètres spectraux indispensables au dépouillement des spectres atmosphériques et planétologiques.
- Des codes chimiques explicites permettant une description détaillée de l'évolution de la matière organique et donc de la formation des aérosols organiques secondaires.

Le LISA a également développé un modèle d'émission d'aérosols désertiques largement utilisé aujourd'hui par la communauté internationale. Pour ses propres thématiques, le LISA a inclus ces derniers développements dans différentes versions du modèle CHIMERE. Il est actuellement engagé dans des activités de modélisation inverse des sources d'émission et d'assimilation de données de surface ou satellitaires.

### **II.3.7 Laboratoire d'Econométrie de l'Ecole Polytechnique (CECO)**

Le laboratoire comprend 19 chercheurs et enseignants-chercheurs. Il réunit des économistes et des mathématiciens intéressés par la modélisation théorique ou appliquée dans une perspective micro-économique.

Les principaux domaines de recherche concernent :

- Méthodes mathématiques : optimisation discrète, théorie des jeux ;
- Economie publique : analyse du vote, économie normative, philosophie économique, économie de l'environnement, économie urbaine ;
- Entreprises et marchés : économie industrielle, théorie des organisations, prévention des risques et gestion des crises, protection de propriété intellectuelle et incitations à l'innovation.

Au sein de l'Ecole polytechnique, le Laboratoire d'Econométrie est rattaché au Département d'enseignement recherche « Economie ». Au niveau du CNRS, il constitue la composante « Economie » du « Pôle de recherche en économie et gestion de l'Ecole Polytechnique », UMR 7176.

L'École Polytechnique et la Fondation de l'École Polytechnique ont créé début 2003 une chaire sur le thème général du développement durable. Cette chaire est soutenue par EDF. Cette création est l'aboutissement d'une initiative et d'un projet portés par le laboratoire d'économétrie.

L'orientation interdisciplinaire retenue correspond à une collaboration entre les sciences économiques et sociales avec les sciences biologiques et les sciences physiques. La présence au sein de l'École de départements d'enseignement recherche comme celui de Biologie ou de laboratoires comme celui de Météorologie Dynamique, et l'existence de contacts réguliers entre ces entités et le laboratoire d'économétrie constituent un gage important pour la matérialisation de programmes interdisciplinaires de qualité.

Les activités de la Chaire (cahiers, séminaires, ateliers de recherche, colloques...) sont diffusés par voie électronique et accessible sur le site <http://ceco.polytechnique.fr/CDD/>

### II.3.8 C3ED – Equipe IACA

L'Equipe IACA du C3ED à l'UVSQ mobilise un noyau d'enseignants-chercheurs titulaires (O'Connor, Fauchaux, Vanderlinden, Job, Douguet, Nicolai, Dalmas, Allal) en collaboration avec des associés à l'étranger. Au sein de l'équipe IACA, l'attention aux problématiques énergétique et climatique remonte aux années 1980 (Fauchaux, O'Connor) en passant par de nombreux projets français et européens pendant les années 1990. Les membres cités de l'équipe portent, chacun d'après leur façon, une expérience et une expertise d'analyse interdisciplinaire dans des domaines de l'analyse intégrée économie-environnementale, risque, prospective, indicateurs du développement durable, méthodes participatives, économie publique et évaluation environnementale. Parmi les points forts des capacités du C3ED, mentionnons :

- **Analyse de risques Méthodologie et outils d'analyse intégrée économie-environnement.** L'Equipe IACA se spécialise aux méthodes d'analyse multicritères participatives, validées dans la pratique, permettant d'envisager *des démarches d'analyse « d'en bas »* qui s'articuleront à l'analyse coût-efficacité à l'échelle globale privilégiée par la modélisation du Thème §1. Elle a également une expertise méthodologique dans le domaine de l'évaluation environnementale, permettant d'exploiter les complémentarités entre analyse coût-bénéfice monétaire, analyse coût-efficacité, et analyse multicritères développée sur hypothèse d'une pluralité irréductible de « grandeurs » ou d'ordres de justification.

- **Concertation d'acteurs :** Les « études de démonstration » du thème transversal 10 se dérouleront par partenariat entre les équipes scientifiques du RTRA et des acteurs des terrains (universitaires, politiques, industriels, monde associatif, etc...).

— Grâce à sa présence au sein du partenariat que représente l'Association FONDaTERRA (Fondation Européenne pour des Territoires Durables) ancrée en Ile de France avec un rayonnement international, l'Equipe IACA du C3ED est bien placée pour développer des analyses « cas d'école » avec des partenaires industriels et administratifs en Ile de France.

— Sur le plan inter-national, encore dans le cadre des études de cas comparatives, l'Equipe IACA compte renforcer ses partenariats étroits existants avec des institutions de plusieurs pays collaborateurs — notamment en Europe (dans le contexte des projets européens intégrés ALARM et SPICOSA), du Magreb (Tunisie, Maroc), du Canada et de la Nouvelle-Zélande.

• **Méthodologie et outils d'analyse intégrée économie-environnement** : L'Equipe IACA se spécialise aux méthodes d'analyse multicritères participatives, validées dans la pratique, permettant d'envisager (dans le thème 10) *des démarches d'analyse « d'en bas »* qui s'articuleront à l'analyse coût-efficacité à l'échelle globale privilégiée par la modélisation du Thème §1. Elle a également une expertise méthodologique dans le domaine de l'évaluation environnementale, permettant d'exploiter les complémentarités entre analyse coût-bénéfice monétaire, analyse coût-efficacité, et analyse multicritères développée sur hypothèse d'une pluralité irréductible de « grandeurs » ou d'ordres de justification.

• **Médiation de connaissances environnementales** : Sur les démarches pédagogiques et les pratiques de l'intégration des analyses scientifiques au sein des processus sociaux de réflexion autour des risques et des conflits sociétaux et, plus particulièrement, l'exploitation des outils TIC multimédia dans des démarches de « médiation de connaissances » sur l'interface science-politique-société, voir la présentation de compétences du C3ED par rapport au thème 10).

## **Annexe III : Structures mutualisées de l'Institut Pierre-Simon Laplace**

L'IPSL fonde sa stratégie scientifique sur plusieurs structures fédératives transverses qui permettent une coordination du travail des équipes localisées sur plusieurs sites. Le RTRA bénéficiera de ce travail d'animation et de mutualisation d'outils dont il ouvrira l'accès plus largement aux autres unités dans le cadre des axes scientifiques du RTRA.

### ***III.1 Le Pôle de Modélisation du Climat et la plateforme de modélisation associée***

Le Pôle de Modélisation du Climat s'est constitué autour d'un projet multidisciplinaire de modélisation du système climatique, nécessitant de développer un ensemble de codes, cohérent et modulaire, traitant à la fois tous les milieux (océan, atmosphère, glace, surfaces continentales) et tous les processus (physiques, chimiques, biologiques). C'est un élément fédérateur de recherche et d'expertise sur le climat. Il a pour missions de fédérer les études faisant intervenir les composantes du modèle de l'IPSL, d'identifier et de coordonner les simulations de référence, de fédérer et de rationaliser les moyens et les développements techniques, et d'assurer l'animation scientifique.

Le Pôle de Modélisation développe et maintient un modèle couplé atmosphère-océan mis à la disposition de l'ensemble de la communauté de l'IPSL. Ce modèle est l'outil indispensable à la réalisation de simulations du changement climatique. Il inclut des modules représentant les cycles biogéochimiques, la chimie de l'atmosphère et les aérosols, les processus de surface et les interactions avec la végétation afin d'intégrer la complexité du « Système Terre ». Ce modèle inclut un modèle de circulation générale de l'océan qui, par la qualité de ce modèle, est devenu une plateforme nationale et européenne.

### ***III.2 Le Pôle PROMETEE (PROcessus de Moyenne Echelle: Transfert d'Energie et d'Eau)***

Ce pôle a pour objectif de favoriser le regroupement des efforts engagés à l'IPSL sur l'étude du **Cycle de l'eau**. Il s'intéresse à des échelles de temps et d'espace relativement fines accessibles par les observations issues de missions spatiales, de satellites opérationnels, de réseaux de mesures opérationnels, de stations sols, ou encore de campagnes en mer, et qui mettent en oeuvre des modèles à méso-échelle. Ce Pôle vise regrouper les efforts engagés sur ces thèmes, et à permettre, en articulation avec le Pôle de Modélisation du Climat, l'émergence de nouveaux axes de recherche.

Ce pôle sera un appui important pour l'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau. Il aidera également au développement du modèle de climat et à l'amélioration des prévisions des changements climatiques et environnementaux.

### **III.3 Le Pôle Spatial et Instrumental**

Ce pôle est en cours de mise en place. L'activité spatiale constitue, en effet, un des domaines majeurs de la coopération entre les laboratoires de l'IPSL au sein desquels de nombreuses équipes analysent et interprètent des données spatiales, et mettent en œuvre des opérations de recherche conjuguées ou intégrées à des projets spatiaux relevant de la physique des plasmas terrestres, de la planétologie et de l'observation de la terre. L'objectif est de fédérer ces différentes activités aussi bien sur les plans technique et instrumental que sur les aspects scientifiques.

Ce pôle apportera non seulement une capacité de développement de projets dans le domaine de l'observation de la Terre mais également une capacité de développement de nouvelles instrumentations d'observation sol.

### **III.4 Les missions d'observation**

L'étude du climat et de son évolution nécessite la mise en place de systèmes d'observation de long terme. Au sein de l'IPSL, trois services d'observation labellisés par l'INSU ont été développés depuis de nombreuses années :

- NDSC (Network for Detection of Stratospheric Change), dédié à l'ozone stratosphérique et aux variables associées
- RAMCES (Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre)
- CARAUS (CARbone AUstral) qui concerne la mesure des échanges de gaz carbonique entre l'océan et l'atmosphère.

L'exploitation des données de ces systèmes d'observation aidera à répondre aux différentes questions posées par le RTRA, en particulier en ce qui concerne l'évolution des gaz à effet de serre.

S'y ajoutent :

- les activités du Site de Télédétection Atmosphérique (SIRTA) qui regroupe une instrumentation de pointe (lidars, radars, radiomètres) pour conduire des études coordonnées sur le cycle de l'eau, la dynamique atmosphérique, la pollution urbaine et le bilan radiatif
- le service NEMO, outil national dédié à la modélisation numérique de l'océan (dynamique et biogéochimie) utilisé dans le cadre du modèle couplé atmosphère-océan mais également plus largement dans pour l'étude de l'océan et le développement de l'océanographie opérationnelle.

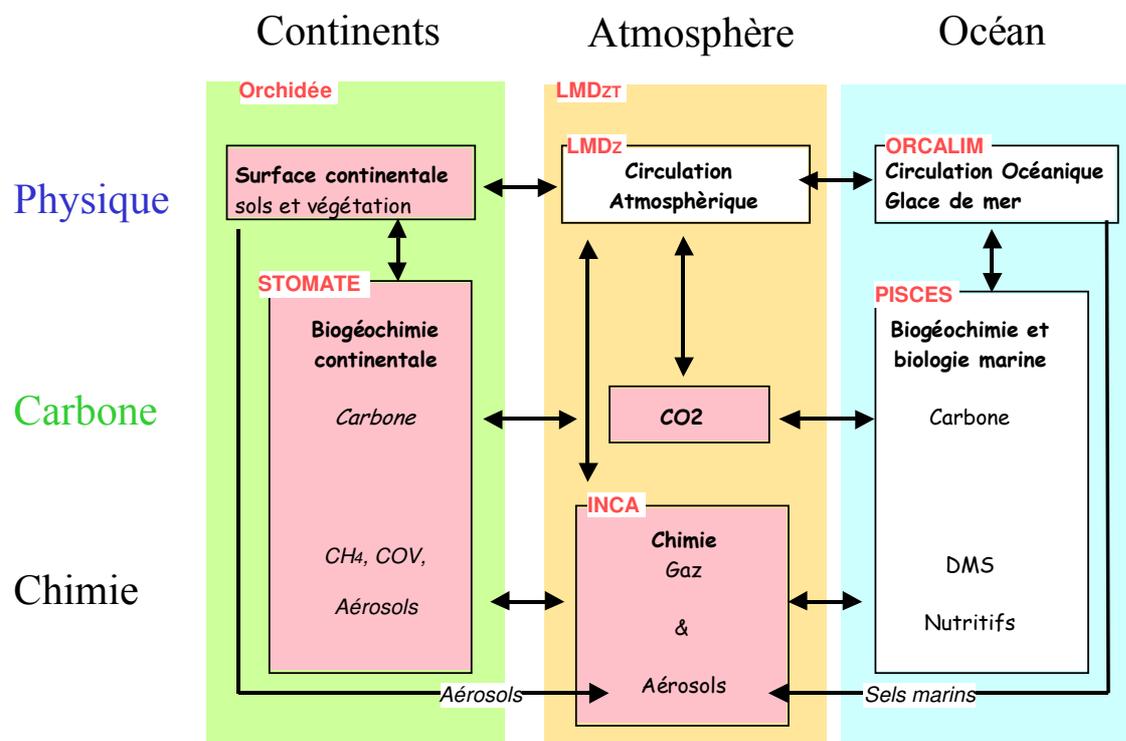
### **III.5 Le Centre de Données**

Ce centre a pour première mission de répondre aux besoins des laboratoires de l'IPSL en matière de collecte, gestion, et mise à disposition de données. Il a également pour objectifs de valoriser l'ensemble des données acquises à l'IPSL et leur analyse, auprès de la communauté nationale et internationale, et de jouer un rôle actif dans la mise en place et la gestion des

centres thématiques tels ceux dédiés à la chimie atmosphérique (ETHER) et aux interactions nuages, eau, aérosols, rayonnement (ICARE).

### III.6 Les outils numériques partagés

#### Le modèle intégré du système Terre de l'IPSL



**Le Modèle Intégré IPSL du Système Terre**, comportant les différents modèles physiques, chimiques et biologiques intervenant dans le couplage climat-cycles biogéochimiques. Les composantes affectées directement par les activités anthropiques sont grisées. Les circulations tri-dimensionnelles de l'atmosphère et de l'océan sont calculées respectivement par le modèle de circulation générale de l'atmosphère (LMDZ) développé au LMD, et le modèle de circulation générale de l'océan (ORCA) développé au LODYC et du modèle de dynamique et thermodynamique de la glace de mer (LIM) mis au point à Louvain-la-Neuve. La communication entre les modèles d'océan et d'atmosphère est assurée par le coupleur OASIS développé au CERFACS à Toulouse.

Le modèle global de végétation dynamique ORCHIDEE, développé par les chercheurs du LSCE et du LMD, comporte un module physique (SECHIBA), un module carbone (STOMATE) et un module de dynamique de la végétation (LPJ). Ce modèle permet d'étudier tant les interactions entre climat et écosystèmes, qu'entre climat et cycle du carbone. L'intégration de composés réactifs (CH<sub>4</sub> et composés organiques volatils, COVs) est prévue, ouvrant la voie aux interactions biosphère-chimie. Le modèle global de biogéochimie océanique (PISCES), développé au LOCEAN et au LSCE, inclut le cycle du carbone et un modèle de biologie marine représentant les grands types de plancton et les principaux éléments chimiques susceptibles de limiter la production primaire. Un module estime aussi les composés soufrés (DMS) ouvrant la voie à la rétroaction de la biomasse marine sur le climat. Le couplage chimie-aérosols-climat est en plein essor avec le modèle INCA développé au

LSCE. Ce modèle complet de chimie atmosphérique intègre les principaux gaz réactifs (O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, COV, NO<sub>x</sub>, ...) et les 4 grands types d'aérosols (carboné, soufré, minéral et sel de mer).

### **Le modèle de chimie-transport CHIMERE**

CHIMERE est le modèle de simulation de la qualité de l'air développé conjointement par l'IPSL, le LISA et l'INERIS. Il simule la concentration d'une centaine de polluants dont l'ozone, les oxydes d'azote, le CO<sub>2</sub>, les composés organiques volatils, les aérosols (particules) de façon détaillée, sur une grille pouvant couvrir une grande région du monde (Europe) ou une région urbaine. Le modèle est utilisé à la fois pour la recherche sur le transport et la chimie des polluants, mais aussi pour des applications opérationnelles comme la simulation de scénarios de réduction d'émissions à l'échéance d'une ou plusieurs décennies, ou la prévision opérationnelle des pointes de pollutions. En collaboration avec plusieurs organismes internationaux Le modèle est actuellement utilisé de façon opérationnelle dans plusieurs pays (Italie, Portugal, Pays-Bas). Il est aujourd'hui au cœur du dispositif français de surveillance et prévision de la qualité de l'air (PREVAIR), et du programme européen d'étude intégrée des impacts des politiques des émissions polluantes. Il est aujourd'hui participant aux programmes GMES sur l'étude de la composition atmosphérique (GEMS).

Les équipes du RTRA ont également développé une expertise sur un ensemble de modèles et d'outils numériques développés dans d'autres unités, et qui pourront être utilisés dans le cadre des travaux du RTRA, comme les modèles de météorologie à méso-échelle **MESO-NH**, **MM5**, **WRF**, la plates-formes numérique **CAST3M** utilisée pour la simulation en hydrologie et hydrogéologie, tant pour les processus d'écoulement d'eau que les processus de transfert de matière chimique ou particulaire.

## Annexe IV : Formation

Fort de la tutelle de deux universités, l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et l'Université de Versailles Saint – Quentin en Yvelines (UVSQ), et de celle de deux Etablissements d'enseignement supérieur, Ecole Polytechnique et ENS Paris, l'IPSL, qui compte près de 60 Enseignants Chercheurs (EC) dans ses laboratoires, est très présent dans le domaine de l'enseignement avec la plus large partie du potentiel qui se concentre sur des activités conduites au sein de l'UPMC et de l'UVSQ. Plusieurs autres unités partenaires sont également très présentes dans ces deux universités, comme le C3ED et l'UFR de médecine à l'UVSQ, l'UMR SISYPHE et BioEMCO à l'UPMC.

Côté de l'UPMC, une partie notable des EC de l'IPSL participent à l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement de l'île de France (dirigée par K.Laval, LMD) dans laquelle sont partie prenante, l'UPMC, l'UVSQ, Paris VII et Paris XII. Une quarantaine d'EC des laboratoires de l'IPSL est statutairement rattachée à l'UPMC. Au niveau de la licence, ils interviennent principalement dans les enseignements de physique et à celui du Master de Sciences principalement dans deux mentions : "Physique et Applications" et "Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie". Une spécialité, commune aux deux mentions, est en prise directe avec les thèmes de recherche de l'IPSL. Il s'agit de la spécialité "Océan, Atmosphère, Climat, Télédétection (OACT)", prise en charge dans sa quasi intégralité par des personnels rattachés à des laboratoires de l'IPSL. Conscient de la nécessité d'attirer en plus grand nombre des étudiants de qualité dans le domaine des Sciences de l'Environnement, l'IPSL soutient fortement ces formations et ses laboratoires accueillent de nombreux stagiaires qui suivent des enseignements à l'UPMC.

Côté de l'UVSQ, les enseignants rattachés aussi bien à l'IPSL (une quinzaine) qu'au C3ED (une trentaine) interviennent à tous les niveaux des cursus aussi bien dans les disciplines fondamentales (par exemple, physique ou sciences économiques, respectivement) que dans les enseignements touchant plus directement les domaines interdisciplinaires des programmes de recherche — par exemple, les thèmes de climat, environnement, modélisation, traitement du signal, etc., au sein de l'IPSL ; ou les thèmes d'analyse intégrée, aide à la délibération, évaluation de risque et de politiques territoriaux, responsabilité sociétale d'entreprise, etc., au sein du C3ED.

Au niveau Licence chez les scientifiques (UFR de Sciences) à l'UVSQ, la mention «Physique, Chimie, Environnement» propose aux étudiants un parcours axés sur les disciplines fondamentales (Math, Physique, Chimie) et ouvrant sur les sciences de l'environnement et du climat. En Master, l'IPSL intervient dans les domaines *Sciences et Technologie, Santé et Sciences de l'Environnement, du Territoire et de l'Économie (SETE)*. Chez les sciences sociales et humanités (UFR SSH) les mentions géographie et sciences économiques préparent les étudiants pour, parmi d'autres perspectives, des formations au niveau Master en économie du développement, de l'environnement et internationale et en géographie. A noter, d'un côté, la mise en place de la Spécialité ICE (Interactions Climat-Environnement) au sein de la Mention SEN du Master SETE, dont l'originalité est, en collaboration avec le C3ED, d'associer à l'étude du climat et de l'environnement une ouverture vers les problèmes socio-économiques liés aux changements environnementaux et climatiques. A noter, d'autre côté, la mise en place de la Spécialité **MEDIATIONS**

(Médiations de Connaissances Environnementales : Partenariats pour le Développement Durable) au sein de la Mention IDD du Master SETE.

Compte tenu du petit nombre de candidats potentiels, et des possibilités limitées d'insertion françaises dans des équipes de recherche, il y a une réelle difficulté à monter une formation spécialisée et de très haut niveau couvrant les différentes disciplines nécessaires à la compréhension des facteurs interagissant dans les changements du climat et de l'environnement. Le problème est encore plus complexe, si on veut y associer une formation de haut niveau en économie et sciences sociales, en vue de former des chercheurs aptes à répondre aux défis du changement global et du développement durable. C'est avec cet objectif que se mettra en place, vraisemblablement par collaboration entre plusieurs établissements de recherche et d'enseignement supérieur sur le plan européen (dont l'UVSQ Master SETE et chercheurs enseignants de l'IPSL et du C3ED), le programme **PERICLES** — Programme d'Enseignement **p**Ré-doctoral sur les **I**nteractions entre **C**limat, **E**nvironnement et **S**ociété (projet de Spécialité **PERICLES** — dont l'objectif est de donner une formation d'excellence de niveau Master, pour des étudiants ayant terminé leur Licence, et présélectionnés sur dossier. Ce projet ambitieux à dimension européenne (l'objectif étant d'établir un Master sur 2 ans mutualisé entre plusieurs universités européennes), au carrefour des disciplines au coeur de notre réseau, est logiquement appelé à jouer un rôle dans la dynamique de formation qui se développera au sein du RTRA.

Les universités Paris 12, Paris 7 et Paris 11, ainsi que plusieurs autres écoles d'ingénieurs, ont également des EC participant au RTRA. Pour Paris 7 et Paris 12, le LISA a joué un rôle moteur, souvent créateur, dans le développement des enseignements scientifiques sur l'environnement dans ces Universités, tant en second qu'en troisième cycles. La double appartenance universitaire de ce laboratoire a d'ailleurs été un élément clé dans le développement d'un master SGE environnement co-habilité (Universités Paris7, Paris 12, Marne La Vallée et Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), le LISA en étant le coordinateur. Le LISA est fortement impliqué dans 3 écoles doctorales liées aux thématiques du laboratoire: deux écoles thématiques d'Ile de France : celle d'Environnement et celle d'Astronomie et Astrophysique ainsi qu'à une école de site, l'école Sciences de l'Ingénierie, Matériaux, Modélisation, Environnement SIMME (Paris 12). Dans les domaines de l'environnement et du climat, les laboratoires ESE et LSCE interviennent dans les enseignements de l'Université Paris 11. BioEMCO et SISYPHE interviennent dans le cadre de plusieurs formations (UPMC, INA, ENS, Paris 7, ENMP) liées aux thématiques du RTRA. Plusieurs chercheurs des unités du RTRA, notamment CECO, le LMD, participent également aux enseignements de l'Ecole Polytechnique.