

B Prospective

1. Introduction

Plus que jamais, il est nécessaire de comprendre les mécanismes essentiels qui gouverneront l'évolution du climat et notamment le lien entre les émissions anthropiques, la dynamique des surfaces continentales, l'utilisation des sols et le changement de climat. 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. 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.

Seule une approche multidisciplinaire et intégrée du Système Terre peut permettre de relever ce défi. Elle doit faire intervenir à la fois les interactions entre l'océan, l'atmosphère, la biosphère et la cryosphère sous l'ensemble de leurs aspects physiques, chimiques et biologiques. La modélisation des différents éléments du système climatique et de leurs interactions menée à l'IPSL est un élément indispensable pour améliorer notre connaissance de ce système complexe et pour pouvoir étudier le climat dans sa globalité. Notre objectif est de réduire l'incertitude des projections climatiques futures par une meilleure compréhension des interactions mises en jeu et de la façon dont elles affectent l'état moyen et la variabilité climatique. Ainsi la trame du projet fédérateur du pôle de modélisation concerne le changement climatique. Elle s'appuie sur l'ensemble des activités de modélisation, sachant qu'une bonne analyse des changements climatiques futurs repose en amont sur une bonne connaissance du système climatique actuel et sur l'amélioration de la compréhension des processus de petites échelles. Notre démarche doit aussi associer simulations à l'échelle globale et simulations aux échelles régionales. Ces études nécessitent la poursuite du développement des composantes du système Terre de l'IPSL, par l'intégration successive de nouveaux couplages avec les cycles biogéochimiques. Elles demandent aussi une continuelle amélioration des processus physiques représentés dans les modèles en fonction des questions scientifiques majeures et la mise en place d'un ensemble d'études permettant de lever les "verrous scientifiques" et comprendre la réponse du système climatique à différentes échelles de temps.

Dans ce contexte, les objectifs du Pôle de Modélisation pour les années à venir sont :

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

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

reconnu comme un interlocuteur privilégié pour la modélisation du climat, tant au niveau national, qu'au niveau international.

2. Analyses de changements climatiques

L'ensemble de simulations cohérentes réalisées pour le GIEC, qui couvrent les périodes du 20^{ème} et du 21 siècle permettent de mieux caractériser le changement climatique. Nos principaux objectifs pour les années à venir sont les suivants:

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

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

2.1 Analyses des changements du climat moyen

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

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

2.2 Analyse des changements de variabilités climatiques

Les études qui seront menées pour comprendre la variabilité naturelle du climat et la façon dont cette variabilité est affectée par le changement climatique ont comme double but de déterminer la contribution de la variabilité naturelle dans les changements climatiques récents et d'estimer et comprendre les changements de variabilité futurs des variabilités. Pour cela nous considérerons principalement les simulations stabilisées sur des périodes assez longues (quelques centaines d'années) pour mener à bien des études statistiques significatives et avec différents états moyens (préindustriel, actuel, 2xCO₂...) pour étudier les liens entre les changements de variabilité avec l'état moyen. Ces simulations seront analysées grâce à la variété des compétences de l'IPSL.

Régions tropicales:

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

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

Moyennes latitudes

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

2.3 Rôle de variations d'ensoleillement et du volcanisme au cours du 20^e siècle et des mille dernières années

Les variations du climat observées pendant la période instrumentale (140 dernières années) résultent d'une imbrication entre la variabilité interne du système (c'est à dire résultant des interactions entre les différents éléments du système en absence de forçage extérieur) et de la réponse de ce système à différents types de perturbations qu'elles soient naturelles (éruptions volcaniques, variations de l'intensité solaire...) ou anthropiques (gaz à effet de serre, aérosols, utilisation des sols...). Simuler de façon réaliste les variations du climat observées au cours du 20^{ème} siècle (pour lequel les perturbations anthropiques deviennent progressivement dominantes) et au cours du dernier millénaire (pour lequel les perturbations sont avant tout naturelles) permettra de comprendre comment le système répond aux différents types de forçages, et comment cette réponse interfère avec la variabilité climatique naturelle. Ces simulations sont aussi nécessaires pour pouvoir évaluer la façon dont les modèles reproduisent les périodes récentes et viennent en complément des simulations réalisées pour le GIEC. Elles demandent de réaliser des ensembles de simulations pour dégager l'impact des forçages de la variabilité interne. De légères modifications du modèle actuel sont nécessaires pour réaliser ces simulations et pouvoir les comparer aux scénarios de référence en cours. Les étapes de travail seront les suivantes :

- < introduire les aérosols volcaniques dans le modèle atmosphérique, d'abord en prescrivant les concentrations puis en transportant directement les aérosols émis
- < estimer les forçages naturels. Pour le 20^{ème} siècle, nous commencerons par utiliser des forçages recommandés par le projet européen ENSEMBLES. Mais il nous faudra également développer une compétence pour faire une analyse critique de ces forçages, voire de les modifier ou de les compléter. De la même façon, les forçages utilisés pour réaliser des simulations de variations climatiques observées dans les périodes récentes (petit âge glaciaire, optimum médiéval...) s'inspireront des simulations déjà réalisées par d'autres groupes. Ceci sera particulièrement important pour l'étude des changements climatiques observés aux Moyens Ages
- < modéliser les effets des variations d'intensité du soleil. Seul l'aspect énergétique direct sera considéré dans un premier temps. Ensuite, nous aborderons le couplage avec la chimie pour prendre en compte l'effet d'une variation du rayonnement UV sur la composition de la stratosphère, et donc sur ses propriétés radiatives (cf section 3).

2.4 simulations idéalisées pour étudier la sensibilité climatique

Les différences entre les résultats de différents modèles de climat peuvent être reliées leur sensibilité (changement de température simulé pour un doublement de CO₂). Plusieurs facteurs affectent la sensibilité climatique à l'échelle globale et régionale. Dans les 4 prochaines années nous réaliseront plusieurs tests pour mieux comprendre le rôle de la vapeur d'eau et des nuages sur la sensibilité climatique.

Sensibilité du climat global

Un de nos objectifs est d'étudier la sensibilité climatique globale et de confronter la sensibilité du modèle aux observations disponibles. Pour cela nous avons déjà tiré parti de nos développements récents pour avoir deux versions du modèle climatique ne se différenciant que par la représentation de la convection et des nuages hauts : la version de référence avec un schéma d'Emanuel pour la convection et une autre avec un schéma de Tiedke pour la convection et une représentation légèrement différente des nuages hauts pour assurer un bon équilibre énergétique du modèle. Ce premier jeu de simulations nous permettra d'analyser des réponses à priori assez différente de deux versions de modèles aux différences bien identifiées. Les méthodes d'analyse suivront la méthodologie proposée en 2.1 et seront complétées par les analyses des différents types de nuages suivant la méthode proposée dans le projet de comparaison CFMIP, en bénéficiant du simulateur ISCCP en ligne dans le modèle d'atmosphère. Ce simulateur permet de représenter les nuages tels qu'ils sont mesurés par les satellites.

Sensibilité du climat à l'échelle régionale:

En Afrique de l'ouest et dans le cadre du projet AMMA, nous réaliserons quelques études de sensibilité idéalisées pour étudier l'influence de la topographie sur la mousson à travers une modification de la paramétrisation de l'influence de la topographie (traînée), étudier la rétroaction de vapeur d'eau en changeant le profil de température vu par la convection, étudier le rôle des hétérogénéités de surface sur la persistance locale de la convection. En effet, on observe que des systèmes convectifs ont tendances à se former au même endroit pendant des périodes assez longues. Ces analyses auront aussi comme objectif d'identifier les raisons des défaillances du modèle actuel dans cette région.

2.5 Les simulations des paléoclimats

Les simulations des climats passés permettent de placer la période actuelle et le changement climatique en cours dans un contexte plus large. Elles sont principalement réalisées au LSCE, mais offrent à l'ensemble de la communauté un ensemble de données permettant de mieux comprendre la sensibilité climatique et les éléments qui la gouvernent. Une attention particulière est également portée au rôle des différentes rétroactions entre l'océan, l'atmosphère, la glace de mer et les surfaces continentales. Les paléoclimats offrent aussi une possibilité d'évaluation des modèles grâce aux données disponibles. Ces simulations sont analysées au regard des simulations du climat futur. Nous souhaitons renforcer dans les 4 ans à venir les études de changement climatique s'appuyant sur des climats différents.

Au delà du démarrage des simulations des derniers 1000 ans, les principales périodes qui seront étudiées dans les prochaines années sont celles du projet international "Paléoclimat Modeling Intercomparison Project". Elles concernent principalement l'étude de l'Holocène et plus particulièrement les périodes de l'Holocène moyen, il y a 6000 ans et le début de l'Holocène, il y a 10000 ans. Ces périodes sont marquées par un cycle saisonnier plus important de l'ensoleillement dans l'hémisphère nord, ce qui renforce le phénomène de mousson. Le refroidissement du dernier maximum glaciaire il y a 21000 ans est de l'ordre de grandeur (vers le froid) du réchauffement attendu à l'issue du prochain siècle. Cette période est particulièrement bien adaptée pour étudier la sensibilité climatique et la réponse du climat à la présence de larges calottes de glace dans l'hémisphère nord. Enfin l'entrée en glaciation nécessite de comprendre les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, et la mise en place de calottes de glace. Les climats plus anciens comme le Crétacé posent de nombreuses questions sur le fonctionnement du système climatique. Au Crétacé par exemple, les gradients de température entre l'équateur et les pôles étaient plus faibles et les données montrent que les températures de l'océan profond étaient de l'ordre de 6 à 8 °C.

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

3 Nouveaux enjeux pour les interactions chimie-climat

3.1 Introduction

Au cours des 5 dernières années, le modèle de chimie-aérosols INCA couplé au modèle de circulation générale LMDz s'est progressivement avéré être un outil d'étude des interactions chimie-aérosols-climat permettant de fédérer les efforts de plusieurs laboratoires au sein de l'IPSL. La phase de développement intensive s'achèvera en 2005 avec la mise en ligne des versions de référence pour la chimie troposphérique et les aérosols, la réalisation et la

documentation de simulations de référence et la migration vers LMDz.4 et IPSLCM4. Le passage sous MODIPSL et la refonte du site web permettant un accès rapide au modèle et à ses résultats seront réalisés dans la foulée. Comme décrit en détail dans la partie bilan, les efforts se sont essentiellement concentrés jusqu'à présent sur l'étude de la capacité oxydante de la troposphère et des aérosols troposphériques et de leur impact sur le climat à partir de simulations avec le modèle LMDz-INCA. Ces efforts seront poursuivis et même renforcés en ce qui concerne les simulations couplées chimie-climat-aérosols.

De nombreuses avancées ont également été réalisées pour traiter les effets stratosphériques. Ce travail a démarré via un projet IPSL et entre pleinement dans la prospective du pôle de modélisation. La stratosphère influence le climat dans la troposphère de deux façons principales. D'une part elle a un impact radiatif, essentiellement du à ce qu'elle contient l'ozone qui absorbe les UV solaires et qui est un gaz à effet de serre, mais aussi une quantité suffisante (quoique infime) de vapeur d'eau pour avoir un effet de serre. D'autre part, elle a un impact dynamique, provenant du fait que les changements de la circulation stratosphérique ayant une dynamique spécifique (comme l'Oscillation Quasi Biennale ou les Réchauffements Stratosphériques Soudains) peuvent se propager vers le bas et créer des changements significatifs dans la circulation troposphérique et le climat. Les modèles de la circulation générale couplant dynamique et chimie et incluant la stratosphère sont nécessaires pour évaluer le climat, sa variabilité et sa dérive future. A l'heure actuelle, le modèle LMDz étendu à la stratosphère a une climatologie et une variabilité réaliste, dans les tropiques et aux moyennes latitudes, mais de nombreux développements sont encore nécessaires pour pouvoir appréhender les différentes facettes des changements climatiques. Trois directions dans lesquelles la modélisation de la circulation générale du système climatique devait se développer ont été identifiées au cours de cette prospective. Il s'agit (i) des échanges de constituants mineurs à travers la tropopause tropicale, (ii) de l'influence de la dynamique stratosphérique sur la variabilité naturelle et la dérive climatique dans la troposphère, et (iii) de l'influence des ondes de gravité sur le climat. Comme cette discipline requiert de fortes interactions entre spécialistes du rayonnement, de la dynamique, et de la chimie atmosphérique, il s'agit d'un effort fédérateur entre le LMD, le SA et le LSCE.

3.2 Simulations fédératives

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

Simulation couplée chimie troposphérique-aérosols-climat.

A l'échelle de 3 ans, il s'agira de simuler l'évolution sur le XX^e et XXI^e siècles de la composition en espèces réactives et en aérosols, d'en calculer les forçages radiatifs associés et l'impact sur le climat. Différents scénarios d'évolution future seront considérés afin de comparer le forçage radiatif du méthane, de l'ozone troposphérique et des aérosols carbonés à celui du CO₂. Les forçages radiatifs des aérosols et des gaz à effet de serre autres que le CO₂ nous offrent-ils un bras de levier suffisant pour lutter contre le changement climatique futur en étant moins contraignant en termes d'émissions fossiles de CO₂ ? Ce travail s'inscrira dans le cadre entre autres du projet européen GEMS et concernera surtout le LSCE, le LMD, le LOA et le LGGE.

Simulation couplée de l'ozone troposphérique et stratosphérique.

Le développement de la version stratosphérique de LMDz et l'introduction de la chimie stratosphérique dans INCA ont fait l'objet d'un effort important réalisé au cours des deux dernières années dans le cadre du projet IPSL « Impact de la stratosphère sur le climat » auquel ont participé le LMD, le SA et le LSCE. Au terme de ce projet et à l'échelle de 3-5 ans nous réaliserons une simulation couplée 1850-2050 prenant en compte la chimie de l'ozone de la surface à 80-90 km. Cette simulation permettra d'une part d'évaluer le rôle de la stratosphère sur la tendance de l'ozone dans la troposphère et d'étudier le rôle de l'ozone dans le système climatique. Elle permettra surtout d'étudier comment l'ozone stratosphérique retourne progressivement à des valeurs pré-1980 (avant l'apparition du trou d'ozone) sous l'effet de la diminution du contenu en Cl et Br dans la stratosphère et des changements climatiques. La mise au point de cette simulation soulève le problème de la parallélisation du modèle couplé, de l'évaluation du code de rayonnement aux courtes longueurs d'onde, et de la prise en compte de la mésosphère. L'analyse des résultats de cette simulation dépasse le cadre du pôle de modélisation et permettra d'impliquer une plus large communauté stratosphérique pour l'analyse des tendances ou l'évaluation des résultats mais également les chercheurs s'intéressant à l'impact de la variabilité de la luminosité solaire sur le climat. Un groupe de travail « Impact de la stratosphère sur le climat », émanant du projet IPSL du même nom et fédérant cette large communauté, sera proposé à l'IPSL. La réalisation et le suivi de la simulation longue seront les premiers objectifs de ce groupe de travail.

Simulation couplée CO₂-CH₄-climat.

Cette simulation concerne directement les interactions climat-cycles biogéochimiques mais aussi la chimie atmosphérique pour la simulation de la capacité oxydante de l'atmosphère. Ce travail reste à définir plus précisément et pourrait viser une simulation de l'évolution future du méthane en prenant en compte le rôle joué par les changements climatiques sur les émissions naturelles de méthane par les zones inondées et les permafrosts. Ce travail nécessite de finaliser les modules d'émission de méthane dans ORCHIDEE en collaboration avec le LGGE.

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

3.3 Implications pour le système physique et les traceurs.

La représentation du transport atmosphérique des constituants chimiques et des aérosols est extrêmement sensible à la représentation du transport convectif (l'importance du transport convectif a été confirmée récemment en comparant les concentrations chimiques obtenues avec LMDz-INCA avec les schémas de convection de Tiedtke et d'Emanuel). Un enjeu pour les prochaines années sera donc de valider le nouveau bloc couche-limite/convection/nuages en termes de transport des traceurs. Ce travail sera développé en particulier dans le cadre du projet AMMA. On étendra à la représentation du transport des traceurs, la stratégie mise en place par le passé dans le cadre des projets EUCREM et EUROCS pour le développement et la validation des paramétrisations climatiques : les paramétrisations utilisées dans une version unicolonne du modèle de climat sont comparées à des sorties de modèles méso-échelle, que ce soit sur des cas académiques ou pour essayer de simuler des cas observés lors de campagnes de terrain (campagnes passées dans un premier temps puis périodes d'observations intensives - SOPs - de AMMA). La comparaison des sorties de modèles méso-échelles et de paramétrisations de modèles de grande échelle en termes de matrices d'échange de traceurs devrait permettre d'apporter de nouvelles contraintes sur les paramétrisations elles-mêmes. Ce travail sera

entrepris dans le cadre d'une collaboration étroite avec l'équipe de Jean-Philippe Lafore au CNRM. Après l'issue de la campagne, les concentrations prédites par le modèle LMDz-INCA seront comparées directement aux observations in-situ. Au-delà du transport lui-même, le travail sera étendu au lessivage des espèces solubles et si possible au soulèvement de poussières par les bourrasques de vent associées à la convection de couche limite et par les fronts de rafales des lignes de grain.

D'un point de vue dynamique, l'accent sera mis également sur les processus physiques qui influent sur le transport des espèces chimiques dans la stratosphère et les échanges troposphère-stratosphère. Les études et développements concerneront notamment 1) la paramétrisation des ondes de gravités dont des études ont montré qu'elles contrôlaient en grande partie la circulation méridienne moyenne (circulation de Brewer-Dobson), 2) l'analyse et la réduction d'un biais froid endémique du modèle (et de beaucoup d'autres) dans les hautes latitudes au voisinage de la tropopause et 3) la paramétrisation de la convection profonde et des "overshoots" qui contrôlent pour une bonne part les échanges troposphère-stratosphère de constituants.

4 Nouveaux enjeux pour les interactions climat-cycles bio-geochimiques

Le couplage entre le système climatique et les cycles biogéochimiques est une activité déjà en cours au sein du pôle de modélisation (cf. section Bilan). Les études précédemment réalisées à l'IPSL sur le couplage climat-carbone ont mis en évidence la rétroaction positive entre le changement climatique et le cycle du carbone biosphérique. Ces études s'appuyaient sur des modèles relativement simples des cycles du carbone océanique et biosphérique. A l'heure actuelle seuls trois groupes ont réalisés des simulations couplées climat-carbone à l'aide de modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère. Outre l'IPSL, il s'agit du Hadley Centre et du LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory). Ces autres groupes ont des résultats comparables aux nôtres, c'est-à-dire qu'ils simulent tous une rétroaction positive entre le climat et le cycle du carbone continental. Néanmoins, ces modèles sont plus sophistiqués en terme de représentation des processus que ne l'étaient les modèles de carbone utilisés par l'IPSL il y a 5 ans. Il faut également noter qu'aucun de ces groupes ne prend en compte le changement d'utilisation des sols dans le modèle de surface. Le rôle du changement d'utilisation des sols sur le climat (effets physiques et biophysiques) et sur le cycle du carbone est potentiellement important. Il doit être étudié et mis en regard du couplage climat-carbone. A terme, nous voulons développer à l'IPSL un modèle climat-carbone qui prenne également en compte de manière réaliste le changement d'utilisation des sols de façon à étudier son rôle direct sur le climat, mais également son rôle indirect, lié par exemple aux émissions fossiles, via l'évolution du CO₂ atmosphérique. Au-delà des aspects de couplage, le suivi des différents développements dans les modèles de biogéochimie marine (PISCES) et de surfaces continentales, permettra d'améliorer la complexité du modèle et de réaliser des études aux échelles régionales.

4.1. Couplage climat-cycle du carbone et rôle de l'utilisation des sols

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

Les développements en cours autour du changement d'utilisation des sols permettront dans un premier temps d'étudier l'impact du changement d'utilisation des sols sur le climat via les changements de la surface (albédo, rugosité) et des flux d'énergie (chaleur latente, chaleur sensible) mais également via le cycle du carbone (émissions de CO₂ liées à la déforestation). Ces études seront centrées sur le siècle passé et le 21^{ème} siècle. Ensuite, comme mentionné dans l'introduction, il faudra coupler ces développements du changement d'utilisation des sols aux développements climat-carbone afin de pouvoir réaliser une simulation (SRES A2 par exemple) où seuls sont imposés les émissions de CO₂ d'origine fossile et les cartes spatiales d'étendues de

la déforestation. Le modèle couplé climat-carbone-land-use calculera les flux de carbone océaniques et continentaux naturels, fonctions du climat et ceux associés à la déforestation afin de pouvoir calculer l'évolution du CO₂ et le changement climatique correspondant.

4.2. Nouveaux développements

Ensuite, les développements en cours autour de la biogéochimie marine d'une part et de la biosphère continentale d'autre part seront étendus à l'échelle globale si nécessaire, validés et introduits dans le modèle couplé. Il s'agit, pour la biogéochimie marine, d'intégrer la biogéochimie des zones d'upwelling (en particulier, les émissions de N₂O), d'un modèle en quotas (au lieu de l'approche redfieldienne classique) pour le carbone et l'azote, de la représentation des chaînes trophiques supérieures, de la paramétrisation des processus méso-échelle pour le modèle global, du rôle des zones côtières dans les processus biogéochimiques, des émissions d'autres composés tels que DMS, CO,...

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

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

4.3. Intégration de l'ensemble des rétroactions

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

Au-delà du « premier challenge » qui consiste à simuler le climat du 20^{ème} et 21^{ème} siècle en prenant en compte le cycle du carbone et le changement d'utilisation des sols, nous proposons ici deux autres « challenges » à l'échelle de quatre ans qui permettront de fédérer les différents développements.

D'une part, en lien avec la proposition de la section chimie-climat, il s'agira d'étudier le bilan actuel et futur du méthane. La stabilisation actuelle du méthane depuis le début des années 1990 reste une question scientifique non résolue. Pour y répondre, et être en mesure de simuler l'évolution future du méthane, il faut fermer le cycle du méthane, c'est-à-dire quantifier ses sources et puits anthropiques et naturels. Il s'agit ensuite de calculer les changements futurs du méthane atmosphérique résultant de l'impact du changement climatique sur les sources naturelles de méthane. En particulier, les zones de permafrosts qui peuvent, en cas de fonte, libérer des quantités énormes de carbone sous forme de méthane et de CO₂ seront prises en compte. D'autre part, nous proposons d'étudier à l'aide de ce modèle climat-cycle les transitions glaciaires-interglaciaires. La grande question scientifique est de comprendre les changements glaciaire/interglaciaire de CO₂, CH₄,... Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir un modèle « système Terre » suffisamment complet (par exemple, qui inclut une représentation des

sédiments) et de tester si ce modèle peut rentrer ou sortir de glaciation en terme de climat, mais également en terme de variations de CO₂, méthane, poussières,... Ces questions scientifiques serviront de guide pour déterminer les versions de modèles à utiliser.

5. Enjeux et évolutions pour le système physique

Dans les prochaines années, la partie physique du modèle du système climatique de l'IPSL doit évoluer de façon à réduire les biais de la version actuelle et introduire des nouveaux processus qui sont actuellement seulement en développement et en test dans les composantes individuelles. De plus, les couplages entre les modèles apportent aussi une réflexion sur les interfaces physiques ou la continuité de certaines paramétrisations, comme les paramétrisation des flux à l'interface air-mer entre les différents milieux. Les principaux axes développés ci-dessous ont été identifiés comme des axes majeurs lors des journées de prospective de Trouville (16-17 novembre 2004). L'amélioration de la climatologie (section 5.1) passe par la réalisation de nombreux tests de sensibilité qui seront suggérés par les résultats des analyses proposées dans la section 2. Les autres thématiques (section 5.2) serviront de base pour démarrer de nouvelles version du modèle de climat.

5.1 Amélioration de la climatologie moyenne et des caractéristiques de la variabilité court terme.

Etat moyen

L'amélioration de la représentation du climat moyen continue à sous-tendre une partie des développements effectués sur les modèles. Comme la prospective du pôle est centrée autour des changements climatiques, cette amélioration doit se faire sur la base d'améliorations physiques plutôt que de corrections adhoc. Si le modèle IPSLCM4 représente un progrès considérable en termes de représentation du climat moyen (variations saisonnières des SSTs dans les tropiques, structure des précipitations, climat polaire, forçage radiatif des nuages) des défauts importants persistent. Ils concernent notamment un biais froid dans les moyennes latitudes, une mauvaise représentation des moussons indienne et africaine, ainsi qu'une circulation thermo-haline trop faible. Une résolution plus fine du modèle d'atmosphère pourrait améliorer les biais froids des moyennes latitudes mais des problèmes dans la représentation des nuages ou des échanges turbulents à l'interface océan/atmosphères ne sont pas à exclure. Une attention particulière sera portée à la représentation de la densité foliaire (LAI), qui conditionne à la fois les bilans radiatifs, thermiques et hydriques des régions continentales. Une phase préalable sera l'évaluation de la capacité du modèle couplé à représenter correctement les variations spatio-temporelles du LAI, sachant que le comportement du modèle n'a pour le moment été testé que dans des configurations forcées. Il s'agira également de comprendre comment améliorer la représentation des flux d'eau douce dans la région du Labrador, qui semble être à l'origine du défaut de formation d'eau profonde dans cette région. Une autre piste fait intervenir les interactions entre la dynamique de la glace de mer et l'océan. Pour les précipitations de moussons, qui ont un maximum trop proche de l'équateur avec une circulation de basse couche trop zonale et un continent surchauffé, plusieurs pistes sont envisagées (processus continentaux, cycle diurne de la convection, mélange vertical de moment horizontal, biais chaud océanique sur le Golfe de Guinée, résolution spatiale, etc.). La campagne AMMA devrait permettre de combler un certain nombre de manques au niveau des données, concernant notamment les processus de couplage avec la surface.

Variabilité

La bonne représentation de la variabilité climatique à différentes échelles de temps est également essentielle pour l'étude du changement climatique et de nombreux développements et études seront dévolus à ces aspects dans les années qui viennent. Du fait de son poids dans la variabilité climatique, on continuera notamment à essayer d'améliorer la représentation de l'ENSO dans le modèle. La simulation de l'ENSO avec IPSLCM4 est relativement réaliste à la

fois en termes d'amplitude et de structures. Point très positif, le comportement d'ENSO semble changer au cours des décennies. En revanche, comme dans beaucoup de modèle, le poids des périodes courtes (2-3 ans) est surestimé. L'amélioration de ce point pourrait passer, entre autre, par un accroissement significatif de la résolution du modèle.

Un autre sujet privilégié sera l'étude des échelles intra-saisonniers et du lien entre variabilité intra-saisonnier (oscillations de Madden et Julian) et variabilité (Moussons, El Niño). Le couplage avec l'Océan, qui demande à ces échelles de temps une bonne résolution verticale de la couche de mélange océanique et la prise en compte du cycle diurne de l'ensoleillement (formation de « warm layers »), est un facteur important de cette variabilité intrasaisonnier. Cette variabilité doit être correctement décrite par le modèle couplé pour que l'on puisse étudier son origine physique, son impact sur la prévisibilité saisonnière et son rôle dans la variabilité du climat. Les données de l'expérience Vasco-Cirene permettront d'évaluer la représentation de ce couplage aux échelles intrasaisonniers dans l'Océan Indien. Les moussons Indienne et Africaine se caractérisent aussi par des ruptures intrasaisonniers (démarrage des différentes saisons des pluies, occurrence de séquences sèches importantes au sein des saisons des pluies) et par une variabilité interannuelle qui ont un impact important sur les ressources en eau, les rendements agricoles et la vie des populations locales. Cette problématique sera au cœur des études menées dans le cadre de la campagne AMMA.

Différentes études ont mis en évidence l'existence d'une oscillation bisannuelle (TBO : Tropospheric Biennial Oscillation) dans les variations de nombreuses variables climatiques troposphériques observées dans la zone tropicale. Des phénomènes climatiques majeurs tels que l'Oscillation australe (et sa conséquence El Niño), ou encore la mousson asiatique, possèdent un rythme bisannuel plus ou moins marqué selon les périodes historiques. Il semble à l'heure actuelle que ce signal soit en partie lié à l'Oscillation Quasi-Biennale. Nous proposons d'étudier ces liens, ce qui demande d'améliorer la représentation de la dynamique équatoriale et la représentation de la QBO dans la version stratosphérique de LMDZ. Des études similaires sont aussi entreprises aux moyennes latitudes pour comprendre et mieux représenter les oscillations à l'échelle décennales. Des études récentes suggèrent en effet qu'un déplacement vertical comparable à celui de la QBO intervient dans la propagation vers le bas de modes annulaires sur une échelle de quelques jours. Dans la troposphère, ces modes ressemblent beaucoup à l'Oscillation Arctique et/ou à l'oscillation Nord Atlantique.

5.2 Nouveaux développements

Rétroactions nuageuses, couche limite et cycle diurne

La modification des nuages et du forçage radiatif associé restent une des plus grosses sources d'incertitude concernant la réponse du climat à une perturbation naturelle ou anthropique. Des développements amont ont été entrepris ces dernières années sur la représentation de la convection et des nuages dans la composante atmosphérique du modèle (Modèle du thermique, Hourdin et al., 2002, modification de la représentation de l'entraînement dans le schéma d'Emanuel, Grandpeix et al., 2004, développement d'un modèle de nuages couplé à la convection, Bony et Emanuel, 2001, développement d'un modèle des courants de densité sous les orages). Ces développements seront à la base du nouveau bloc de paramétrisations couche-limite/convection/nuages du modèle de climat. Ces développements devraient permettre de franchir un cap dans la représentation des nuages et de s'attaquer à un biais endémique des modèles de climat : la mauvaise représentation du cycle diurne de la convection continentale (avec un maximum vers midi dans les modèles et en fin de journée dans la réalité). Ce biais est problématique pour l'étude de la variabilité aux courtes échelles de temps, pour les mécanismes de changement à long terme du climat (rétroaction radiative des nuages) et pour le lien entre modèles et observations.

L'utilisation d'un océan résolvant le cycle diurne de la couche mélangée océanique (haute résolution verticale et paramétrisations adaptées) devrait également permettre d'étendre cette étude du cycle diurne de la convection aux régions océaniques. Le modèle ORCA a été testé dans des versions à très haute résolution verticale afin de représenter correctement les premiers

mètres d'océan. Ce raffinement est important à la fois pour le cycle diurne et pour la représentation de couches stables de quelques mètres qui peuvent se créer sur les océans tropicaux et jouer un rôle important dans certains modes de variabilité.

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

Le développement d'une version du modèle couplé incluant ces différents développements est une des priorités pour la nouvelle version du modèle à l'échelle de 4 ans. Il est également prévu de réaliser une version spécifique pour étudier les régions tropicales. Les modèles de l'IPSL ont été développés sur des grilles paramétrables, qui permettent de raffiner la résolution sur une région du globe. Dans le cadre de AMMA et VASCO, des versions des modèles LMDZOR (atmosphère-surfaces continentales) zoomées, avec une résolution d'une 50aine de kilomètres sur les régions d'intérêt seront développées. Un couplage avec un océan régionalisé à haute résolution est envisagé.

Couplage avec les modèles de calotte et de glace de mer

Plusieurs processus des régions polaires jouent potentiellement un rôle important dans la sensibilité climatique. Les études menées à l'IPSL sur ces régions se font en forte interaction avec le LGGE à Grenoble pour la représentation du climat de ses régions et le couplage avec le modèle de calotte de glace développé par C. Ritz, et avec l'Université Catholique de Louvain la Neuve pour le modèle de glace de mer incorporé dans IPSLCM4.

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

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

Hydrologie des surfaces continentales

L'hydrologie des surfaces continentales est au cœur des questions de société en rapport avec le changement climatique. Les rétroactions liées à l'albédo de la neige font partie des incertitudes importantes des projections climatiques. La bonne représentation de l'hydrologie et du routage de l'eau vers les océans est également importante pour le couplage océan/atmosphère. Un enjeu pour le système couplé est de prendre en compte un certain nombre de raffinements du modèle ORCHIDEE qui n'ont été jusqu'à présent testés qu'en mode forcé. On inclura en particulier 1) un modèle hydrologique multi-couches (de Rosnay et al. 2002) associé à un modèle de routage de l'eau avec gestion de l'irrigation (de Rosnay et al. 2003) qui nous permettent de simuler de façon réaliste le cycle de l'eau continental (Ngo-Duc et al. soumis), 2) une représentation

interactive du cycle foliaire (Krinner et al. in press) conduisant à une bonne variabilité saisonnière et interannuelle des flux d'eau, de chaleur et de carbone échangés avec l'atmosphère (Ciais et al. subm.), 3) une meilleure formulation de l'albédo de la neige, tenant compte à la fois de la présence de végétation, du métamorphisme du manteau neigeux (taille des grains), et de la pollution (carbone suie), 4) une paramétrisation du gel du sol, selon la formulation décrite dans (Poutou et al. 2004) qui affecte les bilans hydrologiques et thermiques des sols, et par voie de conséquence le cycle du carbone, 5) une paramétrisation des lacs, dérivée de celle développée par Krinner (2004).

Couplages et interfaces

La représentation du couplage entre systèmes physiques en général, et entre l'atmosphère et les surfaces océaniques ou continentales n'est pas une question close. Nous continuerons à envisager des approches originales pour ces différents sujets dans les années qui viennent. Notons en particulier la possibilité de réactiver l'approche dite de la « physique délocalisée » dans laquelle le changement de grille s'effectue non pas entre l'océan et l'atmosphère mais entre les composantes « physique » et « dynamique », au sein du modèle d'atmosphère. Cette approche permettrait d'éviter les problèmes provenant de l'existence de mailles mixtes, océan/continents, au niveau des côtes. On étudiera également l'importance de la résolution spatiale du modèle atmosphérique et le possible développement de paramétrisation permettant de coupler un modèle d'atmosphère à un modèle d'océan résolvant les tourbillons. Pour la prise en compte du cycle diurne dans le modèle couplé, il sera nécessaire d'envisager un couplage avec une fréquence temporelle suffisamment fine. Les nouvelles paramétrisations atmosphériques, avec une représentation explicite des structures méso-échelles de la couche limite convective et une représentation des rafales de vent sous les orages, devraient également pouvoir être utilisées pour prédire l'état de la mer et contribuer aux développements de nouvelle paramétrisation de flux entre l'océan et l'atmosphère. Une première étape en ce sens sera réalisée par des études de sensibilité aux incertitudes des paramétrisations des flux.

6 Evolution du modèle du système climatique de l'IPSL des outils et de l'infrastructure

6.1 Evolutions majeures du modèle système terre

Pour atteindre les objectifs scientifiques décrits ci-dessus, il est nécessaire de faire évoluer le modèle de l'IPSL dans plusieurs directions complémentaires.

A partir de la version de référence utilisée actuellement pour les scénarios du GIEC, plusieurs développements et chaînes traitées en parallèle nous permettront dans les 2 à 4 ans à venir de considérer les principales rétroactions entre le climat et les cycles biogéochimiques. Nous avancerons ainsi vers l'intégration dans le modèle système Terre de l'ensemble des composantes. Ces configurations comprennent :

- < L'intégration du cycle du carbone (configuration IPSLCM4 LOOP) ;
- < La prise en compte de l'utilisation des sols (extension de IPSLCM4 LOOP) ;
- < L'intégration du modèle INCA (configuration IPSLCM4 INCA).

Pour réaliser l'intégration des cycles biogéochimiques il faut pouvoir échanger les différents constituants entre les différents modèles, ce qui demande de modifier les interfaces des modèles, et éventuellement de transporter les espèces dans l'océan ou l'atmosphère. Ces modifications apportent aussi de nombreux changements dans la gestion des simulations.

Parallèlement des modifications de la partie physique du modèle ont démarré pour :

- < réaliser le scénario A2 du GIEC à plus haute résolution (facteur 4 pour l'atmosphère) ;
- < coupler le modèle de climat avec le modèle de calotte de glace du LGGE, de façon asynchrone dans un premier temps, puis de façon synchrone.

Dans un deuxième temps, l'objectif à 4 ans est de disposer d'une nouvelle version du modèle résolvant le cycle diurne, et prenant en compte les améliorations des différentes composantes. Cette nouvelle version aura une plus grande résolution horizontale et verticale. La version minimale envisagée doit permettre de représenter de façon satisfaisante les passages dépressionnaires des moyennes latitudes, ce qui amène à une résolution de l'ordre de 2 degrés pour l'atmosphère et 0.5 degrés pour l'océan. De même, la résolution minimale sur la verticale comprendra 50 niveaux verticaux dans l'atmosphère pour représenter correctement la stratosphère, et 70 niveaux verticaux pour l'océan, contre les 30 niveaux actuels, ce qui semble nécessaire pour représenter correctement le cycle diurne et l'évolution des couches de mélanges fines. Cette version sera mise au point par étape en notant que nous devons dans la période intermédiaire prévoir une version avec une plus haute résolution verticale dans l'atmosphère pour de nombreuses études faisant intervenir les interactions entre la chimie et le climat. Selon les moyens de calcul disponibles et l'avancée des projets sur le Earth simulator une version à très haute résolution horizontale et verticale sera développée.

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

Enfin, des configurations spécifiques de grille seront développées. Pour des études régionales, la version zoomée (résolution raffinée sur une partie du globe) sera utilisée. Il est envisagé l'utilisation de modèles emboîtés pour l'océan. Pour la paléoclimatologie, des configurations avec des répartitions anciennes des continents, et avec des grilles océaniques adaptées, seront développées. Pour les climats très anciens, le schéma de rayonnement sera adapté à des concentrations très élevées de CO₂. A court terme :

6.2 Parallélisation

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

Nous ferons ensuite l'assemblage des versions parallèles des composantes du modèle de l'IPSL avec le coupleur parallèle OASIS, en profitant de l'expérience acquise sur le Earth Simulator ou avec d'autres modèles. Cette étape franchie, l'intégration de la modélisation du cycle du carbone, de la chimie atmosphérique ou des aérosols demandera encore du temps mais ne posera pas de problème spécifique. Du fait des résolutions relativement faibles utilisées en modélisation du climat, nos codes sont efficaces pour des nombres réduits de processeurs (quelques dizaines) ce qui conduit aujourd'hui encore à privilégier des architectures vectorielles/parallèles, dont le processeur unitaire est très puissant. Dans le futur, il faudra évoluer vers une version capable de tirer pleinement profit des architectures à plusieurs

centaines, voir milliers, de processeurs. Cela impliquera probablement une modification profonde de la résolution de la dynamique atmosphérique.

6.4 Evolution de l'infrastructure

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

Distribution des résultats de simulations longues et évolution du post-traitement

Compte tenu de l'intérêt naturel, tant de la communauté « études climatiques » que celle des « études d'impacts », pour les résultats des simulations longues effectuées au pôle de modélisation, un effort important doit être mené pour rendre l'accès aux résultats le plus facile possible. La première étape de cette mise à disposition consiste en une mise en forme standard et bien documentée des résultats et par le développement d'utilitaires génériques permettant de transformer les sorties brutes des modèles. Cette étape est déjà bien avancée, en se basant sur le standard adopté et les outils développés par le PCMDI (Lawrence Livermore, USA) pour sa collecte de données pour le GIEC. La deuxième étape consiste en la mise à disposition des jeux de données ainsi transformés. Si un certain nombre de ces jeux seront disponibles par le biais du PCMDI, le pôle de modélisation se propose de mettre à disposition un plus large choix de variables et de simulations par le biais d'un serveur OPeNDAP/DODS (mécanisme permettant l'accès à des fichiers de données locaux par des sites extérieurs) et d'un serveur Web/LAS permettant de récupérer figures et jeux de données spécifiques (choisis sur une région ou un intervalle de temps donnés) par une interface conviviale. Cette mise à disposition se fera en collaboration avec Météo-France dans le cadre du programme ESCRIME (cf section 7). Sous réserve de moyens supplémentaires, des pré-analyses spécifiques, des synthèses de résultats et l'accès aux données brutes pourraient aussi être mis à disposition.

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

Evolution de l'outil intégré de compilation, exécution et de post-traitement (modipl)

Du point de vue de l'évolution de l'outil intégré de compilation, d'exécution et de post-traitement, les évolutions prévues concernent :

- < L'environnement d'accès et de compilation du modèle pour qu'il reste facile à utiliser et à modifier, que l'on travaille sur une composante ou sur plusieurs, en activant ou en supprimant des rétroactions,
- < Le portage et l'optimisation de l'environnement sur tous les calculateurs accessibles ou prochainement accessibles;
- < L'environnement des configurations pour faciliter les branchements/débranchements de couplage existants ou non, pour intégrer de nouvelles paramétrisations;

- < L'environnement d'exécution pour faciliter le suivi des simulations y compris les simulations d'ensemble, en automatisant leur suivi graphique, les pages WWW descriptives, ...
- < L'accès aux résultats pour faciliter les analyses spécifiques.

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

6.5 Besoins en moyen de calcul

Les études menées à l'IPSL ont besoin de ressources en calcul importantes. A l'heure actuelle, un an de couplé coûte 7h de CPU vectoriel et 3 Go de mémoire pour 5 Go de fichiers de sorties. Ajoutons la chimie (100 traceurs, 200 réactions) et la stratosphère (50 niveaux), une année simulée nécessite alors 100h CPU, 14 Go de mémoire et 10 Go de fichiers. Les projets scientifiques menés à l'IPSL demandent d'être capable d'accroître nos systèmes dans plusieurs directions à la fois qui vont toutes accroître les ressources nécessaires (calcul, mémoire, espace fichiers, outils d'analyse, ...), comme en témoigne la prospective. Les évolutions les plus contraignantes vis à vis des ressources de calcul concernent l'augmentation de la résolution horizontale et verticale, l'augmentation des longueurs des simulations, la généralisation des simulations d'ensemble et l'augmentation du nombre de membres de ces ensembles, la complexification des composantes (plus d'espèces chimiques, plus de processus physiques, ...). Nous souhaitons rester actifs dans la définition des besoins en calcul intensif de notre communauté (cf rapport du groupe GEPCI2). Nous soulignons simplement ici les besoins en ressources de calcul nécessaires pour les différentes études demandent de bénéficier dès maintenant de l'équivalent de 100 processeurs NEC, et du double dans 2 ans. Il est également indispensable de retrouver et garder un juste équilibre entre les ressources calcul et les ressources de stockage et de post-traitement des résultats.

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

6.6 Coopérations internationales liées aux moyens en calcul intensif

Les études que nous menons et certaines avancées scientifiques qui en découlent sont extrêmement dépendant des moyens en calcul. Les machines de type Earth simulator au Japon ouvrent de nouvelles possibilités, en particulier pour étudier les interactions d'échelles et représenter explicitement des phénomènes actuellement paramétrés. Plusieurs actions sont engagées pour être prêts à faire tourner nos modèles sur ces machines et pouvoir au besoin pallier le manque de ressource en calcul en France ou en Europe.

Earth Simulator

Afin de maintenir à jour notre expertise sur les différents calculateurs, nous avons engagé une coopération avec les Japonais pour porter et faire tourner sur le Earth Simulator nos codes prêts pour ce type d'architecture (vectoriel et parallèle à deux niveaux). Le travail s'est engagé au travers du mémorandum of understanding franco-japonais qui fait suite aux collaborations engagées par Pascale Delécluse sur l'étude du couplage océan atmosphère dans les régions tropicales. En particulier, la configuration du modèle d'océan ORCA05_LIM_300L (1/2° et 300

niveaux) a été implémentée sur le Earth Simulator. Elle tourne sur 20 nœuds soit 160 processeurs en 2h de temps CPU pour une année simulée. Notons que cette configuration était impossible à tester et valider sur l'IDRIS ou le CEA. Une maquette du modèle LMDZ parallèle a également été testée. Trois délégations, soutenue par un projet IPSL se sont ainsi rendu au Japon pour travailler sur le Earth Simulator et identifier les points à améliorer sur nos modèles et leur optimisation. Cette action doit se poursuivre et de nouveaux projets de collaboration avec le japonais sont à l'étude.

Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

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

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

7. Actions communes entre le pôle de modélisation et Météo-France (CNRM, CERFACS)

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

7.1 Les scénarios climatique

L'étude du changement climatique et le développement d'activités de recherche dédiés à la compréhension de ses changements ou à leur traductions aux échelles régionales se fait dans les deux groupes en forte interactions avec les projets nationaux ou internationaux. L'effort de coordination doit permettre de :

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

7.2 Vers des outils de modélisation communs

Différentes actions sont également en cours pour partager des modules numériques ou mettre en place une physique commune pour les modèles d'atmosphère. Dans les quatre

prochaines années, nous souhaitons favoriser les échanges de modules, comme par exemple le carbone du sol pour le modèle de surfaces continentales. L'effort le plus important reste l'effort autour de la mise en place de la physique commune. Le travail pour les années à venir concerne :

- < La mise en place d'une meilleure modularité dans la physique des deux modèles pour permettre un échange des différents "blocs" : onde, rayonnement, CLNC (Couche Limite, Nuage, Convection). Le travail commencera par l'écriture d'une interface commune pour les codes radiatifs, le test et le choix de nouveaux codes radiatifs.
- < L'introduction de nouveaux cas adaptés au projet AMMA dans le modèle unicolonne commun. Etude conjointe de ces cas. Analyse critique des différentes paramétrisations de couche limite, nuage et convection.

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

7. Organisation du pôle et moyens humains

7.1 Contours du pôle pour les quatre prochaines années

Dans les dernières années le pôle de modélisation s'était recentré autour du modèle couplé, de sa mise en œuvre scientifique et technique, pour les exercices type GIEC et les études dérivées. Les journées de prospective de Trouville des 16 et 17 novembre 2004 ont montré la richesse scientifique et la volonté de monter une véritable dynamique scientifique. On peut signaler en particulier signaler l'émergence (au travers d'un projet IPSL) du groupe stratosphère et de la mise en place d'un atelier tropical. Le pôle de modélisation n'a donc pas simplement vocation à fournir un service de développement de modèles. Il doit pouvoir faire évoluer ces outils en fonction des priorités scientifiques, et ce, en forte interaction avec les personnes des différents laboratoires. A l'issue de cette prospective, il est possible de réaffirmer que les activités du pôle de modélisation du climat concernent toutes les personnes qui :

- < développent les différentes composantes du modèle du système climatique de l'IPSL (océan, glace de mer, atmosphère, surfaces continentales, cycle du carbone, chimie et aérosols, biogéochimie marine);
- < réalisent et analysent des simulations avec l'une ou plusieurs composantes du système climatique de l'IPSL;
- < analysent des simulations de référence mises à disposition d'une large communauté

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

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

- < Une refonte du conseil scientifique du pôle de modélisation dès le début 2005;
- < Une meilleure définition des missions des différents groupes de travail;
- < La diffusion de l'information sous forme de lettre d'information;
- < Un accès facile via le serveur web à l'ensemble de l'activité;
- < Une utilisation plus systématique des notes de l'IPSL pour faire connaître l'activité et partager l'expertise (études particulières, nouveaux développements, rapport de stages);
- < Une meilleure organisation du travail des ingénieurs participant aux activités de développement, évolution, mise en œuvre et pérennisation des modèles, des outils associés et de l'infrastructure;
- < Une meilleure visibilité des travaux effectués à l'IPSL vis-à-vis de l'extérieur.

7.2 Moyens humains

Une partie des difficultés rencontrées dans les dernières années provient d'un sous-dimensionnement des moyens humains par rapport aux objectifs affichés. La force de l'IPSL est de regrouper dans une même structure de nombreux spécialistes. La faiblesse est que chaque thématique est traitée avec un nombre limité de personnes. Il devient donc prioritaire de bien renforcer dans les différents laboratoires de l'IPSL les activités de recherche pour lesquels les couplages et l'évolution des modèles sont au cœur des préoccupations. Nous avons en particulier un sous potentiel de chercheurs impliqués dans le développement, l'application et les études du système physique.

Au niveau des ingénieurs, les différents organismes ont répondu à notre appel, et plusieurs personnes ont rejoint les effectifs dans les différents laboratoires et à l'IPSL. Les systèmes que nous utilisons sont de plus en plus complexes et il faut absolument continuer cet effort si l'on veut pouvoir mener de front dans les années à venir :

- < l'exploitation d'une version de modèle;
- < la possibilité d'utiliser les différentes composantes dans des configurations très variées;
- < le développement de nouvelles paramétrisation ou la refonte des modèles;
- < la construction d'un modèle système terre;
- < la diffusion des modèles et des résultats des simulations;
- < la veille technologie pour anticiper le futur et développer les outils adaptés.

L'équipe d'ingénieur de l'IPSL n'a pas vocation à grossir indéfiniment, et l'organisation actuelle demande un bon équilibre entre les ingénieurs répartis dans les laboratoires et les ingénieurs IPSL rattachés au pôle de modélisation. Pour les quatre prochaines années nous avons besoins de renforcer les ingénieurs de la façon suivant (sans ordre de priorité) :

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