

Habilitation à diriger des recherches

Les processus de surface à l'échelle globale
et leurs interactions avec l'atmosphère.

Jan Polcher

Proposition de Jury :

Alain Perrier	Professeur INAPG	Rapporteur
Bryant McAvaney	Senior Scientist, BMRC, Australie	Rapporteur
Jean-Luc Redelsperger	Directeur de Recherche, CNRS	Rapporteur
Katia Laval	Professeur Paris VI	Examineur
Gérard Mégie	Professeur Paris VI	Examineur
Serge Planton	Ingénieur Météo-France	Examineur
Paul Caseau	Académie des Technologies	Invité
Robert Sadourny	Directeur de Recherche, CNRS	Invité

Date de soutenance prévue : 10 Septembre 2003

Table des matières

1	Introduction	6
2	La relation entre les modèles de surface et les observations	9
2.1	Quelques définitions	10
2.2	Le cas de l'humidité du sol dans les schémas de surface	14
2.3	L'utilisation des variables non-observables	17
3	Développement du modèle de surface	22
3.1	Vers des modèles de surface vert	23
3.2	L'interaction avec l'atmosphère	24
3.3	L'interaction du système racinaire avec l'humidité du sol	28
3.4	La diffusion de l'eau dans le sol	29
3.5	Routage de l'eau par les fleuves et les rivières	30
3.6	Plaines d'inondation et irrigation	32
3.7	Perspectives	37
3.7.1	l'évolution d'ORCHIDEE	37
3.7.2	La validation d'ORCHIDEE	39
4	Interactions surfaces-atmosphère	42
4.1	Processus de surface et changement climatique	44
4.2	L'utilisation de modèles régionaux pour l'étude des interactions	49
4.3	Le rôle des surfaces continentales dans la variabilité climatique	52
4.4	Perspectives	57
5	conclusion	61
5.1	Curriculum vitae	74
5.2	Production scientifique	76
5.2.1	Revue à comité de lecture	76
5.2.2	Contributions à des ouvrages	79
5.2.3	Actes de conférence	79
5.2.4	Conférencier invité	80

5.2.5	Lettres d'information	80
5.2.6	Logiciels publiés	81
5.3	Autres activités liées au métier de chercheur	81
5.3.1	Direction de thèses	81
5.3.2	Encadrement	81
5.3.3	Enseignement	82
5.3.4	Organisation de conférences	82
5.3.5	Presse écrite et audiovisuelle	83
5.3.6	Editeur	83
5.3.7	Animation et administration de la recherche	83

Chapitre 1

Introduction

Dans ce mémoire, préparé en vue d'une habilitation à diriger des recherches, je désire présenter les recherches que j'ai effectuées depuis ma thèse qui portait sur la sensibilité du climat tropical à la déforestation (Polcher, 1994). C'est au cours de cette thèse que j'ai réalisé que les schémas de surface sont des modèles indépendants, mais que leur justification vient directement du couplage avec l'atmosphère et de leur intégration dans les modèles du système terre. Pour mieux montrer cette émancipation, je propose de renommer les schémas de surface (Land-Surface Schemes) en modèles de surface (Land-Surface Models) indiquant ainsi que ces outils numériques sont à placer au même niveau que les modèles de circulation générale océanique et atmosphérique dans la hiérarchie des modèles utilisés pour l'étude du changement et variations climatiques. Même si ces modèles de surface ont beaucoup en commun avec les outils utilisés par les agronomes, les hydrologues ou la communauté de la télédétection, ils ont la particularité d'avoir été développés dans le but de s'intégrer dans une modélisation globale et en se focalisant sur l'interaction entre un grand nombre de processus géophysiques.

C'est dans cette perspective que j'ai choisi le plan qui structure cette description de mes travaux scientifiques et la prospective que je propose pour les années à venir. En premier lieu, (Chapitre 3) je décris l'évolution du schéma de surface du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (LMD) qui est devenu le modèle de surface de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) et qui couvre aujourd'hui plus de processus que juste les interactions physiques entre la surface et l'atmosphère. Un point clef dans cette transition est la définition d'une interface standard qui permette de séparer numériquement la surface de l'atmosphère sans imposer de limites sur la physique ou la biogéochimie que l'on veut décrire. L'intégration des processus de surface dans le système climatique est abordé dans le chapitre 4. La présentation de mes travaux sur l'interaction surface atmosphère a été guidée par mon souci d'évaluer et de comprendre le réalisme du couplage des modèles de surface et d'atmosphère et la sensibilité de ce couplage aux perturbations. Cette

incertitude dans l'interaction entre les deux milieux est une motivation majeure pour les développements des modèles de surface qui sont exposés dans le chapitre 3. Ces deux chapitres se terminent sur des perspectives qui couvrent d'une part les évolutions du modèle et de l'autre les stratégies envisagées pour mieux comprendre les interactions surface atmosphère.

Dès le début de mes activités dans ce domaine de recherche, s'est posé la question de la signification des variables simulées par nos modèles. Depuis la première inter-comparaison, qui a été faite en Europe (Polcher et al., 1996), la validité de la comparaison des variables simulées par les différents schémas, telles que l'humidité du sol par exemple, a fait l'objet de débats. Toutes les tentatives d'expériences de sensibilité multi-modèle que nous avons tenté depuis les études de déforestation ont aussi soulevé des discussions sur la signification de perturbations comparables dans différents modèles. Je me suis donc permis d'exposer dans le premier chapitre de ce mémoire un petit travail original d'épistémologie. Le but est de profiter de ce bilan de mes activités de recherche pour le placer dans une réflexion plus large sur la façon dont nous construisons nos modèles géophysiques et d'essayer d'y trouver une réponse à la signification des variables simulées et plus généralement des résultats que nous obtenons.

Ayant commencé ma formation de chercheur en physique théorique, j'ai toujours été déçu par le manque d'intérêt que portent, en général, les physiciens envers les problèmes géophysiques. La raison la plus évidente que l'on peut avancer est que l'étude du système terre se base essentiellement sur des théories physiques qui ont été établies au cours du XIX^{ème} siècle. Le travail effectué pour ce mémoire m'a fait comprendre que même si nous basons notre travail sur la physique classique, nous avons rompu avec un des grands principes qui ont dominé cette science jusqu'au au XX^{ème} siècle : pour nous, l'homme fait partie du système physique. Le système climatique ne peut se traiter comme une expérimentation physique que nous observerions et nous décririons de l'extérieur et ceci pour au moins deux raisons :

- Devant l'impossibilité de suivre chaque molécule, ou chaque atome dans le système climatique nous avons choisi de décrire le système à l'échelle humaine et donc macroscopique. En liant la description du système à l'observateur, nous sommes passés d'une exo-physique à une endo-physique avec toutes les conséquences que nous avons déjà vu en mécanique quantique.
- Vu que l'activité humaine influence le climat, notre description et notre compréhension du système influence les décisions humaines. Il nous faudrait donc atteindre l'auto-prédiction du système pour arriver au déterminisme du système climatique si chère à Pierre Simon Laplace et qui est à la base de la physique classique.

Il apparaît donc clairement que l'étude du climat n'est pas la simple utilisation de

la physique classique mais qu'au contraire c'est le développement d'une physique moderne qui tente de décrire le système à l'échelle de l'observateur et en intégrant son interaction avec l'observateur.

Je propose ce mémoire d'habilitation qui décrit ma contribution au modèle de surface de l'Institut Pierre Simon Laplace et à l'effort de l'institut de se doter d'un vrai modèle du système Terre. Néanmoins je met en doute l'application à l'étude du système géophysique des hypothèses de Pierre Simon Laplace sur le déterminisme. Je propose donc à mes collègues de l'institut de réfléchir à un leitmotiv qui montrerait la modernité de notre activité scientifique malgré la référence à Pierre Simon Laplace !

Chapitre 2

La relation entre les modèles de surface et les observations

Une des questions centrales de la modélisation des processus de surface est de savoir si celle-ci peut se reposer sur des quantités observables ou non. La réponse à cette question déterminera entre autres si les variables simulées peuvent se comparer quantitativement aux observations, et par la même si une représentation des processus de surface peut être intrinsèquement meilleure que les autres. Au-delà de la modélisation, les possibilités de l'assimilation de données à la surface seront déterminées par la réponse à cette question.

On ne peut déterminer la relation entre la réalité des processus de surface et la représentation que nous pouvons nous en faire dans le cadre de la géophysique. Il faudra pour cela faire appel à l'épistémologie et en particulier aux réflexions qui ont été menées à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} lors de l'émergence de la théorie de la relativité et de la physique quantique. C'est à ce moment que, pour expliquer les nouvelles découvertes, les physiciens ont eu recours dans leurs théories à des variables non-observables. Un grand débat s'est engagé qui a généré une réflexion plus approfondie sur la légitimité des différentes représentations mentales de la réalité que nous nous faisons. Nous allons ici tenter de comprendre les liens qui existent entre les observations et l'image que nous nous faisons des processus de surface dans nos modèles. L'échelle spatiale que nous considérerons sera suffisamment grande pour inclure des hétérogénéités significatives, c'est-à-dire au-delà du mètre. Il est essentiel de passer des considérations microscopiques sur le devenir de l'eau, à l'échelle macroscopique. En effet, le traitement microscopique de l'eau n'est pas pertinent pour l'étude du système climatique et dans l'état actuel de nos connaissances, le démon de Laplace n'a plus lieu d'être. Cette hypothèse de Laplace stipule qu'un humain, et non un dieu, pourrait acquérir une connaissance complète de l'état initial du système lui permettant ainsi de déterminer tous les autres états. Aujourd'hui le démon de Laplace n'est plus défendable, nous avons reconnu que le

fait que cet humain fasse partie du système, lui enlève toute possibilité de connaître cet état initial. L'étude du système climatique ne peut donc être abordé qu'en prenant en compte l'échelle humaine. Une approche "Endo-physique" s'impose donc et on peut pas aborder ce sujet en se considérant extérieur au système (l'approche Exo-physique) comme le fait le physique classique.

Nous nous plaçons donc résolument à l'échelle macroscopique, et donc dans l'image du monde que nous donne nos sens pour tenter de le comprendre et de le prédire. Il ne sera pas nécessaire de faire intervenir dans cette discussion les interactions qui peuvent exister entre les hétérogénéités de surface et l'atmosphère.

L'humidité du sol sera prise ici comme exemple de variable pour laquelle nous essayerons de déterminer si elle est observable ou non. Des efforts considérables sont déployés aujourd'hui pour tenter de la mesurer à grande échelle et il est donc important de se demander quel est le lien entre une telle observation et les modèles que nous avons. Comme nous le verrons plus tard, l'humidité du sol est représentative de la plupart des variables d'état liées au cycle de l'eau sur terre.

2.1 Quelques définitions

Quand nous parlons "d'observable" ici, nous ne nous limitons pas à ce qui est perceptible par nos sens. La signification de ce terme est plus large et il englobe aussi les observations par déduction, comme on peut par exemple en obtenir en utilisant un instrument de mesure aussi complexe que l'on puisse l'imaginer. On pourra donc considérer le rayonnement ultra-violet comme observable, même s'il n'est pas directement perceptible par nos sens. Par contre la diffusion moléculaire ou le mouvement brownien des molécules ne sont pas observables, et nous ne pouvons que constater leurs impact sur les gradients ou la pression. Ces quantités sont le résultat des hypothèses faites par la théorie, et leur réalité physique n'est pas nécessaire. En géophysique, où à priori nous traitons dans le cadre des théories physiques classiques, l'existence de variables non-observables peut surprendre. Mais les théories physiques utilisées s'appliquent aux échelles microscopiques alors que la description que nous faisons du système terre est macroscopique. Il est donc possible que pour transposer ces théories physiques aux échelles utilisées en géophysique, nous ayons recours à des quantités conceptuelles que l'on ne peut pas mesurer. Cette définition des observables est encore assez vague, mais elle sera précisée par la suite à l'aide des exemples qui seront donnés.

Dans la description que Bergson fait de la représentation que nous nous faisons de la réalité dans son ouvrage "L'Évolution Créatrice" il choisit l'exemple suivant : "Que je dise "le sol est humide" ou "le sol n'est pas humide", dans les deux cas les termes "sol" et "humide" sont des concepts plus ou moins artificiellement créés par l'esprit de l'homme, je veux dire extraits par sa libre initiative de la continuité

de l'expérience" (Bergson, 1907, p291). Au delà de la réalité physique du sol et de son contenu en eau nous nous créons avec ces concepts une image qui nous permet d'échanger nos impressions avec autrui. Avec ces deux propositions nous n'exprimons que le fait que le sol contient une certaine humidité et que cela peut en être autrement. En aucun cas, l'existence d'un sol sec n'est exprimé ou un lien établi entre les deux par cette phrase. Nous avons donc ainsi posé la première pierre du modèle le plus simple qui soit de l'humidité du sol. Il nous permet d'exprimer l'impression que nous avons du monde qui nous entoure mais de façon purement qualitative. Il décrit bien une réalité physique mais dont nous ne pouvons dire à priori si elle correspond à une observable ou non.

Afin de pouvoir nous exprimer sur ce point, nous avons besoin de relations qui lient l'humidité du sol avec d'autres réalités du monde. Ceci revient donc à compléter le modèle qui contiendra d'un côté la qualité que nous avons tiré de notre expérience et de l'autre les relations que nous avons construites. Ce n'est donc que sur la base d'un modèle, que nous pouvons discuter de la pertinence d'une observation pour les concepts que nous avons créés. Max Planck exprime cette situation de façon très claire dans le passage suivant (Plank, 1933) : "La réponse à la question si une grandeur physique est en principe observable, ou si une certaine question a un sens physique, ne peut jamais être donnée à priori mais seulement du point de vue d'une certaine théorie."¹. Il apparaît donc que la réponse à la question de l'observabilité de l'humidité du sol, nécessite un examen détaillé des modèles qui sont utilisés pour décrire les processus de surface. C'est lors de la formulation de ces modèles que sont posées les définitions des variables, que leurs propriétés sont fixées et que donc les liens avec la réalité observable deviennent apparents.

Détaillons un peu plus les ingrédients qui forment nos modèles géophysiques. Pour cela nous nous baserons sur l'exposé que fait Bergson de nos mécanismes de conceptualisation. Afin de décrire le devenir des formes que nous avons créées à partir de notre expérience du monde qui nous entoure, nous avons deux grandes étapes à franchir. Tout d'abord il est indispensable d'identifier les qualités qui évoluent ou qui interviennent dans l'évolution du système. Pour ces qualités nous devons établir leurs variations potentielles afin de pouvoir les placer dans un contexte. Une des conditions que doivent remplir ces qualités est d'être divisibles à volonté afin que tous les moments soient équivalents et qu'aucune organisation interne n'existe. Si cette condition n'est pas remplie, nous nous retrouvons inévitablement confrontés au paradoxe de la tortue et d'Achille, de Zénon ². En effet, quand la

¹Denn die Entscheidung darüber, ob eine physikalische Größe prinzipiell beobachtbar ist oder ob eine gewisse Frage einen Physikalischen Sinn hat, läßt sich niemals a priori, sondern immer erst vom Standpunkt einer bestimmten Theorie aus treffen.

²Le paradoxe de la flèche de Zénon a été transposé par Lewis Carroll à une course entre Achille et la tortue. Achille parcourt d'abord la moitié de la distance qui le sépare de la tortue,

décomposition du mouvement d'Achille est organisé par le mouvement de la tortue, Achille ne peut pas rattraper la tortue. La seconde étape consiste à construire les liens qui relient ces qualités. Deux types de liens peuvent être construits. Tout d'abord, ceux que nous considérons être des lois et dont nous supposons qu'ils ont une validité universelle, ou alors de simples relations que nous ne supposons valables que dans le contexte d'un modèle. De cette architecture découlent les deux grands types de théories que nous connaissons en physique et qui sont discutées en détail par A. d'Abro (d'Abro, 1936). Nous allons ici les présenter brièvement, en montrant comment elles se transcrivent dans les modèles de la réalité que nous nous construisons.

1. Les modèles phénoménologiques font l'hypothèse que tous les éléments de la chaîne causale sont observables. L'exemple classique pour ce type d'approche est la théorie thermodynamique. C'est avec les théories phénoménologiques que la physique a commencé et acquis ses lettres de noblesse. Le procédé qui aboutit à ces théories est toujours le même : à partir d'observations une relation est "trouvée" et au fil des expériences, cette relation se confirme et prend le caractère de loi. Nous ne pouvons qualifier nos modèles géophysiques de phénoménologiques que s'ils sont basés sur des théories phénoménologiques ou s'ils sont basés sur des relations empiriques. Les modèles de prévision statistique sont des modèles phénoménologiques par essence. Le lien étroit avec les observations donne à ce type de modèle une grande force de conviction, mais il faut toujours se demander si les relations obtenues ont une validité générale. Ce type d'approche engendre un grand nombre de modèles dont on ne peut affirmer qu'ils sont tous bien indépendants les uns des autres.
2. Les modèles atomistes par contre acceptent l'existence de processus et de variables non observables dans les liens qui relient les quantités observables. La théorie cinétique des gaz avec les hypothèses sur le mouvement aléatoire des molécules peut être pris ici comme exemple. Ce type de théorie a commencé à être reconnu au cours de XIX^{ème} siècle et Boltzman en a été l'un des grands défenseurs (Boltzman, 1886). Dans cette approche, le développement de théories ou de modèles passe par la "construction" de relations entre observables en inventant une image de la réalité qui va au delà de ce que révèle l'expérience. Évidemment la construction de cette image n'est pas complètement arbitraire car elle doit se conformer aux lois existantes et être construite de façon à prédire des processus similaires non encore observés. Il faut garder à l'esprit que cette image n'est pas nécessairement unique et donc qu'elle doit pouvoir être remise en question à tout moment. Le grand avantage de cette approche est de pouvoir décomposer les liens complexes qui relient les obser-

ensuite il parcourt la moitié de la distance restante et ainsi de suite. D'après Zénon, Achille ne pourra jamais rattraper la tortue.

vables en processus plus simples que nous pouvons traiter par similarité avec des théories déjà existantes. Nos modèles géophysiques peuvent être qualifiés d'atomistes dès que nous procédons par exemple à un changement d'échelle par similarité.

Le nom de modèle atomiste proposé par Boltzman (Boltzman, 1886) en opposition aux modèles phénoménologiques sera gardé ici. Cette nomenclature reflète bien la conviction des défenseurs des modèles phénoménologiques que le monde visible peut s'expliquer par une seule théorie. Par contre pour les partisans des modèles atomistes il faudra considérer chaque processus indépendamment des autres avant d'essayer de les assembler pour former un tout.

Les deux types de théories utilisent aussi des lois universelles qui ont une position un peu différente et peuvent être considérées comme plus fondamentales. Les exemples les plus parlants que l'on peut prendre en géophysique, sont les équations de continuité ou de conservation. L'éminence que nous attribuons à ces lois nous vient du cartésianisme qui considère qu'elles font partie des lois universelles qui gouvernent l'action de Dieu. Elles sont donc plutôt du domaine de la métaphysique que de la physique. Leibniz donne l'explication la plus claire et la plus juste de ces lois de conservation (ici de l'énergie) : "Mais le décret de la sagesse divine de conserver toujours la même force et la même direction en somme y a pourvu" (Leibniz, 1686). Boltzman (1896) reconnaît la prééminence de ces lois fondamentales et signale qu'elles interviennent aussi bien dans la construction des théories phénoménologiques qu'atomistes.

La physique décrit un monde qui va au delà du monde visible que nous révèle nos sens. Elle tente de décrire le monde réel avec des théories de plus en plus abstraites et dont les phénomènes que nous observons ne sont que des cas particuliers. Dans cette vision de notre connaissance, les lois universelles font partie du monde réel et doivent donc intervenir dans tout type de théorie. La question de l'observabilité de l'humidité du sol peut donc s'élargir à une interrogation sur le monde décrit par la géophysique. Afin de représenter le système terre, avons-nous introduit, en plus des lois universelles, des qualités et des relations qui ne font pas partie du monde visible ? Ou plus généralement, est-il possible de décrire le monde géophysique sans avoir recours à des éléments qui vont au delà de ce qui est observable ?

Répondre à cette question n'est pas notre propos ici et nous nous limiterons au cas particulier de l'humidité du sol dans les schémas de surface actuels.

2.2 Le cas de l’humidité du sol dans les schémas de surface

Afin de déterminer si l’humidité du sol représentée par nos schémas de surface est une observable ou non, il nous faut donc déterminer si ces modèles sont basés sur des théories de type phénoménologique ou atomiste. Dans ce dernier cas il faudra examiner le schéma et décider si la variable en question fait partie des observables ou bien de l’image que nous nous faisons pour expliquer le lien entre les observables. Le modèle de Manabe (Manabe, 1969) sera le point de départ de notre analyse, vu que c’est le plus simple et que tous les autres en découlent d’une certaine façon.

Le but premier du modèle bucket proposé par Manabe (1969) était de clore les bilans d’eau et d’énergie. Il s’agissait de trouver un modèle qui puisse produire les flux d’évaporation et de chaleur sensible à partir des forçages atmosphériques tout en conservant l’eau et l’énergie. Manabe a choisi comme image du fonctionnement de la surface le seau d’eau en s’appuyant sur les travaux de Budyko (1958). Les flux sont donc les observables pour lesquels un modèle était cherché et l’humidité du sol ainsi que la fonction de stress hydrique ne sont que des variables intermédiaires qui *à priori* ne sont pas observables. Manabe a repris la qualité “humidité du sol” que Budyko avait définie en se basant sur son expérience, mais sans se limiter aux observations *in situ*. Il a aussi établi les variations potentielles de cette variable (de 0 à 150 kg/m^2 sur 1 mètre de sol) à partir des contraintes de son modèle (production de ruissellement à partir d’une certaine humidité) et non à partir d’observations. Il apparaît donc que ce modèle de surface est de type atomiste et que l’humidité de sol n’est pas une observable. Vu la façon dont elle a été construite et les limites qui lui ont été données, on peut affirmer que ce n’est pas une observable. Nous arrivons à ce résultat par l’examen des objectifs de l’auteur et les contraintes fortement réductrices qui en découlent sur la variable “humidité du sol”.

Pour la fonction de stress hydrique la même chose peut être démontrée. Elle est intimement liée aux choix qui ont été faits pour l’humidité du sol et pour l’évaporation potentielle, vu que c’est la combinaison des deux qui nous donne l’observable “évaporation”. La discussion de Milly (1992) sur le choix entre la formulation de Penmann-Montheith et celle dérivée de l’approche bulck de l’évaporation potentielle est très instructive. On voit bien qu’elle est le résultat de l’image que nous nous faisons de la réalité qui peut être modifiée tout en produisant l’évaporation. Les deux définitions de l’évaporation potentielle sont valables et l’une n’est pas intrinsèquement meilleure ou plus juste que l’autre. Mais le choix d’une définition contraint le choix de la formulation du stress hydrique si on cherche à préserver le comportement de l’observable “évaporation”. Si un des éléments de

la chaîne causale qui va du stress hydrique du sol à l'évaporation était observable, nous n'aurions plus le choix.

On peut maintenant se demander si tous les développements qui ont eu lieu dans la modélisation des processus de surface depuis le modèle de Manabe ont fondamentalement modifié la nature de la variable "humidité du sol". Les modèles ont toujours pour but de relier les flux d'énergie et d'eau quittant la surface avec les forçages atmosphériques tout en respectant la conservation d'énergie et d'eau. On doit s'interroger sur le raffinement qui s'est opéré sur l'image que nous avons du fonctionnement de l'humidité du sol et si celle-ci c'est suffisamment rapprochée de la réalité observable pour changer la nature de la qualité "humidité du sol".

Les développements qui ont été faits au cours des années 70 et 80, les modèles de Deardorff et Choissnel par exemple, avaient pour objectif d'améliorer l'évolution temporelle de l'évaporation. On a rajouté à l'image de l'humidité de sol qui avait été choisie par Manabe, un réservoir superficiel qui permet une réponse rapide de l'évaporation à un événement de pluie. On est donc resté dans l'approche atomiste sans tentative de rapprocher l'humidité du sol simulée d'une variable observable.

La question est plus ouverte si on examine les développements qui ont appliqué des modèles multicouches de diffusion de l'eau pour simuler l'humidité du sol aux échelles macroscopiques. Une des justifications était de rendre les modèles de surface plus physiques ! À la base des modèles multicouche se trouve la loi de Darcy qui a été établie pour un sol homogène et saturé. La théorie établie par Darcy en 1856 est un exemple typique de loi phénoménologique. Elle a été obtenue à partir d'observations de flux faites en laboratoire et ne comprend que des observables. Elle ne prédit par exemple pas la vitesse de l'écoulement vu que celui-ci dépend de la structure microscopique de la porosité du sol et donc de la connectivité et la position des chenaux qui sont présents. On peut comparer l'approche de Darcy à celle de la thermodynamique classique qui ne s'exprime pas sur le mouvement des molécules du gaz. À ce stade il est envisageable d'avoir une théorie de la diffusion de l'eau dans le sol qui tiendrait compte de la structure microscopique des sols tout comme le fait la théorie cinétique pour les gaz. Vu la complexité de la structure microscopique des sols il est probable qu'une telle théorie serait de type atomiste.

En 1931 la loi de Darcy a été étendue au cas non-saturé par Richards (Richards, 1931) en introduisant une dépendance de la teneur en eau dans la formulation de la conductivité ($K(\theta)$) et du potentiel matriciel ($h(\theta)$). Ces fonctions peuvent être estimées pour un certain nombre de sols, mais en aucun cas l'équation de Richards ne pourra représenter l'hystérèse qui existe dans les propriétés du sol entre les phases de remplissage et de vidage. Les fonctions $K(\theta)$ et $h(\theta)$ sont déterminées de façon expérimentale sur des échantillons de sol en mesurant les flux. Dû au fait que l'équation de Richards est une approximation, et à la difficulté liée à la détermination des paramètres des sols, il existe plusieurs jeux de fonctions de

conductivité et de potentiel matriciels. Elles approximent de façon différente le comportement observé proche de la saturation ou de l'assèchement total du sol.

En construisant une image de la diffusion en milieu non saturé par extension de l'équation de Darcy nous nous éloignons de la théorie phénoménologique. En effet l'équation de Darcy est insuffisante et donc les fonctions $K(\theta)$ et $h(\theta)$ sont des approximations de la réalité. Lors de leur détermination, un aspect du comportement du sol peut être privilégié par rapport à un autre. Il en découle qu'avec deux jeux de fonctions pour la conductivité et le potentiel matriciel on peut obtenir les mêmes flux mais avec des humidités du sol différentes. L'humidité du sol ainsi obtenue n'est donc valable que dans le cadre d'un choix de propriétés de sol. Cela montre donc bien qu'un modèle multicouche de diffusion de l'eau dans le sol ne nous permet pas d'obtenir une humidité du sol observable. Prendre un modèle phénoménologique comme base d'une vue plus générale du fonctionnement de la nature est justement la méthode de construction des modèles atomistes que propose Boltzmann (1886). Il défend la thèse que c'est la seule façon d'aboutir à une vue cohérente et unifiée du fonctionnement de la nature, même si pour cela nous ne pouvons plus nous limiter aux variables observables et que nous devons être disposés à changer ou à abandonner une image du fonctionnement de la nature dès que celle-ci s'avère insuffisante.

Jusqu'à présent, dans cette discussion, nous avons présenté un certain nombre d'arguments qui nous font penser que les théories utilisées aujourd'hui pour simuler l'humidité du sol sont de type atomiste et ne permettent donc pas de penser que cette variable est une observable. Le problème de la variabilité spatiale qui est présente aux échelles supérieures à quelques dizaines de mètres, n'a pas encore été abordé. Nous proposons de discuter ici l'inhomogénéité de la surface, en nous demandant s'il est envisageable aujourd'hui de développer une théorie de la variabilité du sol qui donnerait aux modèles de surface une humidité du sol observable. Si la réponse est négative nous devons en conclure qu'il est vain d'espérer simuler une humidité du sol observable dans les schémas de surface. Nous ne tenterons pas ici de discuter la possibilité pour l'esprit humain de décrire dans sa totalité la diversité des surfaces terrestres et de leur fonctionnement, car cela relève plus de la métaphysique que de la géophysique.

Le premier objectif de toute description de l'hétérogénéité sera d'établir des liens entre différents éléments de surface que l'on peut considérer comme homogènes et dont nous aurions une description parfaite et phénoménologique du fonctionnement. Cette étape est indispensable, vu qu'elle seule permet de procéder à une intégration spatiale de ce modèle parfait que nous supposons exister ici. Elle est aussi indispensable pour établir le lien entre une observation ponctuelle et les valeurs recherchées à plus grande échelle. Une théorie de la variabilité sous maille permet de passer d'une variable observable dans un modèle ponctuel à une obser-

vable à grande échelle. Afin de déterminer les éléments clefs qui sont nécessaires pour la construction d'une telle théorie, nous nous baserons sur l'exposé que Bergson fait de nos mécanismes de conceptualisation pour le cas particulier de l'humidité du sol.

Les deux qualités que nous pouvons identifier comme indispensables à la compréhension de la variabilité spatiale des propriétés du sol sont sa texture et sa structure. Pour toutes les deux, nous connaissons leurs domaines de variation potentiel et donc une quantification est envisageable. Par contre, il s'avère beaucoup plus difficile de les définir de sorte qu'elles soient sécables à volonté. La texture des sols a été divisée en un certain nombre de classes afin de faciliter la spécification des paramètres des équations de diffusion de l'eau. Mais cette façon de procéder définit une organisation interne qui interdit toute possibilité de construire un modèle d'intégration spatiale. En effet, si une théorie de la variabilité sous maille de la texture est construite avec une certaine classification, celle-ci ne sera pas applicable pour une autre classification. Une solution se dessine ici avec l'adoption par la communauté, de descriptions de la granularité du sol par des fonctions de distribution statistique, mais le lien possible avec les paramètres de diffusion reste encore à établir. Pour la structure du sol, le problème d'une quantification reste entier, et nous ne disposons même pas de classifications. Il paraît en effet difficile de mesurer ou de quantifier cette description de la structure microscopique du sol tellement elle est variable au cours du temps et dans l'espace.

Devant ces difficultés pour quantifier les qualités qui décrivent la variabilité spatiale des propriétés des sols, il nous semble qu'aujourd'hui une théorie phénoménologique qui permettrait l'intégration spatiale du fonctionnement des sols est hors de portée. Il est donc probable que les théories d'agrégation des paramètres ou des flux, qui sont hautement conceptuelles, et donc de nature atomiste, soient notre seul recours.

En confrontant l'état de l'art de la modélisation de l'humidité du sol, les théories de la connaissance, et l'histoire de la physique théorique, il apparaît que cette variable n'est pas une observable. Nos schémas sont de nature atomiste par le fait qu'il font appel à un certain nombre de quantités conceptuelles afin d'expliquer les liens qui existent entre les flux échangés avec l'atmosphère. Ces derniers constituent les observables qui motivent le développement des modèles des processus de surface.

2.3 L'utilisation des variables non-observables

La discussion ci-dessus peut paraître futile vu qu'elle ne changera pas la façon dont les schémas de surface sont conçus et développés. Mais il nous semble important, surtout en géophysique où les variables que nous manipulons dans nos modèles sont si proches de notre expérience de tous les jours, de bien préciser

leur signification en reconnaissant aussi leurs limites. Utiliser des variables non-observables dans une théorie est tout à fait légitime, et ne la remet nullement en question. Toutefois il est important de reconnaître cette limite au moment où la théorie est confrontée aux observations ou à d'autres approches. Dans ce qui suit, nous allons détailler les conséquences qui découlent du fait que l'humidité du sol n'est pas une observable.

Une fois le caractère atomiste des schémas de surface reconnu, l'existence d'une grande diversité de ces modèles semble tout à fait naturelle. Il n'est pas possible dans ce domaine de la géophysique de définir un modèle de référence, car par là même, une image de la réalité serait déclarée meilleure que les autres. La situation est par exemple différente pour les modèles de rayonnement (en ciel clair et sans aérosols) vu qu'une théorie phénoménologique existe et que les modèles peuvent être jugés par leur capacité à se rapprocher au mieux de cette théorie. Cet état des choses nous amène tout naturellement à organiser des inter-comparaisons. Celles-ci nous permettent de déterminer sur une région, pour une situation climatique donnée, quelle image de la réalité simule par exemple les meilleurs flux. Mais cela ne préjuge pas de la qualité des variables internes des modèles.

L'aspect conceptuel des modèles de surface impose aussi un certain nombre de contraintes sur les inter-comparaisons. Les variables qu'il est légitime de comparer entre les différents schémas sont celles qui interviennent dans les lois fondamentales, essentiellement les flux intervenant dans les équations de continuité. Il est intéressant de noter que ceci était la conclusion à laquelle la première inter-comparaison de schémas de surface (SLAPS) était arrivée (Polcher et al., 1996). En effet, il avait été constaté qu'il n'était pas possible de calibrer un modèle de façon à ce que pour des flux simulés comparables, l'humidité du sol soit similaire. L'humidité du sol n'étant pas une observable, elle ne peut pas être comparée directement entre modèles. Voici la conclusion que nous aurions pu tirer au moment du projet SLAPS. Les expériences de type PILPS (Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes) qui ont suivi, ont montré l'importance pour la communauté, de l'évaluation des flux dans les inter-comparaisons de modèles. Mais toutes les tentatives qui ont été entreprises de comparer les réservoirs ont échoué. RICE (Shao and Henderson-Sellers, 1996) avait pour objectif lors de son lancement, de comparer l'humidité du sol, mais une fois l'expérience en cours, il a été constaté que cela mènerait à un échec car les valeurs de l'humidité étaient trop différentes.

GSWP (Global Soil Wetness Project, Dirmeyer et al. (1999)) avait pour but de construire une climatologie de l'état hydrique des sols pour les années 1987-1988 en utilisant les forçages atmosphériques produits par ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) (Meeson et al., 1995). Dès le départ, le choix a été fait de ce concentrer sur le "soil wetness" (rapport entre l'humidité du

sol et son potentiel de variation) et non l'humidité du sol. Ceci a permis à ce projet de remplir un grand nombre de ses objectifs. Effectivement le "soil wetness", en normalisant la valeur de l'humidité du sol par son potentiel de variation, élimine une grande partie de l'aspect conceptuel de la variable. Un choix plus correct aurait été de comparer entre modèles, et avec les observations, la dérivée temporelle de l'humidité du sol. Cette variable étant utilisée dans l'équation de continuité, elle est une observable du système.

Si on se penche sur la validation des schémas de surface avec la conscience que la plupart des variables internes ne sont pas observables, le problème prend une nouvelle tournure. Les variables que nous pouvons comparer aux observations se limitent aux flux de l'équation de continuité de la conservation d'énergie. Vu qu'à l'échelle locale, l'observation de ces quantités est possible, la validation est aisée. À l'échelle régionale, continentale, ou globale, le problème se pose différemment, étant donné qu'un grand nombre des flux ne peuvent être observés pour des raisons pratiques. Les seuls flux que nous pouvons utiliser à ces échelles sont les débits des fleuves et les flux électromagnétiques. Ces quantités ont leurs limites et elles sont souvent affectées par des erreurs importantes, mais elles sont comparables avec leur représentation dans les modèles. Il est intéressant dans ce contexte de voir que l'équipe de Chris Milly (Milly and Shmakin, 2002a; Milly and Shmakin, 2002b; Shmakin et al., 2002) a utilisé le débit des fleuves pour valider son modèle. Ceci est certainement la façon la plus cohérente et la plus juste de valider un schéma de surface à cette échelle. Les autres variables qui peuvent être utilisées sont les flux de rayonnement solaire et tellurique à la surface. Pour toutes les autres quantités il faut d'abord déterminer si la comparaison est légitime. Un exemple qui peut être cité ici est la température de surface. La comparaison des températures radiatives dans l'infrarouge doit prendre en compte le fait que lors du passage du flux radiatif observé à la température, des hypothèses sont utilisées sur l'émissivité de la surface et la pénétration du rayonnement. Celles-ci peuvent différer des hypothèses utilisées dans le modèle. Ces différences sont souvent faibles et elles peuvent être assimilées à des erreurs du modèle ou des observations mais, il serait plus juste de comparer le flux de rayonnement infrarouge émis par la surface. Pour toutes les autres températures, il faut avant toute chose prouver que la quantité est observable et qu'il y a correspondance avec l'observation disponible. Une discussion de la diversité qui existe dans la définition des températures de surface dans les schémas peut être trouvée dans l'article de Schulz et al. (1998). Elle montre bien que même entre les différents modèles cette variable ne peut être comparée et qu'en aucun cas la différence ne peut être attribuée à une erreur d'un des modèles.

Le grand nombre de variables non-observables dans les schémas de surface est le plus grand défi dans l'utilisation de méthodes d'assimilation. La plupart des

observations qui contiennent de l'information sur les processus de surface n'ont pas de variables correspondantes dans les modèles. L'étape indispensable, avant toute assimilation, consiste donc à construire les modèles qui simulent les observables à partir des variables internes du modèle. Ceci est par exemple l'approche qui a été choisie pour la télédétection par microonde passive de l'humidité du sol. En utilisant un modèle radiatif dans le schéma de surface, on peut déduire du profil d'humidité et de température du sol, le flux radiatif à la surface dans la bande spectrale dans laquelle l'instrument est sensible. De la diversité des images qui sous-tendent les schémas de surface, il découle qu'il ne pourra pas exister un modèle radiatif unique valable pour tous. Chaque schéma devra construire le sien. On peut se demander pourquoi ceci n'est pas nécessaire pour l'assimilation de variables météorologiques classiques (vent, température, pression) dans les modèles de prévision. La réponse est relativement simple vu que les équations de la dynamique, en excluant pour le moment la turbulence à petite échelle, sont basées sur une théorie phénoménologique. Les variables du modèle sont donc des observables et les observations peuvent être assimilées telles quelles.

Pour la télédétection de l'humidité de surface, l'instrument le plus prometteur pour le moment est clairement GRACE (Wahr et al., 1989). La variable qui est observée est la variation de masse de la surface, mais aux courtes échelles de temps, le signal est dominé par le cycle hydrologique. Les variations rapides de masse ainsi obtenues peuvent donc être directement comparées à la dérivée temporelle de l'humidité du sol dans l'équation de conservation de l'eau. Avec cet instrument nous aurons donc directement accès à une variable d'une loi universelle et la comparaison avec le modèle sera tout à fait justifiée.

Un autre problème qui fait couler beaucoup d'encre dans la communauté est l'initialisation de l'humidité du sol pour la prévision ou les simulations atmosphériques courtes (inférieures à l'année). Vu la nature atomiste des schémas de surface il semble impossible de transférer l'humidité du sol obtenue par un modèle, à un autre. On ne peut donc pas appliquer la même procédure que pour les variables de la dynamique atmosphérique que l'on peut directement transférer moyennant une interpolation. Initialiser avec le "soil wetness" d'un autre modèle peut être considéré comme un pis-aller. Cela ne garantit en aucun cas que l'information sur le stress hydrique subi par les plantes ou la disposition du sol à produire du ruissellement ou du drainage soit préservé. Il semble aujourd'hui que la seule solution pratique soit de se reporter à l'équation de continuité de l'eau et de forcer pendant un temps suffisamment long le nouveau schéma avec les flux de la simulation qui a produit l'état initial que l'on cherche à transférer.

Il apparaît qu'un grand nombre de discussions en cours dans la communauté sont liées à une mauvaise compréhension de la nature des théories sur lesquelles sont basés les schémas de surface que nous utilisons. La discussion menée ici s'est

concentrée sur l'humidité du sol, mais elle aurait pu tout aussi bien se mener sur la végétation et toutes les variables d'état liées au cycle de l'eau. Dans les modèles de climat, ce ne sont pas que les schémas de surface qui sont de nature atomiste. Les théories qui sont à la base des paramétrisations des nuages ou de la couche limite contiennent un grand nombre de variables non-observables. L'inter-comparaison est donc aussi un élément majeur de leur développement, et la validation par les observations tout aussi délicate. Il est remarquable que ces trois paramétrisations traitent des changements de phase de l'eau, donc d'un processus de très petite échelle. Elles font aussi partie du même programme international de modélisation, le GEWEX³ Modelling and Prediction Panel. Ceci n'est pas un hasard vu que les développements qui y ont cours sont aussi basés sur une approche macroscopique du cycle de l'eau. Les trois types de paramétrisation présentes dans GMPP ont pour but de transposer la physique microscopique de l'eau sur terre dans une théorie macroscopique pertinente pour l'étude du climat.

La question de l'observabilité des variables d'état des modèles, intervient aussi lors de leur couplage. Ceci est par exemple un point central dans la définition des interfaces dans le projet PRISM (PRogramme for Integrated earth System Modelling) vu que l'objectif est de rendre le système couplé (terre, océan, surfaces continentales, biogéochimie et chimie) suffisamment modulaire pour que les modèles pour chaque composante soient échangeables. Il est clair que si les variables échangées ne sont pas observables, leurs définitions vont dépendre du modèle et donc leurs valeurs ne pourront pas être échangées lors du couplage. Ou du moins, si elles sont échangées, le couplage n'a plus le caractère général espéré vu qu'un modèle doit connaître les définitions de l'autre. La communauté autour de la modélisation des processus de surface a abordé ces problèmes lors des discussions qui ont abouti à la définition d'une interface surface/atmosphère générale (PILPS-4c : (Polcher et al., 1998b)). La plupart des variables qui ont été proposées dans cette interface sont des flux observables, mais nous avons eu recours à un certain nombre de variables qui ne sont pas observables. Ce qui est intéressant dans ce contexte, c'est que ce sont ces dernières variables qui ont généré le plus de discussions. Aujourd'hui dans les discussions autour de PRISM, des propositions sont faites pour remplacer ces variables par des observables. Les pensées ci-dessus, et la prise de conscience que certaines variables modélisées ne sont pas observables vont nous aider à formuler des interfaces plus générales pour PRISM.

³Global Energy and Water Cycle Experiment : Programme initié par le World Climate Research Programme de l'Organisation Météorologique Mondiale.

Chapitre 3

Développement du modèle de surface

Si on accepte l'idée que la plupart des processus qui sont traités dans les schémas de surface sont basés sur des théories atomistes, on doit en tirer un certain nombre de conséquences pour le développement de ces schémas. Dans cette partie nous allons discuter les différentes évolutions qu'a subi le schéma de surface SECHIBA du LMD pour devenir le modèle de surface ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) de l'IPSL. Avant de présenter brièvement ces évolutions, nous allons discuter les principes que nous avons tiré de la nature des théories qui nous permettent de simuler les processus de surface.

La première étape consiste à diviser le modèle de surface en un certain nombre de modules qui correspondent pour chacun d'eux à une théorie bien délimitée. Pour ORCHIDEE nous avons retenu : la paramétrisation des résistances, le bilan d'énergie, le bilan d'eau dans le sol et sur la canopée, la diffusion thermique dans le sol, l'estimation des paramètres de surface, le routage de l'eau par les fleuves et rivières et finalement les processus plus lents liés aux cycles du carbone et à l'écologie. Vu la "fragilité" des théories qui sont à la base de chacun de ces éléments, ils doivent être conçus et implémentés de façon aussi indépendante que possible afin que toute composante puisse être remplacée sans affecter le reste du modèle. Certaines hypothèses du schéma sont communes à tous les modules, par exemple le traitement de la variabilité sous maille.

Cette décomposition signifie que toute variable non-observable d'un module n'est pas échangée avec les autres. Autant que possible, on essaye de limiter les échanges aux observables ou alors aux variables qui possèdent une définition claire dans le cadre d'une théorie qui régit l'ensemble des composantes (la variabilité sous maille). Les interfaces internes du modèle sont donc critiques et doivent être choisies avec précaution.

Cette décomposition du modèle a aussi un certain nombre d'avantages informa-

tiques : elle assure une bonne orthogonalité du code. Cela signifie que les modules sont, informatiquement parlant, indépendants les uns des autres. L'information échangée est minimalisée et donc les découplages pour des tests de fonctionnalités sont fortement simplifiés. La localisation d'erreurs de programmation est aussi plus simple car pour chaque variable échangée un seul module est autorisé à la modifier.

Lors de la réécriture de SECHIBA, nous avons essayé de mettre en pratique autant que possible ces principes, mais certains points ont dû être traités avec beaucoup de pragmatisme pour ne pas trop retarder le développement du modèle. Grâce à cette nouvelle structure, nous avons pu gérer la complexité d'ORCHIDEE ces dernières années et rajouter le schéma de routage que nous allons brièvement présenter ici.

3.1 Vers des modèles de surface vert

Depuis la fondation de l'IPSL toutes les compétences sont réunies pour construire un modèle de surface qui en plus du cycle de l'eau et de l'énergie inclurait aussi le cycle du carbone. Il a donc été décidé d'intégrer au schéma de surface SECHIBA développé au LMD tous les développements faits au LSCE autour du cycle du carbone. Avant de se lancer dans ce projet il était nécessaire de récrire SECHIBA afin de le rendre plus modulaire et de s'assurer que le même code pouvait aussi bien être couplé au modèle de circulation générale (MCG) qu'utilisé en mode forcé.

En plus de la réécriture purement informatique, il a aussi été nécessaire d'adapter SECHIBA et le modèle biogéochimique développé au LSCE (STOMATE). Il fallait s'assurer que les mêmes concepts étaient utilisés dans les deux modèles et éviter la duplication de calculs. Certaines paramétrisations dans les deux modèles ont donc dû être repensées. Cette intégration des deux modèles a donné naissance au nouveau modèle de surface global de l'IPSL : ORCHIDEE <http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipsl/>.

Lors du couplage des deux composantes et le développement de l'interface, nous avons essayé de mettre en pratique les principes cités ci-dessus. Prenons ici l'exemple de l'humidité du sol. Cette variable est nécessaire dans STOMATE pour la respiration des sols et l'allocation du carbone. Passer l'humidité du sol directement à STOMATE aurait rendu tout développement dans SECHIBA très complexe. Une modification de sa représentation dans le modèle nécessiterait une adaptation dans STOMATE. Nous avons choisi de remplacer l'humidité du sol par le stress hydrique et l'humidité relative du sol (Soil wetness). Le stress hydrique varie toujours entre zéro et un. Il combine l'eau dans le sol avec le fonctionnement des racines. C'est l'information dont nous avons besoin pour l'allocation du carbone. L'humidité relative du sol est calculée sur des niveaux verticaux standard permettant ainsi à STOMATE de l'utiliser telquel pour l'estimation de la

respiration des sols. Dans les deux cas les variables du sol sont utilisées en mode diagnostique et lors de modifications dans SECHIBA seule leur évolution change car leur définition n'est liée à aucun choix numérique.

Cette évolution n'est pas unique à l'IPSL, même si nous sommes un des premiers organismes à nous être lancés dans la construction de cette nouvelle génération de modèles de surface. Déjà au cours de l'atelier organisé par GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) et IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) en 1997, l'intégration de la physique et de la biogéochimie avait été jugée indispensable (Dolman and Dickinson, 1997). Pour tenir compte de cette évolution, GEWEX a restructuré son projet pour aider au développement de cette nouvelle génération de schémas de surface. Depuis l'année 2000 je dirige le projet GLASS (Global Land Atmosphere System Study, voir section 5.3.7) qui a justement pour but de favoriser le développement de cette nouvelle génération de schéma de surface (Polcher et al., 2000).

Le modèle ORCHIDEE a atteint un niveau de maturité suffisant pour une utilisation scientifique au cours de l'année 1999. En 2000 son couplage avec l'atmosphère a été réalisé. L'activité de recherche autour du développement du schéma de surface présentée ci-dessous, concerne surtout SECHIBA. Mais toutes ces améliorations se retrouvent aujourd'hui dans ORCHIDEE.

3.2 L'interaction avec l'atmosphère

SECHIBA a été couplé à plusieurs modèles atmosphériques (CCM2 du NCAR, ECHAM du MPI für Meteorologie, PROMES le modèle régional de la Universidad Complutense de Madrid) et à chaque fois la question du meilleur choix numérique pour le traitement de l'interaction surface/atmosphère s'est posée. Cela a permis de nous conforter dans les choix fait au LMD mais aussi d'affiner le schéma numérique et puis de proposer une interface générale qui permette de coupler le modèle de surface, comme un modèle indépendant, à l'atmosphère.

Au cours des années 90, un certain nombre d'études ont été publiées dans lesquelles l'impact d'un changement de schéma de surface (souvent le passage d'un schéma simple à un schéma complexe) était analysé. Les résultats de ces études sont contradictoires comme le montre déjà la comparaison de l'impact de SECHIBA dans CCM (Peylin et al., 1997) et dans ECHAM (Schulz et al., 1998). Afin d'éclaircir ce point, l'expérience PILPS avait décidé, sous l'impulsion d'Ann Henderson-Sellers, d'organiser le couplage d'un grand nombre de schémas de surface dans un même modèle atmosphérique. Il est très vite apparu que cette tâche était titanique car les schémas de surface à ce moment-là étaient encore très fortement imbriqués dans leur MCG atmosphérique. Il était pratiquement inévitable de réécrire chaque schéma de surface pour l'adapter à la structure du MCG retenu.

Devant l'échec annoncé de cette phase de PILPS j'ai donc décidé d'entreprendre avec des collègues le développement d'une interface standard. Le but était de lui donner des spécifications assez générales pour pouvoir être utilisée par tous les schémas de surface et tous les modèles atmosphériques. Elle devait aussi offrir suffisamment d'avantages pour le développement et la maintenance des deux modèles que son adoption dans chaque groupe offrirait des avantages incontournables. Au cours de l'année 1997 j'ai donc animé un débat dans la communauté qui a abouti au papier Polcher et al. (1998). Ce travail a nécessité la définition des tâches que doit remplir un schéma de surface pour le MCG et les quantités que ce dernier doit fournir à l'atmosphère.

Un des points les plus délicats du développement de cette interface a été le couplage du calcul des flux turbulents (évaporation et flux de chaleur sensible) avec la turbulence calculée dans la couche limite atmosphérique. Quatre méthodes numériques pour le couplage ont été identifiées mais seulement trois sont réellement utilisées car elles sont seules à satisfaire aux critères de stabilité. L'interface a donc dû être conçue de façon à pouvoir accueillir les trois méthodes. Deux points n'ont pas pu être tranchés et une certaine flexibilité a dû être intégrée dans l'interface :

1. La turbulence de la couche de surface (coefficients de traînée) doit-elle être calculée dans le schéma de surface ou par le modèle atmosphérique ?
2. Lequel des deux modèles a la charge du calcul de la diffusion de la quantité de mouvement dans la couche de surface ?

Le manque d'accord sur ces points est lié je pense à un manque de compréhension de la valeur des théories que nous utilisons. Si nous partons du principe que la théorie de la turbulence, qui est à la base du calcul, est de type phénoménologique, alors il est conséquent de donner la responsabilité des coefficients de traînée pour la couche de surface à l'atmosphère vu que les mêmes calculs y sont déjà faits pour la couche limite atmosphérique. Par contre, si le choix est basé sur l'hypothèse d'une théorie conceptuelle, alors la continuité des approches entre la couche limite et la couche de surface n'est plus aussi importante. On peut alors prendre en considération les avantages qu'apportent dans la représentation de la variabilité sous maille la simulation des coefficients de traînée par le schéma de surface. La discussion sur la diffusion du moment se présente dans les termes.

Au cours des discussions en 1997, qui ont abouti à l'article Polcher et al. (1998), je n'ai pas reconnu que le problème se posait en ces termes et je me suis trompé en favorisant la solution qui préconisait le traitement de toute la turbulence dans l'atmosphère. Pour les mêmes raisons je pense que nous nous sommes trompés en proposant dans cet article que le modèle de surface donne à l'atmosphère une température de brillance et non le flux de rayonnement infra-rouge montant. À notre décharge, il faut signaler qu'en 1997 il n'aurait pas été acceptable par la communauté des développeurs de MCG que les schémas de surface ne fournissent

plus de température de surface à l'atmosphère!

Au cours de la thèse de Jan-Peter Schulz nous avons étudié en détail les propriétés de deux des trois couplages possibles pour les flux turbulents afin d'essayer de voir lequel a les meilleures propriétés physiques, et si le choix de la méthode numérique est comparable aux autres différences entre schémas de surface. Pour cela le MCG ECHAM4 du MPI für Meteorologie couplé à son propre schéma de surface et à SECHIBA a été utilisé. Dans sa version originale ECHAM4 est couplé avec une méthode semi-implicite à son schéma de surface. Lors de l'intégration de SECHIBA il a été décidé de passer au schéma numérique utilisé au LMD, c-à-d un couplage implicite. Afin de pouvoir compléter l'étude, il fallait donc réaliser le couplage d'ECHAM4 avec son propre schéma en implicite.

Dans un premier temps l'évaluation de ces trois couplages atmosphère/surface a été examiné dans le cadre d'un modèle uni-colonne (Schulz et al., 2001). Dans ce cas, on simule toute l'atmosphère et la surface en un point, en imposant l'advection de la température et de l'eau dans l'atmosphère. Cela permet d'étudier les interactions surface/couche-limite atmosphérique dans un environnement mieux contrôlé que le MCG complet.

Nous avons pu montrer que le couplage semi-implicite utilisé par ECHAM ne conserve pas l'énergie à l'interface. Mais même une fois ce problème résolu par une correction *ad hoc*, les propriétés de ce schéma ne sont pas satisfaisantes. Les termes d'ordre supérieur dans le bilan de surface qui ne sont couplés à l'atmosphère qu'avec un pas de temps de décalage, ne sont pas négligeables et causent des oscillations importantes. Le passage du modèle ECHAM à un couplage implicite améliore de façon générale le comportement des flux en surface et en particulier simule des amplitudes plus grandes du cycle diurne de la température de surface. Ceci corrige un défaut systématique du modèle. Par contre le fait d'utiliser le schéma saute-mouton dans le couplage, entraîne des oscillations des flux en surface. Ceci est probablement lié au fait que le filtre appliqué par ECHAM4 dans l'atmosphère pour lisser l'oscillation entre les deux solutions n'est pas adapté aux constantes de temps typiques de la surface. Mais vu que le couplage implicite n'a plus besoin d'un schéma saute-mouton pour être stable, on peut le supprimer de l'interface.

Ceci a été fait lors du couplage avec SECHIBA. Dans ce cas, le modèle uni-colonne n'exhibe plus d'instabilités numériques et en général les flux et quantités de surface sont mieux représentés. Avec cet outil, nous avons revisité l'expérience PILPS-2c (Chen et al., 1997) sur le site de Cabauw et la comparaison ECHAM/SECHIBA qui avait été faite (Schulz et al., 1998) en parallèle. Contrairement à l'intercomparaison PILPS, nous avons ici une rétroaction de l'atmosphère grâce au couplage avec le modèle uni-colonne.

Ce travail a mis en évidence que les choix numériques pour résoudre le bilan d'énergie et l'interaction avec l'atmosphère faite dans SECHIBA sont meilleurs

que ceux de ECHAM4 et d'autres modèles construits sur les mêmes principes. En particulier, la température de surface, qui est simulée comme une couche infinitésimale dans SECHIBA, montre des variations diurnes plus réalistes que dans d'autres modèles.

Des simulations ont été faites avec le MCG ECHAM4 couplé aux trois schémas de surface (ECHAM semi-implicite, ECHAM implicite, SECHIBA qui est toujours couplé en implicite) pour vérifier que l'analyse avec le modèle uni-colonne est bien représentative de ce qui se passe dans un MCG. La première constatation que nous avons pu faire est que le changement de schéma de surface a autant d'impact sur le climat simulé que le changement de méthode numérique de couplage. Ceci montre encore une fois que le choix de la méthode de couplage n'est pas anodine. Une des caractéristiques communes des deux simulations qui utilisent le couplage implicite est que la mousson Indienne est mieux simulée. Avec le schéma SECHIBA nous avons obtenu en plus une meilleure représentation des températures de surface sur les continents de l'hémisphère Nord.

La thèse de Jan-Peter Schulz est une des analyses les plus complètes des aspects numériques de la modélisation des processus de surface et leur interaction avec l'atmosphère. L'idée de tester les schémas dans le cadre d'un couplage simplifié a été reprise par GLASS (Voir section 5.3.7) pour un de ses sous-projets. L'utilisation d'un modèle uni-colonne, comme celui qui a été fait avec ECHAM, n'est peut être pas la meilleure solution. La convection est trop sensible aux modifications de l'évaporation dans cette configuration. Dans GLASS il est donc envisagé de trouver une solution plus simple et aussi plus robuste.

Le travail mené en collaboration avec Jan-Peter Schulz et l'analyse faite dans le cadre de PILPS sur les interactions surface/atmosphère nous ont permis de réécrire SECHIBA de façon à ce qu'il devienne un modèle indépendant de l'atmosphère. Le nouveau modèle qui en a résulté (ORCHIDEE : <http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssips1/>) est maintenant une entité indépendante pour le système climatique telle que peut l'être par exemple l'océan. Cette évolution est une étape importante voir même indispensable pour le développement de modèles plus complexes. En ajoutant le cycle du carbone et en affinant la représentation du cycle hydrologique nous arrivons à un système trop complexe pour pouvoir être testé uniquement en mode couplé. Ce n'est qu'en mode off-line que nous pouvons évaluer si le cycle du carbone se stabilise bien après plusieurs dizaines d'années de simulation, que la distribution de végétation est réaliste et que l'écoulement des rivières est bien simulé à toutes les résolutions.

Cette séparation du point de vue des modèles entre la surface et l'atmosphère peut paraître normale quand on regarde la modélisation du système climatique de l'extérieur. Mais pour la communauté des modélisateurs de l'atmosphère, cela a représenté un grand changement, voir une révolution, car depuis les travaux

de Manabe (1969) la surface a été considérée comme une paramétrisation parmi d'autres dans le MCG. L'IPSL est le premier centre à avoir appliqué cette nouvelle décomposition des modèles et il est clair que cet investissement dans l'infrastructure nous a grandement facilité le développement du nouveau modèle couplé.

L'interface proposée en 1998 a aussi été appliquée à Météo-France et au Hadley-Centre. Martin Best qui a fait le travail au Hadley Centre a proposé un certain nombre d'améliorations qui vont faire l'objet d'une publication. Nous profiterons de cette occasion pour lever les ambiguïtés sur le calcul des coefficients de traînée et du flux de moment et pour corriger l'interfaçage du rayonnement infra-rouge. Ces idées ont aussi été reprises par PRISM (Voir section 5.3.7). Dans ce projet, pour la première fois, les modèles de surfaces continentales sont au même niveau que les autres composantes du système climatique. Ceci a amené les océanographes et les modélisateurs de la glace de mer à considérer l'interface proposée pour les modèles de surfaces.

3.3 L'interaction du système racinaire avec l'humidité du sol

Ce travail constitue la première partie de la thèse de Patricia de Rosnay. Il nous a amené à mieux décrire l'interaction du profil racinaire avec l'humidité du sol. Nous sommes partis de l'hypothèse d'une distribution exponentielle de la densité racinaire avec la profondeur. Un grand nombre d'observations de profils de densité racinaire utilisent cette méthode de description du profil. Les coefficients ainsi obtenus montrent une dépendance du type de végétation mais avec une très grande diversité inter-espèces. Ceci est lié au fait qu'un même type de plante aura une distribution racinaire assez différente si elle pousse sur du sable ou sur un sol rocaillieux. Néanmoins, nous avons par cette méthode un accès relativement simple aux profondeurs racinaires qui est cohérent avec la carte de végétation. Nous nous gardons la possibilité ouverte d'affiner cette représentation des racines dans l'avenir en tenant compte des types de sols.

En utilisant l'hypothèse faite sur la distribution verticale de l'humidité dans le sol dans SECHIBA et le profil exponentiel de densité de longueur racinaire, nous avons dérivé une formule simple qui décrit bien le stress hydrique par type de végétation.

Cette nouvelle approche a été implémentée dans le MCG et une étude de sensibilité a été faite. Nous avons pu montrer que la description du stress hydrique était meilleure et qu'elle permet de décrire des contrastes entre types de végétation qui n'étaient pas possibles avant. Ce travail fait aujourd'hui référence dans la simulation de l'interaction entre l'humidité du sol et le stress hydrique par les schémas

de surface (de Rosnay P. and Polcher, 1998; Feddes et al., 2001).

Un des grands avantages de cette approche a été de découpler dans le modèle, la profondeur racinaire de la représentation de l'eau dans le sol. En effet, même pour l'hydrologie la plus simple, le bucket (Manabe, 1969), il existe une hypothèse sous-jacente sur la distribution verticale de l'eau. Celle-ci peut être convoluée avec le profil racinaire afin de donner une fonction de stress hydrique. La décroissance exponentielle de la densité racinaire atténue le problème de la profondeur du sol comme nous l'avons montré (de Rosnay P. and Polcher, 1998).

3.4 La diffusion de l'eau dans le sol

Cette nouvelle description du profil racinaire a révélé la trop grande simplicité de la description du profil hydrique dans le sol de SECHIBA (Choisnel, 1984). Ou plutôt la simplicité du schéma de Choisnel ne nous permettait pas de tirer pleinement profit de l'amélioration dans la représentation des racines. Nous en avons conclu qu'il était nécessaire pour progresser dans la description du stress hydrique des plantes, de passer à un hydrologique multicouche. Ce travail constitue la seconde partie de la thèse de Patricia de Rosnay et a été fait en collaboration avec le groupe de Jim Dooge à Dublin.

Par rapport aux autres schémas de surface nous avons fait un certain nombre de choix originaux. Les points essentiels sont les suivants :

- Afin de respecter la forte non-linéarité des processus de diffusion de l'eau dans le sol, nous avons choisi d'utiliser dès le départ un grand nombre de couches avec une très haute résolution près de la surface. Les 11 couches que nous avons choisies sont à comparer avec les 4 utilisées aujourd'hui dans la plupart des schémas de surface.
- L'interaction racine humidité du sol, développée précédemment, a été transposée. La plupart des autres schémas de surface font l'hypothèse d'une densité racinaire constante sur les deux ou trois premières couches du modèle.
- Dans la continuité de la représentation explicite de la variabilité sous maille de SECHIBA, nous avons introduit la possibilité d'avoir jusqu'à trois types de sols distincts dans une même maille. Une matrice de distribution répartit la végétation sur les types de sols. Ceci permet dans une même maille d'avoir une partie des arbres sur du sable et une autre sur de l'argile par exemple ou au contraire de placer les arbres sur l'argile et les herbes sur du sable.

Un certain nombre de combinaisons de la variabilité sous maille de l'humidité du sol et de la végétation a été testé dans le MCG du LMD. Il en est ressorti que l'impact sur le climat est relativement faible mais que par contre, la répartition des flux entre l'évaporation des différents types de végétation et le ruissellement en surface peut être fortement modifié. Cette modification du schéma de surface

va donc être importante pour la dynamique de la végétation et le débit des fleuves simulé.

Ce résultat nous fait penser que les développements des schémas de surface qui sont en cours pour le moment ne vont plus autant contribuer à l'amélioration des modèles atmosphériques sur les courtes échelles de temps. Ils vont plutôt bénéficier aux modèles couplés et aux processus de surface eux-mêmes. Il ne faut pas oublier que bien représenter les processus de surface est un but en soi dans la prévision météorologique ou climatique vu que la quasi totalité des hommes vivent sur les continents !

3.5 Routage de l'eau par les fleuves et les rivières

La modélisation de l'écoulement de l'eau des continents dont nous décrivons le développement ici a été conçu avec le but de l'appliquer à l'échelle continentale. Cet objectif implique un certain nombre de limitations. Contrairement aux modèles utilisés sur des bassins versants bien instrumentés, nous n'avons pas la possibilité ici de calibrer un nombre important de paramètres. Les observations disponibles à l'échelle continentale ne sont pas de qualité suffisante ou en nombre assez grand pour justifier un jeu d'équations complexe avec un grand nombre de paramètres à calibrer. On ne pourra donc pas attendre de ce type de modèles qu'il représente fidèlement des processus rapides ou à petite échelle. Cette limitation aux grandes échelles nous permet aussi dans un premier temps de négliger les détails de la production du ruissellement. Comme nous l'avons effectivement montré dans Ducharne et al. (1998) les grands bassins versants ont une variabilité climatique suffisamment importante pour rendre l'apport de paramétrisation du ruissellement sous maille peu significatif. Par contre il nous faut prendre en compte des processus tels que les zones d'inondations saisonnières ou l'irrigation pour l'agriculture qui jouent un rôle important dans les grands bassins tropicaux mais qui sont négligeables dans nos latitudes.

Le routage de l'eau qui ruisselle à la surface jusqu'aux océans a été fait jusqu'à présent dans les modèles couplés océan/atmosphère par nécessité. Les paramétrisations qui ont été développées pour simuler ce flux sont de complexités très variées. Cela va du transport instantané du ruissellement vers les océans jusqu'à un modèle à haute résolution qui prend en compte les bassins versants, les gradients et la tortuosité des fleuves. Mais dans tous les cas, l'implémentation de ces paramétrisations s'est faite en dehors des schémas de surface. Cela pose un vrai problème car une grande partie de l'eau qui rejoint les rivières et les fleuves n'arrive jamais à l'océan. Un certain nombre de fleuves se déversent dans des lacs intérieurs et l'eau se re-évapore *in fine*. D'autres fleuves ont de grands deltas intérieurs qui font qu'une partie non négligeable de l'eau qu'ils transportent, ir-

rigue des régions plus sèches. Finalement, l'irrigation pratiquée par l'agriculture, représente une reprise importante de l'eau transportée. Aucune de ces composantes n'est bien quantifiée mais on peut penser qu'à peu près 10% de l'eau transportée repart d'une façon ou d'une autre vers l'atmosphère.

La meilleure façon d'intégrer dans la modélisation des processus de surface, les phénomènes qui permettent à l'eau dans les rivières et les fleuves de se re-évaporer, est de simuler le transport horizontal de l'eau dans le schéma de surface. Afin de pouvoir le faire, il est indispensable que le schéma de surface soit suffisamment flexible pour pouvoir intégrer cette nouvelle paramétrisation. Il faut aussi trouver une solution au fait que la résolution spatiale du schéma de surface est celle de l'atmosphère et qu'elle doit pouvoir être changée facilement.

Nous avons profité de la nouvelle flexibilité offerte par le fait que ORCHIDEE soit devenu un modèle indépendant de l'atmosphère pour intégrer le routage de l'eau. Nous avons choisi de résoudre le problème de la faible résolution de la grille atmosphérique en introduisant une troncature sur le nombre de bassins versants représenté dans chaque maille. C'est-à-dire que sur chaque maille du modèle nous permettons l'existence de n bassins versants simultanément. Partant d'une carte des bassins versants à haute résolution ($50km^2$ pour le moment) (Vörösmarty et al., 2000a) nous déterminons quels sont les bassins qui sont présents dans chaque maille. Pour chacun d'eux nous déterminons dans quel autre bassin il se déverse. Cela peut aussi bien être un bassin dans la même maille qu'un bassin dans une maille voisine. Une fois que les connections sont établies nous fusionnons les plus petits bassins de chaque maille avec le bassin dans lequel ils se déversent jusqu'à ce qu'il ne reste plus que n bassins par maille.

Le débit des plus grands fleuves (dont le nombre est choisi par l'utilisateur) est transmis tel quel au modèle océanique, par contre le flux des petits bassins est sommé et comptabilisé comme un apport diffus d'eau douce le long des côtes pour les océans. Si un fleuve se jette dans un lac intérieur qui n'a pas d'exutoire vers l'océan, l'eau est remise dans le réservoir d'humidité de sol de SECHIBA. Pour le forçage du modèle de routage, le ruissellement et le drainage profond de surface produit par ORCHIDEE sont distribués de façon uniforme sur tous les bassins présents dans la maille. Cette hypothèse forte pourra être réajustée plus tard quand la meilleure configuration pour la représentation de la variabilité sous maille de l'humidité du sol aura été choisie.

Avec cet algorithme, la génération du réseau hydrographique peut être complètement automatisée et adaptée à toutes les grilles typiquement utilisées par les modèles atmosphériques. Les propriétés numériques et physiques du modèle devraient être relativement indépendantes de la résolution spatiale utilisée.

Pour les équations qui gouvernent le transport de l'eau nous nous sommes fortement inspirés de ce qui se fait aujourd'hui dans les schémas de routage (Le-

doux, 1980; Miller et al., 1994; Hagemann and Dümenil, 1998; Fekete et al., 2000; Ducharne et al., 2003). Nous avons choisi une cascade de 3 réservoirs linéaires :

1. Un réservoir lent qui a comme source le drainage depuis le modèle de sol et dont le puits alimente le réservoir des fleuves.
2. Le second réservoir est alimenté par le ruissellement de surface et fournit aussi de l'eau au réservoir des fleuves.
3. L'eau du réservoir des fleuves se déverse, lui, dans le bassin en aval.

Le flux de chaque réservoir linéaire est déterminé par le coefficient de rétention qui est fonction de la vitesse moyenne sur le bassin. Cette vitesse est paramétrisée à travers un indice topographique. Celui-ci doit être déterminé pour chaque bassin à partir de la distance qui y est à parcourir et le gradient orographique (Miller et al., 1994). Sinon les constantes de temps pour chaque réservoir doivent être calibrées. Cela a été fait de façon globale et pour une seule résolution : $1^\circ \times 1^\circ$.

La figure 3.1 donne une idée de la flexibilité de ce schéma de routage. En effet on y voit le débit du Danube près de son embouchure pour ORCHIDEE forcé à une résolution de $1^\circ \times 1^\circ$ (Utilisant les données du projet GSWP (section 5.3.7)) et en couplé avec le modèle LMDZ qui possède un maillage beaucoup plus grossier. Le phasage du débit est correcte en mode forcé mais l'amplitude est trop importante. Cela peut être attribué aux perturbations anthropiques sur le bord du fleuve ainsi qu'à des biais dans les forçages. Par contre, la différence entre la version couplée et celle forcée, la différence de phasage est dûe à une différence dans les précipitations de LMDZ et à une fonte trop précoce de la neige.

Une partie faible de la différence entre ces deux débits peut être dûe au changement de résolution. L'analyse qualitative des résultats indique que l'effet est négligeable mais une étude avec des signaux théoriques est en cours pour quantifier cette erreur.

3.6 Plaines d'inondation et irrigation

Il est naturel d'inclure dans un modèle de surface qui simule le transport latéral de l'eau, les plaines d'inondation et l'irrigation. Au cours de l'année 2002 nous avons fait les deux, et les premiers résultats sont très prometteurs.

Pour les plaines d'inondation, nous avons suivi une approche très simple basée sur un modèle à deux paramètres. L'idée est de repérer une montée brusque de l'eau dans le fleuve qui se jette dans une zone décrite comme inondable dans la carte globale. En fonction de cette montée, l'eau se retrouve redistribuée dans la composante plus lente du schéma de routage et dans l'humidité du sol qui sert à l'évaporation. L'impact de cette paramétrisation est donc de ralentir la vitesse de l'écoulement de l'eau et d'augmenter l'eau disponible pour l'évaporation. Cette

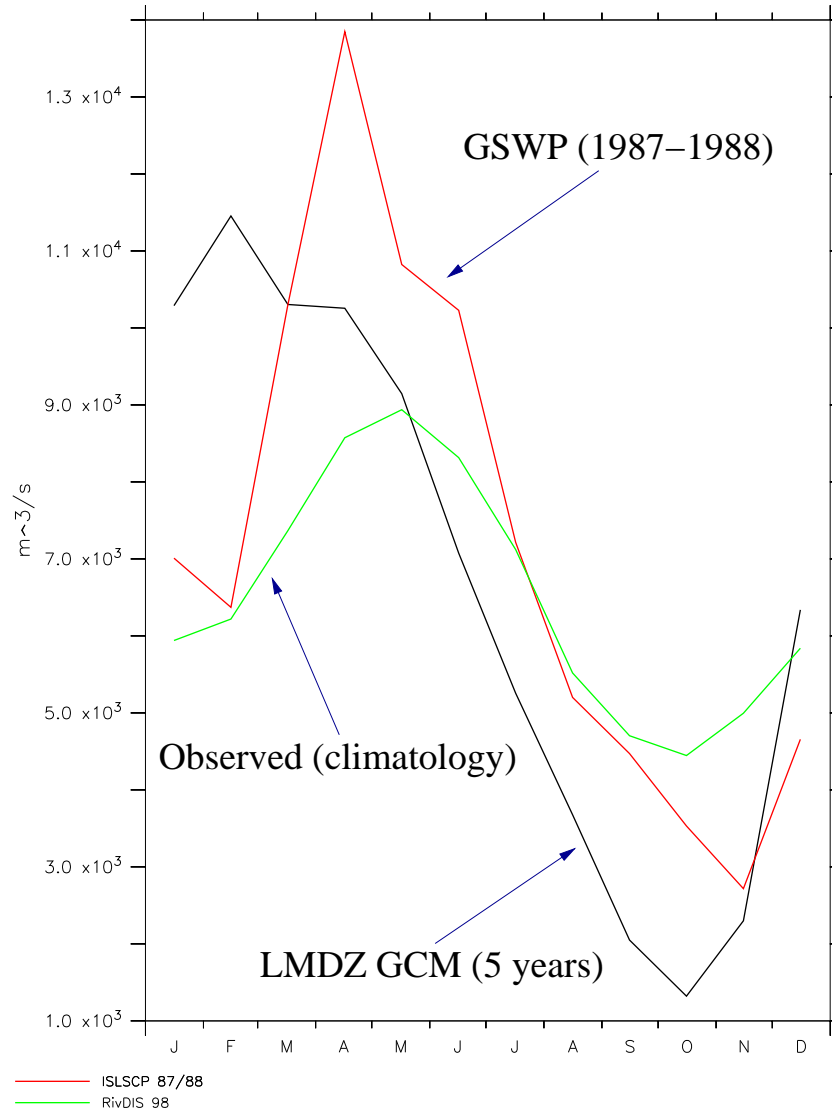


FIG. 3.1 – Comparaison des débits simulés par ORCHIDEE couplé à LMDZ, ceux simulés en mode forcé (courbe intitulée GSWP) et finalement les observations à la station de Ceatal Izmail (Ligne intitulée “Observed”).

approche ne fonctionne qu'en l'absence de gel des sols et fonte des neiges et donc les études des plaines d'inondation se limitent pour le moment aux tropiques.

Les deux paramètres ont été calibrés sur le bassin du Niger. Nous avons pour la période 1987-1988 aussi bien des forçages atmosphériques de haute qualité (ISLSCP (Meeson et al., 1995)) que des observations du débit du fleuve avant le delta intérieur (Koulikoro) et après cette zone inondable (Diré ou Niamey par exemple). La calibration a été vérifiée de façon indépendante sur la bassin de Parana ou nous n'avons que des observations de débit qu'à la station de Corrientes qui se situe après la zone inondable (Le Pantanal). Il semble illusoire de vouloir avec une telle approche représenter toute la complexité du fonctionnement des zones inondables mais il semble possible de rendre compte des deux processus qui comptent pour l'interaction des surfaces continentales avec le reste du système climatique :

1. Augmenter l'humidité du sol dans les zones inondables afin de faciliter l'évaporation et ainsi permettre le fonctionnement des plantes.
2. Obtenir un cycle annuel correct du débit des fleuves à leurs embouchures et donc simuler de façon plus réaliste l'apport d'eau douce à l'océan.

La figure 3.2 montre les débits simulés et observés sur le Parana à la station Corrientes. Les 3 lignes noires donnent la moyenne climatique du débit ainsi que sa variabilité. On remarque que l'amplitude du cycle annuel est faible. Dans la version du modèle sans plaines d'inondation par contre, l'amplitude est beaucoup trop importante. Quand on tient compte des zones inondables dans le Pantanal, ce défaut disparaît, toutefois un déphasage du signal persiste. Il est à noter qu'en tenant compte des plaines d'inondation, le débit moyen est nettement en dessous des observations. Ce défaut existe déjà dans la simulation de référence, mais le biais est moins important. Les données disponibles ne permettent pas de dire si la réduction du débit est réaliste et si le défaut ne vient pas d'une précipitation en entrée sous estimée ou alors d'une évaporation simulée trop importante.

Sur le delta intérieur du Niger le réalisme de la re-évaporation induite par la plaine d'inondation a pu être évaluée. Le modèle produit des valeurs tout à fait réalistes du débit du fleuve à Niamey (Figure 3.3).

Pour l'irrigation, qui est la composante dominante de l'eau utilisée par l'homme, une approche aussi simple que pour les plaines d'inondation a été suivie. Afin d'essayer de représenter cette reprise d'eau, nous avons choisi une paramétrisation qui équilibre la demande évaporative avec la disponibilité de l'eau. La demande est représentée par l'évaporation potentielle (une estimation de celle proposée par Penmann-Monteith (Milly, 1992)) réduite par un paramètre qui tient compte des types de cultures ainsi que des pratiques agricoles et qui reste à calibrer. La disponibilité en eau est déterminée par l'humidité du sol et l'eau dans les fleuves. De toute évidence, il est un peu simpliste de penser qu'avec un paramètre on

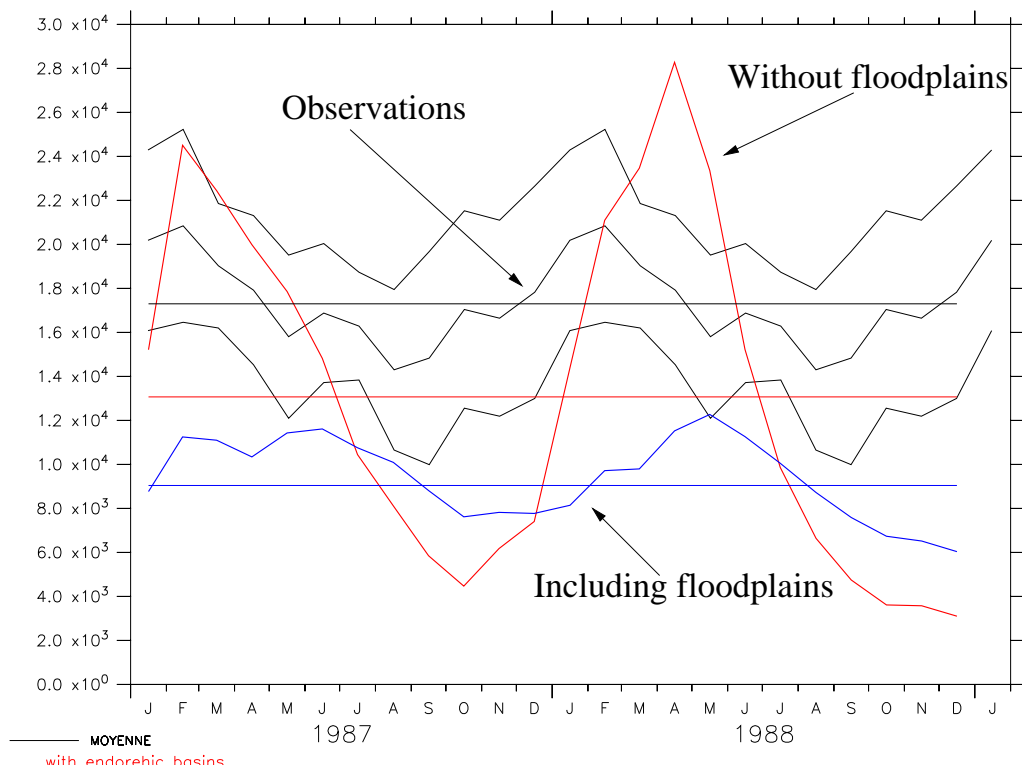


FIG. 3.2 – Les débits observés sur le Parana à Corrientes sont donnés par trois courbes parallèles (le cycle annuel moyen au centre et plus ou moins un écart-type de chaque côté). Les résultats des deux versions du modèle sont donnés par les deux courbes “without floodplains” et “including floodplains”.

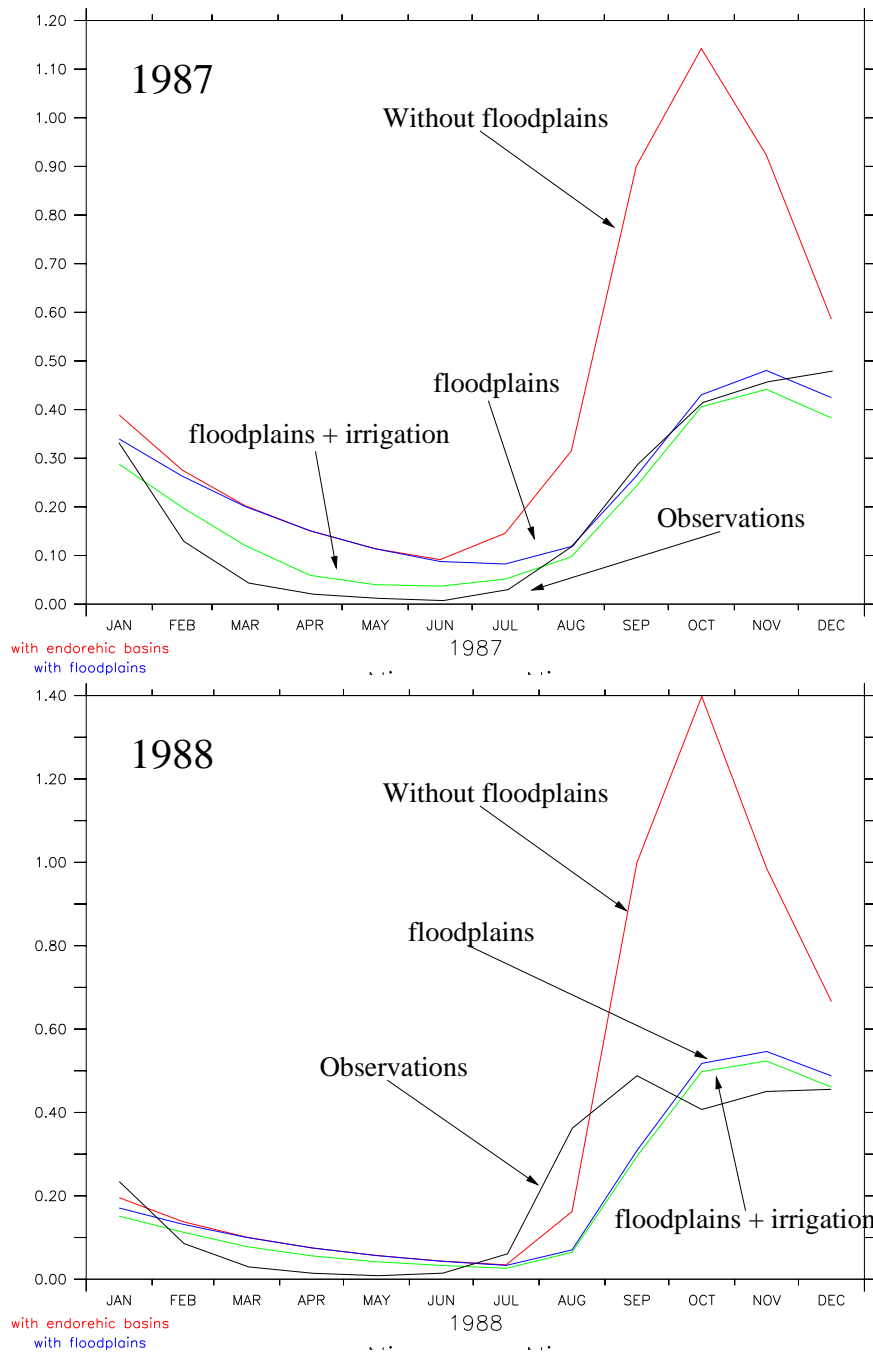


FIG. 3.3 – Les débits observés sur le Niger à Niamey pour les années 1987 et 1988. Les résultats des deux versions du modèle sont donnés par les deux courbes “without floodplains” et “floodplains”. Les figures montrent aussi l’impact de l’irrigation dans le modèle avec la courbe intitulée “floodplains+irrigation”.

puisse représenter toute la diversité des méthodes d'irrigation et de culture. Mais notre but est de rajouter ce flux d'eau afin d'augmenter l'évaporation simulée et de réduire d'autant le débit des fleuves et ainsi d'obtenir un modèle global couplé avec un cycle de l'eau plus réaliste.

Cette paramétrisation a été évaluée sur le continent Indien qui présente l'avantage d'une bonne description de l'irrigation pratiquée et d'un impact certain de cette activité humaine sur le volume d'eau transporté par les fleuves. Cette évaluation du modèle est décrite dans une petite note publiée dans GEWEX-News (de Rosnay et al., 2003).

3.7 Perspectives

3.7.1 l'évolution d'ORCHIDEE

Le développement du modèle de surface se concentrera dans les années à venir sur la finalisation du travail présenté ci-dessus. Un aspect que je crois important, est de rajouter dans nos schémas l'impact de l'activité humaine sur le cycle de l'eau. Avec l'irrigation, nous avons fait le premier pas, mais il faudra poursuivre cet effort.

Ceci n'est pas une tentative de remplacer les modèles qui sont utilisés pour la gestion de bassins versants ou pour les études de l'impact climatique. Ce qui est recherché ici est une complémentarité du type de celle qui existe aujourd'hui entre les schémas de surface et les modèles hydrologiques. La nécessité de ces développements vient directement du besoin de prédire les conséquences de la variabilité et du changement climatique sur la ressource en eau.

Un modèle de climat qui incluerait ces processus et qui ne donnerait qu'une estimation grossière de la ressource en eau, permettrait quand même d'identifier rapidement les régions qui auront un risque d'être touchées par de fortes réductions de l'eau disponible pour les activités humaines dans un climat futur. Dans les intégrations longues sur le XXI^{ème} siècle on pourra dire comment la probabilité d'années critiques pour la ressource en eau va évoluer. Ceci est un progrès par rapport à la situation actuelle où les bassins choisis pour des études d'impact plus fines le sont pour l'existence d'une expertise scientifique et non pour la gravité des changements climatiques qui y sont prédits. Dans cet objectif, je rejoins tout à fait les ambitions du projet PUB (Prediction in Ungauged Basins) proposé par l'IAHS en collaboration avec GEWEX.

Les résultats d'un tel modèle ne seront pas directement exploitables par les agences de bassin ou les services agricoles, mais serviront d'alerte et permettront de cibler des études d'impact beaucoup plus précises. Les résultats globaux pourront aussi être comparés avec des estimations, faites à la même échelle, des besoins

en eau. On pourra alors obtenir des résultats comparables à ceux proposés par Vörösmarty et al. (2000) mais avec une estimation plus cohérente de l'eau disponible tout en prenant en compte la variabilité inter-annuelle de la ressource. Dans une simulation transitoire du changement climatique on pourra donc voir comment progressivement la courbe croissante des besoins en eau croisera celle décroissante de la ressource. La période au cours de laquelle les deux courbes se chevaucheront sous l'effet de la variabilité inter-annuelle de la partie physique du cycle va être la plus critique pour les populations et sera déterminante pour l'adaptation aux nouvelles conditions.

L'évolution des schémas de surface que je propose accroît encore le besoin de collaboration avec les hydrologues et bio-climatologues, car nous devons à travers la comparaison de nos modèles, montrer qu'ils peuvent jouer ce rôle d'alarme dans les modèles de climat. Il y a donc une relation de confiance à établir afin que chaque communauté voit bien la complémentarité des deux approches et que celle-ci puisse se transposer dans un progrès plus rapide de la compréhension des changements que nous pouvons attendre dans le cycle de l'eau.

Dans les années qui viennent, trois points doivent être développés en priorité dans ORCHIDEE :

- Les zones inondables dans les hautes latitudes ne sont pas traitées par la paramétrisation présentée ci-dessus. En effet, les processus qui y dominent sont fondamentalement différents de ceux qui interviennent dans le fonctionnement des deltas intérieurs. Nous avons affaire ici à un excédent d'eau de ruissellement qui se forme au moment de la fonte de la neige et du dégel des sols et qui ne peut s'évacuer assez vite. Des petits lacs se forment et tout le terrain devient marécageux.
- Les barrages construits par l'homme sur les cours d'eau, affectent le cycle annuel et la quantité d'eau douce qui arrive dans les océans. Le fleuve où cet effet est le plus important est clairement le Nil. On a des raisons de penser que la construction de barrages depuis des siècles sur le Nil et les rivières se jetant dans la Mer Noire, explique une partie de la dérive en salinité et en température de la Mer Méditerranée (Rohling and Bryden, 1992). Le débit de presque tous les fleuves dans les pays industrialisés est affecté par les barrages, et sa prise en compte est essentielle si l'on veut aborder le problème de la ressource en eau.
- Le point le plus crucial pour simuler la disponibilité de l'eau, est de prendre en compte la partie utilisée par les hommes pour les besoins industriels et ménagers. Ceci n'aura pas d'effet sur la quantité totale de l'eau disponible, mais elle va déterminer si l'eau est propre et consommable ou si au contraire elle est insalubre. En prenant en compte les villes et la fraction de l'eau qu'elles polluent on devrait pouvoir obtenir un ordre de grandeur

de l'eau disponible pour les populations en aval. Le forçage climatique va déterminer le niveau de l'eau dans les fleuves, mais ce n'est qu'avec une telle paramétrisation que l'on pourra dire si cette eau est une ressource exploitable ou non.

- Pour le moment seul le volume de l'eau libre (fleuves et lacs) est simulé dans ORCHIDEE et nous n'avons pas accès à l'étendue associée. Cela pose un problème vu que seule la surface nous permettrait de bien représenter l'impact sur l'évaporation. Cette caractéristique est aussi indispensable si on veut faire le bilan d'énergie sur ces surfaces, ou alors modéliser l'évolution thermodynamique des lacs. À priori, si la topographie était suffisamment bien connue, cela ne poserait pas de problèmes. Mais vu que bien souvent dans ces régions les pentes sont très faibles, cela pose des contraintes extrêmes sur la précision requise pour la topographie. Il faudra donc essayer de trouver une solution plus pragmatique à ce problème. Cela sera relativement aisé pour les grands lacs par exemple, mais ne sera sans doute jamais satisfaisant dans les zones inondables.

3.7.2 La validation d'ORCHIDEE

Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre, lors du développement d'un modèle basé sur une théorie atomiste, la validation est beaucoup plus délicate, car nous avons à faire à des variables non observables. Il est donc indispensable de développer, en même temps le modèle, les méthodes de validation et en particulier les opérateurs qui nous permettent de passer des variables internes aux observables.

Les opérateurs de télédétection

La fin de la thèse de Patricia de Rosnay a coïncidé avec le début des études préparatoires pour SMOS. Il nous est apparu assez rapidement que le modèle multicouche qui venait d'être développé, pouvait être combiné avec un modèle radiatif pour les micro-ondes. Cela permettait de transformer l'humidité et la température du sol en un rayonnement dans la bande de fréquence observée par SMOS. Patricia de Rosnay a donc développé un outil qui permet de transformer la variable non observable qu'est l'humidité du sol dans la quantité qui sera mesurée par SMOS. Même si elle travaille aujourd'hui au CESBIO j'espère que ce modèle radiatif pourra être intégré dans ORCHIDEE et un jour utilisé pour valider le modèle voire pour assimiler des observations.

En 2000 avec Pascale Cayrol, nous avons proposé au CNES, dans le cadre d'une bourse post doctorale, un projet de recherche sur l'assimilation des observations satellitales dans le domaine spectral visible. Aujourd'hui qu'ORCHIDEE inclut un modèle de phénologie, il est tout à fait envisageable de transformer l'état de

la végétation prédit, en un rapport de radiance réfléchi par la surface tel que le NDVI par exemple. Celle-ci pourra donc être directement comparée au grand nombre d'observations qui existent dans cette partie du spectre. Malgré la grande complexité du processus de réflexion de la lumière dans la végétation et la simplicité des modèles que nous sommes contraints d'utiliser, l'information que cela peut apporter aux processus de surface simulés est importante. On touche avec ces observations directement l'albedo et la bio-masse simulée par le modèle. Lionel Jarlan postule au CNRS pour reprendre ce travail qui a été interrompu par le départ de Pascale Cayrol pour un poste dans le privé.

Une observation facilement accessible depuis l'espace, est la hauteur de l'eau dans les fleuves et les lacs. ORCHIDEE pourrait profiter de cette information pour affiner le modèle de routage. Les variations temporelles de l'observation sont directement corrélées avec les changements de volume prédits par le modèle, mais pour une exploitation plus complète de l'information, il faudrait faire des progrès sur le lien entre le volume et la surface ou la hauteur de l'eau libre. Ces observations disponibles aujourd'hui sont donc une motivation de plus pour résoudre ce problème.

Dans GLASS (Voir section 5.3.7) nous encourageons toute la communauté à introduire des opérateurs de télédétection dans leurs modèles. Cela va non seulement faciliter la validation des schémas mais aussi permettre l'inter-comparaison de variables non observables tel que l'humidité du sol entre schémas.

Le routage

Le schéma de routage que nous avons inclus dans ORCHIDEE n'est pas seulement un processus indispensable dans la représentation du cycle de l'eau sur les continents, il est aussi un outil de validation important pour le modèle. En effet, le débit des fleuves est un des flux dans le cycle qui est facile à mesurer tout en étant une observable dans les modèles, vu qu'il est directement lié à la conservation de l'eau.

Un des problèmes à résoudre pour pouvoir profiter pleinement de cette variable de validation est de prendre en compte l'activité humaine. En effet toutes les observations que nous avons, sont affectées d'une façon ou d'une autre par la présence de l'homme. Une des motivations pour les développements présentés ci-dessus est donc aussi de faciliter l'évaluation d'ORCHIDEE. Évidemment ce ne sont pas tous les effets anthropiques qu'il faut prendre en compte, mais seulement ceux qui ont un impact plus important que la marge d'incertitude des modèles.

Le bilan de masse

Comme nous l'avons expliqué dans le premier chapitre, la masse totale de l'eau simulée dans les sols ne sera jamais comparable aux observations. Par contre, les variations temporelles de masse sont observables et offrent un potentiel de validation réel. Les analyses des mesures de TOPEX/POSEIDON qui ont permis de quantifier les échanges de masse d'eau entre les continents et les océans (Cazenave et al., 2000) sont déjà un premier pas dans cette direction. Mais il semble que ces observations ne sont pas suffisamment contraignantes pour le modèle (Ngo-Duc, 2002). Par contre les mesures attendues de GRACE documenteront les variations de l'eau à l'échelle continentale et contribueront plus facilement à l'amélioration du modèle.

Un des problèmes récurrents dans la validation des modèles et l'assimilation d'observations aux échelles plus grandes, est la disponibilité des forçages atmosphériques. Les milieux universitaires qui ont la liberté d'explorer des méthodes originales pour l'exploitation des mesures afin d'obtenir une meilleur contrainte des modèles de surface, n'ont souvent pas accès aux données atmosphériques en quasi temps réel. Les projets LDAS et GLDAS essayent de remédier à ce problème, mais l'effort doit s'intensifier. Vu la nature conceptuelle des schémas de surface, l'assimilation des données y est un problème autrement plus difficile que dans les modèles atmosphériques ou océaniques. Si nous n'essayons pas d'impliquer dès maintenant une communauté scientifique plus importante, les systèmes d'analyse des conditions de surface ne verront pas le jour avant longtemps.

Chapitre 4

Interactions surfaces-atmosphère

À la fin des années 80 et au début des années 90, l'interaction surface-atmosphère a surtout été étudiée à travers les expériences de déforestation tropicale. Vu l'importance des surfaces tropicales (océaniques ou continentales) dans l'énergétique de la machine climatique, cette limitation aux tropiques était tout à fait justifiée. Dans cette région, les modifications des surfaces continentales ont le potentiel d'engendrer des perturbations globales de la circulation atmosphérique. En outre, la problématique de la déforestation est un enjeu majeur pour les pays de la région. Ces études ont commencé par les simulations du Hadley Centre (Lean and Warrilow, 1989) mais ont été reprises par presque toutes les équipes de modélisation du climat.

L'intérêt pour cette problématique s'est fortement estompée au cours de la seconde moitié des années 90 car les résultats des modèles étaient contradictoires. Nous avons aujourd'hui autant de modèles qui suggèrent qu'une déforestation massive induira une réduction de la convergence d'humidité que de modèles qui prédisent une augmentation de la convergence. Certains modèles ont même produit les deux résultats! Le manque de possibilité de validation de la sensibilité des modèles aux perturbations à la surface ont laissé dans la communauté un goût d'inachevé. Toute nouvelle simulation, sans percée significative dans la validation de l'interaction surface/climat dans le tropique, ne sera prise que comme une autre anecdote. Je pense que les résultats obtenus avec le modèle de circulation général (MCG) du LMD (Polcher, 1995) ont été un des éléments qui ont fortement contribué aux doutes sur notre capacité à apporter une réponse satisfaisante au problème de la déforestation tropicale. En effet nous avons montré en 1995 que la grande inconnue dans les régions tropicales était l'interaction surface/systèmes convectifs. L'expérience en AMMA qui est en cours de préparation nous permettra peut être de faire une avancée dans ce domaine.

Depuis la seconde moitié des années 90, plus aucun sujet ne domine l'étude des interactions surface-atmosphère comme le faisait la déforestation avant. Un certain

nombre d'études ont été faites depuis, sur l'impact des changements de surface au Sahel sur le climat. Mais ces dernières ont été confrontées aux mêmes questions sur la validité de la sensibilité des modèles que les études de déforestation. Deux autres thèmes ont émergé ces dernières années. Nous allons les décrire brièvement ici avant de présenter notre contribution avec plus de détails.

Le rôle des processus de surface dans la problématique du changement climatique a été abordé de plusieurs manières au cours de dernières années. Les surfaces continentales avec leurs capacités intégratrices peuvent permettre de rendre détectable un signal de changement climatique comme Chris Milly (2002) l'a montré. Les changements du cycle hydrologique dans sa partie atmosphérique simulée pour une augmentation des gaz à effet de serre sont très bruitées et les observations dont nous disposons ne sont pas suffisamment fiables pour permettre la détection d'une tendance. Chris Milly a pu montrer que ce signal peut devenir interprétable à l'échelle d'un certain nombre de bassins versants si on analyse le débit du fleuve. Comme nous l'avons montré ci-dessus, des limites à cette méthode sont données par la disponibilité de bassins versants ou aucun autre impact humain significatif existe. L'autre solution est de représenter cet effet anthropique explicitement dans les schémas de surface. Le fonctionnement de la végétation sera sans aucun doute affecté par le changement climatique entraînant une modification de sa capacité à stocker du carbone. Ainsi les surfaces continentales interviennent directement dans le cycle du CO_2 et des gaz à effet de serre atmosphérique (Berthelot et al., 2002). Finalement, il y a le sujet de l'incertitude introduite par les schémas de surface dans les prévisions des changements climatiques proches de la surface. Les incertitudes à la surface n'affectent pas aussi directement la sensibilité des MCGs que celles présentes dans la modélisation des nuages par exemple, mais elles affectent directement les variables produites par les modèles de climat qui sont ensuite utilisées dans les études d'impact. Ceci est un thème que nous avons lancé dans le projet Européen Land-Surface Processes and Climate Response (Section 5.3.7) et qui a engendré un certain nombre d'autres études (Pitman, 2001; Pitman and McAvaney, 2002). La section 4.1 décrit notre contribution à ce domaine de recherche.

Le rôle des processus de surface dans la prévisibilité et la variabilité inter-annuelle du climat est un autre thème qui a reçu beaucoup d'attention ces dernières années. Deux approches ont été proposées et elles ont toutes les deux leurs avantages et inconvénients. Pour la première on s'inspire du traitement des océans dans les modèles atmosphériques, c'est-à-dire on impose les conditions de surfaces sur les continents et leurs variations au cours du temps. Ces conditions de surface (l'ensemble des variables prognostiques du schéma de surface ou alors juste la fonction de stress hydrique) sont soit issues d'une simulation précédente (Koster et al., 2000b), d'un exercice GSWP (Section 5.3.7) ou alors d'un système d'assi-

milation de données à la surface (Dirmeyer, 1999). Contrairement aux océans, la variabilité temporelle dominante des surfaces continentales n'est pas limitée aux longues échelles de temps et donc, si on impose les conditions de surface, des divergences vont rapidement apparaître aux courtes échelles de temps (diurnes et synoptiques) et entraîner des problèmes majeurs lors du calcul des flux. On peut tenter de remédier à ce problème en se limitant à n'imposer que les réservoirs lents du schéma de surface pour préserver la cohérence atmosphère/surface aux courtes échelles de temps, mais de cette façon on ne fait que déplacer le problème. On peut aussi utiliser une relaxation vers les conditions de surface, mais là le choix de la constante de temps devient critique. La solution la plus défendable serait de préserver les flux en surface à très haute fréquence et de remplacer le schéma de surface par ces flux. Mais cette solution est plus difficile à mettre en pratique.

Dans la seconde approche, l'étude du rôle des surfaces dans la variabilité du climat, on modifie le schéma de surface afin d'obtenir un autre type d'interaction surface/atmosphère. Par l'analyse on tente ensuite de lier les modifications dans la variabilité inter-annuelle du climat ainsi obtenue aux changements dans le schéma de surface. Le problème de cette approche est la difficulté de l'analyse. Contrairement à la première méthode, la seconde ne donne pas directement la réponse à la question de l'impact sur l'atmosphère d'une meilleure connaissance de la surface. Par contre, on peut extraire des simulations les différentes répercussions sur les interactions surface/atmosphère des anomalies de température de la mer. Ainsi on peut trouver les régions et les processus de surface qui sont critiques pour la variabilité inter-annuelle. Nous allons présenter dans la suite (Section 4.3) le potentiel de cette méthode. Quelle que soit l'approche utilisée, il est clair que ce type d'étude nécessite des intégrations longues, vu qu'il faut construire des ensembles et explorer un grand nombre de situations océaniques différentes. Tout comme pour la déforestation, les résultats risquent de varier fortement d'un modèle à l'autre même si le même protocole expérimental est utilisé.

4.1 Processus de surface et changement climatique

De plus en plus les processus de surface retiennent l'attention dans les études du changement climatique. Maintenant qu'il est acquis que l'activité humaine modifie le climat de la terre, le public et les décideurs se posent des questions sur les impacts. Ce qui est demandé n'est pas une description du changement de la température globale ou de la circulation atmosphérique prévue, mais les impacts sur le cycle hydrologique (inondations ou sécheresses) et les températures extrêmes à la surface. Cette information est requise à l'échelle d'un pays ou d'une région et

non d'un continent.

Les modèles couplés océan/atmosphère qui sont utilisés pour la prévision du changement climatique produisent ce type de sorties, mais on sait que la qualité de la réponse fournie dépend essentiellement de la façon dont les processus de surface sont modélisés. Une inondation ou une sécheresse ne dépend pas que de la modification de la pluviométrie mais aussi de l'évolution de la surface elle-même. Les événements extrêmes en température à la surface par exemple, dépendent de la capacité du schéma de surface à modéliser correctement le cycle diurne à l'échelle régionale.

Nous avons pensé un temps que l'utilisation de modèles plus fins des processus de surface, tels que ceux utilisés en hydrologie ou agronomie, forcés par les conditions atmosphériques prédites dans la simulation globale, pourrait suffire pour reconstituer le signal à petite échelle. Mais à cause du fort couplage entre les surfaces continentales et l'atmosphère, une simulation erronée de la surface aura un impact négatif sur les conditions atmosphériques calculées. La simulation du modèle hydrologique ou agronomique sera donc limitée par la qualité des processus de surface du modèle global.

Afin de comprendre un peu mieux le rôle des schémas de surface dans les simulations de changement climatique, j'ai coordonné un projet Européen : Land-Surface Processes and Climate Response (Voir section 5.3.7). L'expérience proposée était de faire avec 4 modèles de circulation générale (Météo-France, Hadley Centre, University of Reading et le LMD) européens pour une situation de doublement du CO_2 , deux simulations qui ne se distinguent que par leur schéma de surface. Pour s'assurer que le changement climatique simulé était bien le même, un jeu de température de mer commun a été utilisé par les 4 groupes. Le choix du changement à appliquer au schéma de surface entre les deux simulations était libre, mais tous les participants ont choisi une modification de l'hydrologie ou de la paramétrisation de la conductance stomatique. Dans la comparaison des résultats nous avons donc été obligés de faire l'hypothèse que les quatre modifications sont un échantillon représentatif des incertitudes dans la modélisation des processus de surface.

Il aurait été plus rigoureux de changer deux à deux les schémas de surface entre les 4 modèles. Mais vu la forte imbrication des schémas de surface dans les modèles atmosphériques, ce n'était pas faisable. On espère que les développements récents dans les modèles de surface (voir section 3.2) et que le projet PRISM (voir section 5.3.7) qui est financé par l'Europe rendront possible dans un proche avenir ce type d'expérience.

Les incertitudes liées aux processus de surface dans les simulations de doublement de CO_2 peuvent être estimées en comparant les 8 expériences. Les simulations faites par les 4 MCGs avec leurs schémas de surface standard par contre permet d'obtenir une mesure de l'incertitude liée à la composante atmosphérique. Nous

avons pris en charge au LMD l'analyse détaillée de ces incertitudes et nous avons essayé de les quantifier et en les comparant, de déterminer pour certaines variables lequel des deux systèmes contribue le plus aux incertitudes. Tout ce travail a été fait sous l'hypothèse que les modèles utilisés couvrent le spectre des incertitudes liées à la modélisation du système. Mais toutes les études multi-modèle doivent admettre cette hypothèse qui ne pourra jamais être prouvée ou infirmée. Ceci est tout simplement lié au fait que le développement des modèles ne se fait pas de façon indépendante ou avec des conceptualisations des lois phénoménologiques qui ont été obtenues par approches différentes.

Pour ce faire, nous avons développé un diagnostic qui mesure l'incertitude liée aux processus de surface (Crossley et al., 2000). Il est basé sur le rapport de la variance entre les écarts causés par la modification du schéma de surface et de la variance entre les simulations de référence de chaque MCG. Les faibles valeurs de ce rapport d'incertitude indiquent que les changements induits par les processus de surface sont faibles par rapport aux différences entre MCGs et par rapport à la variabilité naturelle de ces modèles. Par contre pour des valeurs autour de 1 on peut dire que les processus de surface entraînent des écarts comparables à ceux que l'on trouve entre MCGs. Cette mesure n'est pas très intuitive, il est donc doublement important de lui donner sa signification statistique. Vu que la distribution statistique du rapport n'est pas connu à priori, il n'est pas possible de développer un test sur des bases analytiques. Nous avons donc opté pour un test basé sur une permutation Monte Carlo des échantillons. Le grand avantage d'un tel test est qu'il est non paramétrique et qu'il utilise tout l'ensemble des données.

La Figure 4.1 montre les valeurs en moyenne zonale du rapport d'incertitude obtenu sur les continents pour les simulations du climat actuel et les anomalies simulées pour le doublement du CO_2 . La contribution la plus importante des processus de surface à l'incertitude sur ces 5 variables simulées par les 4 MCGs pour le climat actuel se trouve aux hautes latitudes et elle est liée au cycle de l'eau. L'étude régionale montre que c'est pendant l'été que cette incertitude est maximale. Ceci est un résultat direct du contrôle que les surfaces continentales exercent sur le recyclage de l'eau surtout sur les continents de l'hémisphère Nord.

Pour les anomalies climatiques l'image est assez différente. La plus grande incertitude apparaît dans les tropiques et elle est directement liée au rôle que joue l'évaporation sur le bilan des flux en surface et donc sur la température de surface. La contribution la plus importante à cette incertitude vient de la saison sèche où effectivement l'augmentation avec le changement climatique du stress hydrique détermine en grande partie les difficultés de la simulation du réchauffement. L'augmentation de l'incertitude sur le rayonnement solaire à la surface et de la couverture nuageuse que l'on peut constater dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord est liée aux rétroactions entre l'évaporation et la couverture nuageuse. Ici on

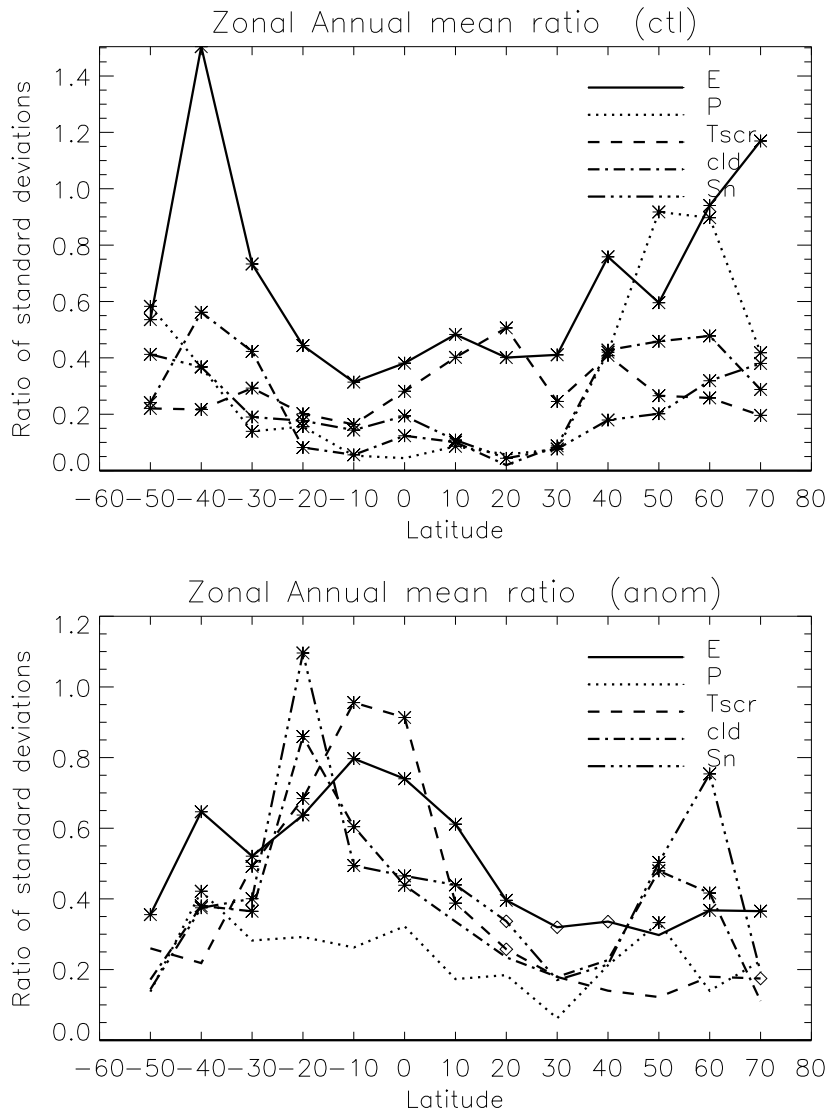


FIG. 4.1 – La moyenne zonale du rapport d’incertitude calculé sur les continents pour 5 variables : Évaporation (E), Précipitation (P), Température à 2m (Tscr), Couverture nuageuse (cld) et rayonnement Solaire Net à la surface (Sn). Les astérisques indiquent les valeurs significatives à 95% et les losanges à 90%

montre avec 4 modèles l'importance de ce processus qui avait déjà été identifié par Meehl et Washington (1988).

Pour mieux comprendre les différences trouvées dans les incertitudes en moyenne zonale, une analyse régionale plus détaillée a été faite. Les résultats sont disponibles sur la page web du projet : http://www.lmd.jussieu.fr/~sechiba/report/report_index.html. Le résultat le plus frappant qu'il reste encore à expliquer est cette différence dans les tropiques entre la contribution des processus de surface à l'incertitude de la simulation du climat actuel et la contribution aux incertitudes des anomalies prédites pour un doublement de CO_2 . Dans les hautes latitudes, la situation est plus simple vu que des processus différents sont responsables des incertitudes dans le climat actuel (le recyclage de l'eau) et dans un climat modifié (la rétroaction avec le nébulosité).

Nous avons essayé de comprendre les raisons des différentes sensibilités des schémas de surface aux changements climatiques et en quoi les modifications faites par les 4 groupes dans leurs schémas ont modifié cette sensibilité (Gedney et al., 2000). Pour ce faire nous avons repris le modèle linéaire des processus de surface développé par Koster et Milly (1997) pour le caler sur les moyennes mensuelles simulées par chacun des 8 modèles. La comparaison de l'évolution au cours du temps des paramètres obtenus pour chaque modèle permet de mieux comprendre l'impact sur son schéma de surface du changement climatique. La première constatation a été que les modifications des schémas de surface qui ont été faites ici ne changent pas fondamentalement le régime de stress hydrique ou de génération de ruissellement dans lequel les schémas opèrent. Cet espace est déterminé par le climat de la région et le schéma de surface. Par contre, on a pu montrer que la sensibilité du schéma au doublement de CO_2 dépendait justement du régime de stress hydrique dans lequel il évolue pour la région considérée. Cette caractéristique détermine si le schéma est plutôt sensible aux modifications de la disponibilité en énergie ou aux variations de la pluviométrie.

Cette analyse nous permet d'émettre l'hypothèse que la plus grande incertitude dans les changements climatiques sous les tropiques est liée aux fortes variations de précipitations plutôt qu'à l'augmentation de l'effet de serre et donc de l'énergie disponible. Même si les variations de la sensibilité de l'évaporation et du ruissellement aux changements de précipitation sont faiblement altérées quand on passe d'un schéma à l'autre, les variations de précipitation sont suffisamment importantes pour expliquer la grande incertitude dans cette région. Dans les hautes latitudes l'augmentation de la précipitation est moins prononcée et les changements d'énergie disponible à la surface sont du même ordre de grandeur. L'incertitude attribuable aux schémas de surface pour les anomalies climatiques est donc faible et comparable à celle du climat actuel vu qu'elle n'est pas amplifiée par les modifications du forçage atmosphérique.

Il ressort de cette étude qu'il est important de valider les schémas de surface en mode couplé. C'est seulement dans cette configuration que l'on peut s'assurer que le schéma se trouve dans un régime de stress hydrique et de ruissellement correct. Ces résultats montrent aussi l'attention que l'on doit prêter à la validation des schémas dans la plus grande gamme de climats possible. Effectivement les modifications du climat attendues peuvent être suffisamment importantes régionalement pour amplifier une petite erreur dans des conditions actuelles.

4.2 L'utilisation de modèles régionaux pour l'étude des interactions

Les modèles régionaux de climat (MRCs) qui utilisent des grilles horizontales avec des résolutions de l'ordre de $20km \times 20km$ et des temps d'intégration de plusieurs années, offrent des possibilités tout à fait intéressantes pour l'étude des processus de surface. Tout d'abord ces modèles ont une résolution bien plus importante que les MCGs et permettent donc de résoudre explicitement par exemple le rôle de l'orographie dans les processus de surface. Ensuite, le fait que ces modèles sont forcés aux limites par des analyses météorologiques, assure que les échelles de temps synoptiques sont bien représentées. On peut donc s'attendre à un forçage de la surface beaucoup plus réaliste et directement comparable aux observations. L'avantage de l'utilisation des MRCs par rapport à un forçage direct des schémas de surface par des observations ou des analyses (par exemple SAFRAN (Durand et al., 1993)) est que l'interaction surface/atmosphère est libre. L'atmosphère peut répondre aux flux simulés à la surface, et donc amplifier ou atténuer les erreurs dans le schéma de surface.

Les MRCs ont aussi des problèmes qui conditionnent leur utilisation et qu'il ne faut pas sous estimer. Les deux questions principales que l'on doit se poser sont les suivantes :

- Les méthodes de relaxation des variables atmosphériques aux limites du domaine du MRC vers les champs à grande échelle ne conservent pas l'eau. Ceci peut entraîner une dérive de l'eau dans le modèle et en particulier de l'humidité du sol. Cette limitation a fait l'objet de plusieurs discussions dans le Working Group on Numerical Experiments (WGNE) et le GEWEX Modelling and Prediction Panel (GMPP) (WGNE,1999).
- Les conditions aux limites peuvent réduire de façon excessive le nombre de degrés de liberté de l'atmosphère tel qu'elle est simulée par un MRC près de la surface. Si on veut utiliser avec profit les MRCs pour l'étude des processus entre la surface et l'atmosphère il ne faut pas que cette interaction soit sous estimée ou biaisée.

Dans le projet LSCPR nous avons choisi d'aborder ces points avant d'utiliser les deux MRCs participants pour une étude de déforestation.

Les deux modèles avec lesquels nous avons fait les études sont ceux du Danish Meteorological Institut (HIRHAM) et de la Universidad Complutense de Madrid (PROMES). Dans les modèles régionaux, les schémas de surface sont en général relativement simples vu que l'utilisation de ces modèles en mode climatique est récente. Mais dans les deux modèles utilisés ici nous avons fait une remise à niveau sur ce point. PROMES inclut depuis 1995 le schéma de surface SECHIBA du LMD. Ceci est le résultat d'une longue collaboration qui nous permet justement de profiter du MRC pour le développement de notre schéma de surface. Dans HIRHAM nous avons corrigé les erreurs sur la conservation d'énergie et d'eau dans le couplage avec la surface qui ont été révélées lors de l'intégration de SECHIBA dans ECHAM (Schulz et al., 2001).

Les simulations que nous avons effectuées pour étudier le potentiel des MRCs pour l'étude des interactions surface/atmosphère, sont inspirées de celles faites avec les MCGs pour la séparation des variabilités internes et externes au système atmosphérique (Harzallah and Sadourny, 1995). Un ensemble de simulations pour l'année 1982 a été faite avec chacun des modèles sur un domaine centré sur la Méditerranée. Les membres de l'ensemble ne se distinguent que par les conditions initiales à la surface. Pour chaque simulation on prend l'état de la surface produite par la simulation précédente à la dernière heure de l'année 1982. Le système est initialisé avec un sol à saturation. Avec la variance entre les différentes réalisations de l'année 1982, nous avons une mesure de la variabilité interne du système induite par la surface. En étudiant l'évolution de la première à la dernière année simulée on peut aussi suivre la dérive du système.

Dans les deux modèles régionaux nous avons pu constater qu'après deux années de mise en route, le système ne dérive plus de façon significative. La crainte sur la conservation de l'eau exprimée par WGNE/GMPP n'est pas un problème ici. Ce résultat n'est sans doute pas généralisable à tous les MRCs et à toutes les configurations. Il est probable que la stabilisation obtenue ici soit étroitement liée au fait que le bord d'entrée des masses d'air dominantes se trouve sur l'Atlantique. L'océan n'accumule et n'amplifie pas les précipitations sporadiques qui se produisent dans la zone de relaxation qui correspond au flux d'entrée dominant. On a pu constater dans HIRHAM que si on a des flux entrants sur un des bords du domaine qui se trouve sur le continent, des problèmes peuvent se produire. Dans la configuration méditerranéenne, un faible flux entre par le bord sud qui se trouve au dessus du Sahara. Ici les pluies sporadiques de la zone de relaxation humidifie le sol et augmente l'évaporation. Ceci induit un recyclage de l'eau par l'atmosphère qui se propage tout doucement vers le centre du domaine et humidifie une région de plus en plus grande. Ici cette erreur a été sans conséquences, car le processus était

	LMD MCG PROMES area	HIRHAM full area	HIRHAM PROMES area	PROMES
Janvier				
Température à 2m (°C)	0.72 – 1.55	0.01 – 0.11	0.01 – 0.07	0.00 – 0.05
Precipitation (mm/day)	0.20 – 1.26	0.00 – 0.18	0.00 – 0.14	0.00 – 0.27
Evaporation (mm/day)	0.08 – 0.70	0.00 – 0.06	0.00 – 0.04	0.00 – 0.06
Juillet				
Température à 2m (°C)	0.42 – 1.18	0.03 – 0.16	0.02 – 0.19	0.00 – 0.12
Precipitation (mm/day)	0.00 – 0.61	0.00 – 0.20	0.02 – 0.16	0.00 – 0.61
Evaporation (mm/day)	0.05 – 0.39	0.02 – 0.11	0.02 – 0.12	0.00 – 0.21

TAB. 4.1 – Intervalle de variances ponctuelle normalisée par la variance moyenne sur la région. Les valeurs du MCG sont calculées sur le domaine du modèle PROMES à partir d’une simulation de 10 ans forcée par des températures océaniques climatologiques. Pour HIRHAM les valeurs sur tout son domaine et celui de PROMES sont données.

trop faible et lent pour influencer de façon significative le domaine entier, mais cela montre bien que c’est un point à vérifier pour chaque configuration du MRC. Dans PROMES le problème n’a pu être constaté car le schéma d’interpolation vertical utilisé limite (Gaertner and Castro, 1996) les précipitations sporadiques de la zone de relaxation.

Les degrés de liberté dont disposent les interactions surface atmosphère sont estimés par la variabilité intra-ensemble de chaque modèle. Ceci décrit d’une certaine façon la magnitude de la composante chaotique de l’atmosphère simulée par le MRC. Il est évident que la circulation à grande échelle simulée par le MRC est fortement contrainte par les conditions aux limites, et on trouve effectivement pour des variables telles que le géopotentiel à 850 *hPa*, des valeurs de variance excessivement faibles. Par contre, les processus proches de la surface et liés au cycle de l’eau sont moins fortement contraints par la grande échelle, et peuvent donc développer leur propre dynamique. Le tableau 4.1 montre que dans la région méditerranéenne, la variabilité de la température à 2m, la précipitation, et l’évaporation, atteignent en juillet des valeurs relativement élevées. Il est important de bien comprendre que l’amplitude de cette variabilité interne est déterminante pour évaluer l’utilité des MRCs. Vu que le géopotentiel est fortement contraint, on ne peut pas l’utiliser pour valider le modèle ni étudier la perturbation qui résulterait d’une modification du modèle. Par contre à la surface, il y a un espoir vu que l’ordre de grandeur des fluctuations est comparable à celle d’un MCG.

Évaluer le réalisme de la variabilité interne simulée par les MRCs est difficile vu

que c'est une quantité théorique non observable. La seule possibilité est de comparer les valeurs des MRCs à celles que l'on peut obtenir dans un MCG (Tableau 4.1). On peut s'attendre à une variabilité plus faible à la surface dans les MRCs comparée à celle des MCGs vu que le forçage atmosphérique est fortement contraint. Mais d'un autre côté, le MRC peut lui, grâce à sa haute résolution, développer des circulations méso-échelle fortement variables si leur interaction avec la grande échelle est faible. Le Tableau 4.1 montre qu'en juillet la variabilité interne de la précipitation par exemple est tout à fait comparable entre les MRCs et le MCG. Sur la Péninsule Ibérique on est en situation de subsidence à cette période de l'année, et le forçage grande échelle est faible. Donc le système non-linéaire qu'est l'atmosphère peut se développer librement dans le MRC. Par contre en janvier, quand la région est dominée par les advections venant de l'Atlantique la variabilité interne des MRCs est très faible. Seul le MCG peut faire varier les conditions atmosphériques dans la région.

Les résultats de cette étude nous ont permis d'interpréter les résultats d'une déforestation faite avec HIRHAM et PROMES (Gaertner et al., 2001). Mais la discussion de la significativité des résultats d'un point de vue statistique et rapportée aux degrés de liberté du système, est restée sur des arguments qualitatifs. Pour avancer dans ce domaine il faudrait une étude systématique avec plusieurs MRCs de la variation de la variabilité interne pour différentes tailles de domaine, et donc d'échelles représentées ainsi que pour différentes résolutions afin de comprendre le rôle des circulations méso-échelle. De toute évidence les MRCs ne pourront être utilisés pour des études de sensibilité aux processus de surface que si celle-ci n'a pas d'impact sur la circulation générale. Les applications tropicales semblent donc problématiques.

4.3 Le rôle des surfaces continentales dans la variabilité climatique

Un certain nombre d'études émettent l'hypothèse que les processus de surface, dans certaines régions, peuvent déterminer la variabilité inter-annuelle du climat (Charney, 1975; Charney et al., 1977; Xue and Shukla, 1993). Dans tous les cas il a été montré qu'une modification de la surface changeait le climat moyen. Ensuite il était nécessaire de faire appel à la mémoire des surfaces continentales pour faire évoluer l'anomalie d'une année sur l'autre et donc expliquer le lien entre les processus de surface et la variabilité inter-annuelle du climat. L'exemple le plus convainquant est le processus de Charney (1975) proposé pour le Sahel. Dans ce scénario la végétation est suffisamment affectée par les anomalies climatiques pour que son évolution l'année suivante en soit modifiée et pour qu'elle influence ainsi la

prochaine saison des pluies. Cette rétroaction entre la surface et l'atmosphère d'une année sur l'autre peut expliquer des variations climatiques à toutes les échelles inter-annuelles.

Jusqu'à présent aucune étude n'a tenté d'analyser le rôle de la surface dans la variabilité climatique par le biais des changements de l'état moyen de l'atmosphère que celle-ci peut induire. Les études précédentes sont parties de l'hypothèse que c'est la mémoire longue des surfaces continentales qui influence directement la variabilité inter-annuelle. Nous avons donc essayé d'étudier l'hypothèse suivante : en modifiant l'état moyen de l'atmosphère par la surface, on changera le contraste océan/continents et donc la variabilité imposée sur le système climatique par les températures océaniques. Les interactions surface-atmosphère déterminent en partie l'impact que la variabilité océanique peut avoir sur le cycle de l'eau dans son ensemble. Donc, sans propagation d'une anomalie de l'état de la surface d'une année sur l'autre, la variabilité du climat sur les continents peut être modulée par la surface.

Pour étudier l'interaction entre les processus de surface et la variabilité climatique par le biais du climat moyen, nous avons effectué deux ensembles de simulations avec le MCG du LMD qui ne se distinguent que par leurs schémas de surface (Manynard and Polcher, 2003). Afin d'avoir un échantillon représentatif de la variabilité climatique, les températures océaniques entre 1960 et 1994 ont été utilisées pour forcer le modèle. L'utilisation d'un ensemble de simulations pour chaque configuration du MCG est nécessaire pour séparer la variabilité interne du système de celle forcée par l'océan. Pour des raisons d'ordre pratique, la taille des ensembles a dû être limitée. L'ensemble de simulations de référence (avec le schéma de surface SECHIBA) ne comprend que 5 membres et l'ensemble perturbé (avec une hydrologie de type BUCKET) n'a que 3 membres. La différence entre les deux schémas de surface est relativement simple et seulement liée au cycle de l'eau. L'albédo, la rugosité ou autres propriétés de la surface n'ont pas été modifiées. Les réservoirs assurant l'évaporation rapide de la surface (interception par le feuillage et couche supérieure d'humidité de sol) ont été remplacés par un seul et unique réservoir d'eau dans le sol. L'évaporation moyenne ainsi que la réponse de l'évaporation à des événements pluvieux sont modifiées. L'impact de ces modifications sur les variations de l'évaporation à l'échelle annuelle est plus difficile à évaluer *a-priori* mais on peut avancer que dans les tropiques où le réservoir d'eau se vide toutes les saisons sèches, la mémoire des deux versions du schéma de surface devrait être faible.

L'analyse s'est focalisée sur la précipitation car c'est le flux dominant dans le cycle de l'eau, et sa sensibilité aux processus de surface est indirecte et résume assez bien toutes les modifications atmosphériques. Nous nous concentrons sur les régions tropicales car c'est là que le lien entre les températures océaniques et la

variabilité climatique est le mieux établie. Une motivation supplémentaire vient du fait que pour la plupart des sociétés vivant sous les tropiques, la variabilité inter-annuelle de la précipitation est une contrainte forte sur leur développement car elle détermine la production agricole et les ressources en eau.

La moyenne inter-ensemble des anomalies de précipitation dans les régions indiennes et sahéliennes sur la période simulée montre que les deux ensembles ont des caractéristiques très similaires (Figure 4.2). Les mêmes années sont extrêmes pour les deux configurations du modèle. La variabilité inter-annuelle simulée est satisfaisante en Inde mais au Sahel la différence des précipitations entre les années 50 et 70 n'est pas du tout représentée par le modèle. Ce que l'on doit noter dans ces deux figures, c'est que l'amplitude de la variabilité inter-annuelle des deux ensembles est différente. Ceci montre que les processus ont un effet sur la variabilité inter-annuelle du modèle. Mais vu la grande ressemblance des deux courbes, on peut aussi émettre l'hypothèse que le facteur déterminant de la variabilité est la température océanique même si les surfaces continentales ont un rôle modérateur. Il s'agit maintenant d'analyser les mécanismes qui sont en jeu.

Tout d'abord nous avons analysé en détail l'état moyen des deux modèles. Cela permet de mieux comprendre les différences entre les climats simulés et d'offrir des pistes pour la compréhension de la différence dans les variabilités inter-annuelles. Au cours du cycle annuel de la précipitation dans les régions tropicales, nous pouvons distinguer entre un régime dominé par le recyclage de l'eau et un autre par la convergence d'humidité. Nous nous concentrons donc sur l'importance relative du recyclage et de la convergence. Le régime de recyclage correspond en général à la saison sèche ; par contre l'autre domine pendant la saison des pluies. Cette distinction n'est pas toujours très nette dans le modèle. Par exemple dans le région Sahélienne, durant la saison des pluies le recyclage reste important.

La distinction entre ces deux régimes a été faite à l'aide de la décomposition du climat en événements convectifs (Polcher, 1995). Comme il avait été montré dans l'étude du cycle de l'eau lié à la convection (Polcher, 1995), dans les événement fortement convectifs (Classe III) la précipitation est produite à partir d'eau qui est apportée par la convergence à grande échelle. Par contre en situation de subsidence (événements de classe I) c'est l'évaporation locale qui fournit cette eau. Pour les événements intermédiaires (classe II) par contre, les contributions locales et de grande échelle à la précipitation sont comparables. La comparaison des deux jeux de simulations permet de mieux comprendre comment l'évaporation locale et la circulation atmosphérique interagissent pour produire un changement de précipitation.

Durant la saison sèche, qui est dominée par les événements de subsidence, le schéma BUCKET montre une divergence d'humidité et une évaporation plus faible. Ces deux composantes viennent se combiner pour produire un change-

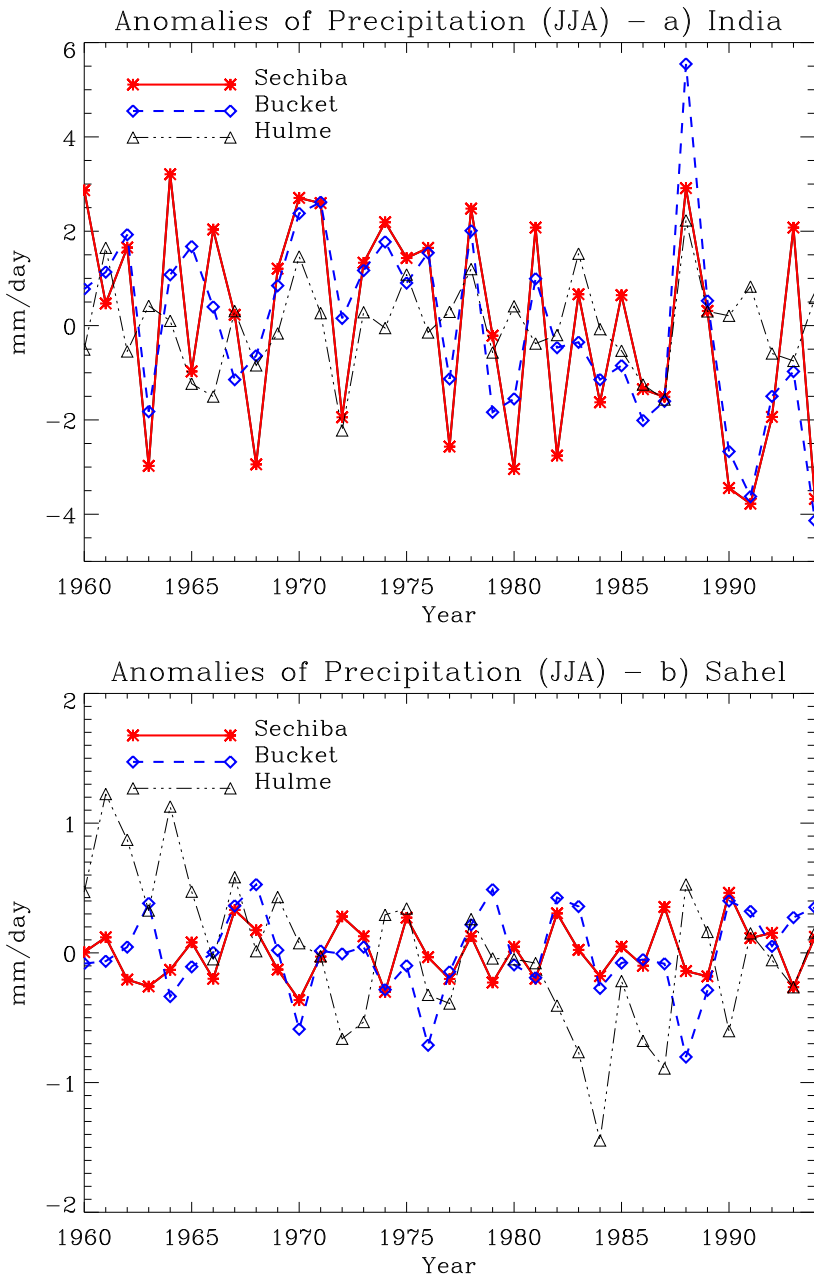


FIG. 4.2 – Anomalies de précipitation moyenne pour les deux ensembles de simulations. SECHIBA : le MCG couplé à SECHIBA. BUCKET : le MCG avec un schéma de surface dont l'hydrologie a été simplifiée. HULME : sont les anomalies de précipitation tirées de la climatologie de Hulme (Hulme, 1992)

ment de précipitation. Si la réduction de la divergence est plus faible que celle de l'évaporation, la précipitation augmente, sinon, elle diminue. Par contre en saison humide, lorsque les événements convectifs intenses dominent, le schéma de surface entraîne systématiquement une augmentation de la précipitation par une convergence d'humidité plus intense. Cette augmentation de la convergence a pu être attribuée à un plus grand nombre d'événements de classe III. En étudiant la réponse des deux schémas de surface au passage d'un événement convectif, nous avons émis l'hypothèse que dans le modèle du LMD cette différence pouvait expliquer la modification de la fréquence de la convection. En effet, l'hydrologie simplifiée perd l'eau tombée au sol par évaporation beaucoup plus rapidement que SECHIBA. Le flux de chaleur sensible est donc faible après un événement convectif avec le schéma BUCKET ce qui ne favorise pas le développement de la convection dans le MCG du LMD comme il a déjà été montré (Polcher, 1995).

La première étape de l'analyse de la variabilité inter-annuelle a été de déterminer quelles situations synoptiques contribuent le plus par leur variabilité aux variations de la précipitation. Dans la plupart des régions analysées, c'est la variabilité des événements fortement convectifs qui explique la plus grande partie des fluctuations de précipitation. Ce résultat correspond bien à ce qui a été observé par Le Barbé et Lebel (1997) sur la région Sahélienne. Le climat du Sahel simulé par le MCG n'est pas assez humide et par conséquent il n'est constitué que de très peu d'événements de classe III. C'est donc une des régions où justement dans le modèle la variabilité de la précipitation n'est pas contrôlée par ce type d'événements.

À partir de ces constatations sur le climat moyen des deux ensembles de simulations et les caractéristiques de la variabilité inter-annuelle du modèle, nous avons émis une hypothèse sur le rôle que peuvent jouer les processus de surface dans la variabilité du climat. Vu la plus grande convergence d'humidité, pendant la saison des pluies, lors du couplage avec le schéma SECHIBA et l'échelle spatiale de la convergence des événement de classe III, cette version du MCG va dépendre plus fortement des processus au dessus des océans et en particulier de l'évaporation. Les variations inter-annuelles des températures océaniques vont donc avoir une répercussion plus forte sur les précipitations continentales.

Cette hypothèse permet d'expliquer les observations faites sur la figure 4.2. Le mécanisme explique que les processus de surface affectent surtout l'amplitude de la variabilité inter-annuelle de la précipitation, vu qu'elle ne fait pas intervenir de nouvelles constantes de temps. La mauvaise représentation au Sahel de la variabilité inter-annuelle peut s'expliquer par le faible nombre d'événements de classe III et donc par le faible lien avec les variations de température océanique, une conséquence directe de la mauvaise simulation du climat moyen. Le changement de la variabilité inter-annuelle dans cette région, induit par la modification du schéma de surface, est différente de celle observée en Inde, car elle opère sur de la

convection moins intense et repose donc plus sur des rétroactions locales.

L'analyse des variabilités internes et forcées de ces simulations a aussi donné des résultats en accord avec l'hypothèse émise. Ce sont les événements de classe III qui ont la variabilité interne la plus faible et qui sont donc fortement pilotés par les conditions océaniques. Lors de la modification du schéma de surface c'est justement cette partie forcée de la variabilité qui est la plus affectée.

4.4 Perspectives

Après les années passées à développer le schéma de surface de l'IPSL, nous allons pouvoir étudier l'impact des zones humides tropicales sur l'atmosphère et l'influence sur le climat du contrôle exercé par l'homme sur la branche continentale du cycle de l'eau. Ces études se feront à travers le cas des plaines d'inondation et celui de l'irrigation. Vu que ces sources d'eau pour l'atmosphère sont dans les tropiques, il est attendu qu'elles auront un impact sur le développement et le cycle de vie des systèmes convectifs qui se déplacent sur les continents. Un certain nombre de questions scientifiques concernant les interactions entre le climat et la branche continentale du cycle hydrologique peuvent être abordées grâce au modèle ORCHIDEE que nous avons développé.

- Des simulations couplées atmosphère/surface nous permettront d'étudier l'interaction, entre les zones humidifiées par les inondations et l'irrigation et la dynamique atmosphérique dans les tropiques. Les trois grandes zones concernées (le Niger, le Parana et l'Inde) correspondent à des zones de convergences tropicales avec une forte interaction entre la surface et la convection. La période au cours de laquelle les flux de surface sont le plus modifiés par le transport latéral de l'eau à la surface est la fin de la saison des pluies. Est-ce que cela aura un effet sur le recyclage de l'eau au cours de la transition entre la saison humide et sèche ?
- Une intégration longue du modèle couplé (1950-2000) atmosphère/surface nous permettra de valider l'impact de la variabilité climatique sur le système hydrologique. Il a été montré que les anomalies de l'hydrographe du fleuve à Niamey sont deux fois plus importantes, en pourcentage, que celles de la précipitation sur le bassin observée au cours du siècle dernier. Arriverons-nous à simuler l'amplification des anomalies de pluies par le bassin versant du Niger ou d'autres fleuves tropicaux ? Sera-t-il possible de reproduire les amplitudes observées des variations du débit à Niamey et le rôle du delta intérieur dans cette variabilité ?
- ORCHIDEE comprend un module de phénologie et d'évolution de la végétation. En activant cette option, nous pourrions tester la réponse de la végétation aux zones inondables et à l'irrigation. Est-ce que la végétation va mieux

se développer dans ces régions, quel en sera l'impact à travers l'albedo et les autres propriétés de la surface sur le climat ? Les modifications atmosphériques ne seront elles que locales ou alors s'étendront-elles à toute la région ? Si la réponse du modèle est correcte, nous pourrions nous aventurer dans l'étude de l'interaction entre la variabilité climatique, l'hydrologie et la végétation.

- Des expériences de doublement de CO_2 en mode arrêt sur image, ou des simulations transitoires, nous permettront d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'irrigation. Le modèle devrait pouvoir nous montrer les régions dans lesquelles la ressource en eau aura trop diminué pour permettre le maintien d'une agriculture qui nécessite l'irrigation.

Même si les études proposées pour les années à venir sont originales elles ne vont pas vraiment répondre aux questions fondamentales que nous nous posons sur l'interaction surface atmosphère. Nous n'apporterons que la réponse d'un modèle et rien ne nous permet d'affirmer qu'elle ne sera pas contestée par un autre modèle avant que l'encre de la publication ne sèche.

Dans les autres disciplines de la physique nous avons accès à des modèles qualitatifs et robustes qui nous permettent d'encadrer les résultats possibles et d'exclure certaines solutions irréalistes produites par le modèle quantitatif. Les interactions surface/atmosphère dans les tropiques sont trop complexes pour pouvoir proposer un tel modèle qualitatif. Il existe bien celui de Charney (Charney et al., 1977) ou celui que j'ai proposé (Polcher, 1995) mais tous les deux sont basés sur des résultats de MCGs. Il n'existe pas aujourd'hui assez de données indépendantes de toute modélisation (cela exclut les re-analyses) pour pouvoir valider ces modèles qualitatifs. Nous n'avons donc pas d'image conceptuelle de l'interaction surface/atmosphère indépendante des implémentations numériques des processus de surface ou de la convection qui nous permettrait de placer des garde fous pour les résultats issus de modèles.

Comment pouvons-nous sortir de cette impasse où la question fondamentale de la pertinence des études faites avec un modèle reste posée ? Pour le moment je ne vois que deux solutions, mais qui nécessitent la collaboration de toute la communauté pour être mises en oeuvre. Toutes les deux sont en cours d'implémentation dans GMPP.

L'approche traditionnelle de GMPP pour développer les paramétrisations a été de faire travailler ensemble, dans le cadre de comparaisons de modèles, les chercheurs travaillant à petite échelle avec ceux développant les MCGs. Cette approche a été très productive car elle a permis de confronter des concepts très différents des processus en jeux. Il paraît donc logique d'aborder une partie des rétroactions surface/atmosphère de la même façon. Dans le cadre de GMPP il est tout à fait envisageable d'organiser une comparaison de schémas de convection

entre CRMs (Cloud Resolving Model) et SCMs (Single Column Model) où tous utiliseraient le même schéma de surface pour un cas de convection continentale observé. Ensuite le schéma de surface pourrait être changé afin d'étudier la réponse atmosphérique. Ce type d'expérience n'explore pas toutes les rétroactions possibles, vu que la convergence à grande échelle est prescrite. Néanmoins on pourrait voir si les deux types de modèles répondent de la même façon à une perturbation à la surface et quelle est l'étendue du spectre des réponses. Tout comme dans les expériences GCSS ou PILPS, ce sont les questions soulevées par une telle inter-comparaison qui enrichiront le débat. Tous les participants chercheront à savoir pourquoi leur modèle était différent et qui a raison. Avec Steve Krueger (directeur de GCSS), nous avons commencé à réfléchir à une telle expérience et GLASS a déjà proposé un schéma de surface adapté à ce type d'étude.

Pour une telle série d'expériences numériques, il faudra au moins un cas test. Vu que la plus forte sensibilité du climat aux processus de surface est attendue dans les régions tropicales, les observations devraient donc couvrir des situations convectives à différents stades d'évolution. Pour le moment, sur les continents, les seuls cas dont nous disposons sont anciens et n'incluent pas d'observations des états ou des flux de surface. Il est donc indispensable que des campagnes d'observation viennent combler ce vide. Le meilleur espoir que nous avons pour le moment est le projet AMMA. Il prévoit non seulement une phase intensive qui devrait permettre de bien observer des situations convectives, mais aussi une période d'observation plus longue (au moins deux années) avec un suivi des conditions de surface. Nous devrions donc disposer après la phase expérimentale d'AMMA des données nécessaires pour faire avancer notre compréhension des interactions surface/convection et nous permettre ainsi de valider dans une certaine mesure la sensibilité des modèles atmosphériques aux changements à la surface.

Une approche complémentaire et tout aussi prometteuse est l'expérience GLACÉ proposée par Randy Koster dans le cadre de GLASS. L'objectif de cette expérience est de comparer les couplages surface/atmosphère entre les différents MCGs et leurs schémas de surface. Le plan expérimental est suffisamment simple pour que tous les modèles puissent le suivre et donc imposer les mêmes perturbations. Il a été testé sur 4 MCG (Koster et al., 2002) et il a prouvé l'intérêt scientifique de cette étude. L'expérience consiste à effectuer un ensemble de simulations sur 3 mois. D'un des membres, on préserve toutes les variables de la surface à tous les pas de temps. Ensuite on effectue un second ensemble, mais maintenant on maintient dans tous les cas les variables de surface aux valeurs sauvegardées. La différence de la variabilité interne du modèle, nous renseignera sur la contrainte imposée par la surface à l'atmosphère. C'est une mesure du couplage surface/atmosphère. Comme nous l'avons exposé dans l'introduction, ce type de perturbation à la surface pose quelques problèmes. Mais ce qui compte ici, c'est que l'implémentation soit simple

afin d'assurer une large participation, et que son impact soit le même dans tous les schémas de surface. Pour le moment c'est la seule expérience que nous avons trouvée qui remplit ces critères. Le résultat attendu de cette expérience est de mettre en évidence les différences dans l'intensité du couplage surface/atmosphère dans les différents modèles. Les bénéfices pour la communauté seront de trois sortes :

1. Les développeurs des modèles se poseront des questions sur les différences observées. Ils chercheront à déterminer laquelle des composantes de leurs modèles est responsable de cette divergence.
2. Nous identifierons des régions où tous les modèles ont le même couplage et on pourra donc en conclure que, soit les processus de surface n'y jouent pas un rôle important, ou alors que les processus sont bien maîtrisés.
3. Si un des modèles participants est utilisé pour une expérience de déforestation, ou toute autre perturbation à la surface on pourra déterminer la représentativité du résultat. En connaissant sa position parmi les résultats de GLACÉ, on saura si sa réponse a de fortes chances d'être reproduite par d'autres modèles ou alors quels sont les modèles qui pourraient contredire le résultat.

L'expérience GLACÉ nous permettra donc d'aborder le problème de la sensibilité du climat aux processus de surface d'une façon plus générale et forcera toute étude de perturbation à la surface de se positionner par rapport à cette incertitude autour du couplage surface/atmosphère. Il est à espérer que cette étude jouera un peu le même rôle que celle faite par Cess et al. (1993)(Cess et al., 1993) pour le forçage radiatif des nuages dans le cadre d'une augmentation des gaz à effet de serre.

Chapitre 5

conclusion

Au cours des années 90, la modélisation globale des processus de surface a pris un certain essor. Il me semble que l'on peut considérer que le point de départ de cette évolution a été la série d'expériences PILPS (Project for Intercomparison of Land surface Parameterization Schemes) (Henderson-Sellers et al., 1995). Même si elle n'a fait que reprendre l'idée expérimentale qui est à la base du projet SLAPS que nous avons mené en Europe (Polcher et al., 1996), elle l'a hissée au niveau international. Une autre différence majeure a été l'enthousiasme avec lequel Ann Henderson-Sellers a mené le projet PILPS et donc a su convaincre un très grand nombre de groupes de participer. En effet des équipes qui avaient un schéma de surface pour le traitement d'observations ou l'étude de processus, que les modélisateurs atmosphériques pour qui le schéma assurait la conservation de l'eau et de l'énergie sur les surfaces continentales, ont contribué leurs simulations.

Les équipes issues de la modélisation atmosphérique ont été très vite confrontées à une divergence entre la version de leur schéma utilisée pour les expériences PILPS et celle utilisée dans le modèle de circulation générale. Cette communauté a aussi découvert à cette occasion les avantages du mode forcé pour le développement des schémas, que se soit sur un site qui propose des flux observés pour comparaison ou alors à l'échelle globale en utilisant la base de données constituée par le projet ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project). Ce dernier jeu de données a été utilisé par le Global Soil Wetness Project (GSWP) qui a suivi PILPS de quelques années. Quand Ann Henderson-Sellers a commencé à proposer de coupler tous les schémas de surface à un même modèle atmosphérique afin de les comparer dans exactement les mêmes conditions de couplage, la communauté a réalisé que la situation qui prévalait alors n'était plus tenable. La vision des processus de surface comme une paramétrisation parmi d'autres dans le modèle atmosphérique nous avait jusqu'alors dispensé de nous poser la question de fond sur la répartition des tâches entre les deux modèles. Il était donc temps de décider quels processus étaient à dominante surface et ceux qui relevaient plus

du rayonnement, de la turbulence ou d'autres processus atmosphériques. Ce n'est qu'une fois cette question tranchée que l'on peut définir et développer un modèle de surface qui traite de façon cohérente tous les processus avec une interaction surface/atmosphère bien définie. C'est cette situation qui a fait que la proposition d'interface standard surface/atmosphère proposée lors du projet PILPS-4c (Polcher et al., 1998b) ai été bien accueillie par la communauté.

L'interface que nous avons proposée en 1997 est implémentée dans de plus en plus de modèles atmosphériques et de schémas de surface. Bien plus important que la standardisation de l'interface, la proposition PILPS-4c a conduit à une indépendance des schémas de surface et elle a aussi conduit à la constitution d'équipes autour de ces modèles dans les centres de modélisation atmosphérique. Depuis cette transition, je pense qu'il vaut mieux parler de modèles de surface et non plus de schémas de surface. Les surfaces continentales ne sont plus traitées par une paramétrisation dans l'atmosphère mais sont modélisées aujourd'hui par un ensemble cohérent de processus. La physique et la biologie sur les terres émergées sont représentées dans des modèles à part entière qui sont à placer au même niveau que l'océan, l'atmosphère ou la chimie.

Avec ce changement d'attitude dans la communauté, la représentation des processus de surface n'est plus seulement une nécessité pour la clôture des grands cycles dans les modèles atmosphériques, mais elle est aussi devenue un objectif en soi dans les modèles du système terre.

Les centres météorologiques opérationnels sont passés de schémas de surface simples fortement contraints par des climatologies, à des modèles qui rivalisent en complexité avec ceux utilisés dans les modèles de climat. Ce changement a été en partie motivé par le besoin de prévoir aussi l'évolution de variables directement influencées par les processus de surface. Ces schémas commencent par exemple à inclure les villes afin de représenter le contraste campagne/villes dans les prévisions des températures. La société attend des centres météorologiques des prévisions des crues. Il est donc devenu important pour ces centres de pouvoir simuler correctement au cours de la prévision le ruissellement de surface induit par les fortes pluies ou la fonte des neiges afin de pouvoir ensuite prévoir des quantités d'eau réalistes dans les rivières et les fleuves. Ceci impose des contraintes fortes sur les schémas de surface utilisés dans la prévision.

Pour les centres de recherche climatique, le cycle du carbone et l'impact de l'activité humaine ainsi que du changement climatique ont été les moteurs de l'évolution des schémas de surface au cours des dernières années. Cela a initié le passage de paramétrisations empiriques de la transpiration, à des représentations plus biophysiques de la photosynthèse et le développement de modules qui simulent l'évolution des stocks de carbone et de l'état de la végétation. On essaye aujourd'hui aussi de simuler dans les modèles de surface la pression anthropique sur le cycle

de l'eau continental afin de pouvoir représenter dans un avenir proche certains aspects de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. Le premier processus à avoir été inclus est l'irrigation (de Rosnay et al., 2003). Sa double dépendance du forçage atmosphérique peut le rendre particulièrement vulnérable au changement climatique. Tout d'abord elle dépend d'une disponibilité suffisante d'eau dans les cours d'eau et ensuite elle sera modifiée par la croissance de la demande atmosphérique en eau induite par l'augmentation de l'effet de serre.

La complexité croissante des modèles de surface a renforcé la nécessité de construire des systèmes d'assimilation de données. Cela concerne aussi bien les applications météorologiques que climatiques. Pour les premières, il est important de construire les états initiaux pour les prévisions. Pour les seconds par contre, il existe aussi bien la nécessité d'initialiser les réservoirs lents (le cycle du carbone par exemple) que le besoin de déterminer des paramètres globaux qui ne sont pas directement observables. Une différence entre les deux applications est que la première peut être régionale tandis que la seconde est nécessairement globale. Mais cela peut aussi être vu comme une complémentarité qui renforce la collaboration entre ces deux applications des schémas de surface.

Ces évolutions qui ont eu lieu au cours de la seconde moitié des années 90 vont certainement se poursuivre en se renforçant dans les 10 ans à venir. La communauté des modèles de surface va se rapprocher de plus en plus des activités traditionnelles des hydrologues, des agronomes ou des écologues. Afin que la collaboration entre ces communautés se passe bien et soit fructueuse, il faudra que soit bien comprise la spécificité de chacune de ces modélisations. Vu la nature atomistique des théories dont nous disposons pour représenter les processus de surface et la nature conceptuelle des variables simulées, la différence dans les objectifs et les échelles considérés feront que les modèles ne seront jamais échangeables. Nous partageons les mêmes idées sur le fonctionnement des surfaces et le débat doit se focaliser sur la façon dont elles sont interprétées à l'échelle macroscopique et ensuite implémentées. Les différences devront pouvoir se justifier par les différents objectifs qui sont visés. Le respect de la spécificité des objectifs de chaque communauté sera donc essentiel pour une bonne collaboration. Si on accepte que le manque de théories phénoménologiques du fonctionnement de la surface fait que le système n'est pas observable dans sa totalité, on doit en conclure que la diversité des modèles est inévitable et qu'elle témoigne directement de la richesse de la communauté et de l'intensité du débat scientifique.

Pour la partie physique des processus de surface (les processus qui interviennent directement dans les cycles d'énergie et d'eau) représentés dans les modèles atmosphériques, les développements des années à venir vont se focaliser sur la prise en compte du transport et de la redistribution horizontales de l'eau. Les premières tentatives de modéliser cette partie du cycle étaient entièrement justifiées par la

nécessité de fermer le bilan d'eau dans les modèles couplés en remettant le ruissellement de surface dans les océans (Sausen et al., 1994). Les derniers développements par contre se concentrent plus sur l'impact de cette redistribution d'eau sur les processus de surface eux mêmes (Koster et al., 2000a), et la ressource en eau disponible pour les activités humaines (Vörösmarty et al., 2000a; Oki et al., 2001; de Rosnay et al., 2003).

À l'échelle sous maille des modèles, la redistribution de l'eau engendrée par l'orographie peut par exemple être importante pour obtenir des ruissellements de surface plus réalistes ou alors renforcer l'évaporation dans les parties où convergent les flux d'eau. Les mêmes processus se produisent aussi à l'échelle des fleuves et peuvent donc modifier les échanges surface/atmosphère à l'échelle régionale. L'écoulement latéral est aussi la source principale pour l'eau consommée par nos sociétés. Une fois que cet écoulement est représenté de façon satisfaisante, l'étape suivante sera de tenir compte de l'irrigation, des barrages et de la consommation municipale.

L'impact de cette redistribution d'eau sur l'atmosphère n'a pas encore été étudié mais on peut envisager deux voies de rétroactions possibles. Soit par une modification locale des flux d'eau et d'énergie à l'interface ou alors par une modification de l'apport d'eau douce dans les océans. Même si l'impact sur le climat actuel est faible, la prise en compte de ces interactions est importante dans le cadre des études de changement climatique vu que les modifications qu'elles vont subir vont directement affecter l'eau disponible pour les populations.

Le but n'est pas de nous immiscer dans le métier des hydrologues mais par contre de faire une première interprétation hydrologique du climat et de ses modifications que nous simulons dans les modèles globaux. En effet le lien entre une anomalie de précipitation et un impact hydrologique n'est pas trivial. On ne peut donc pas simplement, depuis les résultats produits par le modèle atmosphérique, distinguer les régions où l'impact hydrologique sera négligeable de celles où au contraire il sera critique. L'évolution des schémas de surface qui est préconisée ici devrait permettre de reconnaître dans les modèles de climat, les régions qui nécessiteront une étude d'impact hydrologique approfondie afin de prévoir les conséquences d'un changement climatique. Si ces objectifs de la communauté atmosphérique sont bien compris, je pense que cette évolution devrait favoriser les collaborations avec les hydrologues.

La situation est similaire pour les développements qui se font autour du cycle du carbone et l'évolution de la végétation dans les schémas de surface. Les mêmes approches qu'en agronomie ou en écologie sont utilisées mais avec une perspective climatique. Ce qui importe dans les schémas de surface est de bien représenter le liens de ces processus avec les flux surface/atmosphère et le cycle hydrologique tout en gardant une perspective globale. La communauté des schémas de surface doit, je

pense, jouer le rôle d'intégrateur pour les différentes disciplines qui interviennent dans les processus à la surface et leurs interaction avec l'atmosphère. Ce n'est pas une tâche facile vu que nous ne représenterons jamais les processus dans nos modèles aussi bien que ce que les "spécialistes" considèrent comme nécessaire. Avec l'extension à l'échelle globale nous serons toujours confrontés aux cas particuliers qui ne sont pas encore couverts par la théorie. Même si ce travail d'intégration restera toujours imparfait, il est néanmoins nécessaire si on veut avoir une vue globale des processus de surface et une capacité de suivi et de prévision des états de surface.

Une des étapes clefs des années à venir sera la construction de systèmes d'assimilation de données pour les surfaces continentales. Pour notre société ce type de système sera sans doute plus important que les systèmes qui existent déjà pour l'atmosphère ou l'océan car ils permettraient le suivi des états hydriques et des réservoirs de carbone sur les continents. Ceci est crucial dans le contexte du changement climatique car nous devons pouvoir suivre les impacts sur les ressources en eau et l'évolution du bilan naturel de carbone à l'échelle des pays ou des continents dans le cadre du protocole de Kyoto. Construire un tel système d'assimilation sur les continents est un défi scientifique plus important que cela ne l'a été pour l'atmosphère ou l'océan. Il y a plusieurs raisons à cela. Comme nous l'avons déjà discuté, nous ne disposons sur les surfaces continentales que de très peu d'observables et un grand nombre d'approches pour sa représentation sont utilisées. Il faudra donc pour chaque variable observée et chaque modèle utilisé construire les opérateurs d'observation qui font le lien entre les deux. Ce n'est qu'une fois cette étape accomplie que l'on pourra passer à l'assimilation à proprement parler. Une difficulté supplémentaire qui sera rencontrée sur les surfaces continentales, est la diversité des processus qui interagissent. L'assimilation devra aussi bien contraindre les processus physiques que biologiques et ce n'est qu'en combinant des observations de plusieurs sources qu'on pourra y arriver. Finalement, contrairement à l'atmosphère ou à l'océan, l'impact de l'homme sur les processus est directement observable. Les modèles et les méthodes utilisés dans un système d'assimilation doivent donc explicitement en tenir compte.

Vu l'importance des enjeux il me semble qu'il faut tenter de surmonter ces difficultés et essayer de construire des systèmes d'assimilation pour les surfaces continentales et cela dans une approche résolument multidisciplinaire. Pour ce faire il faudra un effort Européen, voir global, pour encourager le plus de chercheurs possibles à se pencher sur la problématique. Ce travail ne devra pas être limité à un nombre restreint de centres opérationnels ou grands centres de recherche mais devra autant que possible impliquer la communauté universitaire d'où sortent souvent les idées les plus originales. Pour y arriver il faudra résoudre le problème de distribution des données et des modèles. En effet il est indispen-

sable que les données et modèles nécessaires pour tester l'assimilation de nouvelles observations ou de nouvelles méthodes numériques soient aussi facilement accessibles que possible. Un premier pas dans cette direction a été fait aux États-Unis avec le projet GLDAS (Global Land-Data Assimilation System). Les données ne sont certainement pas parfaites mais elles sont globales et disponibles avec moins d'une semaine de retard sur le temps réel. Un effort similaire doit être tenté en Europe afin d'encourager une communauté plus large à s'intéresser au problème d'assimilation sur les surfaces continentales. Un pas dans la bonne direction serait de créer un miroir des données GLDAS en Europe et d'organiser autour de lui une animation scientifique. Mais on peut aussi envisager une collaboration avec les collègues Japonais qui essaient eux aussi d'encourager le développement d'un système d'assimilation sur les surfaces continentales.

Pour aller au delà du caractère anecdotique des expériences de sensibilité il faudra aborder le problème de la validation, ou de la vérification, de la sensibilité de nos modèles. Comme les expériences de déforestation tropicale qui ont été faites au début des années 90 l'ont montré, les différents modèles ont des réponses opposées à une modification de l'évaporation continentale similaire. Une validation des modèles dans le climat actuel ne peut garantir qu'ils auront aussi la même sensibilité à une perturbation vu que ces résultats peuvent avoir été obtenu par des chaînes causales différentes. Comme il est peu probable que nos systèmes d'observation n'arrivent à être suffisamment fins pour valider toute la chaîne causale dans nos modèles globaux, d'autres méthodes doivent être trouvées.

Le GEWEX Modelling and Prediction Panel (GMPP) propose de faire avancer notre connaissance sur la sensibilité du système et de nos modèles en les validant dans des cas bien observés et en comparant des modèles qui représentent les processus en question à différentes échelles. Dans les expériences du type de PILPS par exemple, on peut comparer et valider (sur un site où les données sont disponibles) l'origine de l'évaporation et donc déterminer si toutes les causes observées du flux et de ses fluctuations sont bien représentées par le modèle. PILPS ne nous avance pas pour le problème du couplage surface/atmosphère. Par contre l'approche du GEWEX Cloud System Study (GCSS) qui compare le cycle de vie d'un système convectif ou d'un nuage simulé par plusieurs modèles aux observations, nous permettrait de progresser. En effet la comparaison des modèles conceptuels avec ceux qui résolvent explicitement la convection ou les nuages et des observations, peut nous permettre de déterminer si les processus clefs sont pris en compte et si leurs interactions sont réalistes. Ce n'est qu'une fois que ceci a été vérifié que l'on peut espérer que la sensibilité du modèle conceptuel aux perturbations se rapproche de celle de la réalité. Cette validation par processus peut être facilement étendue à l'interaction surface/atmosphère, en particulier pour le climat tropical qui est dominé par les systèmes convectifs. La campagne d'observation AMMA ainsi que sa

composante modélisation devraient nous offrir la possibilité de constituer des cas qui nous permettront d'étudier l'interaction surface/atmosphère dans des modèles qui résolvent différentes échelles. Cela devrait conduire à des améliorations dans les modèles globaux et ainsi nous donner une plus grande confiance dans les études de sensibilité qui sont conduites sur l'interaction surface/atmosphère.

Mais cette validation par les processus est intrinsèquement limitée par le nombre de cas que l'on peut traiter et les régions du globe où les observations sont d'une qualité suffisante. Il est donc important d'explorer en parallèle, à l'échelle globale, les régions où les plus grandes incertitudes subsistent sur l'interaction surface/atmosphère afin de pouvoir cibler des études de cas. Cela peut se faire avec des études de sensibilité multi-modèles dans lesquelles tous les modèles participants appliquent une même perturbation. Sous l'hypothèse que le climat simulé est de qualité comparable, on peut déduire des réponses simulées que les régions où la divergence inter-modèle est la plus importante les processus dans la chaîne causale interagissent différemment. On aura ainsi identifié une région où il faudra approfondir notre connaissance des processus en jeux et améliorer leurs représentation dans les modèles. Ce type d'études a par exemple été fait pour les processus de surface et le changement climatique (Polcher et al., 1998a) et est actuellement en cours dans l'expérience GLACÉ (Koster et al., 2002).

C'est avec ces deux outils que j'espère contribuer à une meilleure connaissance des processus qui interviennent dans l'interaction surface/atmosphère et aboutir à une plus grande confiance dans la sensibilité de nos modèles aux perturbations continentales.

Bibliographie

- Bergson, H. (1907). *L'Évolution Créatrice*. Quadrige P.U.F, Presses Universitaire de France, Paris.
- Berthelot, M., Friedlingstein, P., Ciais, P., Monfray, P., Dufresne, J. L., Le Treut, H., and Fairhead, L. (2002). Global response of the terrestrial biosphere to co2 and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4) :1084.
- Boltzman, L. (1886). Ueber die unentbehrlichkeit der atomistik in der naturwissenschaft. *Annalen Der Physik und Chemie*, 60 :231–247.
- Budyko, M. (1958). *The heat balance of the Earth's surface*. Office of Climatology, U.S. Weather Bureau, Washington D.C. by N. Stepanova.
- Cazenave, A., Remy, F., Dominh, K., and H., D. (2000). Global ocean mass variation, continental hydrology and the mass balance of the antarctica ice sheet at the seasonal time scale. *Geophy. Res. Letters*, 27 :3755–3758.
- Cess, R. D., Zhang, M. H., Potter, G. L., Barker, H. W., Colman, R. A., Dazlich, D. A., Delgenio, A. D., Esch, M., Fraser, J. R., Galin, V., Gates, W. L., Hack, J. J., Ingram, W. J., Kiehl, J. T., Lacis, A. A., Letreut, H., Li, Z.-X., Liang, X.-Z., Mahfouf, J.-F., McAvaney, B. J., Meleshko, V. P., Morcrette, J.-J., Randall, D. A., Roeckner, E., Royer, J.-F., Sokolov, A. P., Sporyshev, P. V., Taylor, K. E., Wang, W. C., and Wetherald, R. T. (1993). Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models. *Science*, 262 :1252–1255.
- Charney, J. G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 :193–202.
- Charney, J. G., Quirk, W. J., Chow, S. H., and Kornfield, J. (1977). A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atmos. Sci.*, 34 :1366–1385.
- Chen, T. H., Henderson-Sellers, A., Milly, P. C. D., Pitman, A. J., Beljaars, A. C. M., Polcher, J., Abramopoulos, F., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Desborough, C. A., Dickinson, R. E., Dumenil, L., Ek, M. B., Garratt, J. R.,

- Gedney, N., Gusev, Y. M., King, J., Koster, R., Kowalczyk, E., Laval, K., Lean, J., Lettenmaier, D., Liang, X., Mahfouf, J.-F., Megelkamp, H.-T., Mitchell, K., Nasonova, O. N., Noilhan, J., Robock, A., Rosenzweig, C., Schaake, J., Schlosser, A., Schulz, J. P., Shao, Y., Shmakin, A. B., Verseghy, D. L., Wetzell, P., Wood, E. F., Xue, Y., Yang, Z.-L., and Zeng, Q. (1997). Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parametrizations schemes (PILPS). *J. Climate*, 10 :1194–1215.
- Choisnel, E. (1984). Un modèle agronoméorologique opérationnel de le bilan hydrique utilisant des données climatiques. *Conférence Internationale CIID, les besoins en eau des cultures* :Paris 11–14.09.1984.
- Crossley, J., Polcher, J., Cox, P., Gedney, N., and Planton, S. (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Climate Dyn.*, in press.
- d’Abro, A. (1936). *The rise of the new physics, its Mathematical and Physical Theorie, Vol I*. Dover Publication, Dover Publication Inc, New York.
- Darcy, H. (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Dalmont, Dalmont, Paris.
- de Rosnay, P., Polcher, J., Laval, K., and Sabre, M. (February 2003). Estimating the atmospheric impact of irrigation over india using a modified land-surface model. *GEWEX News*, pages 3–6.
- de Rosnay P. and Polcher, J. (1998). Improvements of the representation of the hydrological exchanges between the biosphere and the atmosphere in a GCM. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2(2-3) :239–256.
- Dirmeyer, P. A. (1999). Assessing GCM sensitivity to soil wetness using GSWP data. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77 :367–385.
- Dirmeyer, P. A., Dolman, A. J., and Sato, N. (1999). The global soil wetness project : A pilot project for global land surface modeling and validation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80 :851–878.
- Dolman, H. and Dickinson, R., editors (1997). *Land surface parametrization/Soil Vegetation-Atmosphere transfer shemes workshop*, number 31 in IGPO Publication series.
- Ducharne, A., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Polcher, J., Ledoux, E., and de Marsily, G. (2003). Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM. *J. Hydrol.*, submitted.
- Ducharne, A., Laval, K., and Polcher, J. (1998). Sensitivity of the hydrological cycle to the parametrization of soil hydrology in a GCM. *Climate Dyn.*, 13 :307–327.

- Durand, Y., Brun, E., Mérindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., , and Martin, E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow schemes used with atmospheric models. *Ann. Glaciol.*, 18 :65–71.
- Feddes, R. A., Hoff, H., Bruen, M., Dawson, T., de Rosnay, P., Dirmeyer, P., Jackson, R., Kabat, P., Kleidon, A., Lilly, A., Milly, P., and Pitman, A. (2001). Modeling root water uptake in hydrological and climate models. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, under press.
- Fekete, B. M., Charles, V., and Grabs, W. (2000). Global, composite runoff fields based on observed river discharge and simulated water balances. Technical report, UNH/GRDC, Global Runoff Data Centre, Koblenz, Germany.
- Gaertner, M., Christensen, O., Prego, J., Polcher, J., Gallardo, C., and Castro, M. (2001). The impact of deforestation on the hydrological cycle in the western mediterranean : an ensemble study with two regional climate models. *Climate Dyn.*, 17(11) :857–874.
- Gaertner, M.-A. and Castro, M. (1996). A new method for vertical interpolation of the mass field. *Mon. Weather Rev.*, 124 :1596–1603.
- Gedney, N., Cox, P. M., Douville, H., Polcher, J., and Valdes, P. J. (2000). Characterising GCM land-surface schemes to understand their response to climate change. *J. Climate*, 13(17) :3066–3079.
- Hagemann, S. and Dümenil, L. (1998). A parametrization of the lateral waterflow on the global scale. *Climate Dyn.*, 14 :17–31.
- Harzallah, A. and Sadourny, R. (1995). Internal versus SST-forced variability as simulated by an atmospheric general circulation model. *J. Climate*, 8 :474–495.
- Henderson-Sellers, A., Pitman, A. J., Love, P. K., Irannejad, P., and Chen, T. (1995). The project for inter-comparison of land-surface parametrization schemes (PILPS) : Phase 2 and 3. *Bull. Amer. Meteo. Soc.*, 76 :489–503.
- Hulme, M. (1992). A 1951-80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. *Climate Dyn.*, 7 :57–72.
- Koster, R., Dirmeyer, P., Hahmann, A., Ijpelaar, R., Tyahla, L., Cox, P., and Suarez, M. (2002). Comparing the degree of land-atmosphere interaction in four atmospheric general circulation models. *J. Hydrometeor.*, 3 :363–375.
- Koster, R., Suarez, M., Ducharne, A., Praveen, K., and Stieglitz, M. (2000a). A catchment-based approach to modelling land-surface processes in a GCM - part 1 : Model structure. *J. Geophys. Res.*, Submitted.
- Koster, R. D. and Milly, P. C. D. (1997). The interplay between transpiration and runoff formulations in land surface schemes used with atmospheric models. *J. Climate*, 10(7) :1578–1591.

- Koster, R. D., Suarez, M. J., and Heiser, M. (2000b). Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales. *J. Hydrometeorol.*, 1(1) :26–46.
- Le Barbé, L. and Lebel, T. (1997). Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *J. Hydrol.*, 188-189 :43–73.
- Lean, J. and Warrilow, D. A. (1989). Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. *Nature*, 342 :411–413.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et Université Paris 6.
- Leibniz (1686). *Discours de Métaphysique*. Agora, Pocket.
- Manabe, S. (1969). Climate and the ocean circulation 1. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth’s surface. *Mon. Weather Rev.*, 97(11) :739–774.
- Manynard, K. and Polcher, J. (2003). Impact of land-surface processes on the interannual variability of tropical climate in the lmd gcm. *Climate Dyn.*, 20 :613–633.
- Meehl, G. A. and Washington, W. M. (1988). A comparison of soil-moisture sensitivity in two global climate models. *J. Atmos. Sci.*, 45 :1476–1492.
- Meeson, B. W., Corprew, F. E., McManus, J. M. P., Myers, D. M., Closs, J. W., Sun, K. J., Sunday, D. J., and Sellers, P. J. (1995). *ISLSCP Initiative I - Global data sets for land-atmosphere models, 1987-1988, Volumes 1-5*. NASA, Published on CD-ROM by NASA, USA/NASA/GDAAC/ISLSCP 001 - USA, NASA, GDAAC, ISLSCP-005 edition.
- Miller, J. R., Russell, G. L., and Caliri, G. (1994). Continental-scale river flow in climate models. *J. Climate*, 7 :914–928.
- Milly, P. and Shmakin, A. (2002a). Global modeling of land water and energy balances. part i : The land dynamics (lad) model. *J. Hydrometeorol.*, 3(3) :283–299.
- Milly, P. and Shmakin, A. (2002b). Global modeling of land water and energy balances. part ii : Land-characteristic contributions to spatial variability. *J. Hydrometeorol.*, 3(3) :301–310.
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K., and Delworth, T. (2002). Increasing risk of great floods in changing climate. *Nature*, 415 :514–517.
- Milly, P. C. D. (1992). Potential evaporation and soil moisture in general circulation models. *J. Climate*, 5 :209–226.

- Ngo-Duc, T. (2002). Evolution de l'humidité du sol. Master's thesis, DEA : Océanologie, Météorologie et Environnement PARIS 6 Ecole Doctorale Sciences de l'Environnement (ED129).
- Oki, T., Agata, Y., Kanae, S., Saruhashi, T., Yand, D., and Musiaka, K. (2001). Global assessment of current water resources using total runoff integrated pathways. *Hydrological Science Journal*, 46(6) :983–995.
- Peylin, P., Polcher, J., Bonan, G., Williamson, D., and Laval, K. (1997). Comparison of two complex land-surface schemes coupled to the NCAR-GCM. *J. Geophys. Res.*, 102 :19,413–19,431.
- Pitman, A. (2001). Underlying uncertainty in the simulation of soil moisture and runoff from climate models. *Australian Journal of Water Resources*, 5 :1–17.
- Pitman, A. and McAvaney, B. (2002). The role of surface energy balance complexity in land surface models' sensitivity to increasing carbon dioxide. *Climate Dyn.*, 19 :609–618.
- Plank, M. (1933). *Wege zur Physikalischen Erkenntnis*. Hirzel, Hirzel, Leipzig.
- Polcher, J. (1994). *Etude de la sensibilité du climat tropical à la déforestation*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 185pp.
- Polcher, J. (1995). Sensitivity of tropical convection to land surface processes. *J. Atmos. Sci.*, 52(17) :3143–3161.
- Polcher, J., Cox, P., Dirmeyer, P., Dolman, H., Gupta, H., Henderson-Sellers, A., Houser, P., Koster, R., Oki, T., Pitman, A., and Viterbo, P. (May 2000). Glass : Global land atmosphere system study. *GEWEX News*.
- Polcher, J., Crossley, J., Bunton, C., Douville, H., Gedney, N., K., L., Planton, S., Rowntree, P. R., and Valdes, P. (1998a). Importance of land-surface processes for the uncertainties of climate change : A european project. *GEWEX News*, 8(2) :11–13.
- Polcher, J., Laval, K., Dümenil, L., Lean, J., and Rowntree, P. R. (1996). Comparing three land surface schemes used in GCMs. *J. Hydrol.*, 180 :373–394.
- Polcher, J., McAvaney, B., Viterbo, P., Gaertner, M.-A., Hahmann, A., Mahfouf, J.-F., Noilhan, J., Phillips, T., Pitman, A., Schlosser, C. A., Schulz, J.-P., Timbal, B., Verseghy, D., and Y., X. (1998b). A proposal for a general interface between land-surface schemes and general circulation models. *Global and Planetary Change*, 19 :263–278.
- Working Group on Numerical Experimentation (1999). Report on the fourteenth session of the CAS/JSC working group on numerical experimentation. Technical Report WGNE Report No. 14, WMO/TD-No. 964, World Climate Research Programme, WMO Atmospheric Research and Environment Program.

- Richards, L. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1 :318–333.
- Rohling, E. and Bryden, H. (1992). Man-induced salinity and temperature increases in western mediterranean deep water. *J. Geophys. Res.*, 97,C7 :11191–11198.
- Sausen, R., Schubert, S., and Dümenil, L. (1994). A model of the river-runoff for use in coupled atmosphere-ocean models. *J. Hydrol.*, 155 :337–352.
- Schulz, J. P., Dümenil, L., and Polcher, J. (2001). On the land-surface/atmosphere coupling and its impact in a single column atmospheric model. *J. Appl. Meteorol.*, 40 :642–663.
- Schulz, J. P., Dümenil, L., Polcher, J., Schlosser, A., and Xue, Y. (1998). Land surface energy and moisture fluxes : comparing three models. *J. Appl. Meteorol.*, 37 :288–307.
- Shao, Y. and Henderson-Sellers, A. (1996). Modelling soil moisture : a project for intercomparison of land surface parameterization schemes phase 2(b). *J. Geophys. Res.*, 101(D3) :7227–7250.
- Shmakin, A., Milly, P., and Dunne, K. (2002). Global modeling of land water and energy balances. part iii : Interannual variability. *J. Hydrometeorol.*, 3(3) :311–321.
- Vörösmarty, C., Fekete, B., Meybeck, M., and Lammers, R. (2000a). Global system of rivers : Its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(2) :599–621.
- Vörösmarty, C., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. (2000b). Global water resources : Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289 :284–288.
- Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F. (1989). Time variability of the earth’s gravity field : Hydrological and oceanic effects and their possible detection using grace. *J. Geophys. Res.*, 103(B12) :30205–30229.
- Xue, Y. and Shukla, J. (1993). The influence of land surface properties on Sahel climate. part I : Desertification. *J. Climate*, 6(12) :2232–2245.

5.1 Curriculum vitae

Jan POLCHER
10, rue des Frères Lumière
92500 Rueil-Malmaison
FRANCE
Tel : 01.47.32.25.57

21 Août 1964 à Frankfurt a. M.
Citoyen Allemand
Marié, 1 enfant

Adresse Professionnelle :

Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS
Tour 25, 5ème étage, BP 99
4, Place Jussieu, F-75252 PARIS cedex 05

Tel : 01.44.27.47.63
Fax : 01.44.27.62.72
e-mail : polcher@lmd.jussieu.fr

Études Supérieures et diplômes

1983 : Collège Stanislas, Montreal, Canada Baccalauréat série C
1989 : Christian-Albrecht-Universität, Kiel, Allemagne Diplom der Physik
N-body simulations applied to elliptical galaxies
1994 : Université Pierre et Marie Curie, Paris, France Thèse de 3^{ème} Cycle.
Etude de la sensibilité du climat tropical à la deforestation.

Expérience Professionnelle

1994-1995 : Bourse post-doctorale du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).
1995-présent : Chargé de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Fonctions d'intérêt collectif

- Coordination du projet Européen "Land Surface Processes and Climate Response" dans le 4^{ème} PCRD.
- Coordination du projet "Base de données des simulations de changement climatique à l'usage des études d'impact" du programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC).
- Mise en place du projet Global Land/Atmosphere System Study (GLASS) au sein du programme GEWEX.
- Direction du GEWEX Modelling and Prediction Panel (GMPP).
- Membre du comité scientifique du Atmospheric Model Inter-comparison Project (AMIP).
- Membre du Working Group on Numerical Experimentation (WGNE).

- Membre du comité scientifique et du bureau du Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat (PNEDC).

Publications

Publications dans des revues scientifiques :	34
Contributions à des ouvrages :	1
Actes de conférence :	5
Lettres d'information :	6
Logiciels Publiés :	1

Activités d'encadrement

Thèses co-encadrées :		7	
Doctorant	Directeur	Date de soutenance	Taux d'encadrement
J.-P. Shulz	L. Dümenil	1998	50%
P. de Rosnay	K. Laval	1999	75%
J.-A. Prego	M. Castro	2000	50%
S. Verant	K. Laval	Pévu pour fin 2003	50%
T. Ngo-Duc	K. Laval	A débuté en 2002	
T. d'Orgeval	J. Polcher	A débuté en 2003	
X. Trollé	A. Tuzet	A débuté en 2003	
Post-doctorant encadrés :		5	

5.2 Production scientifique

5.2.1 Revues à comité de lecture

- Polcher, J. (1989) N-Körper-Simulationen - Angewandt auf Elliptische Galaxien. Diploma Thesis, *Christian Albrecht Universität zu Kiel*.
- Polcher, J. (1994) Etude de la sensibilité du climat tropical à la deforestation. PhD Thesis, *Université Pierre et Marie Curie, Paris VI*.
- Polcher, J. and Laval, K. (1994a) The impact of African and Amazonian deforestation on tropical climate. *Journal of Hydrology*, **155** : 389-405.
- Polcher, J. and Laval, K. (1994b) A statistical study of the regional impact of deforestation on climate in the LMD-GCM. *Climate Dynamics*, **10** :205-219.
- Le Roux, X., Polcher, J., Dedieu, G., Menaut, J. C., and Monteny, B. (1994) Radiation exchanges above west african moist savannas : seasonal patterns, and comparaison with a GCM simulation. *J. Geophys. Res.*, **99(D12)** : 25,857-25,868.
- Mechoso, C.R., Robertson, A.W., Barth, N., Davey, M.K., Delecluse, P., Gent, P.R., Ineson, S., Kirtman, B., Latif, M., Le Treut, H., Nagai, T., Neelin, J.D., Philander, S.G.H., Polcher, J., Schopf, P.S., Stockdale, T., Suarez, M.J., Terry, L., Thual, O., Tribbia, J.J. (1995). The seasonal cycle over the tropical pacific in general circulation models. *Monthly Weather Review*, **123(9)** : 2825-2838.
- Polcher, J. (1995) Sensitivity of tropical convection to land surface processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52(17)** : 3143-3161.
- R.C. Raghava, K. Laval, R. Sadourny, J. Polcher (1995) On the atmospheric response to the tropical denuding of vegetation. *Atmospheric Environment*, **29** : 1963-2000..
- Polcher J., Laval, K., Dümenil, L., Lean, J., Rowntree, P.R. (1996) Comparing three land surface schemes used in GCMs. *Journal of Hydrology*, **180** : 373-394.
- Polcher J. and Shao, Y. (1996) A Standard format for reporting PILPS experiments. *Global and Planetary Change*, **13** : 217-223.
- Peylin, P., Polcher J., Bonan, G., Williamson, D., Laval, K. (1996) Comparison of two complex Land-Surface Schemes coupled to the NCAR-GCM. *J. Geophys. Res.*, **102** : 19,413-19,431.
- Chen, T.H., Henderson-Sellers, A., Milly, P. C. D., Pitman, A. J., Beljaars, A. C. M., Polcher, J., Abramopoulos, F., Boone, A., Chang, S., Chen, F., Dai, Y., Desborough, C. A., Dickinson, R. E., Dümenil, L., Ek, M. B., Garratt,

- J. R., Gedney, N., Gusev, Y. M., King, J., Koster, R., Kowalczyk, E., Laval, K., Lean, J., Lettenmaier, D., Liang, X., Mahfouf, J.-F., Megelkamp, H.-T., Mitchell, K., Nasonova, O. N., Noilhan, J., Robock, A., Rosenzweig, C., Schaake, J., Schlosser, A., Schulz, J. P., Shao, Y., Shmakin, A. B., Verseghy, D. L., Wetzell, P., Wood, E. F., Xue, Y., Yang, Z.-L. and Zeng, Q. (1996) Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS). *Journal of Climate*, **10** : 1194-1215.
- Laval, K., Raghava, R.C., Polcher, J., Sadourny, R., Forichon, M., (1996) Simulation of the 1987 and 1988 Indian Monsoons using the LMD GCM. *Journal of Climate* **9** : 3357-3371.
- Schulz, J.-P., L. Dümenil, J. Polcher, C. A. Schlosser, Y. Xue, (1998) Land surface energy and moisture fluxes : comparing three models, *J. Appl. Meteor.*, **37** : 288-307.
- Ducharne, A. Laval, K. and Polcher, J. (1998) Sensitivity of the hydrological cycle to the parameterization of soil hydrology in a GCM. *Climate Dynamics*, **14** : 307-327.
- Polcher, J., McAvaney, B., Viterbo, P., Gaertner, M.-A., Hahmann, A., Mahfouf, J.-F., Noilhan, J., Phillips, T., Pitman, A.J., Schlosser, C.A., Schulz, J.-P., Timbal, B., Verseghy D., and Xue, Y. (1998) A proposal for a general interface between land-surface schemes and general circulation models. *Global and Planetary Change*, **19** : 263-278.
- Ciret, C., Polcher, J. and Le Roux, X. (1999) An approach to simulate the phenology of savanna ecosystems in the LMD general circulation model. *Global Biogeochemical Cycles*, **13(2)** :603-622.
- De Rosnay, P. and Polcher J. (1998) Modeling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology and Earth System Sciences*, **2(2-3)** : 239-256.
- Culf, A., Fisch, G., Lean, J., and Polcher, J. (1998). A comparison of amazonian climate data with general circulation models. *J. of Climate*. **11(11)** : 2764–2773.
- Pitman, A.J., Henderson-Sellers, A., Desborough, C.E., Yang, Z.-L., Abramopoulos, F., Boone, A., Dickinson, R.E., Gedney, N., Koster, R., Kowalczyk, E., Lettenmaier, D., Liang, X., Mahfouf, J.-F., Noilhan, J., Polcher, J., Qu, W., Robock, A., Rosenzweig, C., Schlosser, C. A., Shmakin, A. B., Smith, J., Suarez, M., Verseghy, D., Wetzell, P., Wood, E., Xue Y. (1999). Key results and implications from phase 1(c) of the Project for Intercomparison of Land-surface Parametrization Schemes *Climate Dynamics*, **15(9)** : 673-684.

- Gedney, N., Cox, P.M., Douville, H., Polcher, J. and Valdes, P.J. (2000). Characterising GCM land surface schemes to understanding their responses to climate change. *J. of Climate*, **13(17)** : 3066-3079.
- Douville, H., Royer, J.-F., Polcher, J., Cox, P., Gedney, N., Stephenson, D. and Valdes, P. (2000). Impact of CO_2 doubling on the Asian summer monsoon : robust versus model-dependent responses. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78** : 421-439.
- Crossley, J.F., Polcher, J., Cox, P.M., Gedney, N. and Planton S., (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Climate Dynamics*, **16** : 949-961.
- Sabre, M., Hodges, K., Laval, K., Polcher, J. and Désalmand, F. (2000). Simulation of Monsoon disturbances in the LMD GCM. *Mon. Weath. Rev.*, **128(11)** : 3752-3771.
- de Rosnay, P., Bruen, M. and Polcher, J., (2000). Sensitivity of the surface fluxes to the number of layers in the soil model used in GCMs. *Geophys. Res. Lett.* **27(20)** : 3329-3332.
- Lebel, T., Delclaux, F., Le Barbé, L. and Polcher J. (2000). From GCM scales to hydrological scales : rainfall variability in West Africa. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **14** : 275-295.
- Martin, G.M., Arpe, K., Chauvin, F., Ferranti, L., Maynard, K., Polcher, J. and Tschuck, P. (2001). The simulation of the Asian summer monsoon in five general circulation model. *Atmospheric Science Letters* **0(0)** : 1-19.
- Christensen, O., Gaertner, M.A., Prego, J.A., and Polcher, J. (2001). Internal variability of regional climate models. *Climate Dynamics*, **17(11)** : 857-873.
- Gaertner, M.A., Christensen, O., Prego, J.A., Polcher, J., Gallardo, C. and Castro, M. (2001). A deforestation experiment on the Western Mediterranean with two regional climate models. *Climate Dynamics*, **17(11)** : 857-873.
- Schulz, J.-P., Dümenil, L. and Polcher, J. (2001). On the land-surface/atmosphere coupling and its impact in a single column atmospheric model. *J. of Applied Meteor.*, **40(3)** : 642-663.
- de Rosnay, P., Polcher, J., Bruen, M. and Laval, K. (2001). Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large scale land surface processes. *J. Geophys. Res.*, **10.1029** : 2001JD000634
- Bowling, L.C., D.P. Lettenmaier, B. Nijssen, J. Polcher, R.D. Koster and D. Lohmann (2002) Simulation of high latitude hydrological processes in the Torne-Kalix basin : PILPS Phase 2(e) 3 : Equivalent model representation and sensitivity experiment. *Journal of Global and Planetary Change*, submitted.

- Maynard, K. and Polcher, J. (2003) Impact of land-surface processes on the inter-annual variability of tropical climate in the LMD GCM. *Climate Dynamics*, in press.
- Verant, S., Laval, K., Polcher, J. and Castro, M. (2003) Sensitivity of the continental hydrological cycle to the spatial resolution over the Iberian Peninsula. *J. of Hydrometeorology*, Submitted.
- Ducharne, A., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Polcher, J., Ledoux, E. and de Marsily, G. (2003) Development of a High Resolution Runoff Routing Model, Calibration and Application to Assess Runoff from the LMD GCM. *Journal of Hydrology*, in press.
- A. Boone, F. Habets, J. Noilhan, D. Clark, P. Dirmeyer, S. Fox, Y. Gusev, I. Haddeland, R. Koster, D. Lohmann, S. Mahanama, K. Mitchell, O. Nasonova, G.-Y. Niu, A. Pitman, J. Polcher, A. B. Shmakin, K. Tanaka, B. Van Den Hurk, S. Verant, D. Verseghy, and P. Viterbo (2003) The Rhone-Aggregation Land Surface Scheme Inter-comparison Project : An Overview. *Journal of Climate*, submitted.

5.2.2 Contributions à des ouvrages

- Kabat, P. and Claussen, M. and Dirmeyer, P. and Gash, J.H.C. and Bravo de Guenni, L. and Meybeck, M. and Pielke, R.A. and Vörösmarty, C.J. and Hutjes, R.W.A. and Lütkeemeier, S. (Eds.) (2003), *Vegetation, Water, Humans and the Climate*. *Springer*, 650 pp.

5.2.3 Actes de conférence

- K. Laval and J. Polcher (1995) Sensitivity of the Indian Monsoon to Land-Surface Evaporation rate in the LMD-GCM. *AMIP Scientific Conference*, 15-19 May 1995, Monterey, California
- Henderson-Sellers, A., Polcher, J., Chen, T. H., Nakken, M., and Pitman, A. J. (1996) Predicting global change at the land-surface : the Project for Inter-comparison of Land-Surface Parameterization Schemes (PILPS) (Phase 4). *Seventh Symposium on Global Change Studies*, pp. 59-66, Boston, American Meteorological Society.
- Polcher, Jan (1997) The sensitivity of the tropical climate to land surface processes. *ECMWF Seminar*, 8 Sep. 1997 - 12 Sep. 1997
- Laval, K. and Polcher, J. (1999). Les Scénarios, précisions et intérêt dans le cadre de l'Europe de l'Ouest. *C.R. Acas. Agric. Fr.*, 17-19, Séance du 5 Mai 1999.

Polcher, Jan (Editeur) (1999), GEWEX/INSU international workshop on Modelling land-surface atmosphere interactions and climate variability, *Available from GEWEX/WCRP*.

5.2.4 Conférencier invité

8-9 Septembre 1997 Seminar on Atmosphere-surface interaction, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF].

19-20 February 1998 Climate System Model (CSM) land working group, Boulder, USA.

19-23 Octobre 1998 Climate Science Conference, Vienne, Autriche.

19-21 Janvier 1999 International Workshop on Land-Surface Water Budget, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan.

11 Août 2000 Centre for Ocean, Land and Atmosphere (COLA), Calverton, MD, USA.

9 Mai 2001 Séminaire Claude Fourgeaud, Direction de la Prévision, Ministère de l'Économie et de l'Industrie.

5.2.5 Lettres d'information

Polcher, J., Crossley, J., Bunton, C. Douville, H., Gedney, N., Laval, K., Planton, S. Rowntree, P.R., and Valdes, P. (1998). Importance of land-surface processes for the uncertainties of climate change ; A European project. *GEWEX-News May 1998*, 11-13.

Polcher, J., Cox, P.M., Dirmeyer, P., Dolman, H., Gupta, H., Henderson-Sellers, A. Houser, P., Koster, R., Oki, T., Pitman, A.J., Viterbo, P. (2000). GLASS : Global Land-Atmosphere System Study, *GEWEX News, May 2000*.

Polcher, J., Bowling, L. and Lettenmeier, D.(2001) First use of ALMA in PILPS-2e, ALMA-An infrastructure for GLASS. *GEWEX News, August 2001*.

Polcher J. (2001) The Global Land-Atmosphere System Study (GLASS), *BAHC-GEWEX News, Novembre 2001*.

van de Hurk, B. Houser P. and Polcher, J. (2002) GLASS workshop sets new experimental strategy on testing land-atmosphere interactions, *GEWEX News, May 2002*.

de Rosnay, P. and Polcher, J. and Laval, K. and Sabre, M. (2003) Estimating the atmospheric impact of irrigation over India using a modified land-surface model, *GEWEX News, February 2003*.

5.2.6 Logiciels publiés

Dans le cadre du développement d'ORCHIDEE et du modèle régional de l'Universidad Complutense de Madrid (PROMES), j'ai mis au point une librairie générale pour les entrées/sorties des modèles géophysiques : <http://www.ipsl.jussieu.fr/~ioipsl/>. Aujourd'hui cette librairie est utilisée par tous les modèles de l'IPSL et un certain nombre d'autres modèles en Europe. J'ai publié ces logiciels sur le web sous une licence GPL (GNU Public License, <http://www.fsf.org/licenses/gpl.html>)

5.3 Autres activités liées au métier de chercheur

5.3.1 Direction de thèses

- Jan-Peter Schulz au MPI (50%) en collaboration avec Lydia Dümenil (MPI). Jan-Peter Schulz a soutenu en juillet 1998 et a aujourd'hui un poste au DWD à Offenbach. Publications : Schulz et al. (1998), Schulz et al. (2001).
- Patricia de Rosnay (75%) en collaboration avec Katia Laval (LMD). Patricia de Rosnay a soutenu sa thèse en juillet 1999 et a obtenu un Post-Doc CNES sur le projet SMOS. En 2002 elle a été recrutée au CNRS. Publications : De Rosnay and Polcher (1998), De Rosnay et al. (2000), De Rosnay et al. (2002).
- Juan-Antonio Prego (25%) en collaboration avec Manuel de Castro (Universidad Complutense de Madrid). Juan-Antonio Prego a soutenu en decembre 2000. Publication : Christensen et al. (2001), Gaertner et al. (2001).
- Sylvie Verant (50%) en collaboration avec Katia Laval (LMD). Soutenance prévue pour 2003. Publications : Verant et al. (2003), Boone et al. (2003).

Thèses en cours

- Thanh Ngo-Duc (50%) en collaboration avec Katia Laval (LMD). Début de thèse : 2002.
- Tristan d'Orgeval (50%) en collaboration avec Thierry Lebel (LTHE). Début de thèse : 2003.
- Xavier Trollé (50%) en collaboration avec André Tuzet (INRA-Grignon). Début de thèse : 2003.

5.3.2 Encadrement

- Philippe Peylin, VSN au NCAR (1994-1995). Publication : Peylin et al. (1996).

- Karine Maynard, PostDoc sur les projets Européens SHIVA et WAMP (1997-2000). Publications : Martin et al. (2001), Moron et al. (2001a), Moron et al (2001b), Maynard and Polcher (2003).
- Jennifer Crossley, PostDoc sur le projet Européen LSPCR (1997-1998). Publications : Crossley et al. (2000)
- Patricia de Rosnay, PostDoc CNES sur la préparation du projet SMOS (1999-2002).
- Pascale Cayrol, PostDoc CNES sur l’assimilation de données dans les schémas de surface (2000). Recrutée en 2001 par SCOT à Toulouse.
- Viviane Leboucher, PostDoc sur le projet GICC base de donnée (2002-2003). Recrutée en 2003 par Gaz de France.
- Anne-Charlotte Vivant, Ingénieur de recherche en CDD (2002-).
- Philippe Bourcier, Ingénieur informaticien sur le projet Européen PRISM (2002-). En collaboration avec Marie-Alice Foujols.
- Alexandre Tallec, Ingénieur informaticien sur le projet Européen PRISM (2002-2003). En collaboration avec Marie-Alice Foujols.

5.3.3 Enseignement

- Cours à l’INRA dans l’UV Environnement global (3h).
- Cours de DEA “Biosphères continentales“ P6 sur la modélisation des processus de surface dans les MCGs (9h).
- Cours à l’ENS dans le module Environnement du Magistère de Biologie(3h).
- Cours de DEA “Géosystèmes, Evolution, Environnement” à l’Université de Bourgogne (4h).
- Atelier Changement Climatique à l’Ecole des Ponts et Chaussées (15h).
- Cours au personnel de la Cité des Sciences et de l’Industrie (6h)

5.3.4 Organisation de conférences

- ECMWF/GMPP workshop on land surface, Reading, 29 Juin au 2 Juillet 1998.
- GEWEX/INSU international workshop on Modelling land-surface atmosphere interactions and climate variability, Gif-sur-Yvette, 4 au 8 Octobre 1999.
- 4th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Collège de France, du 10 au 14 Septembre 2001.

5.3.5 Presse écrite et audiovisuelle

Conseillé scientifique à la Cité des Sciences pour l'exposition "Osez le Savoir" sur le climat (Juin 2000).

5.3.6 Editeur

- Éditeur pour Atmospheric Science Letters. C'est une nouvelle revue à publication rapide et fortement orientée publication électronique. Cette revue a été lancée en 2000 par la Royal Meteorological Society et vient compléter l'activité du Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

5.3.7 Animation et administration de la recherche

LSPCR : J'ai coordonné le projet Européen intitulé "Land Surface Processes and Climate Response" qui a commencé en Avril 1996 et c'est terminé en Novembre 1998 <http://www.lmd.jussieu.fr/~sechiba/>. Ce projet avait deux volets :

- déterminer la contribution des schémas de surface à l'incertitude dans les prévisions de changement climatique.
- étudier la sensibilité des modèles régionaux climatiques aux processus de surface et ainsi déterminer leur champ d'application possible dans l'étude des interactions surface/atmosphère.

Ce projet a engendré des collaborations étroites entre les partenaires. Toutes les simulations qui ont été faites ont été définies en commun. Pour l'analyse, chaque groupe c'est spécialisé sur un processus ou un type de diagnostic, mais celui-ci a été appliqué à tous les modèles. Ainsi, toutes les simulations ont été traitées sur le même niveau et les papiers qui ont été publiés ont été le fruit de collaborations.

GLASS : Après ma nomination dans le comité scientifique de WGNE/GMPP (Working Group on Numerical Experiments/GEWEX Modelling and Prediction Panel) j'ai fait le point sur l'activité de recherche dans le domaine de la modélisation des processus de surface et le besoin de coordination internationale en organisant un certain nombre d'ateliers. Il en est ressorti qu'une nouvelle génération de schémas de surface est en cours de développement mais que par contre les deux projets d'inter-comparaison existants (PILPS et GSWP) n'étaient plus très actifs et que leurs structures ne suffiraient pas à répondre aux nouvelles demandes.

J'ai donc décidé, avec l'appui de WGNE/GMPP, de réorganiser les projets internationaux dans le domaine de la modélisation des processus de surface. Il en est ressorti une hiérarchie de quatre types d'inter-comparaisons

et validations pour les schémas de surface qui est aujourd'hui regroupé sous le projet GLASS (Global Land Atmosphere System Study, <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GLASS/>) :

1. L'inter-comparaison des schémas forcés par des observations atmosphériques en un point. Ceci est la continuation de PILPS et permet une validation des processus dans les schémas vu que des données de bonne qualité sont disponibles.
2. L'inter-comparaison des schémas de surface utilisés en mode forcé sur tout le globe, c-à-d GSWP, sera continuée. La première expérience GSWP sera revisitée avec un jeu de forçage amélioré et avec l'introduction de comparaisons à des données satellitaires. Afin de déterminer la capacité des schémas de surface à simuler l'hydrologie de surface à différentes échelles spatiales une inter-comparaison est en cours sur le bassin du Rhône.
3. Pour la première fois nous allons aussi valider le couplage des schémas avec la couche limite planétaire mais seulement sur des sites bien instrumentés. Comme nous avons vu (voir section 3.2) ceci est un aspect important lors de l'utilisation de ces modèles dans des MCGs. Ce projet proposera à la communauté un modèle de couche limite ou une colonne atmosphérique simplifiée à laquelle tous les schémas de surface participant au projet seront couplés.
4. Le dernier sous-projet de GLASS a pour but de tester les schémas de surface couplés aux MCGs. La première expérience prévue tentera avec une approche multi-modèle, telle que celle utilisée dans LSCPR, de déterminer les régions où la variabilité inter-annuelle du cycle de l'eau est particulièrement sensible aux processus de surface.

Un aspect original de GLASS est que nous avons dès le début prévu une structure d'aide logistique pour faciliter l'organisation des inter-comparaisons : ALMA (Assistance for Land Surface Modeling Activities). ALMA propose à la communauté des standards pour l'échange de données, des logiciels pour le traitement des données ainsi que des groupes de discussion pour permettre aux participants aux différents projets de communiquer plus facilement.

GLASS c'est bien développé au cours des quatre dernières années. Dans les différents champs d'applications des schémas de surface des projets d'inter-comparaison sont en cours et la communauté est très motivée comme le montre l'importance de la participation dans chacun des projets. Il est donc temps que de nouvelles idées s'expriment. J'ai donc décidé de mettre fin à mon mandat et le comité scientifique de GLASS a choisi Paul Dirmeyer pour assurer la direction de ce projet à partir de Janvier 2004.

GMPP : Le GEWEX Modelling and Prediction Panel est la composante modélisation de GEWEX. Les deux autres groupes de travail de GEWEX sont le GEWEX radiation panel (GRP) qui se consacre à la télédétection ainsi qu'au rayonnement et le GEWEX Hydrometeorological Panel qui lui coordonne les campagnes d'observations sur les bassins versants à l'échelle continentale. Ensemble, nous assurons la coordination des activités de recherche de la communauté de façon à atteindre les objectifs définis pour la deuxième phase de GEWEX (<http://www.gewex.org>).

GMPP recouvre la modélisation des processus de conversion et d'échange d'énergie liée au cycle de l'eau à la surface et dans l'atmosphère. Pour cela nous avons constitué trois projets qui couvrent les nuages et la convection (GCSS), les processus de surface (GLASS) et la couche limite (GABLS). Ces trois "milieux" ont en commun l'utilisation de modèles conceptuels tels que nous les avons présentés dans la section 2. Afin d'assurer une bonne coordination entre nos activités de recherche et leur implémentation dans les modèles de prévision numérique GMPP siège ensemble avec le Working Group on Numerical Experiments (WGNE : <http://www.wmo.ch/web/wcrp/wgne.htm>).

J'ai comme ambition pour la période durant laquelle je vais présider GMPP de renforcer deux aspects clefs de cette partie de la modélisation. Le premier objectif est de renforcer l'interaction entre les chercheurs qui travaillent sur ces processus à petite échelle et ceux qui les intègrent dans les MCGs. Cela devrait pouvoir se réaliser à travers le projet AMIP. Le second objectif est de renforcer l'interaction au sein de GMPP entre la modélisation des nuages/convection, les processus de surface et la modélisation de la couche limite. Le but étant de comparer les rétroactions, surface convection par exemple, simulé par les modèles petite échelle (Cloud Resolving Models) et les paramétrisations des MCGs. Cela devrait nous permettre de mieux comprendre ces interactions complexes et donc avoir une meilleure appréciation de ce que simulent les MCGs.

PRISM : Dans le projet Européen PRISM (PRogramme for Integrated earth System Modelling) je représente d'un coté l'IPSL et de l'autre je coordonne le groupe de travail sur les schémas de surface et les entrées/sorties de modèles. Ce projet ne fait que commencer, mais avec Eric Guilyardi and Sophie Valcke nous avons soumis aux partenaires un premier papier de discussion sur les infrastructures de couplage qui sont envisageables pour PRISM : <http://www.lmd.jussieu.fr/~polcher/PS/techstruct8.pdf>.

Suite à ces premiers travaux, nous avons défini une architecture de couplage qui est décrite dans le rapport de première année du projet PRISM : http://prism.dkrz.de/EU-DOC/ARCDI_4.1.html. Un des points clefs dans

la réalisation de ce coupleur est la gestion des méta-données qui décrivent les champs échangés entre les modèles. Avec Philippe Bourcier et Alexandre Tallec et forts de notre expérience avec IOIPSL, nous avons choisi de prendre en charge les développements de la gestion de ces informations à l'IPSL. Les premiers documents sur la structuration des méta-données sont en cours d'élaboration (<http://www.ipsl.jussieu.fr/~prisipsl/>, PRISM Meta Language 1.0).