

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

Jan Polcher

10 Septembre 2003

- Le modèle de surface, une composante du système terre
- Le développement d'ORCHIDEE
- Interactions surface-atmosphère
- Relation modèles de surface et observations



1. Le modèle de surface, une composante du système terre

Les premiers schémas de surface sont apparus avec le cycle de l'eau dans les modèles atmosphériques afin de clore le bilan d'eau. Ils n'étaient alors qu'une paramétrisation parmi d'autres du modèle de circulation générale (MCG).

Les modèles de surface aujourd'hui, sont devenus des composantes à part entière des modèles du système terre. Malgré leur plus grande complexité ils simulent toujours les conditions aux limites des composantes atmosphériques et océaniques.

Les surfaces continentales fournissent les informations suivantes aux autres composantes :

- fermeture de la turbulence dans la couche limite atmosphérique (évaporation et flux de chaleur sensible).
- Albédo de la surface dans la partie visible du spectre.
- conditions aux limites du rayonnement infrarouge.
- flux d'eau douce vers les océans.

Le modèle de surface contribue à assurer la conservation de l'énergie et de l'eau dans le modèle du système terre.

1.1. Une interface générale pour les surfaces continentales

Afin de rendre les modèles de surface indépendants des autres composantes sans pour autant modifier la physique du couplage, nous avons proposé une interface standard.

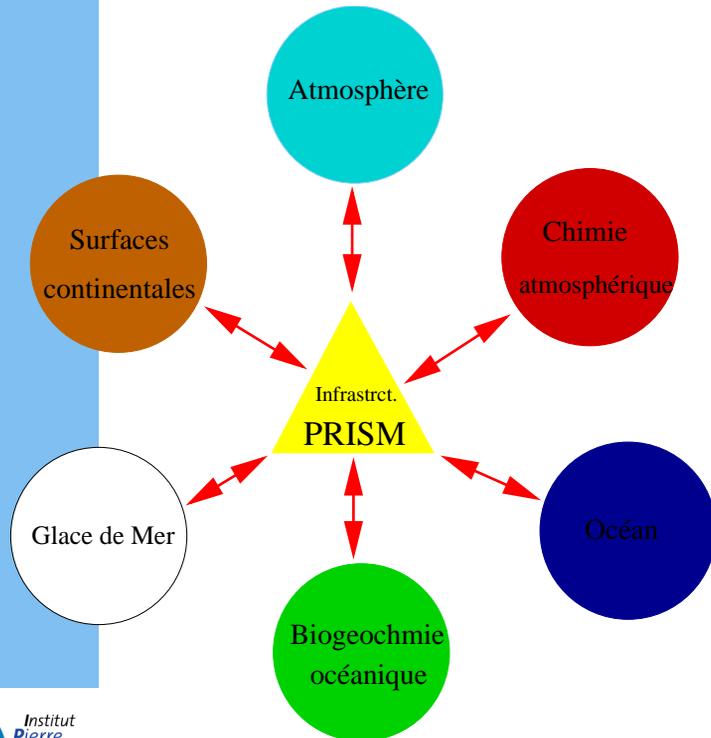
Les conditions suivantes devraient être remplies :

- Pour chaque processus à l'interface, il fallait choisir entre une fermeture de Dirichlet ou de Neumann.
- Ce choix devait être compatible avec tous les schémas numériques.
- L'interface devait être robuste pour les principes de conservation.
- Seules des variables observables pouvaient être échangées.

Une première proposition d'interface standard a été faite en 1998. **Entre temps elle a été mise en application à l'IPSL, au Hadley Centre, à l'ECMWF et à Météo-France.**

Ce retour d'expérience nous a permis d'éclaircir certains points de la proposition initiale. Un papier est en cours de préparation avec les collègues du Hadley Centre et du ECMWF.

1.2. La perspective PRISM



La construction d'un modèle du système terre passe par le développement d'interfaces standard pour chacune des composantes.

L'infrastructure PRISM (en cours de développement) permettra alors la réalisation technique du couplage.

Seule une telle approche permet de développer et de maintenir un modèle de cette complexité.

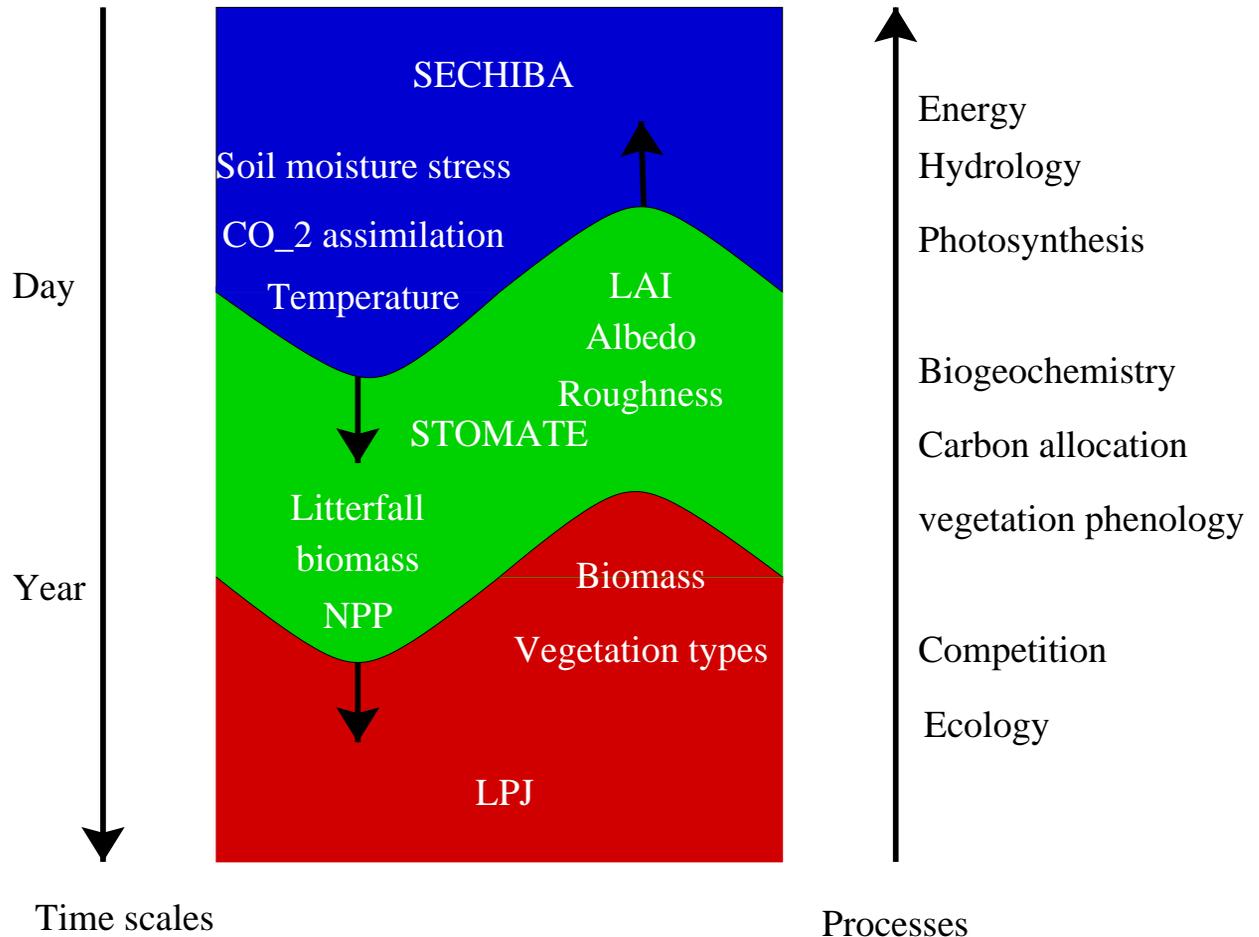
- Chaque composante peut être développée et validée indépendamment.
- L'assemblage du tout se fait sans modification des composantes et de leurs interfaces.
- La substitution de composantes permet d'étudier les erreurs et la sensibilité du système.

Dans le cadre de PRISM le groupe océan/glace de mer développe une interface sur la base de ce qui existe pour les surfaces continentales.

2. Le développement d'ORCHIDEE

Actuellement la communauté vit la transition des paramétrisations de surface vers des modèles de surface.

ORCHIDEE est un des premiers modèles de surface.



2.1. Les interactions système racinaire et humidité du sol



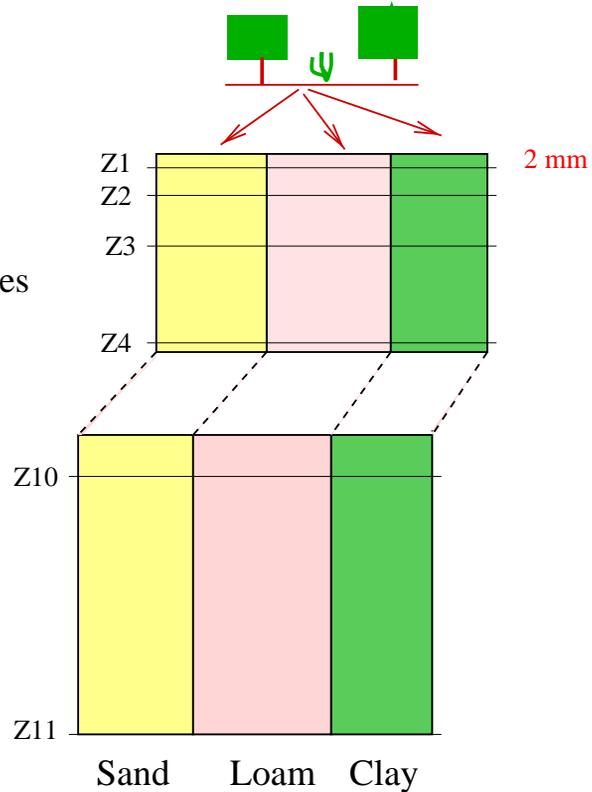
SECHIBA

Collaboration CWRR-LMD

- N=11 layers
- Diffusion Equation (Fokker-Planck)
- Sub-grid scale variabilities of soil and vegetation

* de Rosnay and Polcher 1998

* de Rosnay et al. 2000

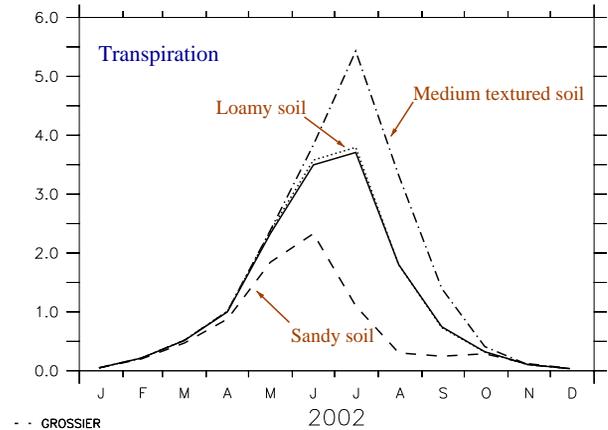
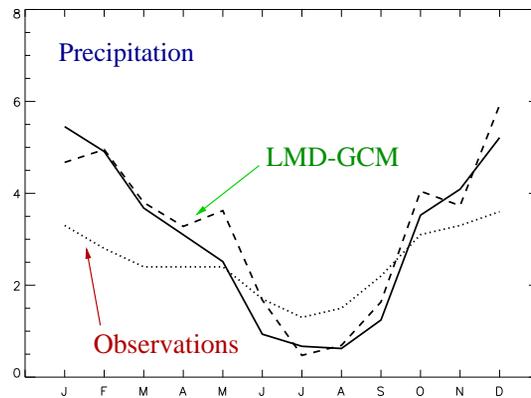


2.1.1. Les contrastes sous maille

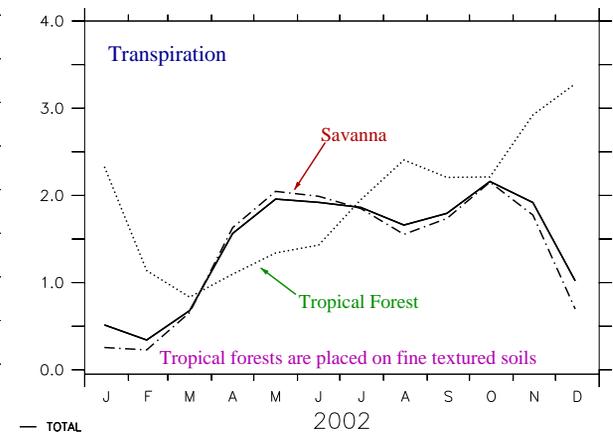
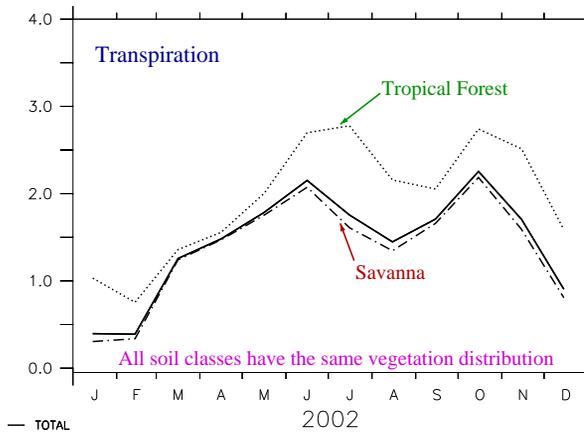
Toutes les végétations partagent les mêmes conditions atmosphériques et le bilan d'énergie à la surface est unique.

Le même type de végétation sur des classes de sol différentes

(Le cas Européen):

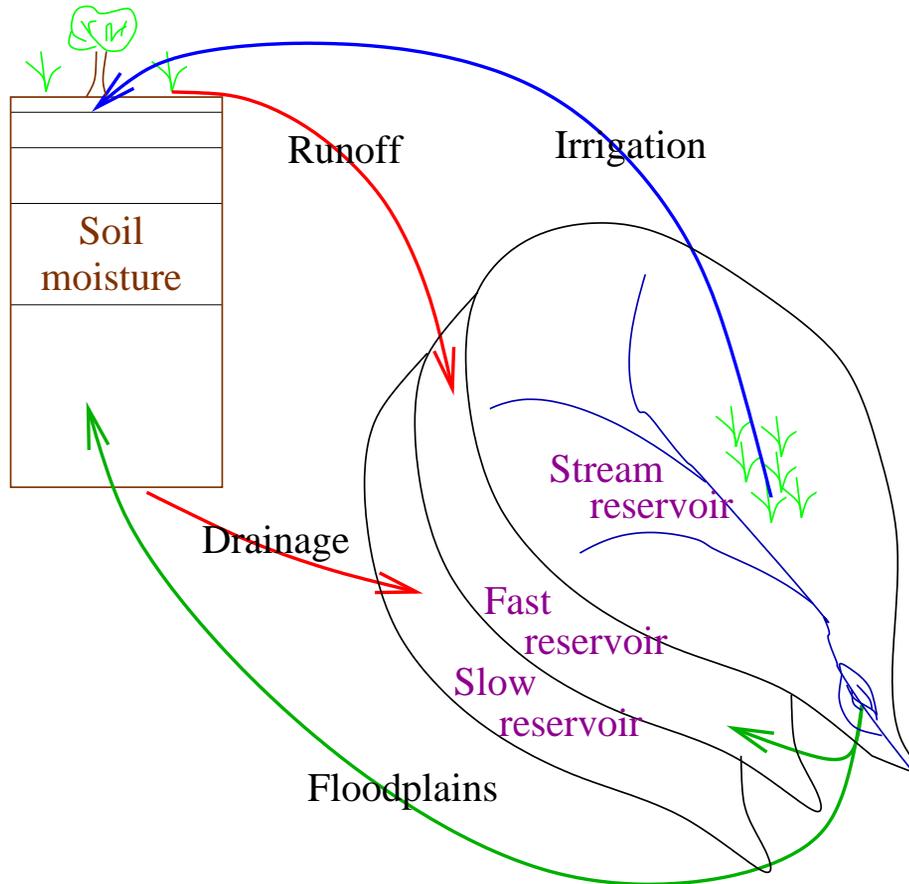


Deux cas pour la distribution de deux types de végétation sur les classes de sols (Un cas africain):



2.2. Le transport horizontal de l'eau

Afin de permettre la re-évaporation de l'eau transportée par les fleuves et les rivières le schéma a été intégré au modèle de surface.



- Les bassins endorehich se terminent par un retour de l'eau dans les réservoirs d'évaporation.
- L'irrigation engendre un transfert des cours d'eau vers l'humidité superficielle.
- Les plaines d'inondation fournissent l'humidité du sol profonde et retardent l'écoulement.

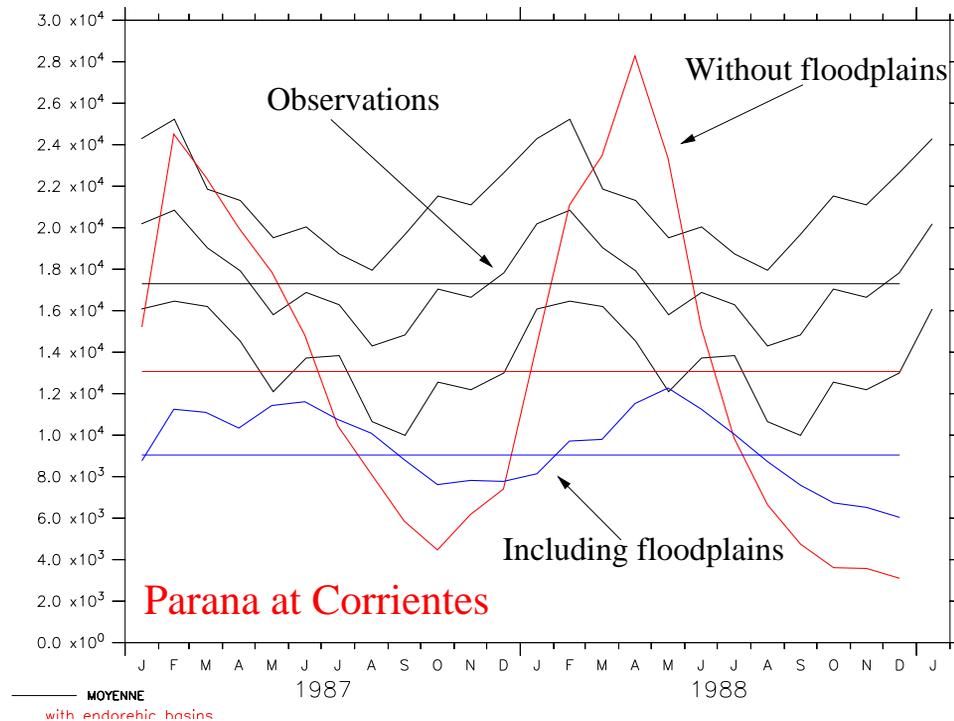
Les mailles ont été divisées en bassins versants afin de rendre le transport moins dépendant de la résolution.

Le modèle de routage utilise une cascade linéaire de réservoirs.

2.2.1. Les plaines d'inondation et l'irrigation

La paramétrisation des plaines d'inondation tropicales a été développée en utilisant le cas du delta intérieur du Niger.

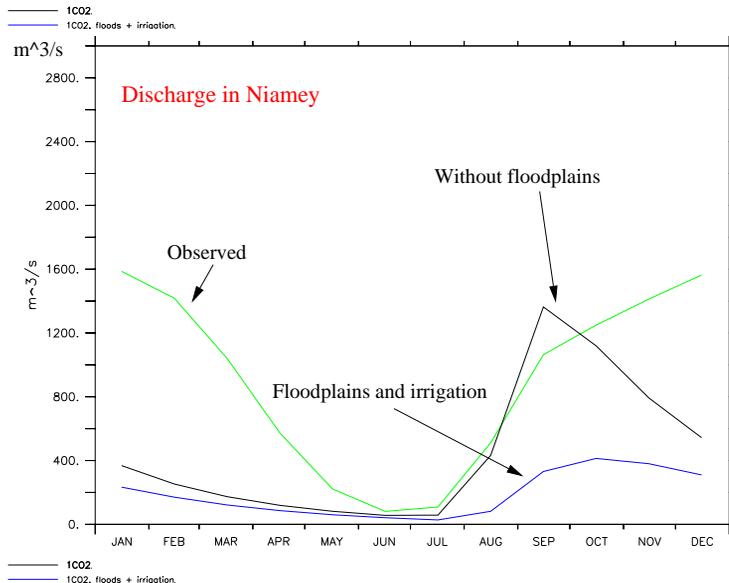
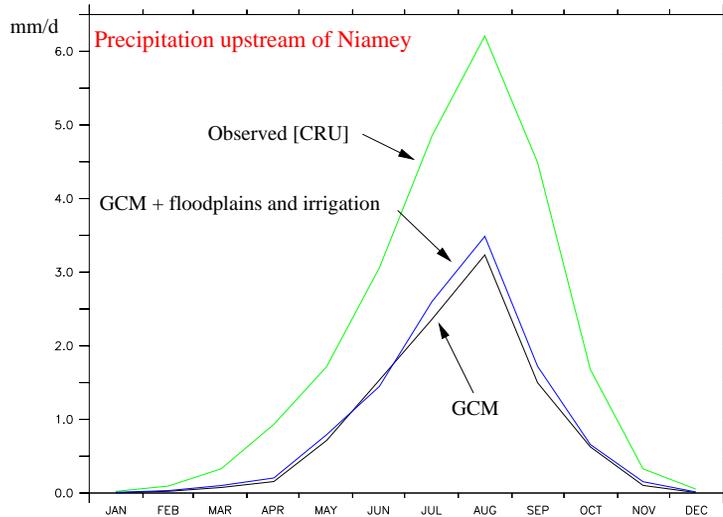
La validation du modèle de routage ainsi que des paramétrisations des plaines d'inondation et de l'irrigation ont été faites avec les forçages atmosphériques proposés par le projet GSWP pour les années 1987 et 1988.



Seule la plaine d'inondation du Pantanal peut expliquer la faible amplitude du cycle annuel.



2.2.2. Les plaines d'inondation et l'irrigation (cont.)

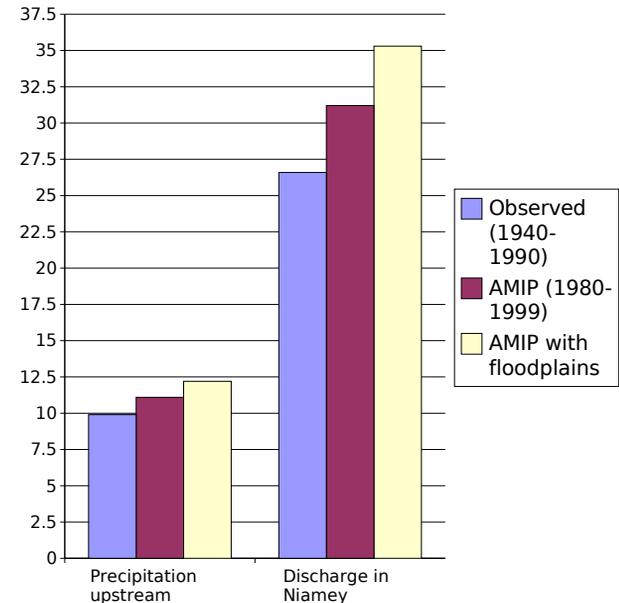


Le couplage d'ORCHIDEE avec LMZ montre la robustesse du modèle de routage et de ses paramétrisations.

Le biais systématique sur la précipitation est amplifié par le système hydrologique.

Le même résultat est obtenu pour la variabilité inter-annuelle à Niamey :

Variance of anomalies (in %)





2.3. Perspectives

L'introduction progressive dans le modèle de la pression anthropique sur le cycle de l'eau va nous rapprocher d'une estimation de **la ressource en eau**.

Ceci devrait nous permettre d'identifier les régions où la variabilité climatique et le changement climatique mettent en péril les ressources en eau.

La spécificité des modèles de surface restera de par :

- l'approche globale,
- l'interaction avec l'atmosphère et
- la prise en compte d'un grand nombre d'interactions (hydrologie, bio-géochimie et écologie).

Ces développements devront se faire en étroite collaboration avec les hydrologues, les bio-climatologues et les spécialistes de l'écologie végétale.

Cette évolution des modèles du système terre est indispensable si nous voulons identifier les régions avec les ressources en eau les plus vulnérables lors de la transition vers un nouveau climat.

3. Interactions surface-atmosphère

3.1. Le rôle des surfaces continentales dans la variabilité climatique

Les surfaces continentales et les océans sont les deux composantes lentes du système qui modulent la variabilité atmosphérique.

Connaître le rôle des surfaces continentales dans la variabilité climatique est indispensable pour focaliser l'observation des conditions de surface et assurer leur prise en compte dans l'initialisation des modèles de prévision.

La conception d'expériences numériques qui révèlent la mémoire de la surface est délicate, car les processus continentaux jouent sur toutes les échelles de temps.

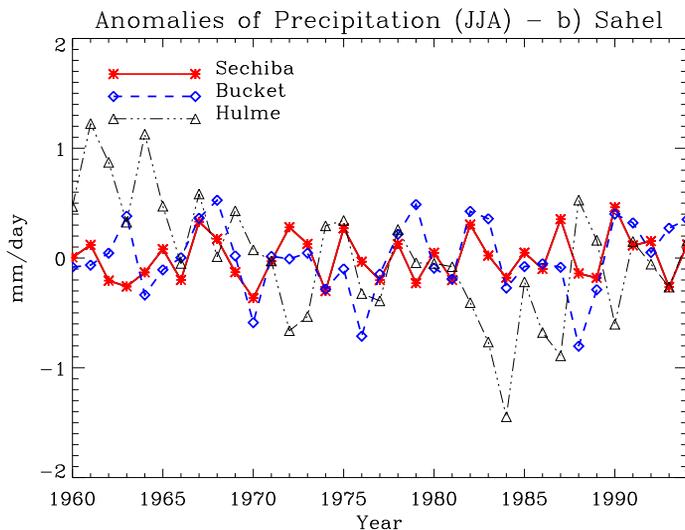
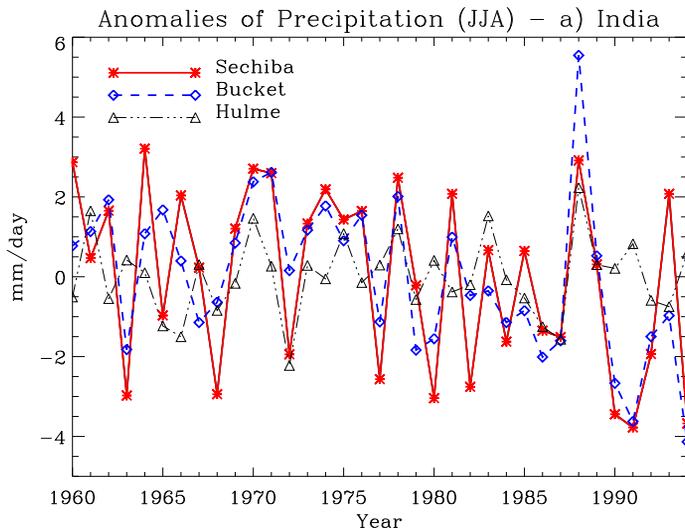
Nous avons choisi de faire deux ensembles de simulations sur la période 1960-1994 qui ne se distinguent que par le schéma de surface : SECHIBA et Bucket.



Aucune incohérence n'apparaît entre les deux systèmes.



Les causes des différences ne peuvent être clairement identifiées.



L'analyse à l'échelle synoptique des deux ensembles de simulations nous a permis de distinguer deux régimes :

Convergence d'humidité dominante :

Le schéma SECHIBA favorise la convergence d'humidité et amplifie la variabilité forcée par les conditions océaniques.

Recyclage d'eau dominant :

L'augmentation de l'évaporation dans le schéma Bucket favorise le recyclage de l'eau et donc la variabilité de la précipitation.

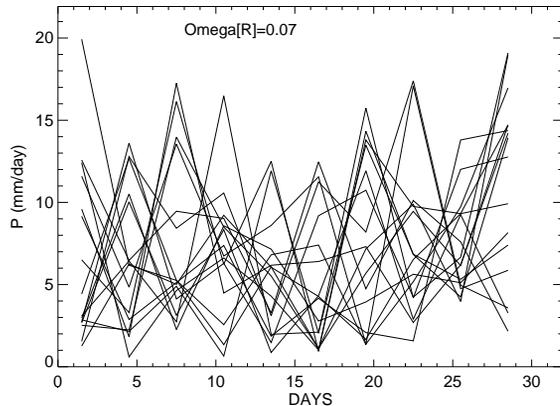
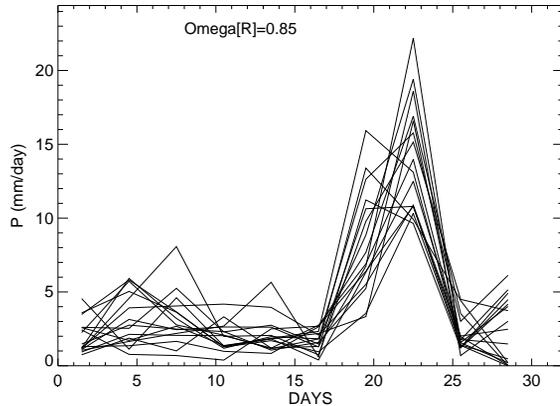
Ces résultats sont fortement dépendants du climat moyen et en particulier de l'intensité du couplage surface/atmosphère simulé.

Dans le cadre du programme GLASS un expérience multi-modèle est en cours. Le protocole expérimental est plus simple :

Ensemble F : Un ensemble de simulations de 3 mois.

On préserve les états de surface d'une des simulations.

Ensemble R : Dans tous les membres de l'ensemble on impose les états de surface préservés d'une des simulations de **F**.



Chaque ensemble est caractérisé par son rapport signal sur bruit Ω_P .

Les différences d' Ω_P entre les deux ensembles peuvent être aisément interprétées :

$\Omega_P(R) - \Omega_P(F)$ **petit** : Imposer les états de surface ne change pas fortement la variabilité interne du système.

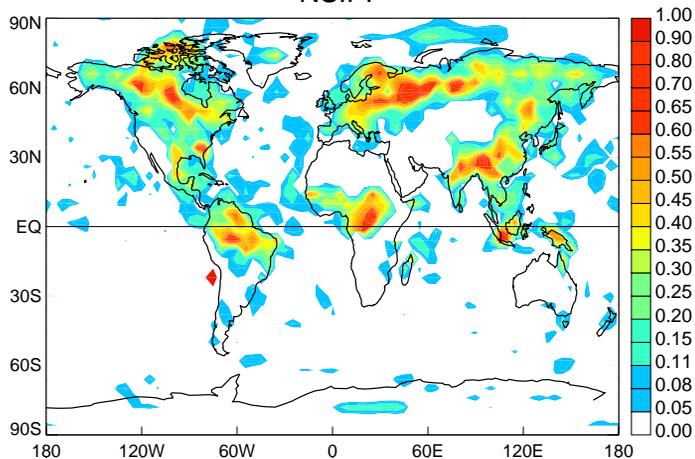
$\Omega_P(R) - \Omega_P(F)$ **grand** : La contrainte sur la surface réduit la variabilité interne du système.



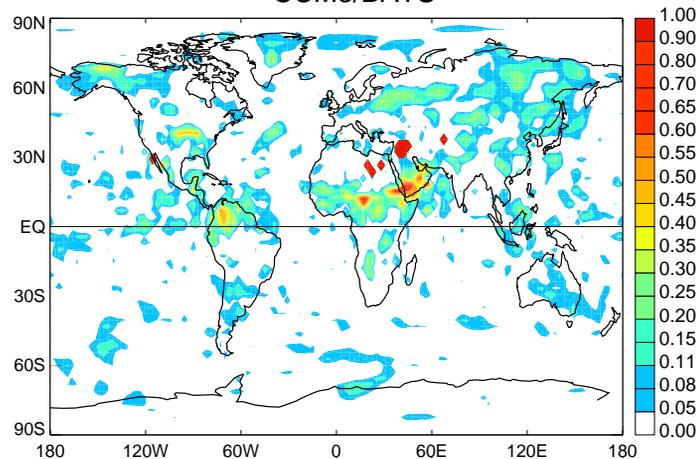
Les premiers résultats de cette expérience montrent que l'intensité du couplage est très différente d'un modèle à l'autre (Koster et al. 2002).

Précipitation : $\Omega_P(R) - \Omega_P(F)$

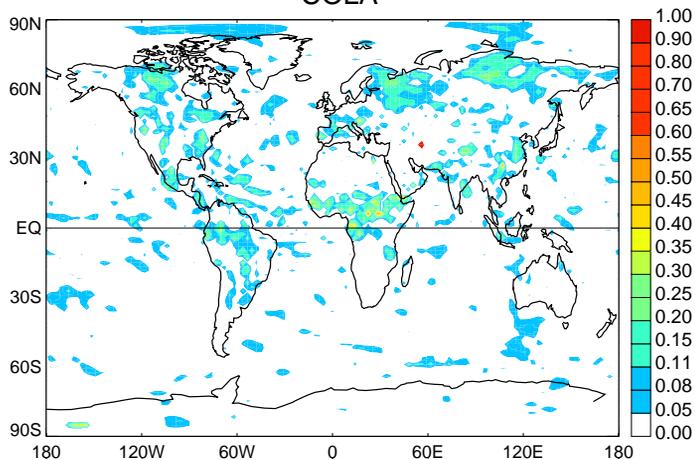
NSIPP



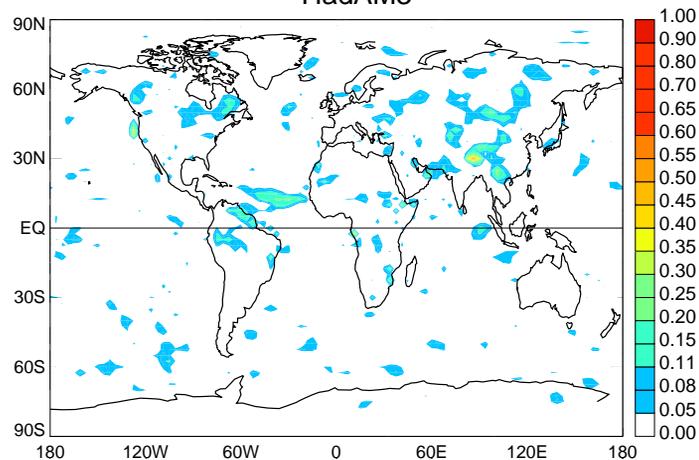
CCM3/BATS



COLA



HadAM3



3.2. Processus de surface et changement climatique

Les changements les plus critiques induits pas l'augmentation de l'effet de serre seront ceux sur les conditions de surface et le cycle de l'eau.

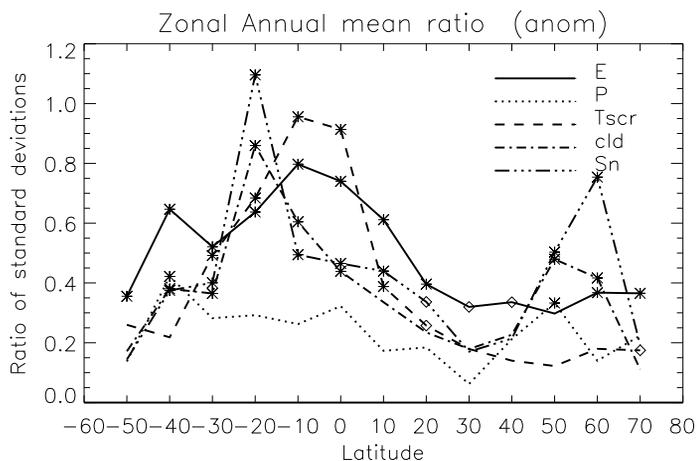
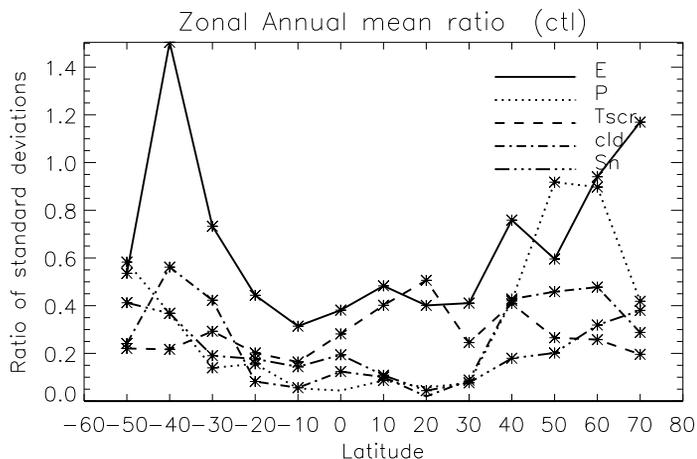
Afin d'explorer les incertitudes liées aux processus de surfaces dans ces changements, nous avons organisé un projet Européen.

Le protocole expérimental qui a été retenu était basé sur 4 MCGs. Chacun d'eux a effectué deux simulations de changement climatique : un doublement de CO_2 avec des anomalies de température océanique imposées. Elles ne se différenciaient que par leurs schémas de surface.

Avec PRISM nous devrions pouvoir à terme échanger les modèles de surface entre MCGs et faciliter l'analyse de ce type d'expérience.

Une mesure de la contribution des schémas de surface à l'incertitude a été développée :

$$R = \frac{\text{Variance des anomalies causées par le changement à la surface}}{\text{Variance entre les simulations de référence des MCGs}}$$

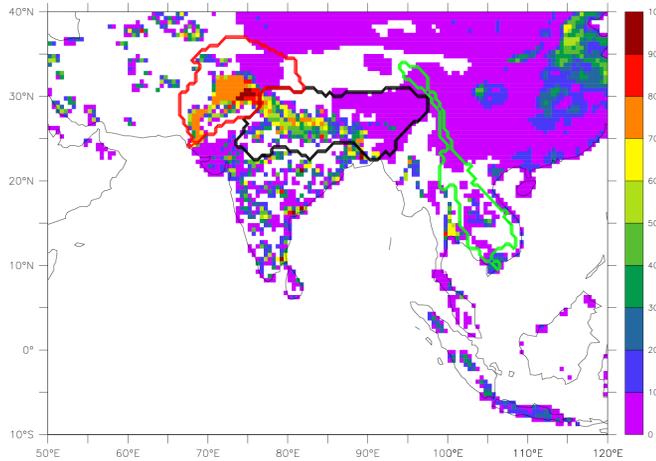


- Dans le climat actuel, le cycle hydrologique est sensible aux schémas de surface dans les hautes latitudes → recyclage de l'eau.
- Pour les anomalies climatiques, les incertitudes sont généralement plus grandes.
- Les valeurs maximales sont obtenues dans les tropiques. Elles passent par l'évaporation et le bilan d'énergie.
- Dans les hautes latitudes l'incertitude se propage de l'évaporation à la couverture nuageuse.

Les incertitudes liées aux processus de surface dans le climat actuel ne laissent rien entrevoir pour les anomalies climatiques.

Dans cet expérience numérique, la sensibilité des schémas de surface aux modifications du forçage climatique a aussi été étudiée.

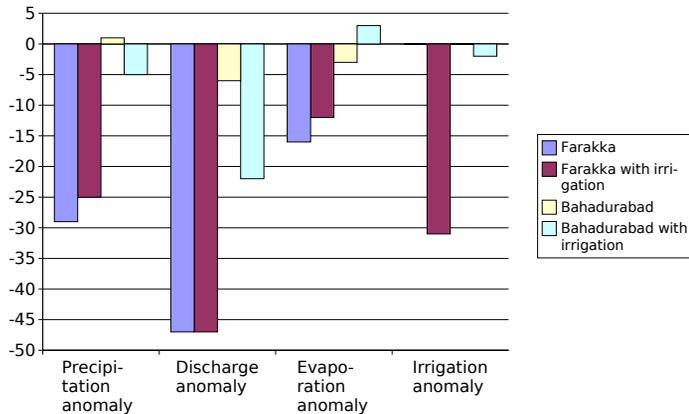
3.3. Changement climatique et irrigation



Malgré des hypothèses simples sur l'irrigation à la fin du siècle, le modèle montre des résultats intéressants :

- Le système hydrologique amplifie les anomalies de précipitation.
- La combinaison du changement climatique et de l'irrigation assèche le Ganges certains mois de l'année.
- L'irrigation ne compense pas le déficit de précipitation.

Percentage changes in the water cycle



Ces résultats préliminaires posent des questions intéressantes sur le rôle de l'irrigation dans les modifications du cycle hydrologique.

3.4. Perspectives

Comment évaluer le réalisme de la sensibilité du couplage surface/atmosphère aux perturbations ?

Pourtant ceci est indispensable si nous voulons accroître notre confiance dans les expériences numériques de déforestation, de changement climatique ou de l'utilisation des sols.

Deux approches doivent être poursuivies en parallèle :

- La multiplication d'études multi-modèles permet d'estimer les incertitudes et de se focaliser sur les régions clés. **Cette approche n'apporte pas une compréhension des processus.**
- Une validation plus fine des processus clés en utilisant une hiérarchie de modèles. **Pour les interactions surface-convection, l'expérience AMMA est très prometteuse**, car elle nous donnera accès à des observations fines de l'atmosphère et de la surface.

Ces deux approches sont poursuivies par le GEWEX Modelling and Prediction Panel dans le cadre du thème cycle diurne.

4. Relation modèles de surface et observations

Un des principes de base qui est utilisé est la conservation de l'eau :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E - R$$

Comparons deux modèles simples de l'évaporation continentale :

L'évaporation bulk

$$E \propto \beta(q_{sat}(T_s) - q_a)$$

$$\beta = MAX(W/W_c, 1)$$

L'évaporation Penmann

$$E \propto \beta'(q_{sat}(T^*) - q_a)$$

$$\beta' = MAX(W'/W_c, 1)$$

Pour reproduire les mêmes flux

- Est ce que les deux humidités du sol (W et W') seront identiques ?
- Est ce que la formulation du stress hydrique dépend de celle de l'évaporation ?

Le liens entre l'humidité du sol dans le principe de conservation et celle dans le modèle de stress est une constante d'intégration.

4.1. L'humidité du sol simulée

L'humidité du sol est une qualité qui nous est familière.

Dans les deux modèles ci-dessus, l'humidité du sol est une variable construite. Elle est un élément supposé de la chaîne causale.

Pouvons-nous construire une humidité du sol qui serait observable dans la chaîne causale ?

- Nous connaissons les lois qui régissent l'évolution de la molécule d'eau dans le milieu poreux.
- Mais nous ne pouvons observer les sols à l'échelle moléculaire.

Nous avons choisi de représenter les processus de surface à l'échelle macroscopique car elle nous est familière. Une définition microscopique ne nous est pas accessible.

Nous sommes donc dans une physique directement inspirée de ce que nos sens nous révèlent du monde.



4.2. L'utilisation de variables non-observables

L'humidité du sol joue dans la modélisation des processus de surface le même rôle que le mouvement des molécules dans la cinétique des gaz.

Nous observons les effets de l'humidité du sol, mais la définition de la variable elle-même est le résultat de la théorie que nous avons choisie.

La comparaison de l'humidité du sol simulée par différents modèles de surface n'est donc pas pertinente. **Nous l'avons montré lors de la toute première inter-comparaison (Le projet Européen SLAPS).**

La validation des modèles de surface ne peut donc se faire que sur des observables. Sinon un opérateur d'observation doit être introduit dans le modèle de surface.

Pierre Simon Laplace :

Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent,[...] embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé , serait présent à ses yeux.

(Traité de Mécanique Céleste, 1805)

5. Conclusion

Les surfaces continentales sont la composante du système terre la plus anthropisée et les modèles de surface doivent en tenir compte.

L'irrigation en est un exemple, mais d'autres suivront :

- Les barrages et l'utilisation municipale de l'eau,
- la gestion de la végétation ou encore
- les villes.

C'est l'impact du changement climatique sur les surfaces continentales qui affectera en premier nos sociétés. L'impact sur un milieu anthropisé est différent de celui sur le milieu naturel.

Les modèles de climat doivent donc pouvoir identifier les régions et les processus les plus vulnérables afin d'aider à initier les études d'impact.

Les incertitudes dans la sensibilité des modèles de climat, et de l'interaction surface/atmosphère en particulier, doivent être étudiées en détail. Ceci est indispensable pour le progrès de notre science mais aussi pour l'utilisation de nos résultats par la société.



De nombreuses collaborations ont permis de réaliser le travail présenté :

Patricia de Rosnay : L'humidité du sol et l'irrigation

Jan-Peter Schulz : Les aspects numériques de l'interface surface/atmosphère.

Karine Maynard : Le rôle des processus de surface dans la variabilité climatique.

Jennifer Crossley : Processus de surface et changement climatique.

Sylvie Verant : Développement d'ORCHIDEE et du schéma de routage.

Anne-Charlotte Vivant : Développement du schéma de routage et des plaines d'inondation.

Viviane Leboucher : Processus de surface et changement climatique.

Thanh Ngo-Duc : Validation de l'humidité du sol et du routage.

Katia Laval : Tout !

Mille mercis à tous !