

Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement
DEA Océanologie, Météorologie et Environnement

RAPPORT DE STAGE

Thanh NGO DUC

EVOLUTION DE L'HUMIDITE DU SOL



Responsable
Co-responsable

Katia LAVAL
Anny CAZENAVE

Organisme d'accueil

Laboratoire de Météorologie Dynamique UPMC/CNRS

08/04/2002 - 02/07/2002

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Katia Laval de m'avoir dirigé tout au long de mon stage. Je lui suis extrêmement reconnaissant de son encadrement, sa disponibilité, sans oublier sa patience, qui ont fait de ce stage une expérience passionnante.

Un très grand remerciement à Anny Cazenave, ma co-directrice du stage, pour les discussions très précieuses que nous avons eues lors de ses passages à Paris. Je remercie également à son équipe GOS (Géodésie Spatiale) pour les données de Topex-Poséidon qu'ils ont mises à ma disposition et pour leur accueil chaleureux à Toulouse.

Un remerciement spécial à Jan Polcher pour la simulation d'ORCHIDEE qu'il m'a donné, pour ses conseils indispensables et son aide précieuse.

Mes remerciements vont également à Rémy Roca et Hélène Brogniez, qui m'ont appris le code de transfert radiatif pendant la semaine du 22 au 27 Avril au LMD de l'Ecole Polytechnique.

Enfin, je remercie tous les membres du LMD de m'avoir accueilli. Ils m'ont transmis leur passion pour la recherche. Je suis particulièrement reconnaissant à Ionéla, Karine, Patricia, Sylvie et Yann pour leur aide.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION	4
Chapitre 1	
HYDROLOGIE DES SOLS	5
1.1. Le cycle de l'eau.....	5
1.2. L'eau dans les sols.....	6
1.2.1. <i>Equation de bilan</i>	7
1.2.2. <i>Contribution de l'eau continentale à la variation du niveau de la mer</i>	8
Chapitre 2	
MODELISATION DE L'HYDROLOGIE DES SOLS	10
2.1. Le modèle Bucket.....	10
2.2. Le modèle SECHIBA.....	11
2.3. Le modèle ORCHIDEE.....	12
2.4. Cycle saisonnier de l'humidité du sol.....	13
2.5. Cycle saisonnier de la neige.....	17
Chapitre 3	
COMPARAISON	19
3.1. Altimétrie spatiale et Topex-Poséidon.....	19
3.1.1. <i>Altimétrie spatiale, histoire et principe</i>	19
3.1.2. <i>Topex-Poséidon</i>	20
3.2. Variations saisonnières du niveau de la mer, mesurées par Topex-Poséidon.....	21
3.3. ORCHIDEE et Topex-Poséidon.....	22
3.4. Comparaison entre différents modèles.....	25
Chapitre 4	
PERSPECTIVES	29
4.1. Nouvelle version d'ORCHIDEE.....	29
4.2. Le projet LSPCR.....	30
4.2.1. <i>Climat actuel</i>	31
4.2.2. <i>Impacts de l'effet de serre</i>	32
4.3. Le développement des outils d'observation.....	33
CONCLUSION	34
BIBLIOGRAPHIE	35

Introduction

Le **Modèle de Circulation Générale (GCM)** du LMD simule le climat et ses variations interannuelles. Les échanges hydrologiques entre l'atmosphère et les surfaces continentales sont représentés par un sous-modèle SECHIBA qui calcule à chaque pas de temps l'évaporation des sols, la transpiration de la couverture végétale, la perte par interception du feuillage, le ruissellement de l'eau dans le sol et le drainage. Ceci permet d'évaluer les variations saisonnières de l'humidité du sol, un paramètre prépondérant dans les échanges d'énergie à l'interface surface-atmosphère.

Ces dernières années, l'altimétrie spatiale, particulièrement les mesures satellitales de la mission Topex-Poséidon, ont permis de déterminer les variations du niveau moyen global de la mer avec une précision meilleure que le millimètre par an. Ces variations sont associées à différents processus : l'expansion thermique des océans, la redistribution des masses d'eau dans les différents réservoirs, océans, atmosphère, continents (humidité du sol, neige, etc.). Les comparaisons entre les résultats simulés par les GCMs et les observations de Topex Poseidon ont montré que ces observations sont un outil performant pour tester les modèles et pour suivre les paramètres, ce que l'on ne pouvait pas faire auparavant.

Ce stage est défini dans ce contexte. Son but est d'évaluer l'évolution de l'humidité du sol à l'aide du GCM du LMD et de le comparer avec les observations de Topex-Poséidon, aussi bien qu'avec les autres modèles de processus de surface.

Organisation du rapport :

Ce rapport comporte six parties. La première partie est l'introduction (cette partie). Quelques notions essentielles en hydrologie sont rappelées au chapitre 1. Le chapitre 2 présente différents schémas de surface dont celui du LMD et analyse le cycle saisonnier de l'humidité du sol et de la neige. Le troisième chapitre, le plus important, est consacré à la comparaison d'une part entre les sorties du modèle ORCHIDEE et les mesures de Topex-Poséidon, et d'autre part entre différents modèles hydrologiques. Les perspectives de ce travail seront développées dans le quatrième chapitre. La dernière partie se compose de la synthèse et de la conclusion du travail.

Chapitre 1

Hydrologie des sols

Le but de ce chapitre est d'introduire les éléments qui seront utilisés dans la suite de ce rapport. Les formules fournies (l'équation du bilan d'eau, l'équation de conservation de la masse) peuvent être simples sur le plan théorique mais très importantes par leur signification. Toutes les analyses de cette étude sont basées sur ces formules.

1.1. Le cycle de l'eau

L'eau est très abondante sur notre planète. Grâce aux conditions particulières de température et de pression qui règnent sur la Terre, l'eau y est présente dans ses trois états: sous forme de **vapeur d'eau** dans l'atmosphère qui enveloppe la planète, sous forme **liquide** dans les océans et les réservoirs continentaux mais aussi au sein de tous les organismes vivants, ou encore sous forme de **la glace** aux pôles ou aux sommets des hautes montagnes. C'est ainsi que l'on distingue quatre grands réservoirs d'eau dans l'hydrosphère : les mers et océans, les eaux continentales (eaux superficielles eaux souterraines), l'atmosphère et la cryosphère.

Entre ces quatre réservoirs, l'échange d'eau est permanent et forme ce que l'on appelle le **cycle de l'eau**. Les rayons du soleil réchauffent l'eau sur la terre et la vaporisent. La vapeur s'accumule en rencontrant de l'air plus froid et se transforme en gouttelettes d'eau qui forment des nuages. En grandissant, les gouttelettes de nuage s'alourdissent et tombent sur le sol, sous forme de pluie, de neige ou de grêle. L'eau ainsi retombée ruisselle sur le sol ou s'infiltre dans le sous-sol. Elle vient grossir les fleuves, qui eux-mêmes retournent à la mer et le cycle recommence. La figure 1.1 représente le schéma du cycle hydrologique global.

Le cycle hydrologique peut se diviser en deux parties intimement liées :

- une partie atmosphérique qui concerne la circulation de l'eau dans l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau essentiellement. Cette partie du cycle de l'eau est associée à des processus d'échelles spatiales très variées. Le temps de résidence de l'eau dans l'atmosphère est court, de l'ordre de 10 jours, ceci est dû aux mouvements rapides de l'eau.
- une partie terrestre qui concerne la neige et l'écoulement de l'eau sur les continents, qu'il soit superficiel ou souterrain. Le cycle de l'eau y est caractérisé par des mouvements relativement lents.

Si on accepte le principe de conservation de l'eau dans l'ensemble des enveloppes terrestres, on peut donc considérer que le cycle de l'eau est stationnaire, c'est-à-dire que toute perte d'eau par l'une ou l'autre de ses parties, atmosphérique ou terrestre, est compensée par un gain d'eau par l'autre partie.

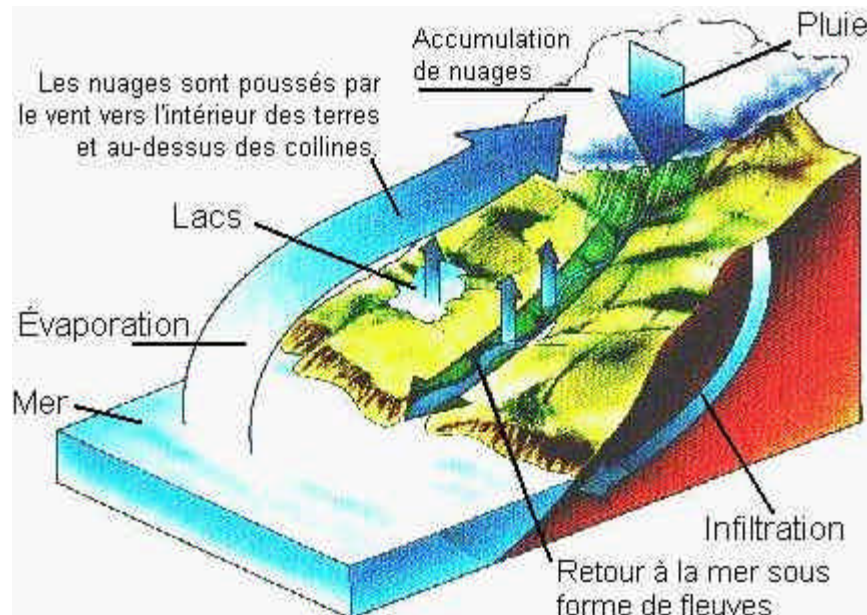


FIG. 3.11 – *Le cycle hydrologique global (source de figure : CNRS)*

1.2. L'eau dans les sols

Durant cette étude, nous nous intéressons à l'hydrologie des sols, à l'évolution de l'humidité du sol pour être plus précis. On étudie donc principalement la branche continentale du cycle de l'eau, en couplage avec celle de l'atmosphère.

Les sols sont des réservoirs d'eau. L'eau est contenue dans certains minéraux, en particulier les minéraux argileux, et dans la matière organique; celle-ci forme notamment des complexes organo-minéraux mal cristallisés qui retiennent l'eau. L'eau des argiles

peut être simplement adsorbée à la surface des cristaux; cette eau est mobile et en grande partie disponible pour les plantes. L'eau du sol provient des précipitations atmosphériques. Elle est transférée vers l'atmosphère par évaporation directe et par transpiration des plantes ainsi que vers les réservoirs profonds par infiltration.

Le stockage de l'eau dans le sol se présente sous différentes formes. On peut distinguer trois grands types de stockage:

- Le réservoir d'eau de surface contient toute l'eau stockée dans les dépressions de surface, des plus petites, dues à la rugosité du sol, aux plus grandes plaines inondées, lacs, marais, étangs, etc.
- Le sol et le sous-sol dans lesquels l'eau est emmagasinée. C'est le réservoir d'eau souterraine
- Les couvertures neigeuses et glaciaires qui constituent le réservoir d'eau sous forme solide.

Les variations saisonnières de ces réservoirs, surtout les deux derniers sont l'objet de notre étude. Dans ces réservoirs, l'eau ainsi que l'air si l'on est en condition non saturée, sont en mouvement, ou sont retenus dans l'espace poreux du sol.

L'humidité du sol appartient au deuxième réservoir. Elle est définie comme eau évaporable contenue dans la portion de sol se trouvant au-dessus de la nappe libre.

En effet, l'humidité du sol est un paramètre prépondérant dans les échanges d'énergie à l'interface surface-atmosphère. Evaporation, infiltration, ruissellement de surface, quantité d'eau absorbée par la végétation sont très dépendants de l'humidité du sol. Il s'agit donc d'un paramètre clef du cycle hydrologique. L'humidité du sol et son évolution spatio-temporelle sont des éléments importants pour les modèles météorologiques et climatiques, ils sont également pris en compte dans les études hydrologiques et de suivi de la végétation.

A travers le cycle de l'eau décrit ci-dessus, le climat et l'hydrologie du sol sont fortement liés. Leurs mécanismes d'interaction s'appellent **les processus de surface**. La représentation de ces processus joue un rôle important sur le cycle hydrologique global et le climat simulés dans les Modèles de Circulation Générale (GCM). Elle comporte de multiples aspects, allant du bilan énergétique en surface, au calcul du profil de température dans le sol, à la prise en compte des processus de neige, à la représentation explicite de la végétation, des mouvements de l'eau dans le sol et des échanges hydriques et énergétiques entre la biosphère et l'atmosphère.

1.2.1. Equation de bilan

L'évolution de la quantité d'eau stockée dans le sol est représentée par l'équation de bilan ci-dessous:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{\text{totale}} - P_I - F - E_{\text{sol}} - R_{\text{surface}} - D - T_v + M \quad (1.1)$$

avec

$$P_I = P_{\text{totale}} - T_f = \frac{\partial W_f}{\partial t} + E_I \quad (1.2)$$

où :

- W : la quantité d'eau stockée dans le sol (mm)
- P_{totale} : les précipitations totales ($mm \times s^{-1}$)
- P_I : les précipitations interceptées par les feuilles ($mm \times s^{-1}$)
- E_{sol} : l'évaporation du sol ($mm \times s^{-1}$)
- R_{surface} : le ruissellement à la surface du sol ($mm \times s^{-1}$)
- D : les sorties d'eau par drainage ($mm \times s^{-1}$)
- T_v : la transpiration des végétaux ($mm \times s^{-1}$)
- T_f : la précipitation non interceptée par la végétation ($mm \times s^{-1}$)
- W_f : la quantité d'eau stockée par la canopée ($mm \times s^{-1}$)
- E_I : l'évaporation de l'eau stockée par la canopée ($mm \times s^{-1}$)
- M : la fonte de neige ($mm \times s^{-1}$)
- F : la précipitation solide sous forme de neige ($mm \times s^{-1}$)

Dans les analyses des chapitres suivants de ce rapport, on notera :

Précipitation:

$$P = P_{\text{totale}} - P_I = T_f \quad (1.3)$$

Evaporation:

$$E = E_{\text{sol}} + T_v \quad (1.4)$$

Ruissellement total :

$$R = R_{\text{surface}} + D \quad (1.5)$$

S'il n'y a pas de fonte de neige et ni de précipitation sous forme de neige, l'équation 1.1 devient donc :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E - R \quad (1.6)$$

1.2.2. Contribution de l'eau continentale à la variation du niveau de la mer

Au niveau global, la conservation de masse de l'eau implique :

$$\Delta M_{\text{océan}} + \Delta M_{\text{vapeur d'eau}} + \Delta M_{\text{eau continentale}} + \Delta M_{\text{cryosphère}} = 0 \quad (1.7)$$

où ΔM est le changement de masse d'eau à l'intérieur des quatre réservoirs principaux : océan, atmosphère, continents et cryosphère.

De 1.7, on déduit que les variations moyennes globales de niveau de la mer doivent être équilibrées par des changements de la masse d'eau dans l'atmosphère, sur les continents et sur la cryosphère

Si on a une variation moyenne globale de la masse d'eau continentale, on obtient donc une variation moyenne en équivalent au niveau de la mer par la formule ci-dessous :

$$\Delta h = -\Delta l \times \frac{S_{continent}}{S_{océan}} \quad (1.8)$$

où :

Δh : la variation moyenne en équivalent au niveau de la mer (*mm*)

Δl : la variation moyenne globale du contenu en eau continental, y compris l'humidité du sol et la neige (*mm*)

$S_{continent}$: la surface des continents, égale $1.49 \times 10^8 \text{ km}^2$

$S_{océan}$: la surface des océans, égale $3.61 \times 10^8 \text{ km}^2$

Ces dernières années, l'altimétrie spatiale a démontré ses capacités à mesurer les variations de niveau de la mer avec une précision très élevée. L'équation 1.8 devient donc un test puissant pour tester les simulations des processus de surface dans les modèles de circulation générale (GCM). On reviendra à ce test au chapitre suivant.

Chapitre 2

Modélisation de l'hydrologie des sols

La modélisation de l'hydrologie des sols dans les GCM fait appel à des méthodes qui sont diverses, et de complexités variées. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse aux simulations qui utilisent un des trois modèles : le modèle « Bucket », le modèle SECHIBA ou le modèle forcé ORCHIDEE.

2.1. Le modèle Bucket

Le modèle Bucket (seau en anglais) est un modèle à une couche. Il représente le sol comme un réservoir profond de 1 mètre. Il se remplit lorsque les précipitations sont supérieures à l'évaporation. Les processus de diffusion de l'eau dans le sol ne sont pas pris en compte dans ce type de modèle, et la représentation de l'évaporation en est affectée. Le fait de considérer une seule couche dans le sol ne permet pas à l'évaporation de réagir rapidement à un événement pluvieux. Le ruissellement se déclenche lorsque l'humidité totale du sol dépasse la valeur maximale qui est fixée.

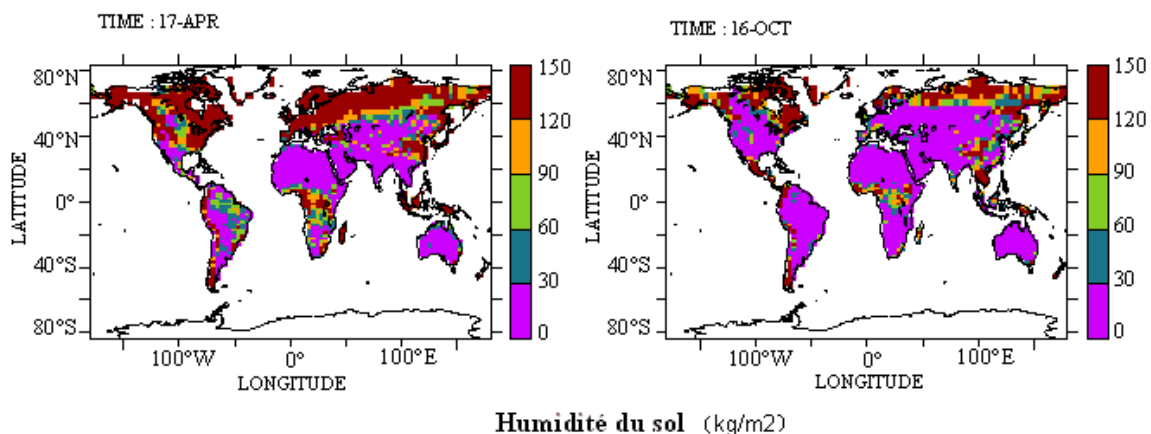


FIG. 2.1 – L'humidité du sol dans le modèle Bucket, valeur moyennée sur 10 ans. A gauche, pour le mois d'avril ; à droite, pour le mois d'octobre.

Dans ce modèle, la capacité maximum de stockage d'eau dans le sol est de 150 kg/m^2 correspondant à une hauteur d'eau de 150 mm. Ce modèle est capable de calculer une évolution pronostique de l'humidité du sol.

2.2. Le modèle SECHIBA

Le modèle SECHIBA (Schématisation des **E**Changes **H**ydriques à l'**I**nterface entre la **B**iosphère et l'**A**tmosphère) (Ducoudré, 1989 ; Ducoudré et al, 1993) est utilisé dans le GCM du Laboratoire de Météorologie Dynamique pour représenter les processus hydrologiques ayant lieu à la surface des continents. Ce modèle considère deux couches dans le sol, l'une fine proche de la surface et l'autre plus épaisse en profondeur. La profondeur et l'épaisseur de la première couche évoluent dans le temps en fonction de l'évapotranspiration, des précipitations et du ruissellement de surface. Ces deux couches ont une profondeur totale de 2 mètres. Cette idée est proposée par Choissnel (1977). La figure 2.2 est la schématisation du principe du modèle.

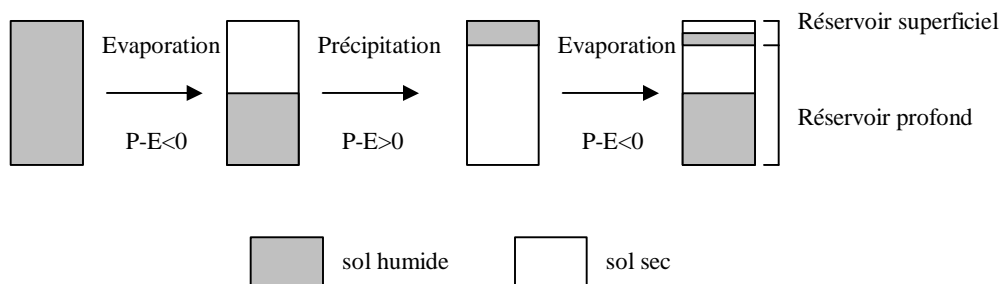
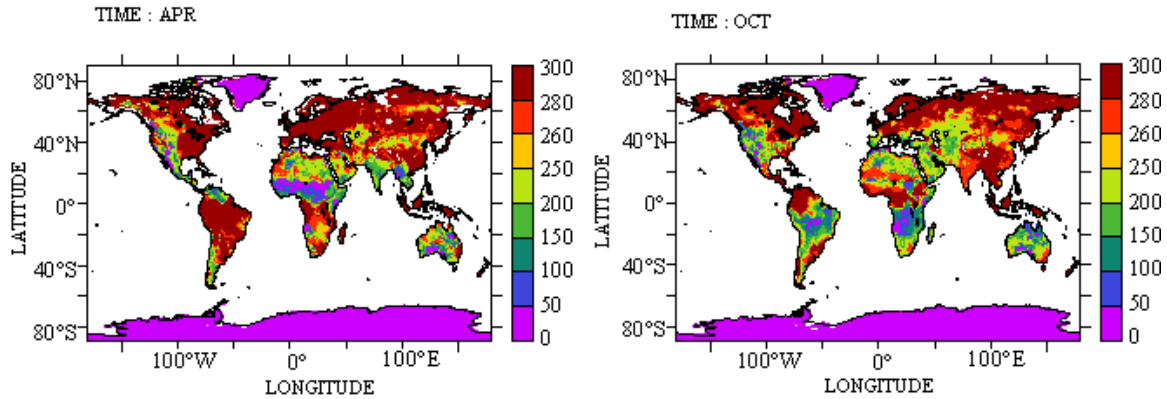


FIG. 2.2 – Diagramme schématisant de l'évolution des deux couches de sol dans SECHIBA (Ducharne, 1997)

Dans SECHIBA, la capacité maximum de stockage d'eau dans le sol est de 300 kg/m^2 correspondant à une hauteur d'eau de 300 mm.

SECHIBA prend en compte différents types de surface au sein d'une même maille du GCM. Sa caractéristique principale est la représentation séparée de treize types de végétation. Les flux évaporatifs sont calculés indépendamment pour chaque type de surface présent sur une maille. Avec l'introduction du cycle journalier, un modèle thermodynamique de sol a été ajouté à SECHIBA. La diffusion thermique est calculée à sept niveaux inégalement espacés de 2cm à 3m de profondeur, associés à des constants de temps d'une demi heure à deux ans.



Humidité du sol (kg/m²)

FIG. 2.3– L'humidité du sol dans le modèle SECHIBA, valeur moyennée sur 10 ans. A gauche, pour le mois d'avril ; à droite, pour le mois d'octobre.

2.3. Le modèle ORCHIDEE

ORCHIDEE (**OR**ganizing **C**arbon and **H**ydrology **I**n **D**ynamic **E**cosystems **E**nvironment) (http://www.ipsl.jussieu.fr/~ssipl/doc/doc_main.html) est un modèle qui couple des processus physiques et biogéochimiques à la dynamique de végétation.

ORCHIDEE est fortement basé sur deux modèles existants et un modèle nouvellement développé :

- SECHIBA (Ducoudré et al, 1993) que l'on a présenté au-dessus.
- Les processus biogéochimiques tels que la photosynthèse, l'attribution de carbone, la décomposition de litière, la dynamique de carbone de sol, etc., forment le sous-modèle de STOMATE (Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems). Tous ces processus sauf la photosynthèse sont quotidiennement calculés.
- Les paramétrisations de la dynamique de végétation: feu, établissement, mortalité d'arbre, etc., qui sont issues du LPJ (Lund Potsdam Jena Dynamique Global Vegetation Model) (Sitch et al, 2000)

ORCHIDEE est forcé par des données climatiques observées pour les deux années 1987 et 1988. Les données climatiques sont: le rayonnement entrant, la température de l'air, les précipitations, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent. La simulation utilisée dans cette étude utilise les données des années 1987-1988. La résolution spatiale est de 1° x 1°. Un des points faibles d'ORCHIDEE est encore son traitement de la neige.

Dans la suite de ce rapport, on va analyser le cycle saisonnier de l'humidité du sol et de la neige, qui est modélisé par le modèle ORCHIDEE. Les différences des modélisations qui utilisent soit Bucket, soit SECHIBA seront abordées dans la partie perspective du chapitre 4.

2.4. Cycle saisonnier de l'humidité du sol

Il est intéressant d'analyser les variations saisonnières de l'humidité du sol simulée par les modèles GCM. Dans cette partie du travail, on étudie d'abord les variations de l'humidité du sol au niveau global, simulée par le modèle ORCHIDEE.

La figure 2.4 montre les variations saisonnières de l'humidité du sol pendant l'année 1988. En avril, les sols des régions de haute latitude de l'hémisphère nord sont chargés d'humidité et proche de la saturation. En juillet (figure en bas à gauche), les régions de l'Asie du Sud – Est, de l'Inde atteignent leur maximum d'humidité du sol. Cet effet correspond tout-à-fait à la période active des moussons indiennes dans ces régions. Pendant les mois d'octobre, novembre (figure en bas à droite), les précipitations dans l'hémisphère nord sont plus faibles, ce qui induit une diminution de l'humidité du sol pendant cette période.

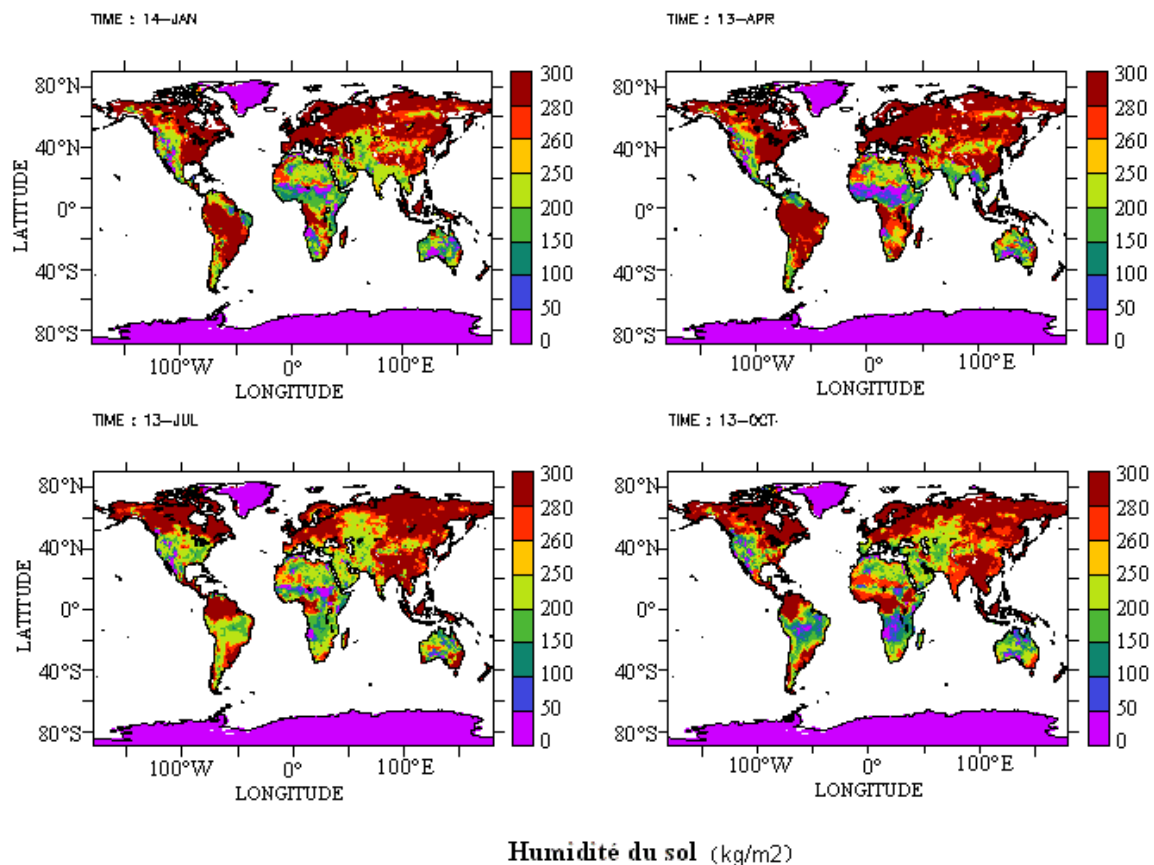


FIG. 2.4– Humidité du sol pour 4 mois de 1988 : janvier (en haut à gauche), avril (en haut à droite), juillet (en bas à gauche) et octobre (en bas à droite).

Dans l'hémisphère sud, l'amplitude saisonnière de l'humidité du sol est plus marquée. Sur le bassin de l'Amazone et le sud de l'Afrique, le contenu en eau du sol est élevé pendant la saison des pluies (janvier à avril) et décroît pendant la saison sèche (juillet à octobre).

Les valeurs moyennées dans l'hémisphère sud varient entre 250 kg/m^2 (en avril) et 180 kg/m^2 (en septembre) tandis que celles dans l'hémisphère nord ne varient que dans l'intervalle de 235 à 253 kg/m^2 . Les fortes variations dans l'hémisphère sud sont le résultat du fait que l'essentiel des continents de l'hémisphère sud se situe dans la région tropicale, où il y a des variations saisonnières très forte des précipitations (voir figure 2.5).

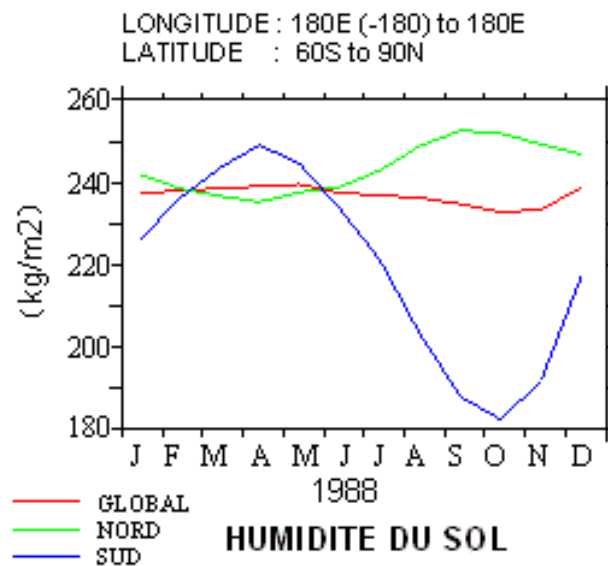


FIG. 2.5– Variations saisonnières de l'humidité du sol, moyennée sur tout le globe (courbe rouge), sur l'hémisphère nord (courbe verte), sur l'hémisphère sud (courbe bleue).

Grâce à ces fortes variations de l'hémisphère sud, **le cycle saisonnier de l'humidité du sol au niveau global varie en phase avec celui de l'hémisphère sud** bien que la surface des continents de l'hémisphère nord soit deux fois plus grande.

La figure 2.6 trace la moyenne globale de l'humidité du sol pour l'année 1988. Elle atteint sa valeur maximale (239 kg/m^2) en mai et sa valeur minimale (233 kg/m^2) en octobre. La différence d'humidité du sol entre ces deux mois est représentée sur la figure 2.7. On voit que le signal saisonnier de chacun des deux hémisphères vient principalement de la zone tropicale (35°S à 35°N).

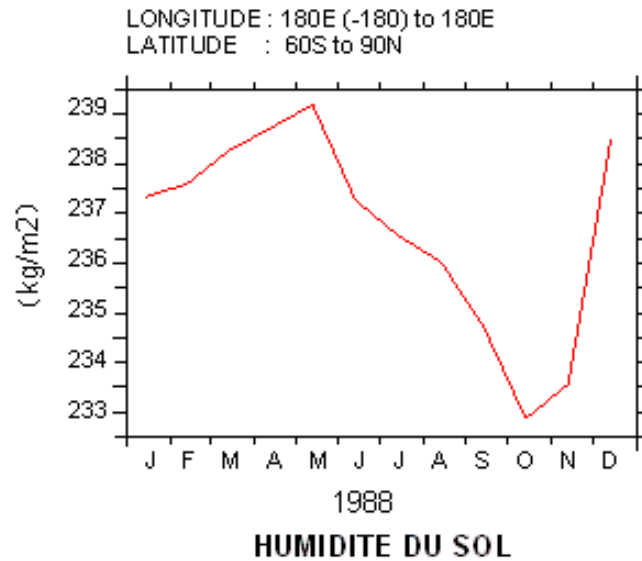


FIG. 2.6– Variations saisonnières de l'humidité du sol moyennée sur tout le globe.

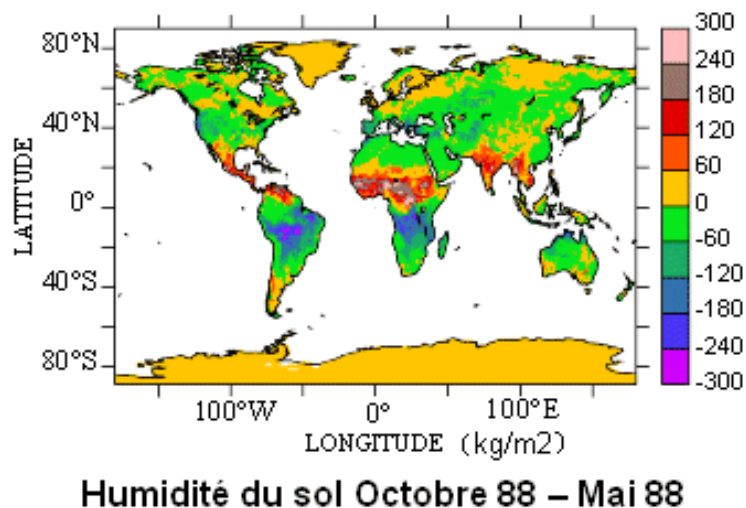


FIG. 2.7– Différence d'humidité du sol entre octobre et mai

A haute latitude, le signal est en opposition de phase avec celui des bandes tropicales. Tout ceci est expliqué par l'équation de bilan (1.6):

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

qui donne:

$$W_{\text{Octobre}} - W_{\text{Mai}} = \sum_{\text{Mai}}^{\text{Octobre}} P - E - R \tag{2.1}$$

La figure 2.8 nous aide à mieux comprendre cette équation. Elle représente la différence entre mai et octobre 1988 de moyenne zonale de l'humidité du sol, de moyenne zonale mensuelle de la précipitation, de l'évaporation et du ruissellement.

Cette figure montre que la forte différence d'humidité du sol dans la zone tropicale entre octobre et mai 1988 vient de la précipitation. La précipitation cumulée de mai à octobre est forte dans la bande tropicale du Nord. Elle peut atteindre jusqu'à 6.5 mm/j en moyenne. Cela induit une grande valeur positive de la différence d'humidité du sol. Quant à la bande tropicale du Sud, la précipitation cumulée y est faible pendant cette période (0.5 mm/j en moyenne) ; l'humidité du sol décroît donc fortement de mai à octobre.

Autour de 40°N, la précipitation est faible, tandis que l'évaporation est relativement forte, le ruissellement est très fort aux certaines latitudes (ce qui est expliqué par l'existence de grands bassins). Par conséquent, l'humidité du sol en octobre est plus faible que celle de mai dans cette région. En revanche, vers 40°S, la précipitation augmente tandis que l'évaporation diminue. On observe donc un signal positif de la différence d'humidité du sol.

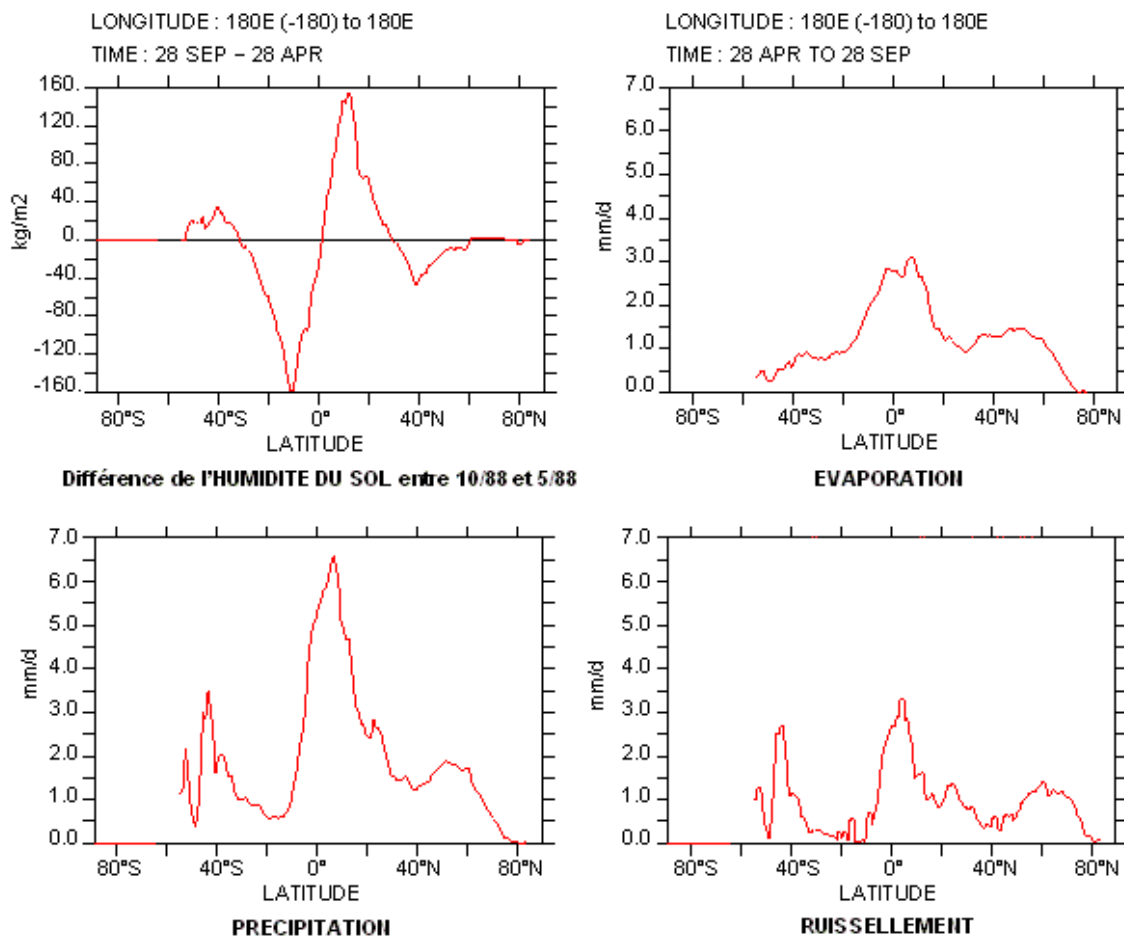


FIG. 2.8– Moyennes zonales de : différence de l'humidité du sol entre octobre et mai (en haut à gauche), précipitation cumulée (en bas à gauche), évaporation cumulée (en haut à droite) et ruissellement cumulé (en bas à droite) de mai à octobre 1988.

Dans la région de haute latitude, entre la cellule Ferrel et la cellule polaire, la précipitation augmente. La figure 2.8 nous montre cet effet, ce qui nous conduit à conclure que la précipitation sur la région est en bon accord avec la théorie.

2.5. Cycle saisonnier de la neige

La cryosphère terrestre se présente sous quatre formes principales qui sont les glaciers (des calottes polaires et des montagnes), la neige, les glaces flottantes (mers, rivières, lacs), et les sols gelés. Les deux composantes : la neige et les glaciers de montagne jouent un rôle important sur le bilan hydrique terrestre et sur le climat à travers les variations importantes d'albedo qu'elles engendrent.

La neige continentale, essentiellement dans la partie boréale de l'hémisphère nord, recouvre de $5 \times 10^7 \text{ km}^2$, soit près d'un quart des surfaces continentales. Le modèle ORCHIDEE du LMD simule la neige pour deux années 1987, 1988. La figure 2.9 représente la distribution globale de la neige, moyennée sur les douze mois de l'année 1988, sortie d'ORCHIDEE.

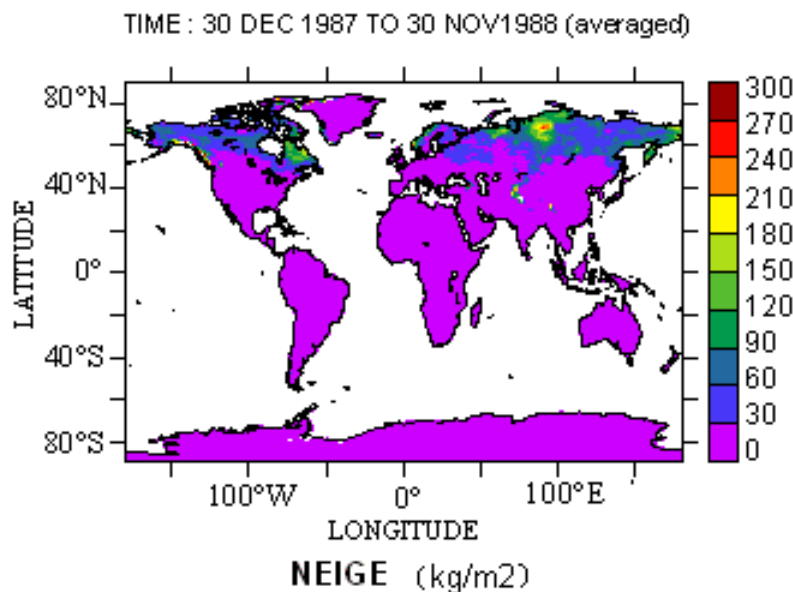


FIG.2.9– Distribution globale de la neige, moyennée sur les 12 mois de 1988

La figure 2.10 trace la moyenne globale de la neige pour les deux années 1987 et 1988. Elle atteint sa valeur maximale (30 kg/m^2) en mars et sa valeur minimale (3 kg/m^2) en août. Les variations saisonnières de la neige sont très fortes (27 kg/m^2) en comparaison avec celle de l'humidité du sol (6 kg/m^2) et représentent la plus forte contribution aux variations saisonnières du niveau de la mer.

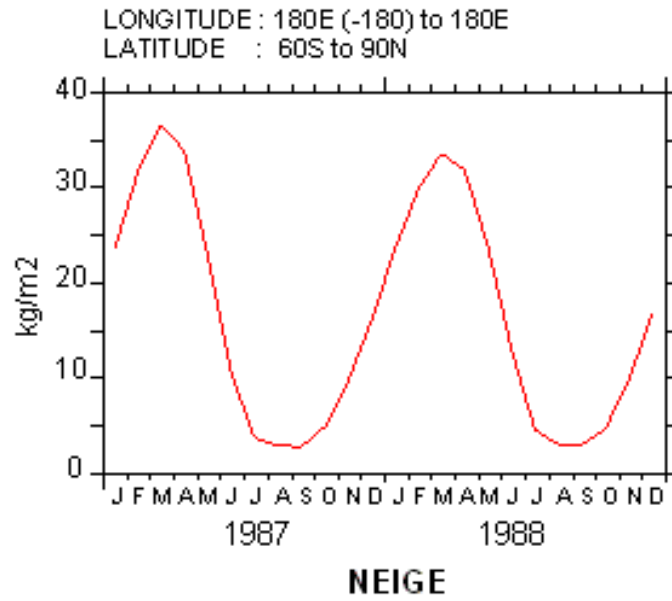


FIG.2.10– Variations saisonnières de la neige, moyennée sur tout le globe

Chapitre 3

Comparaison

Ce chapitre est la partie la plus importante du stage. Dans un premier temps, il est consacré à l'introduction des mesures altimétriques développées par la mission Topex-Poséidon. Puis, on fait la comparaison entre ORCHIDEE et les mesures de Topex-Poséidon et entre ORCHIDEE et deux autres modèles: ISBA (Douville et al. 1999) et LaD (Milly et al, 2001).

3.1. Altimétrie spatiale et Topex-Poséidon

3.1.1. Altimétrie spatiale, histoire et principe

L'altimétrie spatiale est une technique qui permet de mesurer les fluctuations spatio-temporelles des niveaux d'eau sur les mers, les lacs, les fleuves et même les zones d'inondation permanentes et temporaires.

Un peu d'histoire

Dès la fin des années 70, l'altimétrie spatiale s'est développée aux Etats-Unis avec les missions Geos 3 (1975), Seasat (1978) puis Geosat (1985-1989). Au cours de ces deux dernières décennies, grâce aux missions franco-américaine Topex-Poséidon (1992) et européennes ERS-1 (1991) et ERS-2 (1995), on est arrivé à des mesures très précises de l'évolution temporelle du niveau moyen de plusieurs grands réservoirs d'eau sur la Terre.

Principe de l'altimétrie

Le principe de l'altimétrie spatiale est tout simple. Au bord d'un satellite, on fixe un radar altimétrique. Ce radar émet des ondes électromagnétiques à très haute fréquence à la verticale de celui-ci en direction du sol et reçoit en retour l'écho réfléchi par la surface du réservoir d'eau. La durée du trajet aller-retour des signaux fournit la distance entre le

satellite et la surface. Pour arriver à une mesure précise, on doit appliquer certaines corrections, qui tiennent compte de différentes erreurs dues à l'instrument, à la propagation du signal dans l'ionosphère et la troposphère ainsi qu'aux marées océaniques, à l'état de la mer, etc.

La hauteur de mer est la différence entre l'altitude du satellite au dessus de l'ellipsoïde de référence (issue d'un calcul d'orbite précise) et la mesure altimétrique.

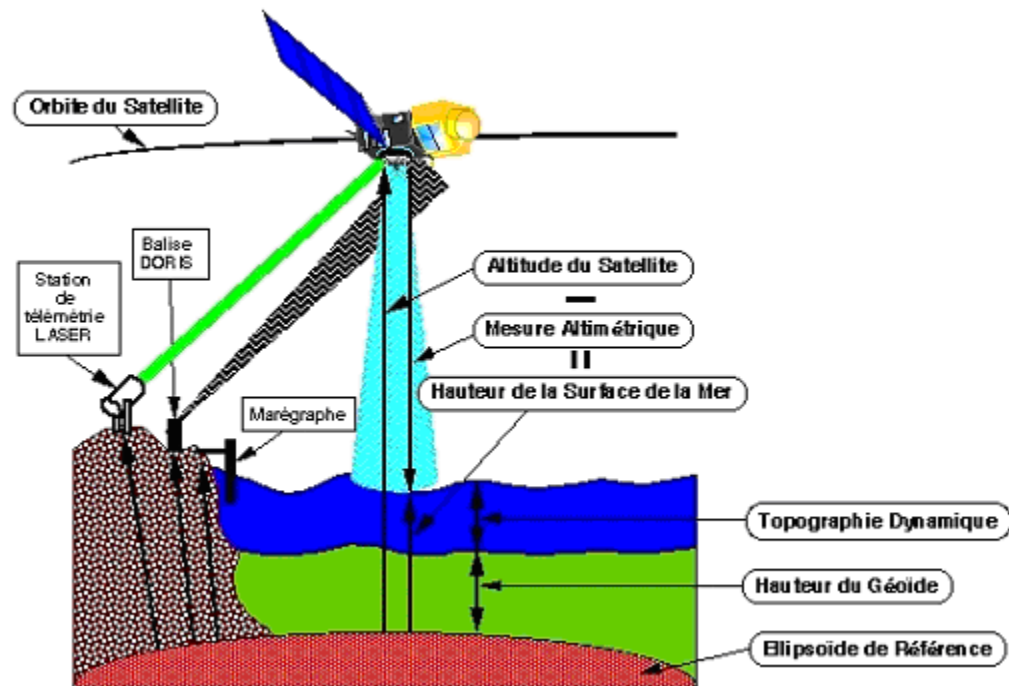


FIG. 3.1 – Altimétrie spatiale (DORIS : Détermination d'Orbite et Radioposition-nement Intégrés par Satellite) (figure de CNES)

3.1.2. Topex-Poséidon

Lancé le 10 août 1992, Topex-Poséidon est la mission la plus importante des collaborations CNES/NASA jusqu'à maintenant. L'orbite de ce satellite est quasi-circulaire et inclinée de 66 degrés par rapport à l'équateur, à 1336km d'altitude. Topex-Poséidon possède à son bord deux radars altimètres, Topex (ALT, NASA) et Poséidon (SSALT, CNES), qui mesurent avec une précision de 2 à 3 cm son altitude par rapport à la surface de la mer.

Ce satellite permet d'effectuer des mesures précises et répétées du niveau des océans afin d'établir des cartes de topographie dynamique. On peut également étudier des phénomènes tels que la circulation à grande échelle, les anomalies climatiques (El Nino, La Nina), les tourbillons, le géoïde marin, les marées, les vagues et la topographie des calottes polaires.

3.2. Variations saisonnières du niveau de la mer, mesurées par Topex-Poséidon

Depuis quelques années, avec l'altimétrie spatiale, on a pu très précisément suivre les variations du niveau moyen global de la mer avec une couverture globale et une haute résolution temporelle. La connaissance de ce phénomène représente une contribution importante à la compréhension du changement climatique global. Les deux causes de variations du niveau de la mer sont:

- les changements du volume des océans résultant de variations de densité de l'eau de mer.
- les échanges de masse d'eau entre les océans et les autres réservoirs: atmosphère, eaux continentales (humidité des sols, couverture neigeuse, eaux souterraines, rivières, lacs, glaciers).

Avec la mission altimétrique Topex-Poséidon, on peut mesurer les variations "absolues" du niveau de la mer avec une précision au-delà de 1 mm/an. Les mesures ont indiqué qu'entre janvier 1993 et octobre 2001, le niveau moyen global de la mer s'est élevé de 2.5 mm/an (figure 3.2).

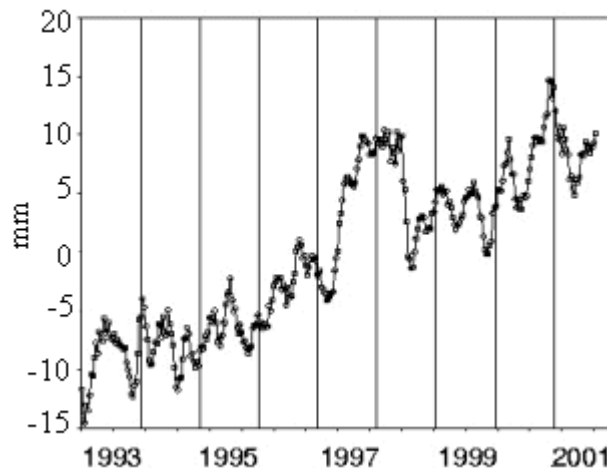


FIG. 3.2 – Variation interannuelle du niveau de la mer mesurée par Topex-Poséidon de 1993 à 2001, représenté en mm

Il faut remarquer que le signal mesuré ne représente pas le changement de la masse d'eau totale dans l'océan. C'est une combinaison des changements de volume et de masse. Le changement de volume, appelé l'effet stérique, est le résultat du changement de densité de l'eau d'océan qui est lui-même la réponse à la variation de la température et de la salinité. Quand on ne s'intéresse qu'au changement de masse, il faut donc estimer l'effet stérique et le supprimer. Pour corriger cet effet, on utilise les données proposées

par Levitus et al (1994), qui sont basées sur des mesures historiques de température in situ. L'amplitude de la contribution stérique annuelle est de 5mm et apparaît en opposition de phase avec le niveau observé par Topex-Poséidon. La différence entre ces deux signaux permet d'évaluer une oscillation du niveau moyen global de la mer due uniquement aux échanges d'eau avec l'atmosphère et les continents. La figure 3.3 représente cette oscillation. C'est une moyenne sur les 9 ans de mesure de Topex-Poséidon. Le signal a une amplitude de 10mm environ, avec le maximum vers mi-septembre.

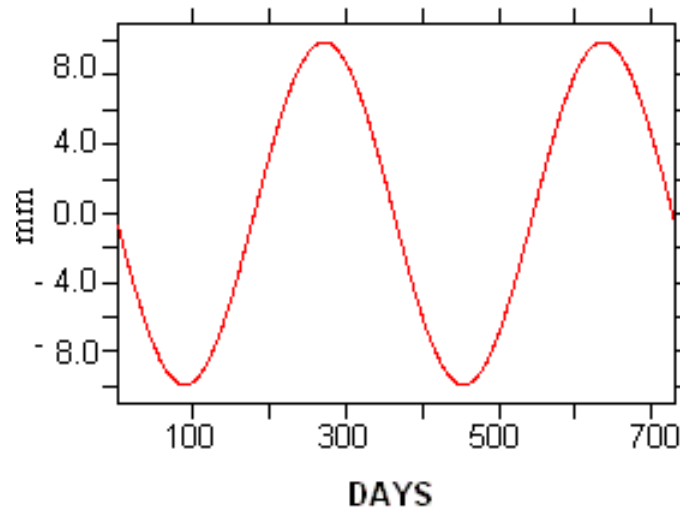


FIG. 3.3 – Variation du niveau moyen global de la mer, due à la variation de la masse d'océan, mesurée par Topex-Poséidon

On va voir par la suite que la contribution principale aux variations saisonnières du niveau moyen global de la mer est la neige des hautes latitudes de l'hémisphère nord.

3.3. ORCHIDEE et Topex-Poséidon

Un certain nombre de modèles permettent d'estimer les échanges saisonniers de masse d'eau entre les trois réservoirs principaux (océans, atmosphère et eaux continentales). Dans cette partie du rapport, on étudie d'abord les variations saisonnières de ces quantités, sorties du modèle ORCHIDEE du LMD. Puis, on les compare avec la mesure altimétrique de la mission Topex-Poséidon. La formule 1.8 (partie 1.2.2) nous sert à calculer les variations saisonnières des eaux continentales équivalentes à la variation du niveau de la mer.

On divise le réservoir d'eaux continentales en trois sous-réservoirs, humidité du sol, la neige, l'Antarctique et le Groënland. La raison de l'apparition des sous-réservoirs d'Antarctique et Groënland est que le forçage ne nous donne pas d'information sur ces régions. Tous les calculs moyens globaux de la neige et de l'humidité du sol sont faits pour la zone de 66°S à 90°N.

ORCHIDEE permet d'évaluer les variations globales de l'humidité du sol et de la neige pour les années 1987-1988. Les contributions de chacun de ces termes au niveau équivalent de la mer sont présentées sur la figure 3.4.

Sur la figure 3.4, la vapeur d'eau utilisée (courbe bleue) est donnée par Trenberth et al. (1994). Ils ont fait l'hypothèse que la masse totale de l'atmosphère sèche est annuellement conservée. L'amplitude du cycle annuel dû à cette quantité (toujours en équivalent au niveau de la mer) est de 2.6mm, qui est maximum au premier janvier.

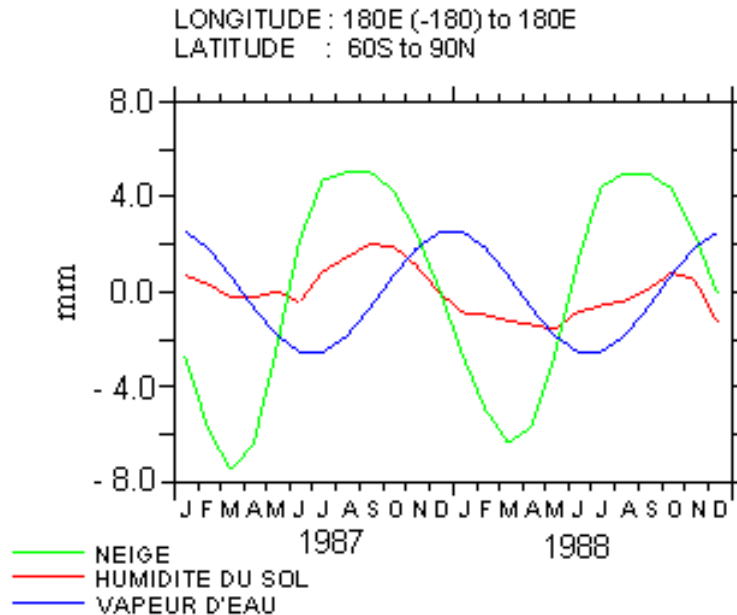


FIG. 3.4 – Contributions hydrologiques au niveau équivalent de la mer : neige (courbe verte), humidité du sol (courbe rouge) et vapeur d'eau (courbe bleue)

Parmi les trois termes : vapeur d'eau, neige et humidité du sol, la plus grande contribution au changement annuel de masse de la mer vient de la neige (courbe verte), notamment la neige dans l'hémisphère nord. Elle peut atteindre 6 mm du niveau de l'océan, avec le maximum en août - septembre. L'humidité du sol, à son tour, ne contribue qu'à hauteur de 2 mm, au maximum en octobre. On note bien qu'il y a un changement remarquable de l'humidité du sol entre les années 87 et 88. Ce signal interannuel sera discuté plus tard quand on fera la comparaison entre différents modèles : ORCHIDEE, ISBA (Douville et al) et LaD (C.Milly et al).

La variation du niveau moyen global de la mer est le résultat des échanges de masse d'eau entre différents réservoirs. La figure 3.5 compare le niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon (après avoir corrigé l'effet stérique) à la contribution hydrologique totale sortie des modèles (c'est à dire la somme de la vapeur d'eau de Trenberth, l'humidité du sol et la neige d'ORCHIDEE).

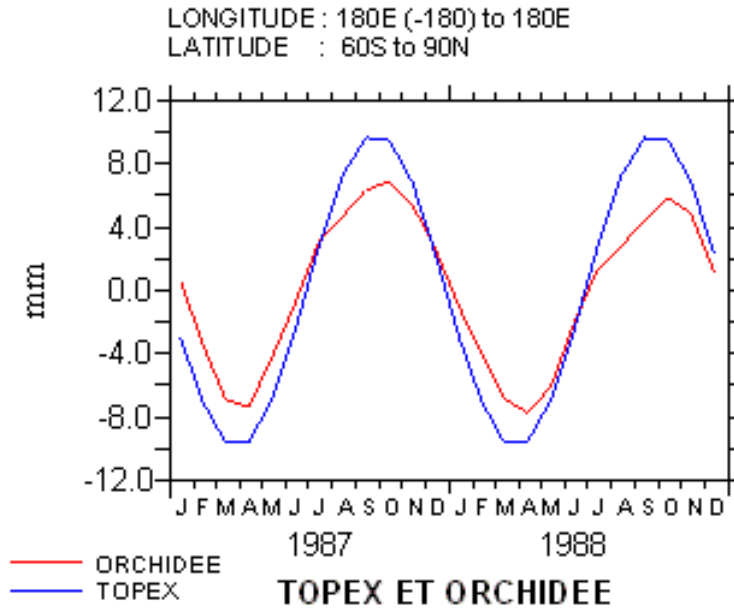


FIG. 3.5 – Comparaison entre le niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon (courbe bleue) et la contribution totale d'eau continentale et de vapeur d'eau (courbe rouge).

Les deux courbes sont en très bon accord bien qu'elles soient tracées à partir de données complètement différentes. La contribution de l'eau continentale et de la vapeur d'eau est en phase avec la variation moyenne globale du niveau de la mer. Son amplitude est inférieure de 4mm à celui de Topex.

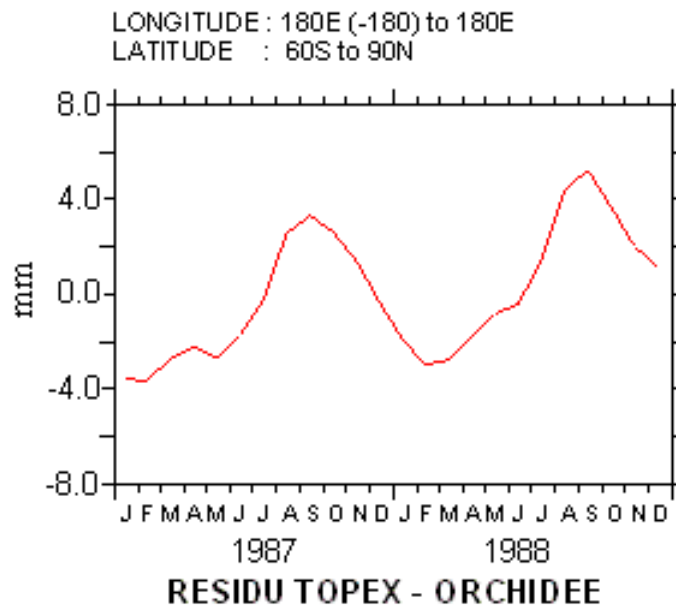


FIG. 3.6 – Résidu entre le niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon et la contribution hydrologique totale sortie du modèle ORCHIDEE

La figure 3.6 trace le résidu entre ces deux courbes. On voit qu'il représente un signal saisonnier (et aussi interannuel) d'une amplitude de 4 mm, avec un maximum vers septembre, et un minimum vers février

Ce signal a de différentes sources :

- D'abord, le satellite Topex-Poséidon ne nous donne des informations que dans la zone de 66°N à 66°S. On n'a pas de variation de masse des océans dans les régions de hautes latitudes.
- On a négligé les variations saisonnières des sous-réservoirs des eaux continentales : fleuves, eaux souterraines, lacs, ...
- Dans la simulation d'ORCHIDEE, on n'a pas d'information sur l'humidité du sol et sur la neige sur l'Antarctique et le Groënland.
- Les incertitudes peuvent aussi venir de la contribution de la neige et de l'humidité du sol dans la modélisation d'ORCHIDEE, aussi de l'effet stérique donnée par Levitus et de la vapeur d'eau donnée par Trenberth et al.

D'après les estimations de Cazenave et al. (2000), la contribution de l'Antarctique est peut-être la plus grande, avec une amplitude de 2.8mm.

De toutes les analyses abordées ci-dessus, on peut conclure que la simulation d'ORCHIDEE est en bon accord avec les données de Topex-Poséidon. Le résidu entre ces deux données nous permet d'évaluer les variations de masse des autres sous-réservoirs qui ne sont pas encore prises en compte, notamment le sous-réservoir Antarctique.

3.4. Comparaison entre différents modèles

Le but de cette partie est de comparer trois modèles qui donnent la variation moyenne globale de l'eau continentale pour les deux années 1987 et 1988: ORCHIDEE de LMD, ISBA (Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère) de Douville et al. (1999) et LaD (Land Dynamics model) de Milly et Shmakin (2001).

La figure 3.7 trace en même temps les contributions hydrologiques totales (somme de la neige, l'humidité du sol et la vapeur d'eau) à la variation du niveau de la mer des trois modèles : ORCHIDEE (rouge), ISBA (bleue), LaD (bleue d'azur).

Tout d'abord, on peut constater que les trois modèles simulent une évolution saisonnière qui est en accord avec Topex-Poséidon. L'amplitude simulée par le modèle ISBA est plus proche de Topex-Poséidon que les deux autres modèles. Nous verrons dans la suite que ceci est dû au fait que le modèle ISBA simule une plus grande amplitude des variations saisonnières de la neige.

On peut aussi noter que ISBA simule de manière très semblable le signal pour l'année 1987 et 1988. Rappelons que le signal présenté dans cette figure pour Topex-Poséidon est la moyenne sur les 9 années de mesure et qu'on attend des variations saisonnières entre 1987, qui est une année El Nino et 1988, qui est une année La Nina. Les modèles LaD et ORCHIDEE présentent une différence de 2 mm entre ces deux années.

Enfin, la courbe obtenue par LaD comporte des décroissances qui apparaissent en juillet-août que les autres modèles ne font pas apparaître. Il serait intéressant de connaître la distribution géographique de cette évolution pour déterminer la cause de cette diminution.

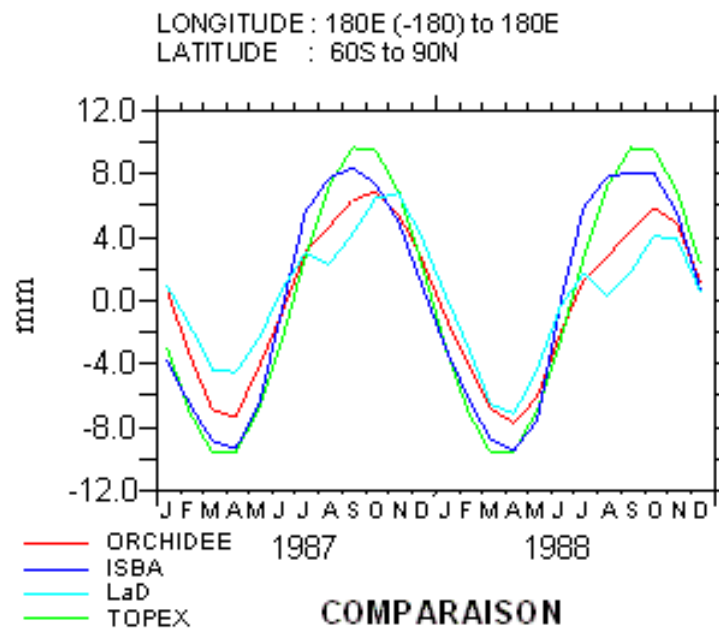


FIG. 3.7 – Variation saisonnière du niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon (courbe verte) et les contributions hydrologiques sorties des modèles : ORCHIDEE (courbe rouge), ISBA (courbe bleue) et LaD (courbe bleue d'azur)

La contribution des différents réservoirs est analysée par ces trois modèles et les résultats sont présentés sur les figures 3.8, 3.9 et 3.10. La neige contribue le plus au changement annuel de la masse de la mer. Les trois modèles donnent une variation de la neige en phase. Elle ne change pas d'une année à l'autre. Cependant, la neige simulée par ISBA a une amplitude d'environ 2 mm de plus par rapport à ORCHIDEE et LaD (figure 3.8). Ce fait explique pourquoi le modèle ISBA est plus proche Topex-Poséidon au niveau de l'amplitude.

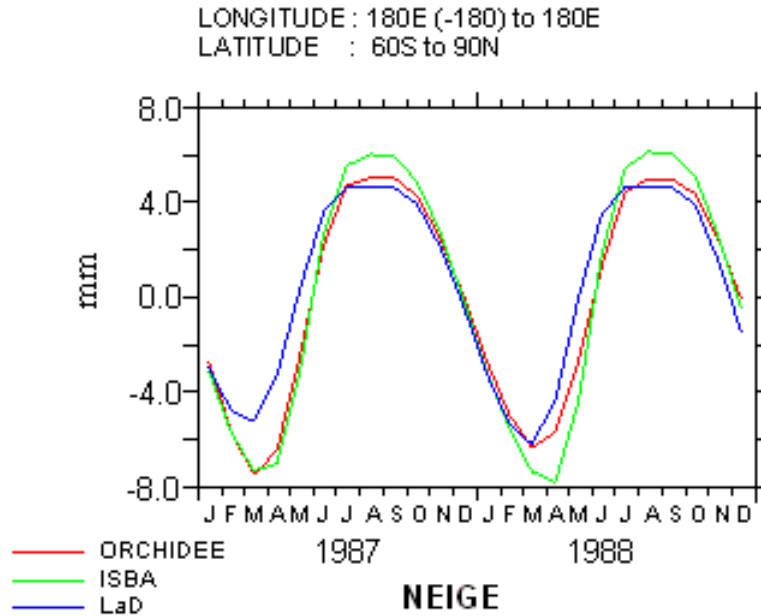


FIG. 3.8 – Contribution de la neige au niveau équivalent de la mer, simulée par ORCHIDEE (courbe rouge), ISBA (courbe verte) et LaD (courbe bleue).

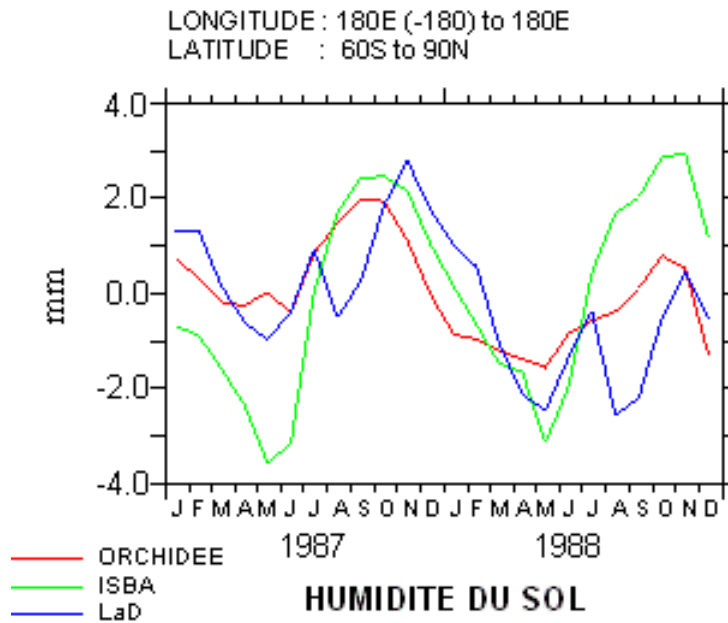


FIG. 3.9 – Contribution de l'humidité du sol au niveau équivalent de la mer, simulée par: ORCHIDEE (courbe rouge), ISBA (courbe verte) et LaD (courbe bleue).

L'humidité du sol simulée par les trois modèles est **très différente** (figure 3.9). ISBA modélise une amplitude bien supérieure aux deux autres modèles. Il apparaît un cycle saisonnier régulier pour ORCHIDEE et ISBA avec un maximum vers le mois

d'octobre et un minimum vers le mois de mai alors que la variation simulée par LaD comporte des fluctuations de quelques mois qui sont associées aux fluctuations déjà notées dans la figure 3.7. D'autre part, la variation interannuelle entre 1987 et 1988 apparaît de manière très claire dans ce graphique pour les modèles ORCHIDEE et LaD. Le modèle ISBA simule une variation bien faible entre les deux années.

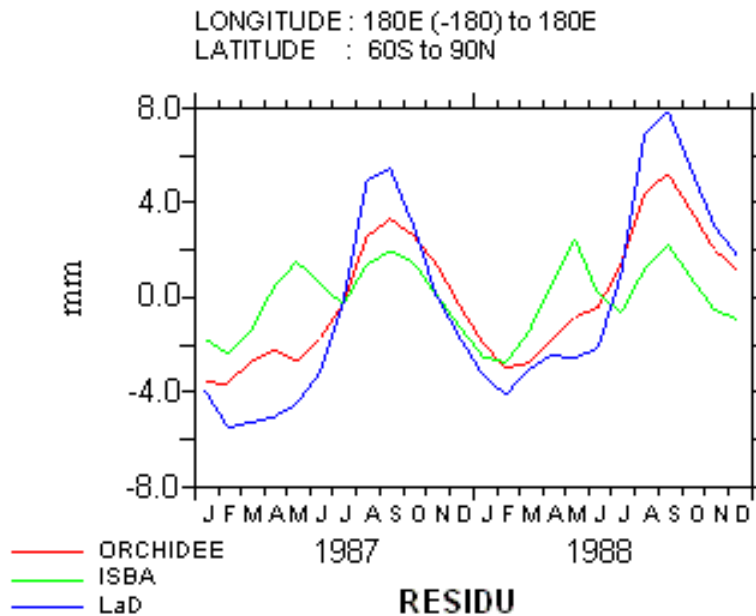


FIG. 3.10 – Résidus entre le niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon et les contributions hydrologiques totales sorties des modèles: ORCHIDEE (courbe rouge), ISBA (courbe verte) et LaD (courbe bleue)

Les résidus entre le niveau moyen global de la mer mesuré par Topex-Poséidon et les contributions hydrologiques totales sorties de trois modèles sont représentés sur la figure 3.10. Ces signaux sont intéressants car ils peuvent être liés aux différentes sources déjà mentionnées dans la partie précédente (les variations saisonnières de l'Antarctique, des rivières, les incertitudes des données, etc.).

Les variations saisonnières régulières simulées par les modèles LaD et ORCHIDEE nous conduisent à conclure que son origine correspond à un phénomène physique particulier négligé ; celui-ci pourrait correspondre à la contribution de l'Antarctique. Sur la figure 3.10, on peut noter que l'amplitude du signal d'ORCHIDEE est de 4 mm, maximum en septembre, et celui de LaD est d'environ 6.5 mm, en phase avec ORCHIDEE.

En revanche, le cycle simulé par ISBA ne comporte ni oscillation annuelle régulière ni variation interannuelle bien qu'il soit le plus petit au niveau de l'amplitude.

Chapitre 4

PERSPECTIVES

4.1. Nouvelle version d'ORCHIDEE

La nouvelle version d'ORCHIDEE (Polcher 2002) prend en compte les flux d'eau entre des sous-réservoirs des eaux continentales autres que la neige et l'humidité du sol. Ce sont les rivières et les lacs et les eaux souterraines, qui se divisent en sous-réservoir rapide, sous-réservoir moyen et sous-réservoir lent selon les constantes de temps. La figure 4.1 nous donne une image globale de la somme de ces trois sous-réservoirs.

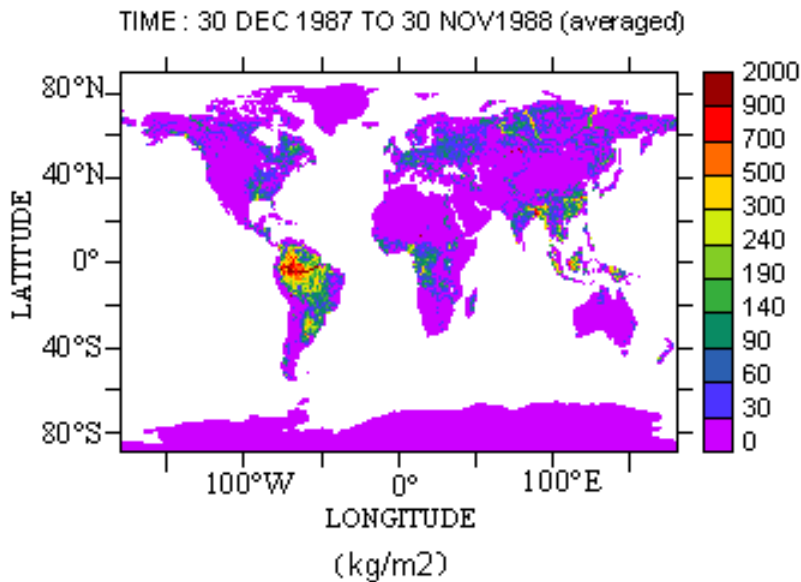


FIG. 4.1 – Somme de sous-réservoir rapide, sous-réservoir moyen et sous-réservoir lent modélisés par la nouvelle version d'ORCHIDEE.

La figure 4.2 représente les variations saisonnières de chacun des trois réservoirs (figure à gauche) et les variations totales (la somme des trois réservoirs) exprimées en équivalent au niveau de la mer.

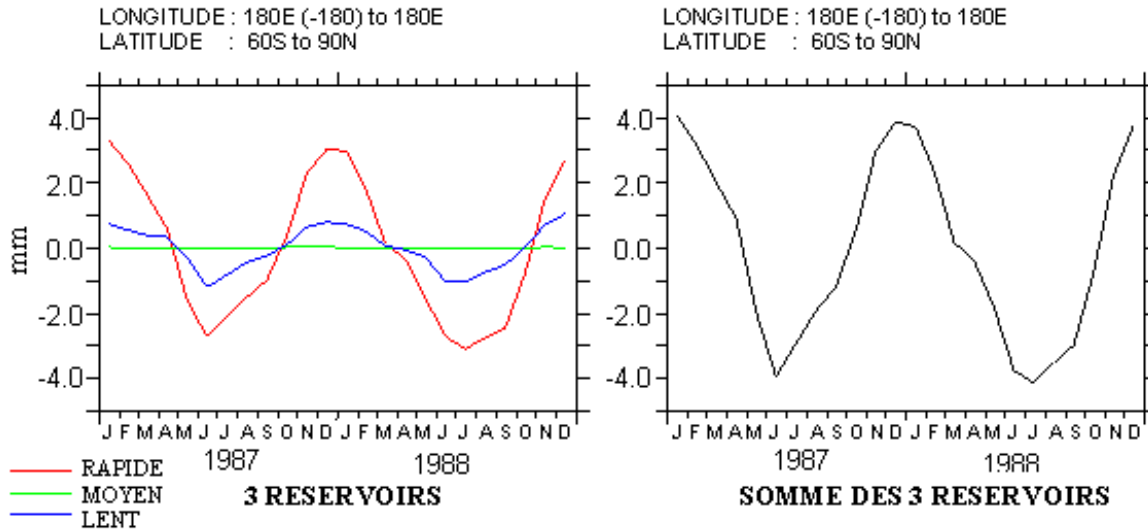


FIG. 4.2 – A gauche : variation saisonnière de sous-réservoir rapide (courbe rouge), sous-réservoir moyen (courbe verte) et sous réservoir lent (courbe bleue) ; à droite, la somme de la variation de ces trois réservoirs.

Le signal total montre une variation de 4 mm d'amplitude, qui est maximum vers décembre et minimum en juin. Cette amplitude est égale à l'amplitude de la différence entre le niveau de la mer mesuré par Topex-Poséidon et la contribution de la neige et de l'humidité du sol sortie du modèle ORCHIDEE (voir figure 3.6). Il existe un décalage de phase de trois mois entre ces deux signaux.

Selon Douville et al. (2000), on a fait l'hypothèse que la variation saisonnière de ces sous-réservoirs est petite et n'atteint que 0.15 mm d'amplitude, ce qui est **contradictoire** avec ce qui est trouvé ici.

Avec la nouvelle version du modèle ORCHIDEE, on a montré que les échanges de masse d'eau entre les rivières, les eaux souterraines et autres réservoirs sont importants et que l'on ne peut pas les négliger.

4.2. Le projet LSPCR

Dans le cadre du projet LSPCR (**L**and-**S**urface **P**rocesses and **C**limate **R**esponse), des simulations de 10ans ont été effectuées avec un GCM couplé aux schémas de surface Bucket ou SECHIBA (que l'on les a présenté au chapitre 2). On peut raisonnablement considérer la dixième année comme représentative du comportement du modèle à

l'équilibre. Dans cette analyse, la résolution spatiale est environ de 2 degrés en latitude dans les régions tropicales et de 3.5 degrés en longitude. La période couvre un an, moyenne de 10 ans.

4.2.1. Climat actuel

Pour décrire les processus de surface, dans le cadre du projet LSPCR, on utilise soit le modèle Bucket, soit le modèle SECHIBA.

La figure 4.3 trace la contribution hydrologique totale (neige, humidité du sol, vapeur d'eau) à la variation du niveau de la mer, modélisée par chacun de ces deux modèles : Bucket (courbe bleue), SECHIBA (courbe rouge). La courbe verte est la variation mesurée par Topex-Poséidon.

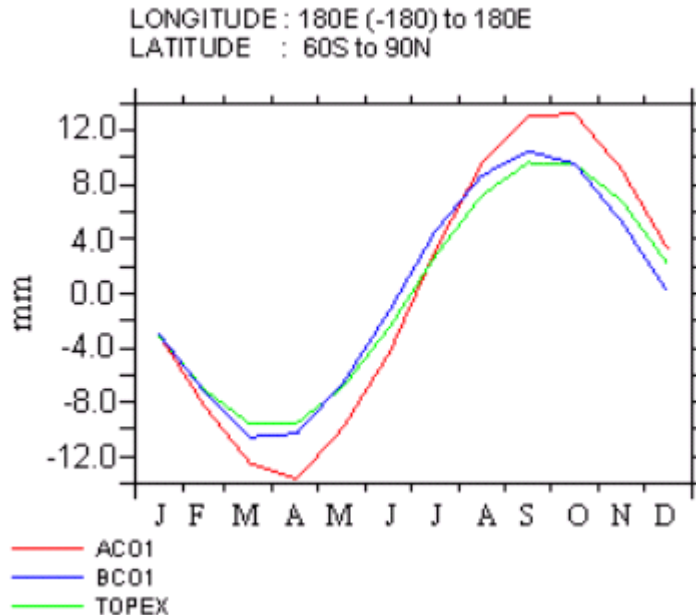


FIG. 4.3 – Contribution de l'eau continentale à la variation du niveau de la mer, modélisée par SECHIBA (courbe rouge), Bucket (courbe bleue) et observée par Topex-Poséidon.

On voit qu'il existe une différence remarquable entre deux simulations Bucket et SECHIBA. Etudier cette différence (d'où vient la différence, lequel parmi deux modèles est plus proche de l'observation, quels sont les paramètres qui ont les influences importantes sur les modélisations, etc.) est une bonne perspective du travail.

4.2.2. Impacts de l'effet de serre

L'augmentation globale du gaz à effet de serre est la cause d'un réchauffement climatique à l'heure actuelle. Ce changement climatique influence directement les échanges hydrologiques entre les réservoirs : atmosphère, océan, continents. Etudier cet impact nous permet de prédire l'évolution des flux et réservoirs d'eau au niveau global et régional. Cette étude nous permet aussi d'avoir une gestion plus rigoureuse des ressources en eau.

LSPCR a commencé à étudier le changement du niveau de la mer en doublant le gaz carbonique CO₂. La figure 4.4 représente les variations saisonnières de l'eau continentale, modélisée par LSPCR avec la quantité actuelle du CO₂ (courbe rouge); avec le double de CO₂ (courbe bleue) et les variations du niveau de la mer observé par Topex-Poséidon (courbe verte).

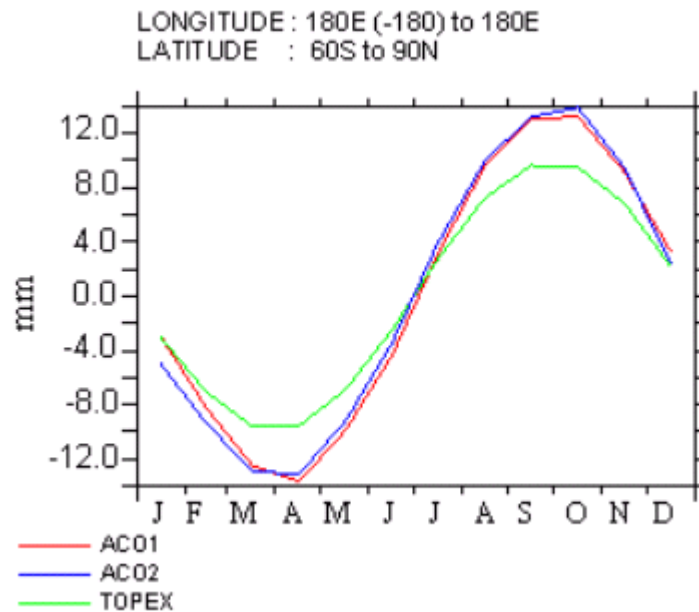


FIG. 4.4 – Contribution de l'eau continentale à la variation du niveau de la mer, modélisée avec la quantité CO₂ actuelle (courbe rouge), avec le double de CO₂ (courbe bleue) et la variation du niveau de la mer mesurée par Topex-Poséidon.

Sur la figure, on n'observe qu'une petite influence de l'effet de serre. On ne peut pas conclure immédiatement que l'effet de serre peut être négligé car dans la simulation, il existe encore des incertitudes dues aux connaissances non suffisantes sur la réponse de certains processus en doublant la quantité de CO₂, par exemple : la réponse de la végétation. Etudier précisément cet effet est donc le but de plusieurs projets dans les années à venir.

4.3. Le développement des outils d'observation

Dans le domaine de l'hydrologie continentale à moyenne et grandes échelles géographiques, l'observation spatiale offre des perspectives considérables et inattendues.

Jason-1 a été lancée en décembre 2001. Il a pris la relève de Topex-Poséidon. Comme son prédécesseur, ce satellite est réalisé dans le cadre d'une coopération franco-américaine. En plus des mesures de haute précision, Jason-1 fournit des produits en temps peu différé pour des prévisions à court et à moyen terme.

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), mission spatiale de mesure de gravité a été lancée le 17 Mars 2002. GRACE nous permettra d'étudier les redistributions de masse d'eau dans les océans, les variations du stock d'eau sur les continents et de glace sur les calottes polaires.

Les résultats des missions Jason-1 et GRACE sont encore attendus. Avec le développement des outils d'observation, l'accès spatial à la caractérisation globale des stocks d'eaux continentales, aux échanges de masse d'eau entre différents réservoirs, est aujourd'hui possible et constitue un enjeu important de l'observation environnement planétaire.

Conclusion

Cette étude a évalué l'évolution saisonnière et interannuelle de l'eau continentale. La comparaison des observations de Topex-Poséidon et des résultats du modèle de surface du LMD, ORCHIDEE, a été tout à fait satisfaisante. La modélisation des échanges d'eau sur les surfaces continentales est capable de reproduire le cycle annuel des réservoirs d'eau et de neige sur les continents. Le modèle ORCHIDEE simule une variation entre les deux années 1987 (El Nino) et 1988 (La Nina) dont l'ordre de grandeur est tout à fait mesurable par Topex-Poséidon. On a montré que l'évolution des modèles hydrologiques dans les GCMs permet d'appréhender les variations du niveau de la mer liées aux autres réservoirs (eau des fleuves, des lacs, etc.) autre que l'humidité du sol et la neige. L'étude préliminaire obtenue lors de ce stage montre que cette contribution peut être assez importante et ne doit pas être négligée.

Avec un fort développement des outils d'observation d'altimétrie spatiale (mission Jason-1, mission GRACE) et des modèles climatiques, nos études ont de très bonnes perspectives. Dans les années à venir, on souhaite d'avoir des résultats précis des échanges entre les glaciers de l'Antarctique et les océans, de l'impact de l'effet de serre, de l'influence des rivières, des lacs, etc. sur le bilan d'eau au niveau global et régional.

Bibliographie

- Cazenave, A. et al., Mai 2001 : Géodésie, gravimétrie et altimétrie spatiales appliquées aux réserves en eau continentales, *Journées d'Hydrologie spatiale*.
- Cazenave, A., F.Remy, K.Dominh, and H.Douville, 2000 : Global ocean mass variation, continental hydrology and the mass balance of antarctica ice sheet at seasonal time scale, *Geo. Res. Letters*, vol.**27**, no.**22**, 3755-3758.
- De Rosnay, P., 1999 : Représentation de l'interaction sol-végétation-atmosphère dans le Modèle de Circulation Générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique, *thèse de doctorat*, Université Paris 6.
- Ducharne, A., and K.Laval, 2000: Influence of the Realistic Description of Soil Water-Holding Capacity on the Global Water Cycle in a GCM, *J.Climate*, **13**, 4393-4413.
- Ducharne, A., K.Laval, J.Polcher, 1998 : Sensitivity of the hydrological cycle to the parametrization of soil hydrology in a GCM, *Climate Dyn.*, **14**, 307-327.
- Ducharne, A., 1997: Le cycle de l'eau: modélisation de l'hydrologie continentale, étude de ses interactions aec le climat, thèse de doctorat, Université Paris 6.
- Laval, K. 1997: Hydrological processes in GCMs, *NATO ASI Series*, Vol. I 46
- Laval, K. and L. Picon, 1986: Effect of a Change of the Surface Albedo of the Sahel on Climate, *Journal of the atmospheric sciences*, vol. **43**, no. **21**
- Minster, J.F. et al., 1999: Annual cycle in mean sea level from Topex-Poséidon and ERS-1: inference on the global hydrological cycle, *Global and Planetary Change*, **20**, 57-66.
- Roca, R., 2000 : Contribution à l'étude de la vapeur d'eau, de la convection et de leurs interactions dans les tropiques à l'aide d'observations de satellites et de modèles, *thèse de doctorat*, Université Paris 6.
- Rodell, M., and J.S.Famiglietti, 1999 : Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field, *Water resources research*, vol.**35**, no.**9**, 2705-2723.
- Verant, S., 2000 : Etude du bilan hydrologique en Espagne simulé par le schéma de surface SECHIBA. Agrégation et désagrégation des forçage, *rapport de stage de DEA*, Université Paris VI.