

**RAPPORT DE STAGE DE M1 DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité :

**ENVIRONNEMENT CONTINENTAUX ET HYDROSCIENCES**

Présenté par :

**JULIEN GOULLET**

Sujet du stage :

**SENSIBILITE DU MODELE DE SURFACE CONTINENTAL ORCHIDEE A LA  
PARAMETRISATION DE L'HYDROLOGIE DU SOL.**

Tutrice :

**AGNÈS DUCHARNE**

Chercheuse CNRS à l'UMR METIS

Année : **2014-2015**

Avant propos :

Initialement prévu sur la rétroaction des eaux souterraines sur le climat par l'analyse d'une série de simulations idéalisées, ce stage a basculé dans un autre domaine, celui de l'analyse de la sensibilité du modèle de surface continentale ORCHIDEE à la paramétrisation de l'hydrologie du sol suite à des problèmes d'équilibre du modèle.

De nombreuses simulations ont été réalisées durant mon stage par ma tutrice A. Ducharne, et des recherches, dans le script du modèle ORCHIDEE, effectuées pour tenter de résoudre les problèmes d'équilibre.

Pour m'avoir accepté en tant que stagiaire, pour son soutien et pour avoir su me pousser quand il le fallait, je souhaiterai la remercier.

Merci à l'ensemble de l'équipe de l'UMR métis pour m'avoir accueilli dans le laboratoire.

# SOMMAIRE

Introduction	p. 4
Chapitre 1 : états des lieux et recherches bibliographiques	p. 5
I. Généralités sur le cycle de l'eau.	p. 5
II. L'hydrologie du sol.	p. 6
III. La modélisation de l'hydrologie.	p. 7
III.1. Les modèles hydrologiques.	p. 8
III.2. Les modèles de surface continentale.	p. 8
IV. ORCHIDEE	p. 9
IV.1. Généralités.	p. 9
IV.2. Description du bilan d'eau.	p. 9
Chapitre 2 : Méthodes et outil.	p. 11
I. Les méthodes.	p. 11
I.1. Distinctions des simulations.	p. 12
I.1.2. La paramétrisation.	p. 12
I.1.2.1. Paramétrisation de la végétation.	p. 13
I.1.2.2. Paramétrisation de la texture.	p. 13
I.1.2.3. Paramétrisation de la profondeur.	p. 14
I.1.2.4. Paramétrisation du nombre de couches.	p. 15
I.1.2.5. Mise en place d'une couche imperméable.	p. 16
I.2. Les conditions initiales.	p. 16
I.3. Les variables de sorties.	p. 16
II. L'outil R.	p. 17
Chapitre 3 : Résultats et discussion	p. 18
I. Résultats	p.18
I.1. La mise à l'équilibre	p. 18
I.2. La sensibilité de l'hydrologie du sol aux paramètres	p. 20
I.3. Le TWBR	p. 23
II. Poursuite du stage	p. 26
Conclusion	p. 27
Bibliographie	p. 28
Annexes	p. 30

# INTRODUCTION

Au cours du cycle de l'eau, des transferts continus d'importantes masses d'eau s'opèrent entre les différents réservoirs terrestres : Océans, Atmosphère, Biosphère, Lithosphère et Cryosphère.

Les flux qui s'établissent entre ces réservoirs sont principalement dus à la répartition du bilan énergétique solaire établi à la surface de la Terre et qui régit les conditions atmosphériques terrestres, définissant le climat.

Le modèle ORCHIDEE est un modèle de surface continental développé par l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) qui est un modèle composant le GCM (Général Circulation Model) IPSL-CM de l'IPSL. Ce GCM dont les versions évoluent avec les progrès réalisés, décrit l'ensemble des interactions physiques, du cycle du carbone et de la chimie de l'atmosphère du système terrestre.

Les autres modèles composant ce GCM sont un modèle atmosphérique (LMDZ), un modèle océan (NEMO) et un modèle de couplage (OASIS). Il s'agit donc d'un outil particulièrement élaboré pour effectuer des modélisations climatiques.

Il est important de représenter les surfaces continentales dans le système terrestre notamment pour définir la ressource en eau douce accessible aux Hommes. Avec les modélisations climatiques, l'évaluation de la demande pour le présent et pour le futur devient possible.

L'objectif de ce stage a été d'analyser la réponse hydrologique des sols à l'échelle mondiale en modifiant certains paramètres d'entrés du modèle de surface continental ORCHIDEE. La façon de procéder a donc été de se centrer sur l'humidité des sols et d'évaluer l'impact de tel ou tel paramètre sur cette variable.

Pour analyser les variations de la réponse d'ORCHIDEE, différentes simulations ont été réalisées en modifiant les paramètres suivants : la texture, le nombre de couche de sol du modèle, en fixant une couche imperméable au fond de sol, et en faisant varier la profondeur du sol.

Ce rapport est organisé en trois parties ; une première présentant un état des lieux sur les recherches préalables effectuées sur le sujet, au travers d'une analyse d'articles scientifiques, montrant l'intérêt de l'étude du cycle de l'eau, de la place des continents dans ce cycle, et d'une présentation du modèle ORCHIDEE.

Une deuxième partie présente les outils et méthodes qui ont été utilisés pour évaluer la sensibilité du modèle ORCHIDEE et principalement les différents paramètres qui ont été changés lors de la réalisation des simulations du modèle.

Enfin une troisième partie présentera les résultats obtenus sur la mise à l'équilibre du modèle, ainsi que les résultats sur les principales variables étudiées.

# Chapitre 1 : État des lieux et recherches bibliographiques.

## I. Généralités sur le cycle de l'eau

Surnommée la planète bleue, la Terre doit son surnom à l'abondance d'eau liquide qu'elle contient à sa surface. L'eau est une ressource circulant librement dans le système terrestre, au sein de différents réservoirs : les Océans, la Cryosphère (neiges et glaces), la Lithosphère (sols et sous-sol), l'Atmosphère et la Biosphère. La masse d'eau terrestre étant considérée comme constante [Oki & al, 2006].

La Terre est soumise aux rayonnements solaires incidents. Le flux d'énergie solaire moyen reçu au sommet de l'atmosphère est d'environ  $342 \text{ W/m}^2$ . Cependant la quantité d'énergie reçue à la surface varie spatialement, puisque l'angle d'incidence des rayons solaires va varier avec la latitude du point considéré [Campoy, 2013].

Le rayonnement solaire est à l'origine de la mise en place du cycle de l'eau. En effet, l'apport d'énergie solaire aux plans d'eau, aux sols et à la végétation, va avoir pour conséquences d'augmenter l'énergie thermique de l'eau. Les changements d'état de l'eau correspondent à des sauts d'énergie interne modifiant la structure des molécules d'eau : de solide vers gazeux, en passant par liquide [Campoy, 2013].

Lorsque la surface terrestre est soumise aux rayonnements solaires, l'évaporation des plans d'eau et du sol, les transpirations végétales et animales, ainsi que la sublimation des glaces se produisent, restituant de la vapeur d'eau à l'atmosphère [Ducharne & Laval, 2015]. La formation des nuages résulte de la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère.

L'évaporation des continents est environs deux fois inférieure à celle des océans en moyenne globale. Au niveau des océans, l'évaporation est supérieure aux précipitations, contrairement aux continents. Cela crée un déficit hydrique qui est transporté par l'atmosphère, sous forme de vapeur d'eau et de nuages vers les continents [Ducharne & Laval, 2015] (FIGURE 1).

La circulation atmosphérique, principalement contrôlée par la variation de la répartition des radiations solaires à la surface du globe [Campoy, 2013], explique le mouvements des masses d'air, des nuages et donc la spatialisation des précipitations sur les continents : principalement sur les côtes et les reliefs.

Les plus grandes précipitations sont enregistrées au niveau de l'équateur, où les radiations solaires sont les plus fortes, et donc où l'évaporation est la plus importante. La ceinture équatoriale apparaît comme le moteur des cellules de convections atmosphériques [Ducharne & Laval, 2015].

L'eau contenue dans l'atmosphère est restituée à la surface sous forme de neiges ou de pluies. Dans le premier cas, elles peuvent être stockées dans les glaciers, qui constituent un stock important d'eau douce [Oki & al, 2006]. Les précipitations participent à l'infiltration des eaux dans le sol et au soutien du débit des rivières par l'intermédiaire du ruissellement (FIGURE 1).

Le volume d'eau stocké dans les surfaces continentales (sol, pergélisol et eaux souterraines) est une part importante du cycle de l'eau, non pas au point de vue quantitatif, puisque cela représente moins de 2% du volume d'eau contenu dans les Océans (FIGURE 1), mais au point de vue gestion de la ressource.

En effet, sur Terre, seul 2,5% de la ressource en eau est dite propre à l'usage des hommes (agriculture, industrie, consommation...), par l'intermédiaire des glaciers, des rivières et des eaux souterraines qui fournissent de l'eau douce. La quantité maximale fictive d'eau propre à la consommation et renouvelable disponible est la différence entre précipitation et évapotranspiration (eau verte) [Oki & al, 2006]. L'eau bleue, qui est l'eau s'écoulant dans les rivières, se trouvant dans les lacs ou encore qui est captée dans les nappes souterraines, représente avec l'eau verte représente la quantité d'eau douce nécessaire aux activités humaines.

Les continents représentent donc un réservoir essentiel aux besoins de l'humanité en permettant de restituer de l'eau douce, par les rivières et de stocker de l'eau par l'infiltration.

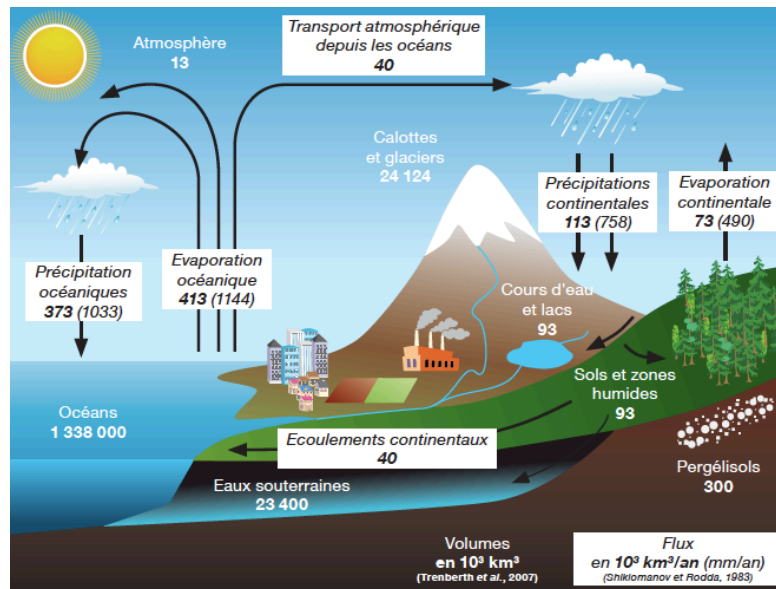


Figure 1 : Le cycle de l'eau global ( Ducharne & Laval, 2015)

## II. L'hydrologie du sol

Lorsque l'eau liquide atteint la surface continentale, par l'intermédiaire des précipitations ou de la rosée, elle est soumise à différents processus hydrologique se produisant au niveau du sol et de la végétation : l'interception par les plantes, qui peut être reprise par évaporation, l'infiltration dans le sol et le ruissellement à la surface du sol.

L'infiltration est définie comme étant le mouvement de l'eau pénétrant dans le sol depuis sa surface. L'eau qui s'infiltré est soumise à la gravité qui tend à créer un écoulement vertical vers le bas et participe à l'humidification du sol. Dans le cas d'un sol

non saturé, des forces de rétention au niveau des particules de sol s'appliquent, et ce d'autant plus que le sol est moins humide. Lorsque de la végétation est présente, une force de succion est exercée par le système racinaire [Noihlan, 1997], qui dépend du type de végétation, de son stade de développement et de son statut hydrique. Ces forces de rétention s'opposent à la gravité, avec lesquelles elles contrôlent la diffusion de l'eau dans le sol.

L'humidité du sol joue un rôle important dans le maintien de la vie sur Terre, permettant de fournir aux plantes le volume d'eau nécessaire à leur croissance. Cette humidité est limitée par une capacité de stockage maximum, définie par sa porosité et par sa profondeur.

Le bilan d'énergie de surface (FIGURE 2) a un impact fort sur l'humidité du sol puisqu'il conditionne les échanges entre le sol et l'atmosphère par l'intermédiaire du flux de chaleur latente [Campoy, 2013]. Il existe un couplage entre humidité du sol et bilan énergétique. En effet, le bilan radiatif va impacter sur l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation et inversement. Lorsque l'énergie augmente, le flux de chaleur latente (évapotranspiration) augmente et donc l'humidité des sols diminue. Lorsque l'humidité du sol est nulle, aucun flux ne s'établit entre le sol et l'atmosphère, si l'énergie reçue augmente, le flux de chaleur sensible augmente et donc la température de surface augmente.

L'humidité du sol apparaît donc comme une composante importante des échanges entre surface continentale et atmosphère. Son étude sur de longues périodes peut fournir des indications sur les modifications climatiques.

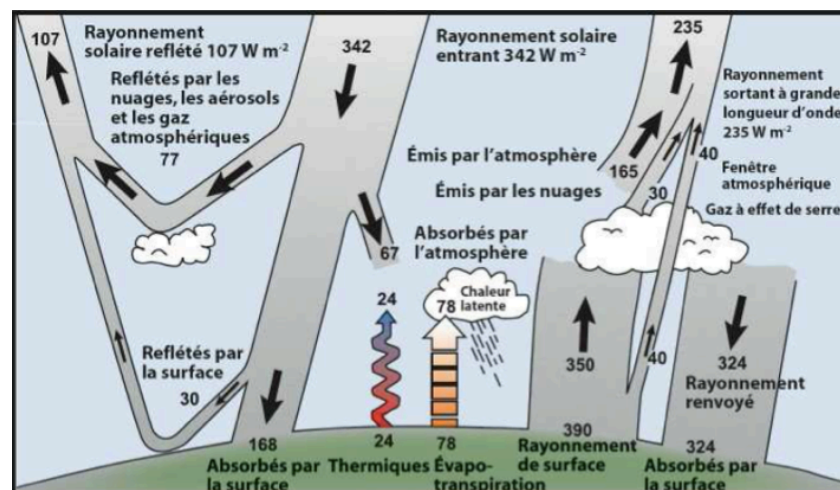


Figure 2 : Bilan radiatif terrestre ( $W/m^2$ ), (Kiehl & al.)

### III. La modélisation de l'hydrologie.

Comme nous l'avons montré précédemment, les surfaces continentales jouent un rôle important dans la mise en place du cycle de l'eau, et représentent un enjeu majeur d'un point de vue gestion de la ressource en eau accessible à l'humanité.

La modélisation de l'hydrologie des surfaces continentales consiste à simuler les flux d'eau de précipitations, d'évapotranspiration et les écoulements qui s'établissent sur une surface. Cela consiste à effectuer le bilan hydrique des échanges qui s'y effectuent.

Plusieurs résultats sont attendus par les modélisations de l'hydrologie des surfaces, tel que d'évaluer l'eau bleue disponible au cours du temps, quantifier le flux d'évapotranspiration dans un intérêt climatique ou agronomique...

Deux types de modèles décrivent la résolution du bilan hydrologique : les modèles hydrologiques et les modèles de surface continentale [Ducharne, 2011].

### III.1. Les modèles hydrologiques.

Les modèles hydrologiques sont des outils numériques, qui se focalisent sur la simulation des écoulements tels que le ruissellement, l'infiltration, les écoulements souterrains, et la mise en place du débit, mais aussi la notion de stockage.

Les modèles hydrologiques caractérisent les flux d'eau horizontaux, soit par une approche pluie/débit, soit en caractérisant la diffusivité dans le sol pour les modèles hydrogéologiques. L'application de ces modèles sur des domaines où les conditions latérales sont bien renseignées, permet principalement de modéliser les flux d'eau horizontaux, c'est à dire les écoulements, de la charge hydraulique la plus haute vers la plus basse [Ducharne, 2011].

Dans le contexte de notre étude, nous avons besoin de modéliser les flux d'eau verticaux, et plus particulièrement l'évapotranspiration et l'infiltration. Or l'évapotranspiration est décrite de manière simplifiée, en négligeant le couplage avec le bilan d'énergie et le rôle de la végétation, par les modèles hydrologiques [Ducharne, 2011].

### III.2. Les modèles de surface continentale.

Ce qui diffère principalement entre les modèles hydrologiques et les modèles de surface continentale est la prise en compte du bilan d'énergie pour le calcul des flux hydriques, dans les modèles de surface continentale.

Ces modèles prennent en compte les caractéristiques du sol tels que sa rugosité, l'albédo de surface par exemple ; les caractéristiques de la végétation comme l'indice de surface foliaire ; et les propriétés hydriques du sol, comme la perméabilité [Campoy, 2013].

Un des buts principaux de ces modèles est de caractériser l'évapotranspiration au cours du temps. Cela nécessite une approche particulière qui intègre à la fois les réservoirs sol, végétation et atmosphère, et la représentation des flux établis entre ces réservoirs (approche TSVA, pour Transferts Sol-Végétation-Atmosphère).

L'autre différence avec les modèles hydrologiques est donc de caractériser les flux hydriques verticaux. Les échanges hydriques entre les différentes mailles du modèle sont plus ou moins ignorés, puisque l'on s'intéresse à l'hydrologie du sol et non des nappes souterraines, du moins dans la plus part des cas [Ducharne, 2011].



## IV. ORCHIDEE.

### IV.1. Généralités.

Parmi les modèles de surface continentale, le modèle ORCHIDÉE (ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamics EcosytEMs) est le modèle très complet, développé par L'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) depuis 1980.

Il s'agit d'un modèle TSVA couplé à un modèle gérant les processus biogéochimiques aux surfaces continentales et un modèle gérant l'évolution de l'occupation des sols [Krinner, 2005]. ORCHIDEE peut être utilisé selon différentes configurations. En activant ou non les différents modules du modèle de surface.

Le module Sechiba (Schématisation des EChanges Hydrique à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmosphère) décrit les bilans d'eau et d'énergie des surfaces continentales comme étant le résultat des interactions sol, végétation, atmosphère pour chaque maille de surface [Campoy & al, 2013].

Les phénomènes liés au cycle du carbone, aux processus de végétation et de décomposition des sols, les changements dans les distributions de végétation en réponse au changement climatique, la caractérisation du débit des rivières à partir des écoulements ainsi que les interactions de courte échelle de temps entre la surface végétale et l'atmosphère, sont aussi pris en compte par les autres modules d'ORCHIDEE (Stomate, module de routage et LPJ). [Krinner, 2005]. Dans les modélisations que j'ai été amené à traiter, les modules Stomate et de routage d'ORCHIDEE sont activés.

L'importance d'utiliser un modèle de surface continentale, lors d'études sur le climat, est comme nous l'avons vu précédemment, d'ajouter les interactions continentales au modèle de circulation atmosphérique générale.

Ce modèle de surface continentale discrétise de manière régulière les surfaces continentales en un maillage rectangulaire (de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres) et qui décrit pour chaque maille, à un pas de temps défini, l'évolution d'un certains nombres de variables.

### IV.2. Description du bilan d'eau.

Pour calculer les flux d'eau, le modèle est défini selon plusieurs réservoirs : le réservoir atmosphérique (dont sont issues les précipitations) est forcé (cf Chap2 I.1.1), et le réservoir de surface divisé en un réservoir canopée et un réservoir sol pour chaque maille de surface continentale. Les calculs sont ensuite réalisés en caractérisant les flux d'évaporation et de ruissellement au cours du temps.

Quand les précipitations atteignent la végétation, l'eau est interceptée puis transpiré ou écoulé vers le sol, rejoignant les précipitations atteignant le sol directement. Elles participent alors à l'infiltration dans le sol, l'évaporation, le ruissellement ou le drainage (FIGURE 3a).

Le calcul du bilan d'eau se fait conjointement au calcul du bilan d'énergie qui conditionne la température de surface. La température de surface est le résultat du rayonnement net reçu divisé en différents flux :

- le flux de chaleur latente (LE) représentant l'évapotranspiration et la sublimation.
- le flux de chaleur sensible (H) définit comme les échanges de chaleur par diffusion et convection, entre la surface et l'atmosphère.
- le flux de chaleur (G) (FIGURE 3b).

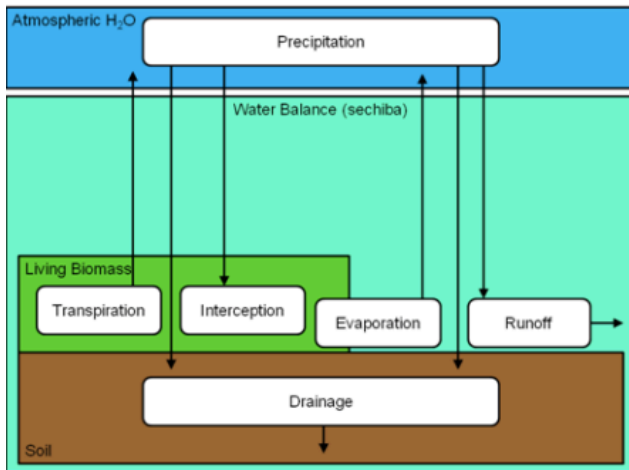


Figure 3a : Schématisation du bilan d'eau dans ORCHIDEE ( d'après [http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled\\_processes](http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled_processes))

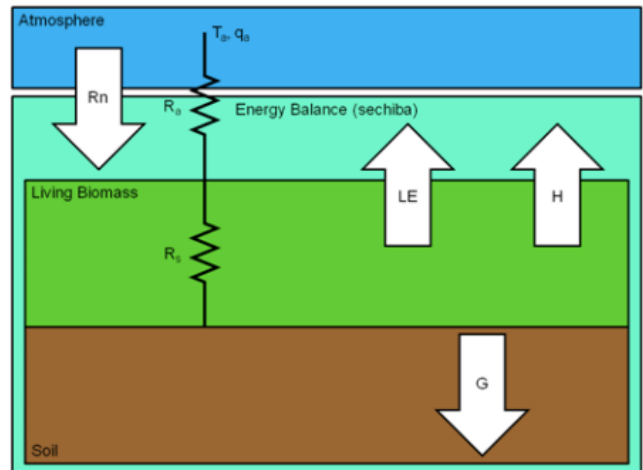


Figure 3b : Schématisation du bilan radiatif dans ORCHIDEE ( d'après [http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled\\_processes](http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled_processes))

L'ensemble de ces bilans est établi par le module Sechiba. Une vérification de la conservation des bilans est préalable à la réalisation des simulations.

Lorsque le modèle est calibré, c'est à dire lorsque les différents paramètres sont décrits de manière réaliste par rapport aux propriétés des surfaces continentales, ORCHIDEE peut ensuite être couplé au modèle de circulation atmosphérique général de l'IPSL pour effectuer des analyses climatiques, ou utilisé seul, forcé par des données météorologiques, pour simuler le fonctionnement des surfaces continentales.

## Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

Le stage réalisé a pour objectif de présenter la sensibilité du modèle de surface continentale ORCHIDEE à différents paramètres mis en entrée de modèle, pour calculer l'humidité du sol. Le modèle ORCHIDEE dans sa version multicouche de sol discrétise l'épaisseur totale de sol en plusieurs couches, caractérisant ainsi l'infiltration au travers de l'humidité du sol, entre chaque couche réservoir.

Il est possible de caractériser la diffusion des flux hydriques entre les couches-réservoirs par l'équation de Richards, qui permet de s'appuyer sur les propriétés hydrauliques du sol (perméabilité, diffusivité) pour caractériser l'infiltration et obtenir la teneur en eau volumique pour chaque couche de sol, au pas de temps défini. En intégrant l'humidité volumétrique sur la profondeur, on obtient le contenu volumétrique en eau de chaque couche qu'il suffit de sommer pour obtenir l'humidité totale du sol [Campoy & al, 2013].

### I. Les méthodes

Pour évaluer la sensibilité du modèle ORCHIDEE, différentes simulations ont été réalisées sur le super ordinateur ada de l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatiques), et possédant différents paramètres d'entrées ont été traitées (cf Chap2. I.1.). Ces simulations ont été réalisées durant mon stage par ma tutrice A. Ducharne (TABLEAU 1).

L'IDRIS met à disposition 32 processeurs pour mettre en place le modèle, compiler le code, gérer les différents paramètres en entrées du modèle et exécuter la suite de scripts pour lancer les simulations. Parmi les 32 processeurs, 31 sont utilisés pour gérer les calculs et le dernier est utilisé pour gérer les variables en sorties de modèle. Les calculs sont conséquents. Les calculateurs de l'IDRIS réalisent par exemple 250 jours de calculs pour gérer des simulations d'ORCHIDEE en mode couplé (cf. Chap2, I.1.) avec l'atmosphère sur une période de 32 ans, avec une résolution de 1°.

Tableau 1 : les simulations et leurs paramètres

param simus	couche imperméable	profondeur sol	nombre de couche	nombre de texture
<b>F1M2L11</b>	non	2 m	11	12
<b>F1M2L11T3</b>	non	2 m	11	3
<b>F1M2L22</b>	non	2 m	22	12
<b>F0M2L22</b>	oui	2 m	22	12
<b>F0M10L86</b>	oui	10 m	86	12

Par la suite, des comparaisons entre simulations seront réalisées et particulièrement utiles pour estimer l'impact de tel ou tel paramètre dans la mise en place du modèle.

## I.1. Distinctions des simulations

Les simulations ont été réalisées en mode forcé, qui consiste à isoler ORCHIDEE du modèle de circulation atmosphérique général. Dans cette configuration, ORCHIDEE n'interagit avec aucun autre modèle. Il faut donc imposer des conditions initiales, pour simuler les flux de surfaces en retour. Lorsque des études se focalisent sur le changement des paramètres d'ORCHIDEE, cette étape est nécessaire pour équilibrer le modèle et ce particulièrement sur une résolution de 1° par 1°.

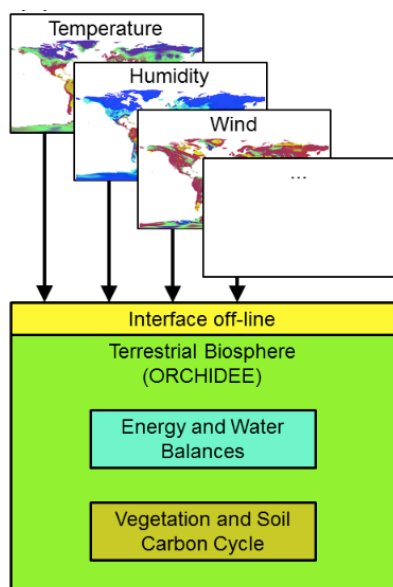
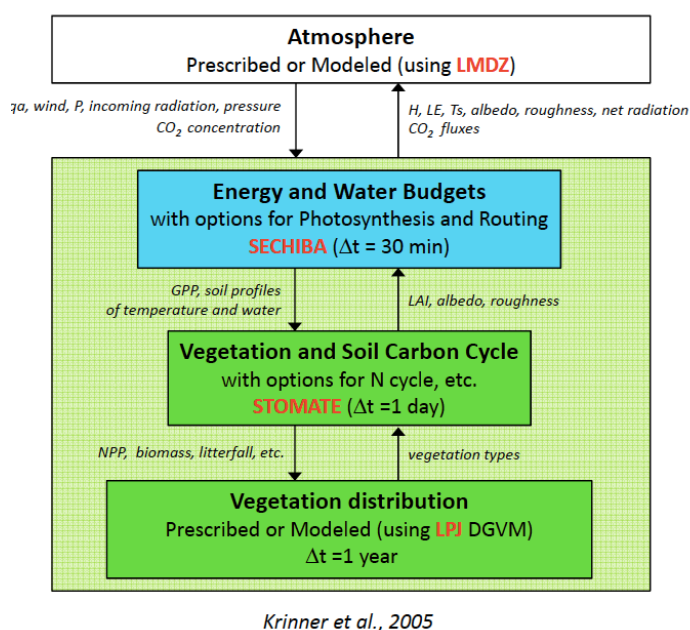


Figure 4 : Simulation réalisée en mode forcée  
(d'après : [http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled\\_processes](http://labex.ipsl.fr/orchidee/index.php/about-orchidee/#modelled_processes))

Des fichiers au format NetCDF (cf. Chap2, I.3.), sont fournies en entrée au modèle et apporte les données sur les conditions atmosphériques ( $T_{\text{air}}$  à 2m, pression de surface, humidité de l'air, les composantes Nord et Est des vitesses des vents, les rayonnements grandes et courtes longueurs d'ondes descendants, les précipitations...) (FIGURE 4) que l'on appellera le forçage météo.

On vérifiera que les précipitations et les températures de l'air correspondent pour chaque simulation faite sur une même période.

La répartition de la végétation est aussi fournie et peut malgré le mode forcé être mise à jour en cours de simulation. En effet, la carte de la végétation est prescrite au modèle, mais l'indice de surface foliaire (LAI) et son évolution sont simulés par le module STOMATE. [Campoy, 2013]. Les calculs et les interactions entre modules sont décrits (FIGURE 5).



Krinner et al., 2005

Figure 3 : Interactions entre les modules d'ORCHIDEE

## I.1.1. Les paramétrisations

### I.1.1.1. Paramétrisation de la végétation.

Chaque maille du modèle ORCHIDEE possède des caractéristiques propres qui sont fonctions notamment du type de végétation qui y figure.

La surface d'une maille est définie comme étant la somme de la surface de sol nu, de la surface végétalisée et d'une autre surface appelée « nobio », qui prend en compte tous les autres types de surface, telles que les lacs, les villes, les glaces... [Ducharne, 2015]. Chacune de ces surfaces occupe une fraction de la surface totale de la maille.

Ainsi, dans ORCHIDEE la surface végétalisée et la surface de sol nu sont organisées en 13 PFT (Plant Functional Type) décrits ci-dessous (FIGURE 6). Ces PFT décrivent des ensembles de végétations, ayant chacun des propriétés propres qui incluent le feuillage et les racines [Campoy & al, 2013].

Type	Sous type	h	LAI	$r_s$	c	$a_{VI}$	$a_{PIR}$	Tile	
1	Sol-nu	0	0	0	5	0	0	1	
2	Arbres feuillus	persistant	30	8	25	0,8	0,04	0,2	2
3	Arbres feuillus	caduque	30	(0/8)	25	0,8	0,06	0,22	2
4	Arbres résineux	persistant	20	4	25	1	0,06	0,22	2
5	Arbres feuillus	persistant	20	4,5	25	0,8	0,06	0,22	2
6	Arbres feuillus	caduque	20	(0/4,5)	25	0,8	0,06	0,22	2
7	Arbres résineux	persistant	15	4	25	1	0,06	0,22	2
8	Arbres feuillus	caduque	15	(0/4,5)	25	1	0,06	0,22	2
9	Arbres résineux	caduque	15	(0/4)	25	0,8	0,06	0,22	2
10	Prairies	caduque C3	0.5	(0/2)	2,5	4	0,1	0,3	3
11	Prairies	caduque C4	0.6	(0/2)	2	4	0,1	0,3	3
12	Cultures	caduque C3	1.0	(0/2)	2	4	0,1	0,3	3
13	Cultures	caduque C4	1.0	(0/2)	2	4	0,1	0,3	3

Figure 6 : caractéristiques des 13 PFT d'ORCHIDEE (d'après : Campoy, influence de l'hydrologie souterraine sur le climat à l'échelle régionale et globale, 2013).

Avec h : hauteur moyenne de la végétation (m) ; LAI : indice foliaire variant entre les valeurs (a/b) ;  $r_s$  : résistance structurale ( $s.m^{-1}$ ) ; c : coefficient de décroissance racinaire ;  $a_{VI}$  et  $a_{PIR}$  : albédo visible et proche infra-rouge ; tile : classes hydrologique de sol (1 pour sol nu ; 2 pour les forêts ; 3 pour les prairies)

La végétation prise en compte dans les simulations traitées ne changera pas et sera toujours réparties selon ces 13 PFT.

### I.1.1.2. Paramétrisation de la texture

L'autre paramètre important définissant une maille est la texture du sol qui y figure. En effet pour caractériser l'infiltration de l'eau dans le sol, la texture est un

élément très important puisqu'elle définit le diamètre des grains de sol, et plus les particules de sol sont larges, plus l'infiltration est rapide [NRCS, 2001].

Le forçage sur la texture des sols a changé par rapport aux modélisations précédant mon stage. En effet, les textures des surfaces continentales étaient réparties en trois classes : argilo-limoneux ( $\varnothing < 0,002$  mm), limoneux ( $0,002 < \varnothing < 0,02$  mm) et sablo-limoneux ( $\varnothing > 0,05$  mm). Ces textures, aux caractéristiques propres du point de vue perméabilité, porosité sont réparties sur l'ensemble du globe, pour représenter les propriétés du sol [Reynolds, 2010].

Les principales modifications des paramètres en entrée ayant été réalisée pendant ce stage a été portée sur la texture et sur la mise en place d'une couche imperméable en fond de sol.

Une redéfinition des classes de texture a été réalisée [par A. Ducharne], en s'appuyant sur les douze classes définies par l'USDA (United States Department of Agriculture) (avec 1 pour la plus grossière ; 12 pour la plus fine) (FIGURE 7).

La transpiration et le drainage sont mieux caractérisés avec une paramétrisation fine de la texture des sols [Campoy, 2013], et une catégorisation de l'ensemble des sols du globe en seulement trois classes me semble être une approximation importante.

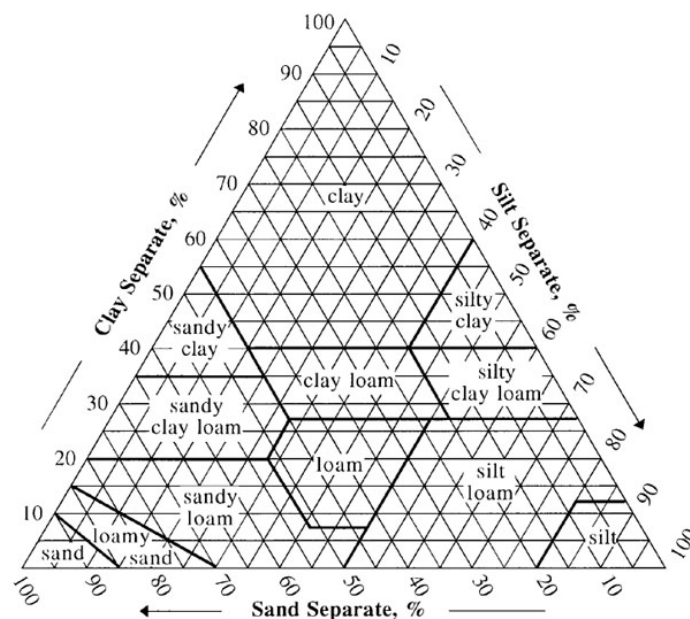


Figure 7 : répartition des 12 classes de textures définies par l'USDA dans un diagramme Sable, Limon, Argile. (d'après : [http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2\\_054167](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167) )

Une carte de la répartition mondiale des 12 textures est fournie (ANNEXE 1). L'impact de la texture sur les résultats sera donc analysé par la suite.

### I.1.1.3. Paramétrisation de la profondeur du réservoir sol.

Les différentes simulations qui sont analysées ne présentent pas toutes la même profondeur de sol. Le volume de réservoir a donc été changé. Les premières simulations

présentaient un réservoir de 2m de profondeur, les suivantes un réservoir de 10m de profondeur (non abordées dans ce rapport).

L'infiltration est caractérisée au pas de temps défini par ORCHIDEE dans chacune des couches-réservoirs. La mise à l'équilibre de chaque couche du sol prend un certains temps, évidemment plus important lorsque le sol est plus profond.

Le but de cette paramétrisation sera d'augmenter la capacité du réservoir sol, et donc d'augmenter la réserve utile, de prendre en compte un temps d'infiltration plus important, pour évaluer l'importance de la profondeur du sol sur les flux qui s'établissent en surface.

À l'heure actuelle, les simulations réalisées avec 10m de sol ne sont pas exploitables. En effet, le poids des fichiers est conséquent : supérieur à 30 Go pour 10 ans d'étude avec un intervalle de calcul de l'ordre de la demi-heure. Le logiciel R (cf II.2.) qui a été mon outil pour traiter les simulations, a connu quelques limites pour exploiter ce volume de données. Ce paramètre sera très certainement étudié dans la suite de ce stage.

#### I.1.1.4. Paramétrisation du nombre de couche de sol.

Un paramètre important qui a varié dans les simulations est le nombre de couche de sol dans le modèle. Les premières modélisations ont été réalisées avec 11 couches de sol, les suivantes avec 22 couches et enfin des simulations présentant 86 couches sur 10m de profondeur ont été faites (rappel : les simulations à 10m n'ont à l'heure actuelle pas pu être traitées). La variation d'humidité du sol a ensuite été observée en ramenant les valeurs initialement en  $\text{kg/m}^2$  en  $\text{m}^3/\text{m}^3$  pour s'affranchir de l'épaisseur du sol.

L'intérêt de discrétiser le sol en un nombre de couche de profondeur constante sur la verticale du sol est, pour un instant donné, d'approximer l'humidité volumétrique de la couche par rapport à l'humidité de la couche sus-jacente et sous-jacente. Cela dans le but de calculer le bilan d'eau du sol avec l'équation de diffusion de Richards entre les différentes couches-réservoirs. Les conditions aux limites étant fixées par le flux entrant vers le bas dans le sol, où peut intervenir l'évaporation du sol nu et par le drainage en sortie de sol et du pas de drainage de 30 min [[Campoy, 2013](#)].

La discrétisation verticale a cependant un coût numérique puisque les calculs à effectuer pour caractériser l'infiltration, l'humidité volumétrique des couches et donc le contenu total en eau du sol seront beaucoup plus long.

#### I.1.2.5. Mise en place d'un fond imperméable.

Des simulations ont été réalisées avec une couche imperméable au fond du sol. Ce paramètre implique donc l'absence de drainage gravitaire du sol vers le souterrain.

Le but de cette paramétrisation est de vérifier la réaction des flux de surface à un volume d'eau dans les sols plus important. En effet, avec un fond imperméable, aucun drainage vers le souterrain n'est appliqué. Les flux appliqués au sol dans ces conditions sont donc l'évapotranspiration et le ruissellement horizontal. On peut donc s'attendre à

ce que l'humidité des sols présentant une couche imperméable soit supérieure à un sol de profondeur équivalente mais présentant un drainage.

## I.2. Les conditions initiales

La mise à l'équilibre (*spin-up*) de l'humidité (et de la température, moins dans la thématique du stage) du sol est primordiale avant d'effectuer des analyses.

En effet, le modèle doit être amené dans un état quasi stationnaire, à l'équilibre avec le climat local, où les conditions initiales du modèle n'influent plus sur les résultats. Ceci a été réalisé en partant d'une teneur en eau de  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  dans toutes les couches.

La mise à l'état stationnaire est réalisée en exécutant les calculs du modèle au complet de manière itérative sur une certaine période (10 à 20 ans dans cette étude) avec le même forçage, ici en répétant les cycles de 5 ans (1979-1983). En général, la répétition des calculs a été effectuée sur la période 1979-1983. La répétition des calculs a pu être réalisés jusqu'à 6 fois en boucle pour les simulations à 10m de profondeur et jusqu'à 4 fois pour les simulations à 22 couches.

Ainsi l'humidité moyenne du sol des continents, le ruissellement total, l'évaporation et la température du sol doivent atteindre des valeurs stables en fin de *spin-up*. Lorsque ces variables atteignent un état stationnaire, les modélisations peuvent être réalisées sur des périodes plus longues, et comparées pour étudier l'influence des facteurs qui les distinguent sur le fonctionnement simulé des surfaces continentales (cf. Chap3, I.1).

## I.3. Les variables de sorties

L'ensemble des données est récupéré en sortie dans un fichier NetCDF (Network Common Data Form), qui est un format de fichiers couramment utilisé en climatologie et en météorologie, du fait du poids informatique des éléments. Il s'agit d'un type de fichier qui permet de regrouper plusieurs variables sous forme de tableaux, et d'avoir une interface d'accès aux données. L'interface des fichiers a pu être visualisée grâce à des fonctions Unix telles que « *ncdump* » renvoyant les dimensions du fichier (longitude, latitude, PFT, nombre de couche de sol, le temps...), et un détail de chaque variables comprises dans le fichier comme le nom de la variable, son unité, ses dimensions, son pas de temps de calcul...

Dans cette étude, des variables allant de 2 à 4 dimensions sont répertoriées. Ces variables sont géo-référencées par leurs dimensions longitude et latitude qui englobent l'ensemble de la surface du globe. La plus part des variables dépendent du temps et sont calculées au pas de temps de la demie heure.

Certaines variables ont une quatrième dimension. En effet, elles peuvent être décrites en fonction de la profondeur du sol : comme l'humidité et la température du sol ; en fonction du type de végétation (PFT) : comme la transpiration ou l'assimilation nette de carbone...

Les variables, qui nous intéressent particulièrement dans le cadre de notre étude sur l'hydrologie des sols, sont résumées ci dessous ([TABLEAU 2](#)) :



Tableau 2 : Les principales variables étudiées

	précipitations totales	évaporation totale	runoff total	humidité du sol
unité	mm/j	mm/j	mm/j	mm
<b>calcul de la variable</b>	pluie + neige	évaporation sol + transpiration végétale + évaporation canopée + sublimation	ruissellement + écoulement souterrain	somme de l'humidité de chaque couche de sol

## II. L'outil R

Le logiciel R est un logiciel de statistique. Il permet de manipuler des données, de tracer des graphiques et de faire des analyses sur les données qu'on lui fournit grâce à des scripts composés de lignes de codes [[Le logiciel R](#)].

Le logiciel R m'a été utile de différentes façons. Dans un premier temps il m'a permis d'ouvrir et d'accéder aux variables des fichiers NetCDF. Des traitements sur ces données ont pu être réalisés par la suite, comme par exemple pour appliquer un masque sur les Océans, afin de ne prendre en compte que les données des surfaces continentales.

Les fichiers NetCDF regroupent les variables sur une certaine durée, jusqu'à 32 ans d'études ont pu être analysés. Pour traiter l'ensemble de ces données, le logiciel a permis de calculer des moyennes annuelles ou pluri-annuelles des variables pour chaque maille.

Des calculs ont pu être effectués sur les variables (comme celles du [TABLEAU 1](#)) et des cartes réalisées sur ces calculs. La mise à l'équilibre du modèle a aussi pu être vérifiée sur R en effectuant des graphiques d'évolution des moyennes des variables mois par mois. L'identification des mailles où les calculs ne sont pas à l'équilibre, et la répartition des pixels dont j'ai pu observer des problèmes, ont pu être comptabilisés, et des statistiques effectuées sur ces anomalies.

Le logiciel R apparait, malgré quelques limites pour les plus gros fichiers, comme un puissant outil qui m'a permis d'analyser les modélisations que j'ai eu à traiter.

## Chapitre 3 : Résultats et discussion.

Le traitement des données par le logiciel R a conduit à obtenir des résultats sur la sensibilité d'ORCHIDEE sur la paramétrisation de l'hydrologie du sol. Les données étant fournies par des fichiers au format NetCDF.

Les simulations réalisées vont être prises une à une pour montrer l'impact de tel ou tel paramètre. Les paramètres de ces différentes simulations sont résumés [TABLEAU 1]. Les simulations présentant une épaisseur de sol de 10 m n'ont pas encore été réalisées.

### I. Résultats

#### I.1. La mise à l'équilibre

Comme nous l'avons vu précédemment, la mise à l'équilibre du modèle est nécessaire avant obtention de tout résultat. Les graphiques présentés (FIGURE 8a, b, c, d) montrent la mise à l'équilibre des différentes variables des différentes simulations.

Comme dit auparavant, une teneur en eau de  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  est forcée sur l'ensemble des surfaces continentales ce qui correspond à une hauteur de 600 mm dans les sols profonds de 2m en début de simulation. Après avoir répété les calculs durant 150 mois, on remarque que la teneur en eau du sol semble s'équilibrer autour de 400mm pour la simulation F1M2L11, et une valeur légèrement plus élevée pour la simulation F0M2L22 (FIGURE 8a).

Le runoff s'équilibre assez rapidement : dès lors de la deuxième année pour les différentes simulations. On remarque aussi que les résultats des différentes simulations sont assez similaires, mais que le flux de runoff total de la simulation F1M2L11T3 est légèrement inférieure aux autres (FIGURE 8b).

Le flux d'évaporation total s'équilibre aussi assez rapidement : aux alentours du 40<sup>ème</sup> mois. Comme pour le runoff, les résultats des différentes simulations sont assez similaires. En revanche l'évaporation totale de la simulation F1M2L11T3 est, à l'opposé du runoff ; la plus importante (FIGURE 8c).

Il apparaît logique que les deux flux se compensent pour maintenir la conservation du bilan d'eau.

La température moyenne de surface est principalement contrôlée par la température de l'air, à laquelle s'ajoute l'impact des différents flux du bilan d'énergie. Pour les différentes simulations, c'est le forçage météo qui semble être à l'origine de ces résultats puisque toutes les simulations suivent la même courbe de tendance (FIGURE 8d).

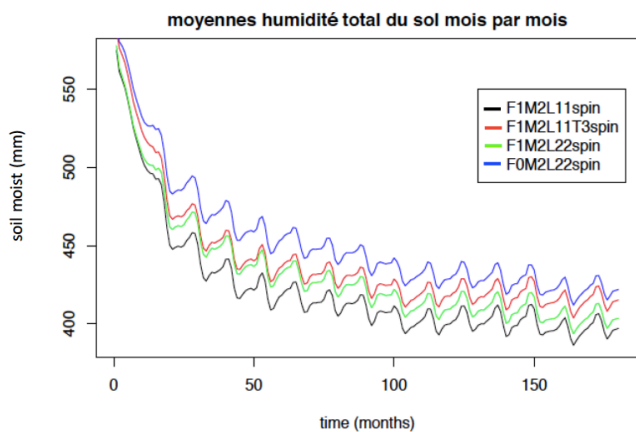


Figure 8a : Mise à l'équilibre de l'humidité

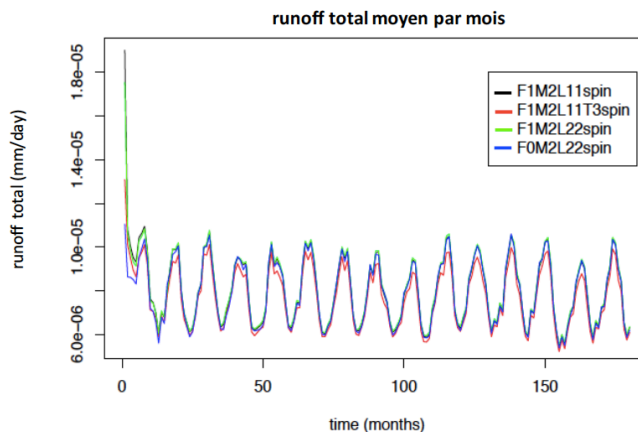


Figure 8b : Mise à l'équilibre du runoff

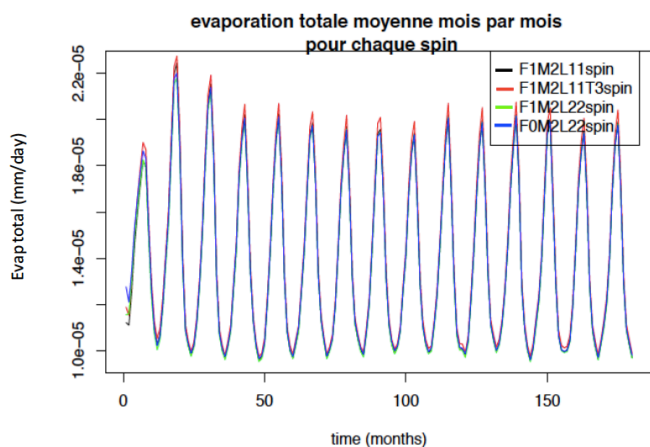


Figure 8c : Mise à l'équilibre de l'évaporation

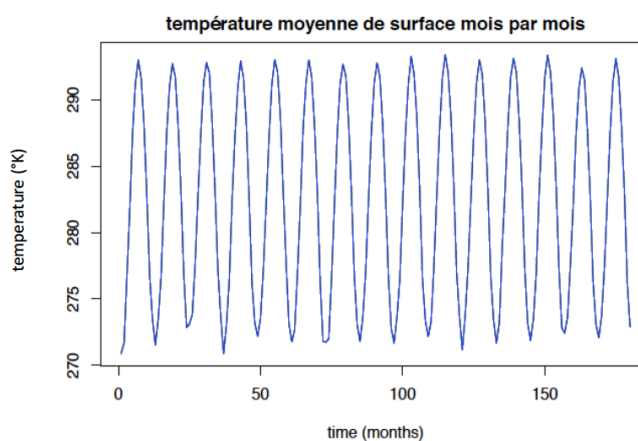


Figure 8d : Mise à l'équilibre de la température

Les oscillations que l'on peut observer sur les figures de mises à l'équilibre représentent la variabilité saisonnière des variables.

L'ensemble des variables observées pour les différentes simulations atteint l'équilibre autour de valeurs moyennes mensuelles maximales et minimales (pour le runoff, l'évaporation totale et la température) ou semble atteindre une moyenne mensuelle pour l'humidité totale du sol.

Pour l'humidité du sol, le pourcentage de pixel non à l'équilibre en sortie de *spin-up* a été comptabilisé pour chaque période (TABLEAU 3). La variable *DelSoilMoist* (qui a servi à réaliser ce tableau) reflète la variation totale de l'humidité du sol pendant la période.

Le nombre de pixel présentant une variation d'humidité du sol supérieur à 0,05 mm est assez faible. La répétition des calculs montre bien la tendance du modèle à s'équilibrer. Cependant pour une raison inconnue, les valeurs augmentent lors de la troisième période de calculs.

Tableau 3 : Tableau du pourcentage de pixel dont la variation d'humidité est supérieure à 0,05

Simulations	1979/1983	1984/1988	1989/1993	1994/1998
<b>F1M2L11spin</b>	0,0672	0,0427	0,0495	-
<b>F1M2L11T3spin</b>	0,0569	0,0466	0,058	-
<b>F1M2L22spin</b>	0,0824	0,0405	0,0465	-
<b>F0M2L22spin</b>	0,0872	0,0317	0,0872	0,0317

## I.2. La sensibilité de l'hydrologie du sol aux paramètres

Pour traiter de la sensibilité de la réponse d'ORCHIDEE aux différents paramètres mis en amont de l'exécution de la simulation, les variables principales ont été récupérées pour chaque fichier de sortie. Elles ont ensuite été traitées avec le logiciel R et des moyennes pluriannuelles, de période suffisamment longue (période d'étude de 32 ans) pour être représentative du paramètre, ont été calculées et résumées (TABLEAU 4).

Ce tableau nous montre tout d'abord que le forçage météo est bien identique pour chaque simulation (précipitations totales identiques).

Tableau 4 : Moyennes pluriannuelles des principales variables

Simulations	Moyennes pluriannuelles (32 ans)					
	Preciptot (mm/j)	Evaptot (mm/j)	Runofftot (mm/j)	Humidité tot (mm)	Température surface (°C)	Bilan d'eau
<b>F1M2L11</b>	2,14	1,328	0,8263	400,236	14,49	-0,0143
<b>F1M2L11T3</b>	2,14	1,358	0,7944	407,7	14,47	-0,0124
<b>F1M2L22</b>	2,14	1,32	0,8342	404,9	14,5	-0,0142
<b>F0M2L22</b>	2,14	1,332	0,8211	422,3	14,49	-0,0131

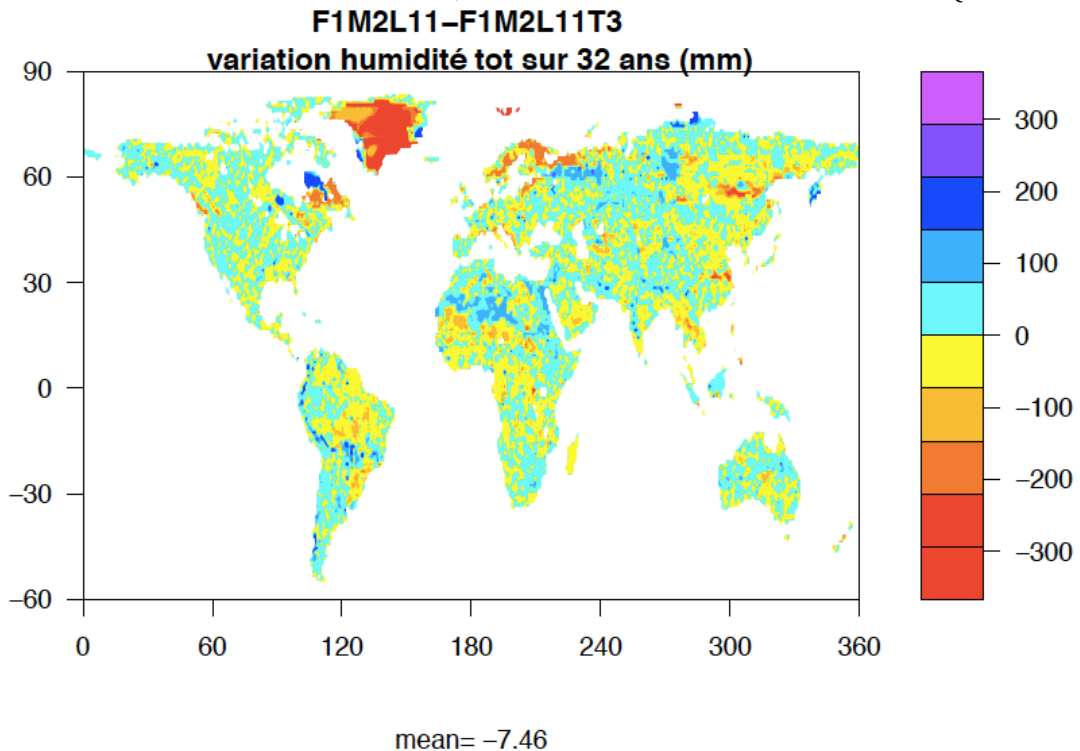
L'ensemble des paramètres affecte différemment les résultats. Pour effectuer une comparaison des simulations, il a été important de n'étudier les simulations qui ne différaient entre elles, que par un seul paramètre. La comparaison des moyennes est résumée (TABLEAU 5). Elle correspond aux variations en pourcentage des moyennes des variables entre les différentes simulations.

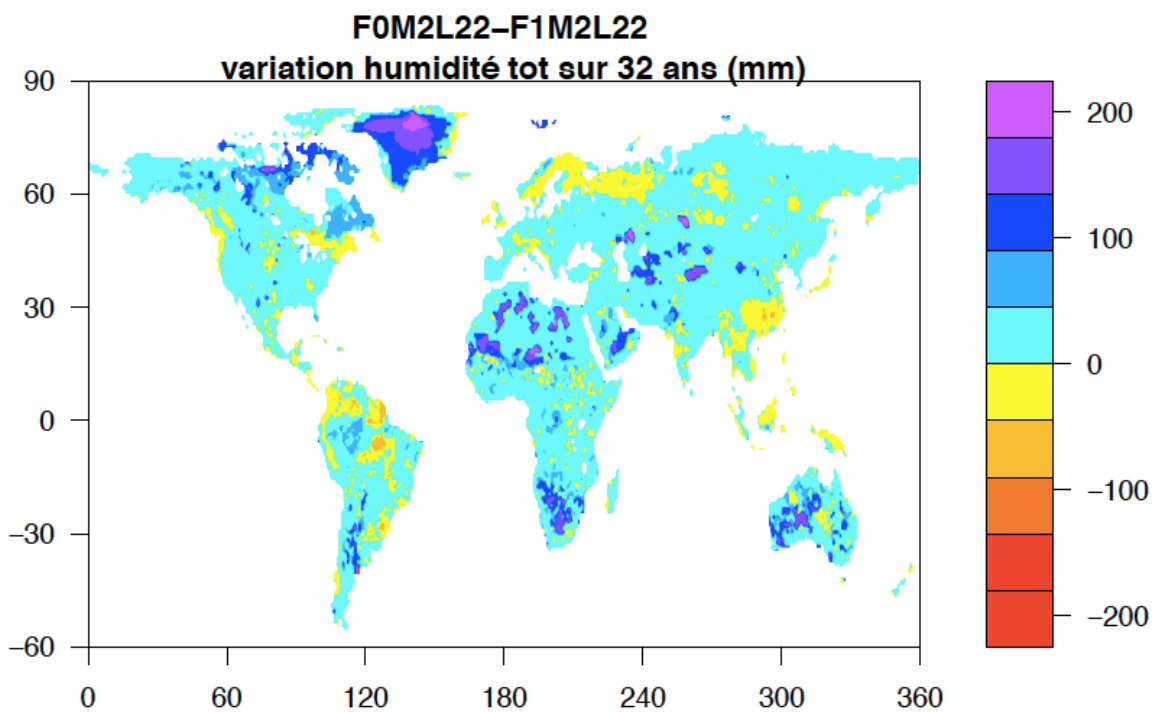
Tableau 5 : Comparaison des moyennes pluriannuelles entre simulations

différences entre Simulations	variation des moyennes en % des variables (sauf Température)			
	Evaporation totale (%)	Runoff total (%)	Humidité totale (%)	Température surface (°C)
<b>F1M2L11T3 &amp; F1M2L11</b>	2,259	-3,861	1,865	0,02
<b>F1M2L22 &amp; F1M2L11</b>	-0,602	0,956	1,165	-0,01
<b>F1M2L22 &amp; F0M2L22</b>	0,909	-1,570	4,297	0,01

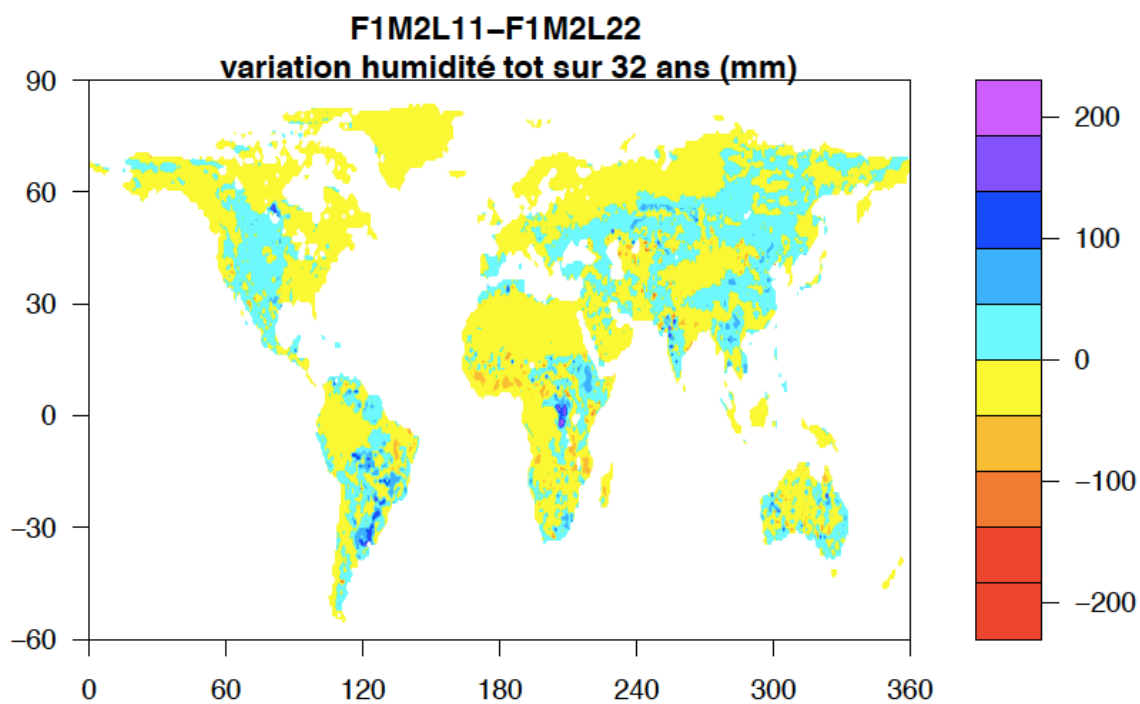
Ainsi sur l'ensemble des simulations testant de la texture, du nombre de couche de sol et d'un niveau imperméable, la texture semble avoir le plus d'impact sur les variables au point de vue du calcul des flux. Le nombre de couche semble être le paramètre faisant varier le moins les flux et l'humidité : les simulations F1M2L11 et F1M2L22 semblent assez proches l'une de l'autre. Comme l'on pouvait s'y attendre, le fait d'annuler le drainage vers le souterrain a tendance à augmenter l'humidité du sol ; et ce de plus de 4%.

Les cartes réalisées ci dessous présentent les différences des moyennes pluriannuelles de l'humidité du sol des simulations. Cela a pour but de tenter de spatialiser les régions du globe où les paramètres impacteront le plus sur l'humidité des sols. Sous réserve d'erreurs dans la répartition géographique des variations de flux moyens entre les différentes simulations, les cartes sont fournies en annexes ([ANNEXE 2](#))





mean= 17.3



mean= -4.7

### I.3. Le TWBR

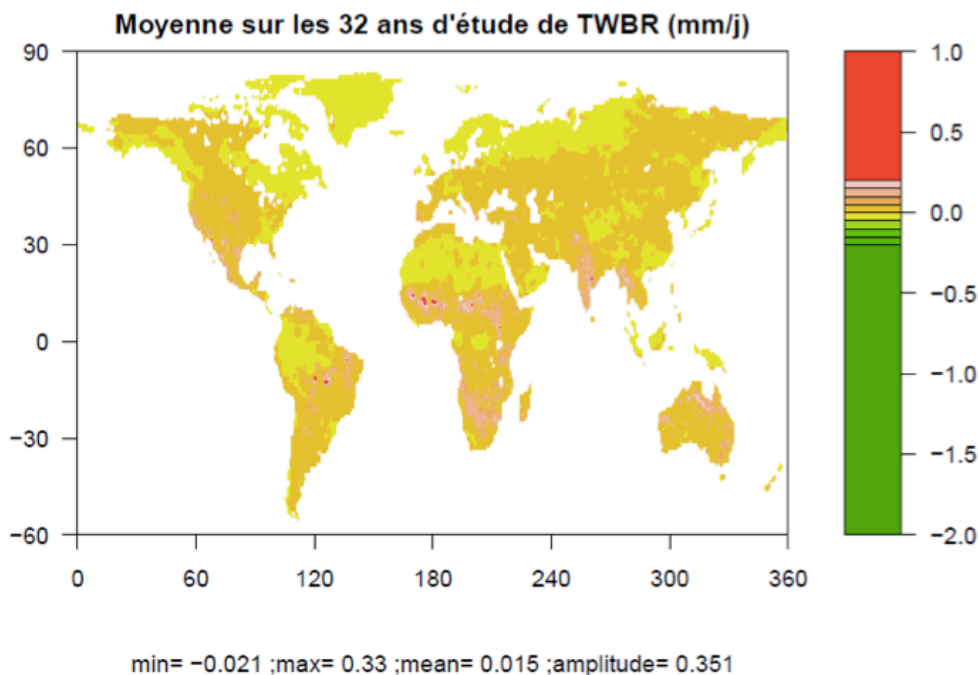
Comme nous pouvons le voir ([TABLEAU 4](#)), le bilan d'eau calculé par : la différence entre les précipitations totales, le runoff total et l'évaporation totale n'est pas égale à zéro. En effet, la conservation du bilan d'eau, sur la verticale et au cours du temps, peut être défini par une variable, le TWBR (Total Water Budget Residu) définit ici :

$$\Delta W_{tot} / \Delta t = P_{tot} - (E_{tot} + R_{tot})$$

$$TWBR = \Delta W_{tot} / \Delta t - [P_{tot} - (E_{tot} + R_{tot})]$$

Avec  $W_{tot}$  : l'humidité totale du sol (en mm)  
 $t$  : le temps (en s)  
 $P_{tot}$  : les précipitations (mm/j)  
 $E_{tot}$  : l'évapotranspiration (mm/j)  
 $R_{tot}$  : le runoff total (mm/j)

Le TWBR estime les variations d'eau dans le bilan d'eau pour chaque maille, en prenant en compte les flux verticaux de précipitations et d'évapotranspiration, les précipitations et l'humidité totale du sol. Le volume d'eau est censé être constant dans le temps et donc le TWBR doit s'approcher au maximum de zéro (en fonction de la précision des calculs de l'ordre de  $10^{-16}$ ), pour montrer la conservation de l'eau du modèle. La carte du TWBR a été réalisée pour la simulation F1M2L11 et montre les pixels où l'on observe une non conservation de l'eau ([ci-dessous](#)). De plus la moyenne globale est de 0,015 mm/j, ce qui s'éloigne assez de l'erreur machine.



Le fait que le bilan d'eau ne soit pas à l'équilibre a monopolisé un certain temps de ce stage et est à l'origine du changement de sujet. En effet, les problèmes doivent être identifiés avant d'être résolus. Pour cela, des tests sur les paramètres ont été réalisés.

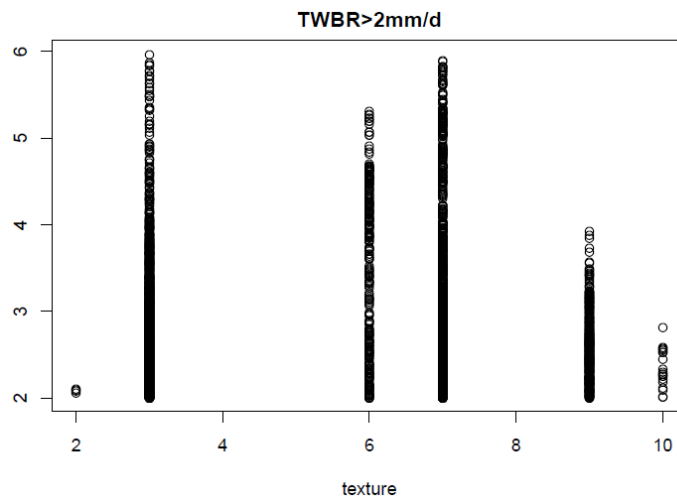


Figure 9 : fréquence de pixels dont le TWBR > 2 mm/j en fonction de la texture

La répartition des pixels dont on observe un problème sur le bilan d'eau est fonction de la présence de certaines textures (FIGURE 9). En effet, les classes de textures 3, 6, 7, 9 et 10 correspondant respectivement à limon sableux, limons, limon sableux et argileux, limon argileux, et argilo-sableux présentent un non respect du bilan d'eau.

Lorsque l'humidité du sol est faible (<230 mm), le bilan d'eau a aussi tendance à être non respecté (FIGURE 10).

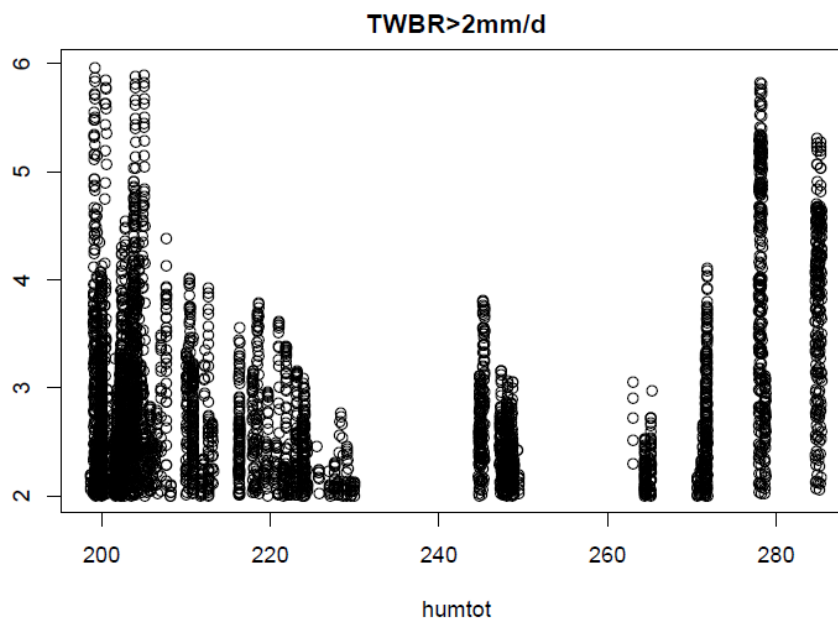


Figure 10 : catégorisation des pixels dont le TBWR > 2 mm/j en fonction de l'humidité du sol



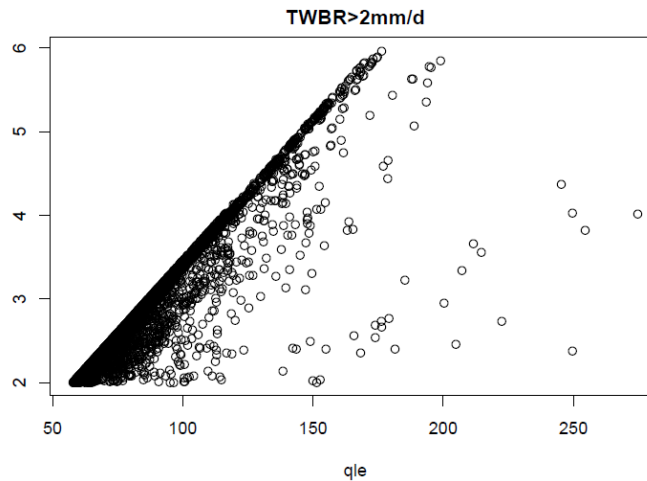


Figure 11a : évaluation des pixels dont TWBR > 2 mm/j en fonction du flux de chaleur latente

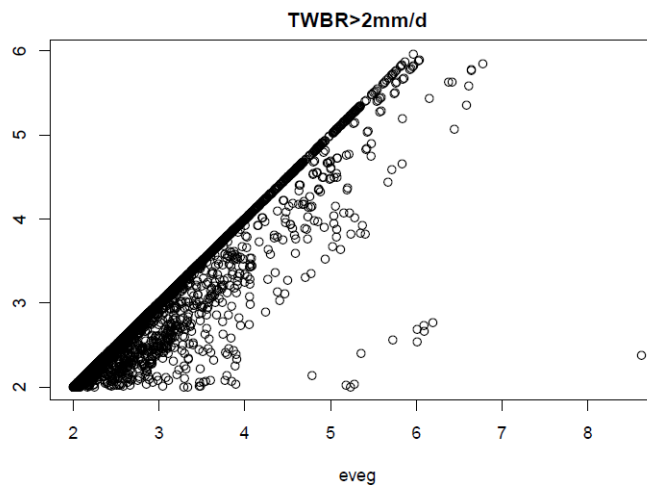


Figure 11b : évaluation des pixels dont TWBR > 2mm/j en fonction de l'évaporation de la végétation

Les figures (*FIGURE 11a & b*) semblent montrer une relation entre la végétation et le TWBR. En effet, une droite de tendance montre la relation entre la fréquence de pixels qui ne sont pas à l'équilibre et le rôle de la végétation : la transpiration de la végétation semble étroitement liée au défaut du bilan d'eau. Le flux de chaleur latente, qui est étroitement lié à la transpiration végétale, suit la même tendance que l'évaporation de la canopée.

La végétation semble donc être un bon candidat à l'explication du défaut dans l'équilibre du bilan d'eau.

## II. Poursuite du stage

Dans la suite de ce stage, nous analyserons l'impact de la profondeur du sol sur les variables décrivant l'hydrologie du sol, pour les simulations qui n'ont pas encore pu être traitées. Quelques résultats peuvent être déjà donnés. En effet, l'humidité totale du

sol pour une profondeur de 10m est plus importante, ce qui semble logique puisque le volume de stockage dans le réservoir sol est plus important.

La mise à l'équilibre de ces modèles va devoir être réalisée sur une période plus longue, puisque le transfert d'eau et le temps d'atteindre l'équilibre va être plus conséquent : il faut caractériser l'infiltration sur l'ensemble du profil de sol soit 10m et 86 couches. Les calculs et la mise à l'équilibre vont par conséquent être plus longs.

Une comparaison avec une simulation réalisée avec une version plus ancienne d'ORCHIDEE (F1M2L11Y32) pourra aussi être réalisée.

## CONCLUSION

L'étude de la sensibilité du modèle ORCHIDEE à la paramétrisation de l'hydrologie du sol aura été un objet d'étude particulièrement intéressant. Faire varier des paramètres telles que la texture, la géologie du fond du sol, le nombre de couche du modèle pour observer la réponse hydrique et énergétique d'un modèle de surface continentale s'est avéré captivant.

Les résultats que j'ai obtenus de cette étude ont été réalisés rapidement et sans avoir réellement le temps de pouvoir les analyser, particulièrement pour la répartition géographique des variations moyennes, chose que j'aurais plus le temps de développer dans la suite de mon stage, en plus des modélisations présentant 10m de profondeur de sol.

Les simulations que j'ai eu à traiter ne sont pas totalement finalisées, puisqu'il s'agit d'un processus itératif, si bien que les simulations que j'ai analysées n'étaient pas parfaitement équilibrées, ni exemptes de problème de conservation de l'eau au cours du temps. C'est pourquoi mon sujet de stage a changé.

La modélisation numérique de la circulation générale est une science en pleine expansion. Les modèles sont donc constamment améliorés. En effet, le calcul des flux établis sur Terre et de l'ensemble des interactions entre réservoirs constituent des voies importantes d'amélioration des modèles.

Lors de ce stage, des problèmes ont pu être détectés dans ORCHIDEE. En effet, le modèle présente un défaut dans la mise à l'équilibre du bilan d'eau. Une hypothèse sur ce point peut être que, dans les lignes du code source d'ORCHIDEE, lorsque l'humidité du sol à l'instant  $i$  est inférieure à l'humidité résiduelle l'humidité résiduelle est remplacée par cette valeur, ce qui crée une perte d'eau (cf. bilan d'eau [TABLEAU 4](#)).

Les mécanismes de réponse du modèle d'ORCHIDEE au changement de paramétrisation ont aussi pu être abordés, montrant que la texture à 3 classes surestimait l'évaporation totale et au contraire, sous-estimait le runoff total, ainsi que la mise en place d'un fond imperméable en fond de sol augmentait l'humidité du sol par exemple.

Ce stage m'aura particulièrement permis d'apprendre à traiter des données complexes sous le logiciel R, à faire des recherches sur l'hydrologie à l'échelle globale et sur le développement des simulations hydrologiques.

## BIBLIOGRAPHIE

- [[Campoy, 2013](#)] : Campoy A. Influence de l'hydrologie souterraine sur la modélisation du climat à l'échelle régionale et globale. Thèse de Sciences de la Terre. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2013, 185 p.
- [[Campoy & al, 2013](#)] : Campoy A, Ducharne A, Cheruy F, Hourdin F, Polcher J, Dupont JC. Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, American Geophysical Union, 2013, 118 (19), pp.10725-10739.
- [[De Rosnay et al, 2000](#)] : De Rosnay P, Bruen M and Polcher J. Sensitivity of the surface fluxes to the number of layers in the soil model used in GCMs. *Geophys. Res. Lett.* 2000 ; 27(20), 3329-3332.
- [[Ducharne, 2011](#)] : Ducharne A. Hydrologie Continentale et Environnement - Apports de la modélisation pour comprendre le milieu physique et les impacts de l'anthropisation. Continental interfaces, environment. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2011.
- [[Ducharne & Laval, 2015](#)] : *Les grandes thématiques et les enjeux d'aujourd'hui, Le cycle de l'eau*, p24-25, L'eau à Découvert, dirigé par Euzen, Jeandel, Mosseri, CNRS Editions. In press.
- [[Ducharne, 2015](#)] : Ducharne A. The hydrol module of ORCHIDEE : *scientific documentation 2015 [rev 2651]*.
- [[Krinner, 2005](#)] : Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, and Prentice IC. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 2005 ; 19 (1), GB1015
- [[Le logiciel R](#)] : Lafaye de Micheaux P, Drouilhet R, Liquet B. Le logiciel R, maîtriser le langage, effectuer des analyses statistiques. Collection Statistique et Probabilités appliquées, édition Springer, 2011.
- [[Noihlan, 1997](#)] : Mahfouf JF and Noilhan J. Inclusion of Gravitational Drainage in a Land Surface Scheme Based on the Force-Restore Method. *J. Appl. Meteor.* 1996 ; 35, 987-992.
- [[NRCS, 2011](#)] : USDA, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Information Sheet. Rangeland Soil Quality -Infiltration. 2001.
- [[Oki & al, 2006](#)] : Oki T and Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 2006; 313(5790):1068-72.

[[Reynolds, 2010](#)] : Reynolds CA, Jackson TJ, and Rawls WJ. Water Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfert functions. *Resources Research* 2010 ; vol 36, NO.12, p 3653-3662, 2000.

# ANNEXES

