

# MÉMOIRE DE STAGE

Module TUT 542R : Stage de recherche  
M2R Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Environnement  
Spécialité Océan Atmosphère Hydrologie, Génie hydraulique et Environnement  
Université Joseph Fourier, Grenoble



---

## Évaluation de modèles SVAT appliqués à un petit bassin versant en zone soudanienne : interaction des bilans d'eau et d'énergie

---

Dorothee Robert

encadrants : Jean-Martial Cohard et Thierry Pellarin

1 février 2009 - 30 juin 2009



Laboratoire d'étude des Transferts  
en Hydrologie et Environnement



# Résumé

Alors que deux périodes de sécheresse ont frappé le Sahel pendant les 40 dernières années, le programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a été fondé pour mener des études sur la mousson en Afrique de l'Ouest. Un aspect central du programme AMMA consiste à mieux caractériser et mieux comprendre les processus de rétroaction qui existent entre les surfaces continentales et le flux de mousson, responsable de la plus grande partie de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest. Pour cela, la quantification des échanges d'énergie et d'eau au niveau de la surface est nécessaire. Plusieurs sites ont été instrumentés et notamment le site du bassin versant de l'Ara au Bénin auquel nous nous sommes intéressés pendant ce stage. Pour ce site, nous disposons de données caractérisant le sol, la surface, la végétation et le forçage atmosphérique sur l'année 2006. Nous avons utilisé ces données pour effectuer des simulations SVAT (Sol-Végétation-Atmosphère) afin de caractériser les bilans d'énergie et d'eau. L'utilisation de deux modèles différents ISBA et SiSPAT ne donne pas les mêmes résultats. Le modèle ISBA simule relativement bien le flux d'évapotranspiration mais surestime le flux de chaleur sensible et le rayonnement net. Le modèle SiSPAT donne de meilleurs résultats à l'exception du flux de chaleur latente qui est surestimé. Le modèle SiSPAT permet de retrouver les dynamiques journalière et annuelle observées sur le terrain en termes de rayonnement net, de flux de chaleur dans le sol et de température du sol. La teneur en eau des sols est également bien reproduite dans le premier horizon de sol.

# Abstract

As the Sahel was affected by two dry periods during the last 40 years, the international AMMA program (African Monsoon Multidisciplinary Analyses) was established to study the West African monsoon. One of the main aspects of the program AMMA is to better characterize and understand the feedback between continental surfaces and the monsoon, which is responsible of the greatest part of climate variability in West Africa. To reach this goal, quantification of energy and water exchanges at the surface is needed. Several sites have been instrumented. We focus our attention on the Ara catchment in Benin. For this site, we have a set of data for 2006 characterizing the soil, the surface, the vegetation and the atmospheric forcing. We used these data to perform SVAT simulations (Soil-Vegetation-Atmosphere Transferts) to characterize the energy and water balances. The simulations using two different models ISBA and SiSPAT give different results. The ISBA model simulates the evapotranspiration flux with a good accuracy but overestimates the sensible heat flux and the net radiation. Better results are obtained with SiSPAT model, except for the latent heat flux which is overestimated. Observed daily and annual dynamics in terms of net radiation, ground heat flux and soil temperature are well represented by SiSPAT model. The soil water content is also well reproduced in the first layer of the soil.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Site d'étude : le bassin de l'Ara au Bénin</b>	<b>4</b>
1.1 Le site expérimental : le bassin de l'Ara . . . . .	4
1.2 Forçage atmosphérique . . . . .	5
1.3 Caractéristiques de la surface et de la végétation . . . . .	9
1.4 Caractéristiques du sol . . . . .	10
<b>2 Les modèles SVAT</b>	<b>13</b>
2.1 Les bilans d'énergie et d'eau . . . . .	13
2.2 Modèle ISBA . . . . .	15
2.3 Modèle SiSPAT . . . . .	18
<b>3 Résultats de simulations et discussion</b>	<b>21</b>
3.1 Flux d'énergie . . . . .	22
3.1.1 Rayonnement net . . . . .	22
3.1.2 Flux de chaleur sensible . . . . .	22
3.1.3 Flux de chaleur latente . . . . .	23
3.1.4 Flux de chaleur dans le sol . . . . .	23
3.2 Humidité et température dans le sol . . . . .	24
3.2.1 Température dans le sol . . . . .	24
3.2.2 Humidité dans le sol . . . . .	24
<b>Conclusion</b>	<b>33</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>34</b>
<b>Annexes</b>	<b>36</b>
<b>A Organigramme d'ISBA simplifié pour les options utilisées</b>	<b>37</b>
<b>B Principaux paramètres d'entrée d'ISBA</b>	<b>38</b>
<b>C Schéma de SiSPAT</b>	<b>40</b>
<b>D Paramètres d'entrée de SiSPAT</b>	<b>41</b>

# Introduction

Les régions semi-arides sont connues pour leurs précipitations incertaines et capricieuses. La variabilité du climat de ces régions a un impact global et régional sur le cycle hydrologique continental, et par conséquent sur les ressources en eau. Les zones sahélienne et soudanienne, qui s'étendent de l'océan Atlantique à l'océan Indien, représentent la plus grande de ces régions. Elles sont soumises à un climat régi par un système de mousson associé aux contrastes thermiques et dynamiques entre l'océan et les surfaces continentales voisines. La mousson d'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une très forte variabilité interannuelle et décennale qu'il est difficile de prévoir. Plusieurs centaines de millions de personnes sont conditionnées par ce climat, et les conséquences sont alarmantes : une pluie capricieuse, de faibles capacités de prédiction et de rapides modifications de l'environnement conduisent à des conditions difficiles. Récemment, on a pu observer un changement radical des régimes de précipitations et une tendance à la sécheresse en Afrique de l'Ouest. Depuis le début des années 1970, deux périodes de sécheresse (1972-1974 et 1983-1985) ont frappé le Sahel. Ce changement a des impacts environnementaux et socio-économiques alarmants : dégradation des sols, sécurité alimentaire, sécurité en eau, population rurale dépendante de l'agriculture... Le Niger a cessé de couler à Niamey en 1985 et la superficie du lac Tchad a été divisée par 10 entre 1950 et aujourd'hui [14]. Certains processus inhibiteurs de la mousson tels que le réchauffement de l'océan tropical et la disparition des savanes et forêts non anthropisées sont bien identifiés. Par contre, les interactions complexes entre la surface continentale et la dynamique atmosphérique régissant la variabilité de la mousson sont encore mal comprises. De l'échelle régionale à locale et de l'échelle saisonnière à climatique, les scientifiques manquent d'observations pertinentes pour documenter toutes les composantes de la mousson et établir des modèles de prévision.

La mousson est un régime de vents périodiques dans les régions tropicales, provoquant une saison humide et une saison sèche. Ce climat se caractérise par l'alternance saisonnière des vents de deux directions opposées : les alizés du Nord-Est et les vents de Sud-Ouest qui confluent dans la Zone de Convergence Inter-tropicale (ZCIT). La ZCIT correspond à une zone de basses pressions équatoriales, avec un air humide et instable. Elle impose le régime des pluies, et par suite la production végétale des régions tropicales. On observe dans cette zone un phénomène de convergence engendrant une ascendance de l'air avec formation de nuages. En Afrique subsaharienne, la mous-

son est liée au déplacement de la ZCIT. Identifiable par ses formations nuageuses, on constate un déplacement de la ZCIT en latitude. En saison humide, elle se déplace vers le Nord, ce qui crée un afflux d'humidité venu de l'océan.

Des modèles conceptuels peuvent être utilisés pour décrire ce phénomène de mousson. Par contre, des phénomènes complexes de rétroaction entre la surface continentale et l'atmosphère doivent être pris en compte pour expliquer sa variabilité [6]. Le projet HAPEX-Sahel (Hydrology-Atmosphere Pilot Experiment in the Sahel) est un programme d'observation sol-végétation-atmosphère au Niger qui a vu le jour en 1990. Il vise à étudier la circulation générale au Sahel et plus particulièrement les effets des fluctuations interannuelles des conditions de la surface continentale. Des mesures atmosphériques, de surface et de sub-surface ont été réalisées sur une zone de  $1^\circ$  par  $1^\circ$  au Niger. Par la suite, le programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) a été créé pour caractériser la variabilité de la mousson en Afrique de l'Ouest.

Dans ce cadre, un dispositif expérimental important a été déployé au Bénin, au Niger et au Mali pour caractériser la rétroaction des surfaces continentales sur le flux de mousson. Le projet AMMA comporte un programme d'observations unique, visant à documenter l'ensemble du système terre-océan-atmosphère, du Sud du Sahara jusqu'à l'équateur et du Soudan jusqu'à l'Atlantique tropicale.

L'observatoire AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine - Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) comporte trois sites méso-échelle (de 10000 à 400000  $km^2$ ). Le programme d'observations consiste en un suivi à long terme de la dynamique de la végétation, du cycle de l'eau, de la rétroaction entre continent et atmosphère, et de leur interaction avec le climat en Afrique de l'Ouest. Ils permettent d'étudier l'impact hydrologique du changement climatique et/ou anthropique. Les trois sites sont situés dans des régions différentes afin de pouvoir étudier les contrastes suivant leur zone climatique, leur fonctionnement hydrologique, l'aménagement et l'occupation des sols.

Il s'agit des sites de Niamey au Niger, du Gourma au Mali et de l'Ouémé au Bénin (cf. figure 1.1). Le site de Niamey, situé à  $13.5^\circ$  N et  $2.5^\circ$  E se caractérise par un climat sahélien avec une pluviométrie de 450 à 600 mm/an, et une végétation semi-aride. Le site du Gourma, situé plus au Nord ( $16^\circ$  N et  $1.5^\circ$  W), a un climat sahélien à saharien et une végétation semi-aride. Les précipitations n'y dépassent pas 400 mm/an. Quant au site de l'Ouémé, situé plus au Sud, à  $9.5^\circ$  N et  $2^\circ$  E, il possède un climat soudanien avec des précipitations pouvant atteindre 1300 mm/an, et a une

végétation de savane et culture. Chacun de ces sites possède des super-sites et des sites intensifs locaux. Ils sont équipés pour réaliser des mesures complémentaires avec des instruments spécifiques et pour densifier localement le réseau de mesure. Ces observations à plus petite échelle et l'imbrication des sites permettent d'analyser la transposabilité d'échelle dans les modèles hydrologiques et d'étudier plus en détail les processus physiques. Les mesures de la campagne ont commencé à partir de 2001 et se poursuivent encore aujourd'hui. Une phase d'observations renforcée s'est déroulée de 2005 à 2007 et une période d'observations intensive en 2006.

L'objectif de ce stage est de simuler à l'aide d'un modèle Sol-Végétation-Atmosphère les échanges d'eau et d'énergie à l'échelle d'un petit bassin versant du Bénin. L'analyse de la dynamique journalière et annuelle des différents termes du bilan d'eau et d'énergie permettra d'affiner la compréhension et l'importance respective des processus hydrologiques dans la région. Dans un premier temps, le travail a consisté à préparer les données disponibles sur la saison 2006 afin de renseigner les différents paramètres d'entrée du modèle ISBA. Puis il a fallu prendre en main ce modèle et confronter les résultats aux mesures expérimentales. Comme ceux-ci n'étaient pas satisfaisants, j'ai dans un dernier temps repris cette démarche avec un autre modèle – le modèle SiSPAT.

Je présenterai tout d'abord le site expérimental du bassin de l'Ara, en m'attachant plus particulièrement aux données météorologiques et aux caractéristiques du sol, de la surface et de la végétation. S'ensuit une description des deux modèles utilisés : ISBA et SiSPAT. Enfin, j'exposerai les résultats des simulations, confrontés aux mesures sur le terrain.

## Site d'étude : le bassin de l'Ara au Bénin

### 1.1 Le site expérimental : le bassin de l'Ara

Le sujet de ce stage porte sur l'étude du site du Bénin, et plus particulièrement sur le super-site de la Donga ( $590 \text{ km}^2$ ), et le site intensif de l'Ara ( $14 \text{ km}^2$ ) (cf. figure 1.1).

Le bassin de la Donga se situe au Nord-Ouest du Bénin. Le sous-bassin versant de l'Ara, appelé site de Nalohou, est caractérisé par une végétation variée (voir figure 1.2). On trouve sur le bassin des zones de savane arborée ou arbustive, ainsi que des zones de culture ou de jachère. Deux autres sites de mesures intensives sont présents sur le bassin de la Donga : celui de Belefoungou (site de forêt claire) et celui de Bira (site de culture).

De nombreux instruments ont été déployés sur le site de Nalohou permettant d'obtenir des mesures atmosphériques et des mesures dans le sol. Ces instruments sont répertoriés dans le tableau 1.1 et situés sur la figure 1.2. Une station météorologique permet d'obtenir le bilan d'énergie d'une jachère jeune entourée de culture. Un scintillomètre permet quant à lui d'obtenir des mesures de turbulence sur une zone plus hétérogène. Une série de capteurs dans le sol, situés à trois endroits d'une top-séquence, permettent de mesurer l'humidité et la température à plusieurs profondeurs et le niveau des nappes.

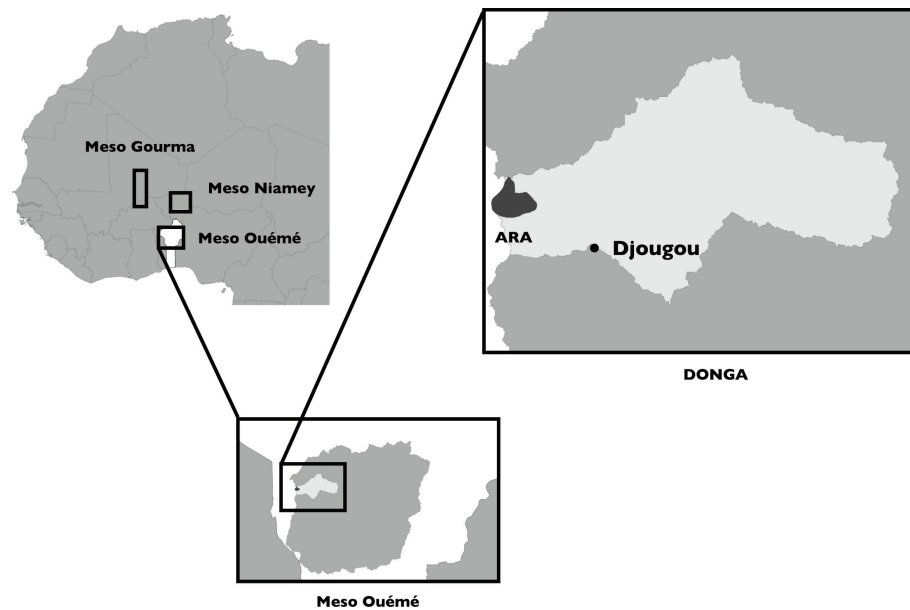


FIG. 1.1 – Sites méso-échelle du programme AMMA, localisation du site de l’Ouémé, du super-site de la Donga et du site intensif du bassin de l’Ara

## 1.2 Forçage atmosphérique

Des capteurs disposés sur la station de Nalohou enregistrent des données météorologiques (température de l’air, pression, humidité relative de l’air, précipitations, vitesse et direction du vent, rayonnement incident et réfléchi de courte et grande longueur d’onde...). Ces données sont représentées sur les figures 1.3 à 1.10.

En 2006, la station de mesures de Nalohou n’a pas fonctionné pendant 2 semaines : du 23ème au 30ème jour et du 220ème au 227ème jour. Afin d’obtenir un set de données continu pour la modélisation, on utilise les données météorologiques des stations de Bira et de Belefoungou pendant ces périodes. Ces 2 stations étant proches de celle de Nalohou, mais n’ayant pas la même végétation, les données ont été éventuellement corrigées par une étude de la corrélation entre les données sur les différents sites lorsque toutes les stations fonctionnaient.

En regardant les données de l’année 2006 à Nalohou, on voit apparaître la dynamique intra-saisonnière du climat du bassin versant. L’année 2006 a été une année particulièrement sèche, avec

Mesures	Localisation Altitude ou Profondeur	Instrument	Temps d'exécu- tion	Temps de sto- ckage
MESURES ATMOSPHÉRIQUES				
Pression atmosphérique	2 m	Vaisala WXT510 weather sta- tion	10 s.	30 min
Température de l'air	2 m	Vaisala WXT510	10 s.	30 min
Humidité relative	2 m	Vaisala WXT510	10 s.	30 min
Vitesse du vent	2 m	Vaisala WXT510	10 s.	30 min
Direction du vent	2 m	Vaisala WXT510	10 s.	30 min
Rayonnement net	2 m	CNR1 Radiometer	10 s.	30 min
Flux de chaleur sensible	5 m	Large Aperture Scintillometer (LAS) Scintec BLS 900	1 s.	1 min
	4.5 m	Sonic anemometer solent R3- 50 Gill windmaster	60 Hz	20 Hz
Précipitations	1.20 m	weighing precipitation gauge (OTT)	5 min	30 min
MESURES DANS LE SOL				
Température du sol	-0.1, -0.2, -0.4, -0.6, et -1 m	Campbell T108 temperature probe	5 min	60 min
Humidité du sol	-0.1, -0.2, -0.4, -0.6, et -1 m	CS616 water content reflec- tometer	5 min	60 min
Hauteur de nappe	-2, -10 et -20 m	manual piezometers (OTT)	2 jours	2 jours

TAB. 1.1 – Descriptif des instruments de mesure

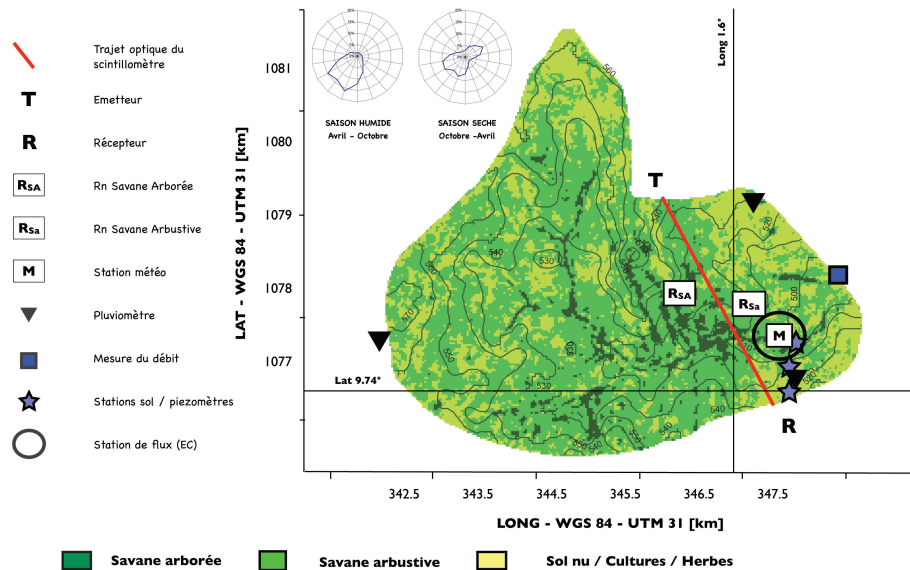


FIG. 1.2 – Bassin de l'Ara : topographie, types de végétation, instruments de mesure

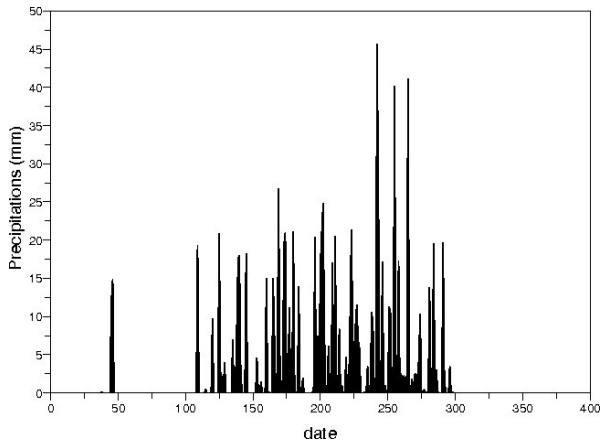


FIG. 1.3 – Précipitations journalières

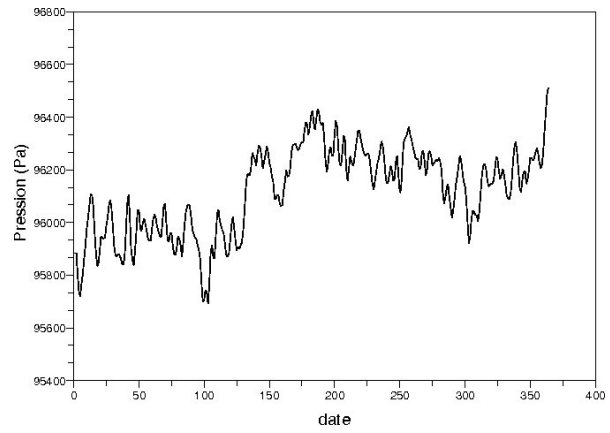


FIG. 1.4 – Pression atmosphérique (moyenne journalière)

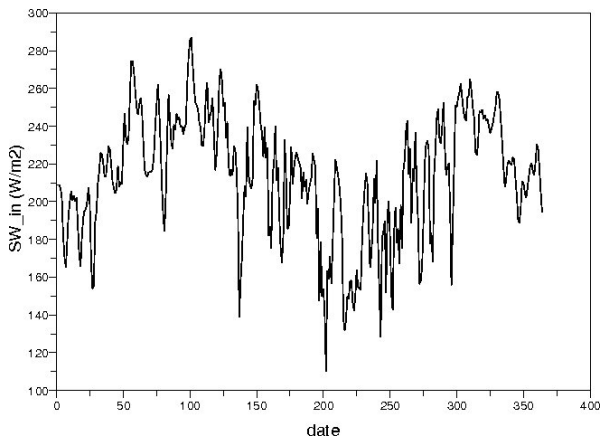


FIG. 1.5 – Rayonnement incident de courte longueur d'onde (moyenne journalière)

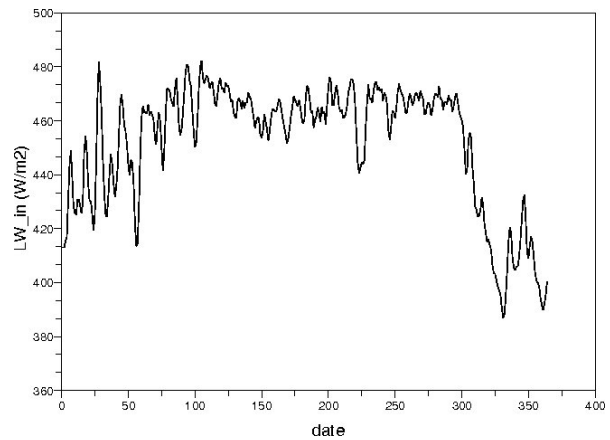


FIG. 1.6 – Rayonnement incident de grande longueur d'onde (moyenne journalière)

seulement 882 mm de précipitations alors qu'en général il y a entre 1000 et 1600mm de précipitations par an dans cette région [11]. La saison sèche dure jusqu'à mi-avril et reprend en novembre (cf. figure 1.3). On observe uniquement un événement pluvieux pendant cette saison, le 13 février (jour 44).

Le rayonnement solaire (courtes longueurs d'onde) incident est représenté sur la figure 1.5. Il augmente en début d'année puis il diminue avec l'arrivée de la saison des pluies. De même, le rayonnement solaire augmente à la fin de la saison des pluies avant de diminuer. Le rayonnement solaire incident suit un cycle saisonnier dû, d'une part, à la rotation de la Terre et, d'autre part, au cycle de la mousson à cause des nuages.

Le rayonnement infrarouge (grandes longueurs d'onde) incident (cf. figure 1.6) est plus important en saison des pluies en raison de la présence des nuages qui ont une émissivité (de l'ordre de 1)

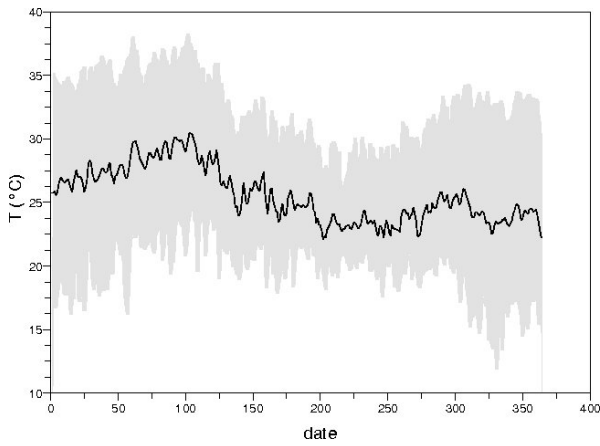


FIG. 1.7 – Température de l'air (trait : moyenne journalière ; grisé : amplitude journalière)

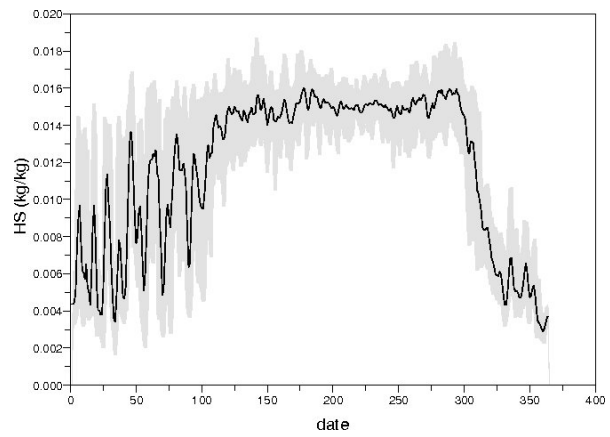


FIG. 1.8 – Humidité spécifique (trait : moyenne journalière ; grisé : amplitude journalière)

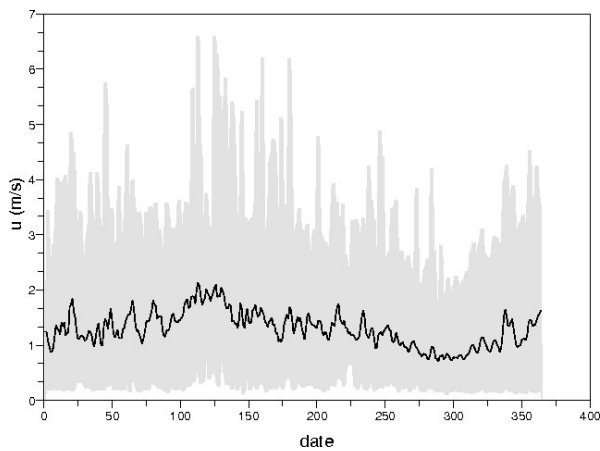


FIG. 1.9 – Vitesse du vent (trait : moyenne journalière ; grisé : amplitude journalière)

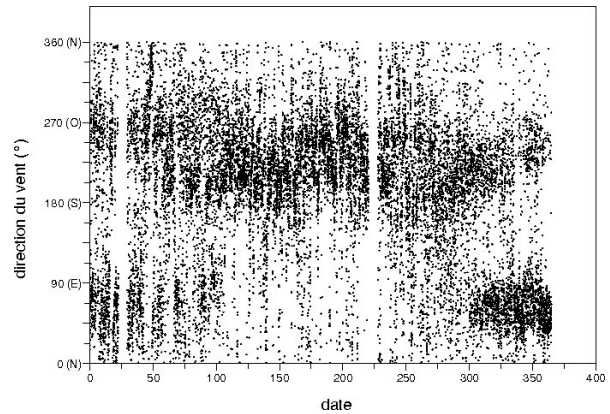


FIG. 1.10 – Direction du vent

supérieure à celle d'un ciel clair (de l'ordre de 0,3). Ceci est particulièrement marqué en fin de saison des pluies.

L'amplitude des variations journalières de la température de l'air (cf. figure 1.7) est plus importante pendant la saison sèche, puisqu'elle est de l'ordre de  $15^{\circ}\text{C}$ . Au contraire, en saison humide elle ne dépasse pas  $10^{\circ}\text{C}$ . L'évolution de la température moyenne journalière est également liée aux saisons : elle augmente jusqu'à atteindre  $30^{\circ}\text{C}$  en moyenne journalière pendant la période sèche et diminue en saison des pluies avec un minimum de  $22^{\circ}\text{C}$  atteint au jour 250. Dès que les pluies s'arrêtent, l'amplitude journalière augmente.

On note trois périodes sur les variations de l'humidité spécifique (cf. figure 1.8), qui a par ailleurs une forte corrélation avec les précipitations et la direction du vent (cf. figures 1.3 et

1.10). D'avril à octobre, le vent souffle du Sud-Ouest, les pluies sont fréquentes, l'humidité de l'air augmente en valeur moyenne et ses variations journalières sont faibles. Au contraire, lorsque le vent vient préférentiellement du Nord-Est (de fin octobre à décembre), il n'y a pas de précipitations et l'humidité est faible. De janvier à avril, on observe une période de transition pour laquelle les entrées de vent de Sud-Ouest sont fréquentes, les précipitations sont rares et la variabilité de l'humidité est importante.

Toutes ces données météorologiques consistent le forçage atmosphérique pour la modélisation SVAT.

### 1.3 Caractéristiques de la surface et de la végétation

La végétation sur le bassin versant de l'Ara est hétérogène. On peut la classier en 4 grands types ([11] et [20]) :

- le sol nu, qui recouvre 7% de la surface du bassin
- les cultures ou zones de jachère, qui représentent environ 25% du bassin (plutôt situées en haut du bassin)
- la savane arbustive, qui occupe 61% du bassin
- la savane arborée, qui recouvre 7% du bassin.

On peut voir le détail de cette répartition obtenue par une analyse d'observations satellites (cf. [20]) sur la figure 1.2. Par ailleurs, les photos de la figure 1.11 montrent ces différents types de végétation.

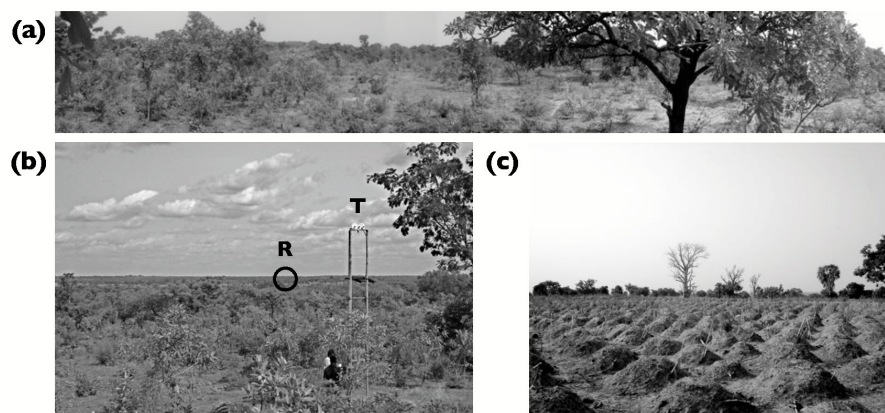


FIG. 1.11 – (a) Savane arbustive. (b) Savane arborée et scintillomètre : émetteur (T) et récepteur (R). (c) Cultures d'ignames pendant la saison sèche. [12]

Le cycle annuel dépend du type de végétation. Les cultures ont leur cycle propre : plantation après la deuxième pluie et récolte à la fin de l'été. Les savanes se couvrent d'herbacées à partir de juillet. Elles peuvent atteindre plus de 2,50m et dépasser les arbustes des savanes arbustives. Elles poussent même sous les canopées forestières. Elles sont brûlées vers fin novembre lorsque les vents changent de régime (de Sud-Ouest à Nord-Est). La végétation est caractérisée par l'évolution annuelle de certains paramètres tels que la hauteur de végétation, la longueur de rugosité, l'indice foliaire (LAI) ou l'albedo. Ces cycles annuels ont été mesurés expérimentalement sur le terrain. Pour les zones de culture, on obtient les cycles annuels représentés sur les figures 1.12 à 1.15. La végétation commence à pousser une à deux semaines après le début de la saison des pluies. En novembre, toutes les cultures sont brûlées ce qui ramène brutalement la hauteur de végétation à 0. Les changements de hauteur de végétation engendrent des modifications de la rugosité : la longueur de rugosité diminue lorsque la végétation pousse et réciproquement. L'indice foliaire est également lié à la hauteur de la végétation : les feuilles se développent lorsque la végétation pousse. Quant à l'albedo, il diminue lorsqu'il pleut et que la végétation pousse car la couleur du sol change : les herbes sont plus sombres que le sol nu. La pluie permet également un lessivage de l'atmosphère, ce qui engendre une diminution du rayonnement diffus par rapport au rayonnement direct. Cela induit une diminution de l'albedo.

## 1.4 Caractéristiques du sol

Un certain nombre de caractéristiques du sol doivent être connues pour mieux comprendre les processus mis en jeu dans les échanges d'énergie et d'eau à la surface. Il faut notamment caractériser les différentes couches de sol, leur épaisseur, et leur texture. Ceci dépend notamment du type de végétation : plus la végétation est importante, plus les couches de sol sont épaisses. Quant à la texture, on observe en moyenne dans le premier mètre de sol une proportion de sable de 80% environ et moins de 20% d'argile [10] [8].

La conductivité hydraulique et les courbes de rétention sont des caractéristiques importantes des sols. En effet, c'est ce qui régit l'infiltration de l'eau dans le sol ou son assèchement, et aussi la partition entre ruissellement et infiltration. On dispose de deux séries de mesures pour déterminer les courbes de rétention, l'une à des profondeurs inférieures à 1m par essais Beer Can, et l'autre pour des profondeurs allant de 2 à 7m par porosité mercure (cf. figure 1.16). Nous avons adopté un modèle empirique de Van Genuchten et Burdine (équations 1.1 et 1.2) pour représenter au mieux

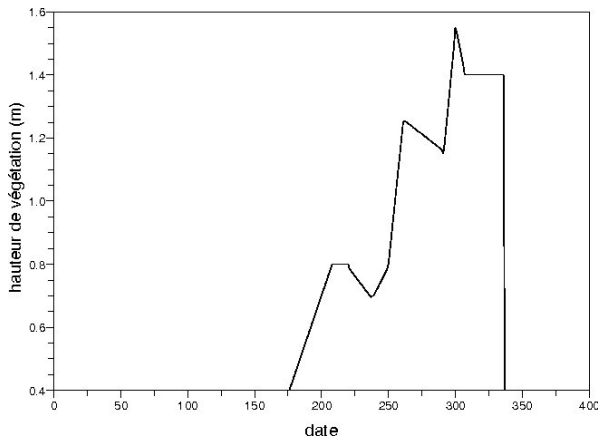


FIG. 1.12 – Hauteur de végétation

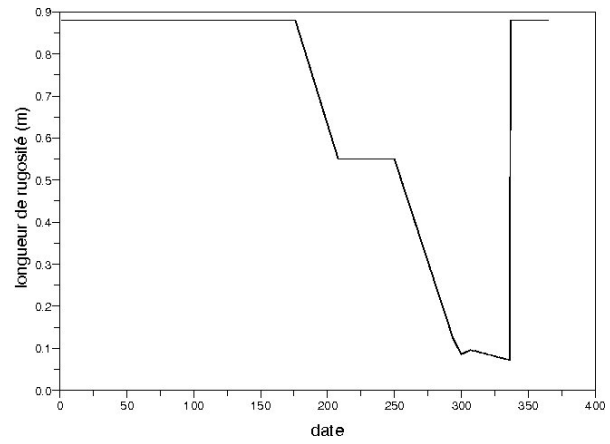


FIG. 1.13 – Longueur de rugosité

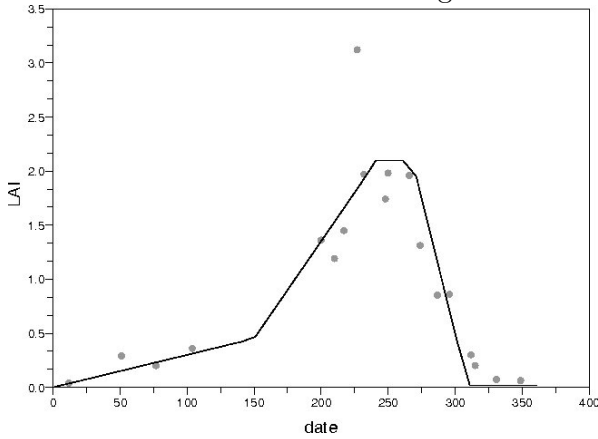


FIG. 1.14 – Indice foliaire (LAI)

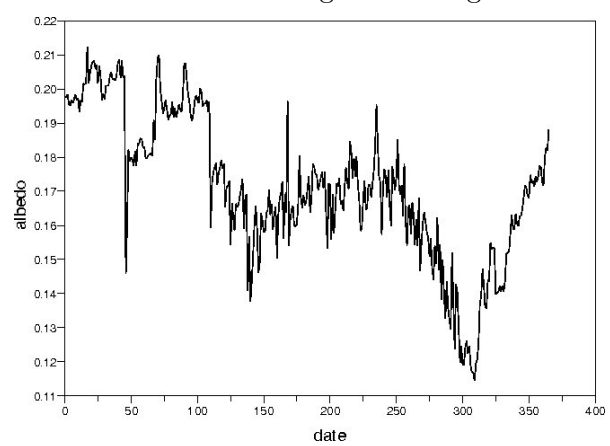


FIG. 1.15 – Albedo

ces courbes aux différentes profondeurs. Les paramètres utilisés sont répertoriés dans le tableau 1.2. Quant à la conductivité hydraulique, des valeurs de l'ordre de  $1.10^{-5}m/s$  sont mesurées dans les quarante premiers centimètres de sol, puis des valeurs plus faibles de l'ordre de  $5.10^{-6}m/s$  dans les couches plus profondes [8].

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^q \right]^{-1+2/q} \quad \text{si } h \geq h_c \quad (1.1)$$

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_{g2}} \right)^{q_2} \right]^{-1+2/q_2} - \left[ 1 + \left( \frac{h_o}{h_{g2}} \right)^{q_2} \right]^{-1+2/q_2} \quad \text{si } h \leq h_c \quad (1.2)$$

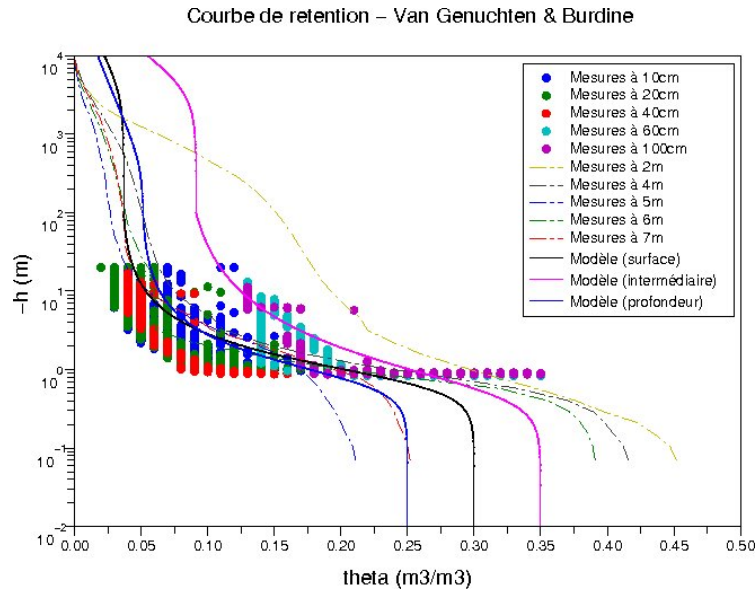


FIG. 1.16 – Courbes de rétention

paramètre	couche 1	couche 2	couche 3
teneur en eau à saturation $w_{sat}(m^3m^{-3})$	0.3	0.35	0.25
teneur en eau résiduelle $w_{resid}(m^3m^{-3})$	0.035	0.08	0.05
paramètre $q$	3	2.6	3
paramètre $h_g(m)$ (point d'inflexion)	-0.7	-0.5	-0.7
paramètre $q_2$	2.047	2.1115	2.047
paramètre $h_{g2}(m)$ (point d'inflexion)	-3690	-4000	-435
pression où on impose la continuité des courbes $h_c(m)$	-100	-100	-100
pression où on impose une teneur en eau nulle $h_o(m)$	-60000	-60000	-60000

TAB. 1.2 – Paramètres utilisés pour le modèle de Van Genuchten et Burdine des courbes de rétention

# 2

## Les modèles SVAT

Afin d'évaluer les bilans d'énergie et d'eau sur le bassin de l'Ara, deux modèles ont été utilisés lors de ce stage : ISBA et SiSPAT. Ce sont deux modèles SVAT (sol-végétation-atmosphère) unidimensionnels. Autrement dit, les échanges horizontaux sont négligés et ils ne prennent en compte que les échanges d'énergie et de masse verticaux. Après un bref résumé des équations physiques régissant les bilans d'énergie et d'eau, je présenterai ces deux modèles et les configurations utilisées.

### 2.1 Les bilans d'énergie et d'eau

Le rayonnement solaire est à l'origine des échanges entre la surface et l'atmosphère. Les radiations solaires ( $R_g$ ) et les radiations infrarouges atmosphériques descendantes ( $R_a$ ), non absorbées et non réfléchies atteignent le sol. En fonction des propriétés optiques de la surface, une partie du rayonnement est réfléchi, et le reste est absorbé et transformé en énergie thermique. La chaleur résiduelle en surface est stockée dans les couches profondes du sol, dans une couche superficielle de surface et par la biomasse.

L'énergie disponible au sol est donnée par le rayonnement net ( $R_n$ ). Il peut être décrit par l'équation 2.1 en fonction des rayonnements solaire (courte longueur d'onde) atmosphérique (grande

longueur d'onde), descendant (respectivement  $R_{SWin}$  et  $R_{LWin}$ ) et ascendant ( $R_{SWout}$  et  $R_{LWout}$ ). Sur le site de Nalohou, nous disposons des mesures des quatre composantes du rayonnement.

$$R_n = R_{SWin} - R_{SWout} + R_{LWin} - R_{LWout} \quad (2.1)$$

Dans les deux modèles utilisés, l'expression permettant de calculer le rayonnement net est la suivante :

$$R_n = R_G(1 - \alpha) + \epsilon(R_A - \sigma T_s^4) \quad (2.2)$$

$R_G(1 - \alpha)$  est le rayonnement solaire descendant absorbé avec l'albédo ( $\alpha = R_{SWout}/R_{SWin}$ ) qui dépend des caractéristiques de la surface. Le second terme  $\epsilon(R_A - \sigma T_s^4)$  est le rayonnement atmosphérique incident absorbé réduit par le rayonnement terrestre.  $R_G = R_{SWin}$  est le rayonnement solaire incident et  $R_A = R_{LWin}$  est le rayonnement atmosphérique descendant. Le rayonnement terrestre est déterminé par la loi de Stefan-Boltzman  $R_T = \epsilon\sigma T_s^4$ , avec  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzman,  $\epsilon$  l'émissivité de la surface et  $T_s$  la température de surface pronostiquée par le modèle. Le flux de rayonnement net est généralement positif en moyenne journalière, mettant en évidence le déséquilibre énergétique entre l'atmosphère et la surface.

L'énergie disponible est redistribuée par conduction, convection, et évaporation de façon à conserver l'énergie à la surface. Les échanges turbulents permettent d'échanger de l'énergie par convection. Ce flux est appelé flux de chaleur sensible  $H$ . Il engendre le réchauffement des basses couches de l'atmosphère au contact du sol lorsque le rayonnement solaire est suffisant. La turbulence transporte l'énergie en impliquant toutes les échelles de temps de la milliseconde à l'heure. Lorsque de l'eau est disponible et qu'il y a suffisamment d'énergie pour la vaporiser, le processus d'évapotranspiration a lieu. Cela implique des échanges d'énergie par changement de phase associés à la quantité de vapeur d'eau introduite dans l'atmosphère. Le flux d'énergie libérée est appelé flux de chaleur latente  $LE$ . La conservation de l'énergie à l'interface sol-atmosphère est alors représentée par l'équation suivante :

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad (2.3)$$

$G$  représente le flux de chaleur dans le sol par conduction.

Après s'être intéressé à la conservation de l'énergie, il faut également se pencher sur la conservation de la masse ou autrement dit sur le bilan d'eau dans le bassin versant étudié. La variation de la masse d'eau totale stockée dans la nappe et dans la zone non saturée du sol, ramenée à la surface du bassin,  $W$  dépend du flux d'eau entrant dans le bassin : les précipitations  $P$  et des flux sortant :

le ruissellement  $Q$  et l'évapotranspiration  $E_{vap}$ . Le bilan s'écrit alors de la façon suivante :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - Q - E_{vap} \quad (2.4)$$

L'infiltration, l'humidité et les mouvements d'eau dans le sol dépendent de la nature et des propriétés du sol, de la topographie et de la couverture végétale.

## 2.2 Modèle ISBA

Le modèle de surface ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) est développé au Centre National de Recherches Météorologiques depuis 1989. C'est un modèle physique qui représente les différents mécanismes hydrologiques verticaux en utilisant la méthode force-restore [16]. Il reproduit le bilan d'énergie et le bilan d'eau à la surface pour un forçage atmosphérique donné. Ce modèle dépend de paramètres liés au type de sol et de végétation ; il existe en plusieurs versions avec des nombres de couches et de paramètres différents. Nous nous intéresserons ici à la version "ISBA-3L" (3 couches) pour modéliser le bassin de l'Ara.

On peut représenter les processus simulés par le modèle de surface ISBA-3L par les deux schémas de la figure 2.1. Le premier représente le bilan d'énergie, et le second le bilan de masse (ou d'eau).

Dans le bilan d'énergie, les flux incidents sont en bleu, les flux sortant en vert, les flux turbulents d'échange avec l'atmosphère en violet et les flux de chaleur dans le sol en rouge.

Dans le bilan hydrologique, les sources (précipitations) sont en bleu, les sources et puits d'évapotranspiration en vert, et les flux de drainage ou ruissellement en rouge.

L'ensemble des variables de la figure 2.1 sont répertoriées dans le tableau suivant :

	variable	unité
$R_g$	Rayonnement incident (courte longueur d'onde)	$Wm^{-2}$
$R_{at}$	Rayonnement incident (grande longueur d'onde)	$Wm^{-2}$
$\alpha R_g$	Rayonnement émis (courte longueur d'onde)	$Wm^{-2}$
$R_l$	Rayonnement réfléchi (grande longueur d'onde)	$Wm^{-2}$
$H$	Flux de chaleur sensible	$Wm^{-2}$
$LE$	Flux de chaleur latente	$Wm^{-2}$
$G$	Flux de chaleur dans le sol	$Wm^{-2}$

$T_s$	Température de surface	$K$
$T_2$	Température profonde	$K$
$P_r$	Précipitations totales	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$P_n$	- sous forme de neige (équivalent liquide)	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$P_s$	- qui atteignent le sol	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$P_v$	- interceptées par la végétation	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$P_g$	Infiltration	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$Q_r$	Ruissellement de surface	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$D_1$	Diffusion dans le sol (surface/zone racinaire)	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$D_2$	Diffusion dans le sol (zone racinaire/zone profonde)	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$K_2$	Drainage gravitationnel (zone racinaire)	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$K_3$	Drainage gravitationnel (zone profonde)	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$E_n$	Sublimation	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$E_g$	Évaporation du sol nu	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$E_r$	Évaporation de l'eau interceptée	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$E_{tr}$	Transpiration	$kg.m^{-2}s^{-1}$
$W_r$	Eau stockée sur la canopée	$kg.m^{-2}$
$W_n$	Eau stockée dans le manteau neigeux	$kg.m^{-2}$
$w_g$	Réservoir d'eau de la couche de surface	$m^3m^{-3}$
$w_2$	Réservoir d'eau de la couche racinaire	$m^3m^{-3}$
$w_3$	Réservoir d'eau de la couche profonde	$m^3m^{-3}$
$d_s$	Profondeur de la couche de surface	$m$
$d_2$	Profondeur de la couche racinaire	$m$
$d_3$	Profondeur totale du sol	$m$

La végétation est décrite par une résistance de surface qui contrôle la transpiration. Les plantes interceptent les précipitations et la rosée qui s'évaporent au taux potentiel. L'amplitude du flux de chaleur dans le sol est modulé par la fraction de surface couverte par la végétation. Seule la température de surface est utilisée pour décrire l'échange d'énergie à la surface, sauf pour  $LE$  qui prend dans la zone racinaire. Dans le sol, les transferts de chaleur et d'eau dépendent de la texture du sol et de sa teneur en eau.

Les paramètres de surface d'entrée sont divisés en deux catégories : les paramètres primaires et les paramètres secondaires dont les valeurs peuvent être associées aux valeurs des paramètres

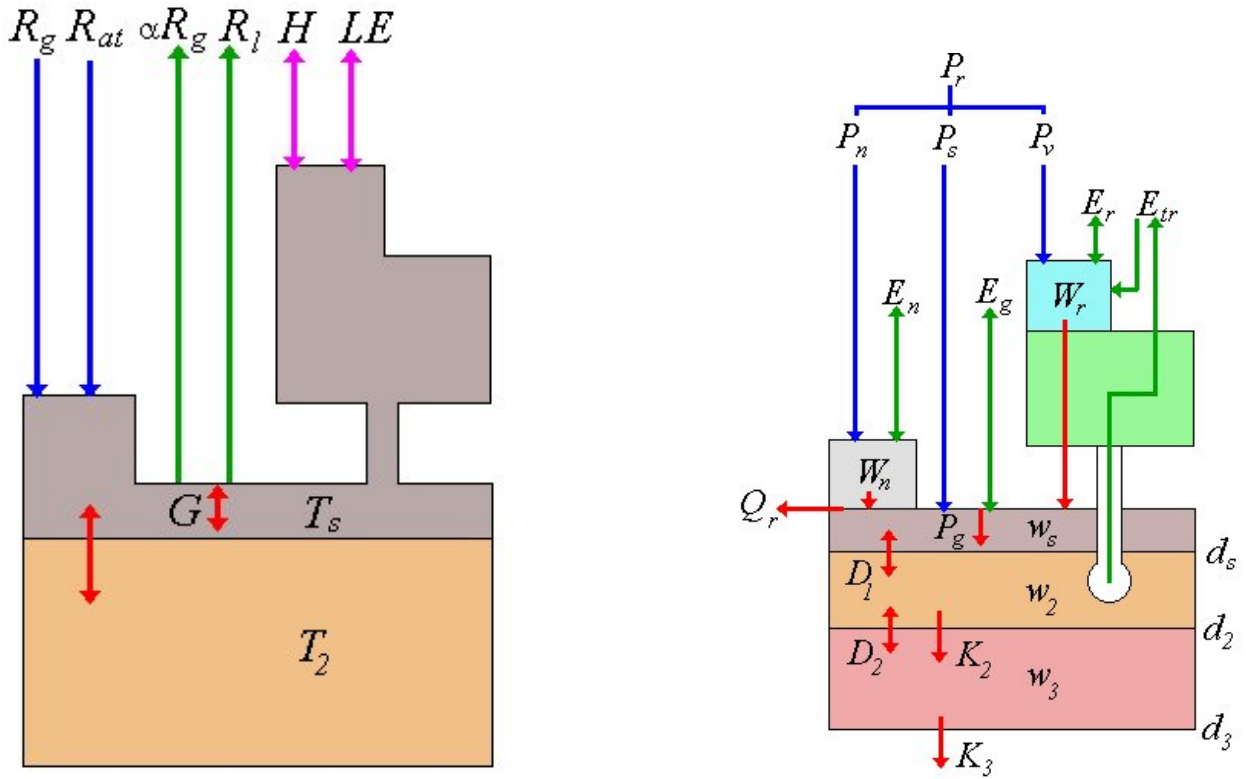


FIG. 2.1 – ISBA - Bilan d'énergie (à gauche). Bilan de masse (à droite).

primaires. Les paramètres primaires décrivent le type de sol et le type de végétation. Les paramètres secondaires liés au sol sont estimés à partir de la texture, et ceux liés à la végétation sont tabulés en fonction des différents types. ISBA est forcé par l'état atmosphérique (pression, température  $T_a$ , humidité de l'air  $q_a$ , pluie  $P_g$ , neige, vitesse du vent  $V_a$ , rayonnement incident de courte et grande longueur d'onde  $R_G$  et  $R_A$ ).

Le modèle calcule l'évolution temporelle de variables pronostiques représentatives de la température dans chaque couche. Les équations pronostiques pour la température de surface  $T_s$  et sa valeur moyenne sur un jour  $T_2$  sont obtenues par la méthode de force-restore :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T G - \frac{2\pi}{\tau} (T_s - T_2) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T_s - T_2) \quad (2.6)$$

En ce qui concerne les flux d'énergie à la surface, le rayonnement net est la somme des radiations solaires incidentes des radiations atmosphériques incidentes réduites de celles émises par la Terre. Les flux turbulents de chaleur sensible  $H$  ou de chaleur latente  $LE$  sont calculés à l'aide de formules aérodynamiques classiques (2.8 et 2.9) où  $C_H$  est un coefficient d'échange qui dépend des paramètres

aérodynamiques de la surface et du forçage météorologique, et  $G$  est le résidu du bilan :

$$R_n = R_G(1 - \alpha) + \epsilon(R_A - \sigma T_s^4) \quad (2.7)$$

$$H = \rho_a c_p C_H V_a (T_s - T_a) \quad (2.8)$$

$$LE = \underbrace{(1 - veg)\rho_a C_H V_a (h_u q_{sat}(T_s) - q_a)}_{\text{sol nu}} + \underbrace{veg\rho_a C_H V_a h_v (q_{sat}(T_s) - q_a)}_{\text{végétation}} \quad (2.9)$$

$$G = R_n - H - LE \quad (2.10)$$

L'eau dans le sol est traitée de façon similaire à la température du sol dans le modèle. Les équations suivantes régissent l'évolution du réservoir d'eau en surface  $w_g$  qui interagit directement avec l'atmosphère, et de la teneur en eau volumique moyenne pour une colonne de sol  $w_2$  :

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1} (P_g - E_g) - \frac{C_2}{\tau} (w_g - w_{geq}) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) \quad (2.12)$$

Le modèle de surface ISBA permet de définir plusieurs tiles de végétation. On en définit 4 correspondant à chacun de ces types de couvert présentés dans le chapitre 1. Le modèle présente une colonne de sol divisée en deux réservoirs : la couche racinaire et la couche de drainage profond. La couche de surface superficielle est incluse dans la zone racinaire. L'eau qui atteint la surface et qui s'infiltré dans le sol est la somme des pluies non interceptées par la canopée et du ruissellement du réservoir d'interception. Afin de calculer l'infiltration réelle, un ruissellement de Dunne est modélisé. Lorsque le contenu en eau de la zone racinaire et/ou de drainage excède la porosité totale du sol, le résidu de chaque couche génère un ruissellement à saturation de sub-surface qui contribue au ruissellement total. Enfin, la perte en eau du réservoir profond par drainage gravitationnel contribue également au ruissellement total [9].

### 2.3 Modèle SiSPAT

Le modèle SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfert) est un modèle numérique des flux d'énergie et d'eau dans le système sol-végétation-atmosphère développé par Dantas-Antonio en 1992 [7] et complété par Isabelle Braud en 1995[2]. C'est un modèle unidirectionnel qui convient pour les études à méso-échelle. Il décrit les transferts de chaleur et d'eau. Il a été conçu pour remplir les deux objectifs suivants :

- donner une représentation physique des processus mis en jeu : mouvements couplés de chaleur et d'eau dans la zone non-saturée, assimilation racinaire, transferts turbulents au-dessus et dans la canopée, interception, infiltration et ruissellement de surface. Une telle représentation autorise l'ajout de modules physiques supplémentaires.
- réaliser un bilan simplifié entre les différentes couches de sol, la végétation et l'atmosphère.

Dans le sol, les équations de transferts couplés d'énergie et d'eau sont résolues avec un terme de puits correspondant à l'assimilation racinaire (terme  $S/\rho_w$  dans l'équation 2.13). Le modèle peut prendre en compte les sols homogènes ou contenant plusieurs horizons. Les transferts sous forme liquide et vapeur sont considérés. La végétation est assimilée à une couche de température  $T_v$  (contrairement à ISBA où  $T_v = T_a$ ) et deux bilans d'énergie sont considérés : un pour la partie de sol nu et un pour la végétation. Le modèle est contraint à un niveau de référence par les variables de forçage atmosphérique, à savoir la vitesse du vent, la température de l'air et l'humidité, le rayonnement incident de courte et grande longueur d'onde et les précipitations.

Les paramètres d'entrée à renseigner dans SiSPAT décrivent :

- la discrétisation du profil de sol
- les paramètres du sol décrivant ses propriétés hydrodynamiques et thermiques
- les caractéristiques de la végétation et leur évolution
- les propriétés de surface (albedo, émissivité, longueur de rugosité, ...)
- les informations nécessaires à la simulation (pas de temps du forçage, durée de la simulation, pas de temps minimum et maximum de la simulation et des fichiers de sortie).

Le modèle SiSPAT ne permet pas de définir plusieurs types de végétation. Il faut donc faire des simulations différentes puis les agréger si l'on veut obtenir des résultats caractéristiques de l'ensemble du bassin. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à une végétation basse de type herbeuse, ce qui correspond principalement au haut du bassin. Par contre, SiSPAT permet une meilleure discrétisation du sol en profondeur qu'ISBA. Nous avons défini trois couches : une couche de surface de 40 cm, une couche intermédiaire allant jusqu'à 2 m de profondeur et une couche profonde allant jusqu'à 6 m, ce qui correspond à un nombre total de 187 noeuds.

En ce qui concerne les propriétés hydrodynamiques et thermiques du sol, nous avons choisi le modèle de Van Genuchten et Burdine pour décrire les courbes de rétention (voir le chapitre 1), ce qui permet une meilleure représentation des courbes de rétention dans le domaine sec.

Dans le sol, les variables pronostiques utilisées pour décrire les transferts sont la température dans le sol  $T$  et le potentiel matriciel  $h$  à chaque noeud du modèle :

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{mh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - K \right) - \frac{S}{\rho_w} \quad (2.13)$$

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ch} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{cT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

avec  $C_h$  et  $C_T$  les capacités capillaire et calorifique volumique,  $D_{mh}$ ,  $D_{mT}$ ,  $D_{ch}$  et  $D_{cT}$  les conductivités isotherme humide, thermique vapeur, isotherme vapeur et thermique apparente,  $K$  la conductivité hydraulique liquide, et  $S/\rho_w$  un terme de ponction racinaire.

Pour les transferts radiatifs au niveau de la surface, le rayonnement net est d'abord calculé en séparant le rayonnement sur la végétation (indice  $v$  dans les équations) et sur le sol nu (indice  $g$ ) à partir du facteur de partitionnement  $\sigma_f$  :

$$R_{nv} = R_{Gv} + R_{Av} = R_G(1 - \alpha_v)\sigma_f \left( 1 + \frac{\alpha_g(1 - \sigma_f)}{1 - \sigma_f\alpha_g\alpha_v} \right) + \sigma_f(\epsilon_v(R_A - \sigma T_v^4) + \frac{\epsilon_v\epsilon_g\sigma(T_1^4 - T_v^4) + (1 - \sigma_f)(1 - \epsilon_g)\epsilon_v(R_A - \sigma T_v^4)}{1 - \sigma_f(1 - \epsilon_v)(1 - \epsilon_g)}) \quad (2.15)$$

$$R_{ng} = R_{Gg} + R_{Ag} = R_G(1 - \alpha_g)(1 - \sigma_f) \frac{1}{1 - \sigma_f\alpha_g\alpha_v} + \frac{(1 - \sigma_f)\epsilon_g(R_A - \sigma T_1^4) - \epsilon_g\epsilon_v\sigma_f\sigma(T_1^4 - T_v^4)}{1 - \sigma_f(1 - \epsilon_v)(1 - \epsilon_g)} \quad (2.16)$$

$$R_n = R_{nv} + R_{ng} \quad (2.17)$$

avec  $\alpha_g$  et  $\alpha_v$  les albedos pour le sol nu et la végétation,  $\epsilon_g$  et  $\epsilon_v$  les émissivités pour le sol nu et la végétation.

Le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente et le flux de chaleur dans le sol sont définis de la façon suivante :

$$H = H_v + H_g = \frac{-\rho_a c_p (T_{av} - T_v)}{R_{vH}} + \frac{-\rho_a c_p (T_{av} - T_1)}{R_{gH}} \quad (2.18)$$

$$E = E_v + E_g = -\rho_a (q_{av} - q_{sat}(T_v)) \left( \frac{\delta}{R_{vV}} + \frac{1 - \delta}{R_{vV} + R_{sto}} \right) + \frac{-\rho_a (q_{av} - q_1)}{R_{gV}} \quad (2.19)$$

$$G = - \left[ D_{ch}(h_1, T_1) \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)_{z=0} + D_{cT}(h_1, T_1) \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \right]. \quad (2.20)$$

# 3

## Résultats de simulations et discussion

L'objectif de mon stage est de simuler les différents termes du bilan d'énergie sur une année complète. Pour cela, j'ai d'abord utilisé le modèle ISBA. Les résultats de simulation n'étant pas satisfaisants, j'ai essayé de modifier le programme et de mieux paramétrer le modèle afin d'obtenir de meilleurs résultats, mais sans succès. Dans un deuxième temps, j'ai donc utilisé le modèle SiSPAT, ce qui a donné des résultats plus prometteurs. Je présenterai ici une comparaison des résultats obtenus avec ces deux modèles.

Les mesures de rayonnement net auxquelles nous comparons les résultats de simulation ont été effectuées au niveau de la station météorologique qui se situe sur la partie herbacée du site d'étude. Les mesures d'humidité et de température dans le sol ont été réalisées à trois endroits différents du bassin, mais nous ne regardons ici que celles effectuées sur la partie haute du bassin, ce qui correspond également à la partie herbacée de la zone étudiée. Seul le flux de chaleur sensible, mesuré par scintillométrie, rend compte de l'ensemble du bassin.

ISBA a été utilisé en définissant 4 tiles différents permettant de reproduire les différents types de végétations présents sur le bassin. Nous ne regarderons que les résultats du tile d'herbacées, afin de pouvoir comparer les résultats de simulations aux mesures. Néanmoins, pour le flux de chaleur sensible, nous regarderons les résultats moyennés sur les 4 tiles. Avec SiSPAT, nous n'avons modélisé que la partie herbacée du bassin.

Pour ces deux modèles, nous avons utilisé le même forçage atmosphérique, présenté dans le chapitre 1.2. L'ensemble des paramètres utilisés est répertorié dans les annexes B et D. Nous avons notamment les mêmes caractéristiques de végétation (indice foliaire, albedo).

## 3.1 Flux d'énergie

Intéressons-nous d'abord au bilan d'énergie à travers les courbes de rayonnement net, de flux de chaleur sensible, de flux de chaleur latente et de flux de chaleur dans le sol. Nous regarderons ici les moyennes et éventuellement les amplitudes journalières obtenues avec les modèles, comparées aux mesures. Nous nous attarderons également sur les valeurs horaires d'un zoom autour du jour 109, qui correspond au deuxième événement pluvieux de la saison. Ceci permet donc de voir l'évaluation des flux en période sèche et en période humide, tout en s'affranchissant d'éventuels problèmes d'initialisation du modèle.

### 3.1.1 Rayonnement net

Le rayonnement net  $R_n$  (autrement dit la quantité de chaleur disponible au sol) est calculé à partir du rayonnement incident, de l'émissivité et de l'albédo, et de la température de surface dont nous reparlerons plus loin. On le compare aux mesures effectuées avec le CNR1. Sur la figure 3.2, on constate que le modèle ISBA surestime  $R_n$  d'environ  $200W/m^2$ , alors qu'on fait une erreur dix fois plus faible avec SiSPAT, de jour en période sèche. Lors d'un événement pluvieux, les résultats de simulations sont meilleurs. La nuit, les deux modèles surestiment  $R_n$  – ISBA d'environ  $60W/m^2$  et SiSPAT d'environ  $30W/m^2$ . La figure 3.1 montre que les variations annuelles sont reproduites plus fidèlement avec SiSPAT qu'ISBA.

### 3.1.2 Flux de chaleur sensible

Le flux de chaleur sensible  $H$  est mesuré à l'aide du scintillomètre. On obtient donc une valeur mesurée qui correspond à une moyenne sur les différents types de végétations puisque la mesure est faite entre un émetteur et un récepteur espacés de  $2,4km$ . Il est important de noter qu'on force la mesure de telle sorte à avoir des conditions stables la nuit, ce qui revient à forcer la mesure à être négative ou nulle. Nous comparons cette mesure représentative de l'ensemble du bassin à la

valeur moyenne d'ISBA sur les 4 tiles de végétation, et à la valeur obtenue avec SiSPAT pour une végétation herbacée.

SiSPAT sous-estime la moyenne journalière de  $H$  (cf. figure 3.3). Il calcule un flux  $H$  relativement faible (cf. figure 3.4). ISBA surestime la moyenne journalière de 100 W et propose des amplitudes journalières irréalistes qu'on n'observe ni avec le scintillomètre (cf. figure 3.3 et 3.4), ni avec des mesures d'eddy corrélation (non montrées ici).

### 3.1.3 Flux de chaleur latente

On ne dispose pas de mesures directes du flux de chaleur latente. Il est donc plus difficile d'évaluer les résultats obtenus par simulation. On constate sur les figures 3.5 et 3.6 que le flux de chaleur latente modélisé par ISBA est plus fort que celui modélisé par SiSPAT en période humide. Par contre, en période sèche, c'est l'inverse. Si l'on compare les flux de chaleur latente cumulés aux précipitations cumulées (cf. figure 3.7), on s'aperçoit que le cumul de chaleur latente modélisé par SiSPAT est plus important que les précipitations, ce qui semble aberrant à moins qu'on ait un sol très humide en initialisation.

### 3.1.4 Flux de chaleur dans le sol

Le flux de chaleur dans le sol  $G$  est calculé par une analyse de gradients à partir de la mesure de la température dans le sol à deux profondeurs différentes. On compare cette valeur de  $G$  à celles obtenues par les modèles. ISBA calcule  $G$  comme étant le résidu du bilan d'énergie alors que SiSPAT permet un calcul direct. Si on regarde les variations annuelles (cf. figure 3.8), on remarque que les résultats obtenus avec SiSPAT sont plus proches de la réalité : les amplitudes journalières sont respectées alors qu'ISBA les sous-estime de moitié en saison sèche et ne reproduit pas le cycle annuel. Effectivement,  $G$  diminue en saison des pluies en raison de la diminution de la température de surface qui augmente peu la journée. La figure 3.9 montre qu'avec ISBA les variations journalières de  $G$  sont environ deux fois trop faibles alors que l'erreur ne dépasse pas 10% lorsqu'on utilise SiSPAT. Étant donné qu'ISBA calcule  $G$  comme le résidu du bilan d'énergie, on ne peut pas obtenir de bons résultats tant que  $H$  est trop fort. En fin de saison (octobre et novembre), on observe un écart important entre les résultats de simulation et les mesures – écarts qu'on retrouve sur la figure 3.10. Ceci est lié à la dynamique de la végétation implémentée dans les modèles. A cette période, toutes

les herbes sont brûlées, excepté à proximité des stations de mesures.

Tous ces flux sont fortement liés à la température et à l'humidité du sol et donc à la capacité du modèle à bien reproduire ces caractéristiques de surface.

## 3.2 Humidité et température dans le sol

### 3.2.1 Température dans le sol

Comme pour le flux de chaleur dans le sol, la température de surface est estimée par analyse de gradients. Sur la figure 3.10, on constate que, contrairement à SiSPAT, ISBA sous-estime la température de surface mais respecte la variation annuelle. La température est bien modélisée par SiSPAT en amplitude journalière, mais elle est surestimée de  $3^{\circ}\text{C}$  après un événement pluvieux comme on peut le remarquer sur la figure 3.11. Avec ISBA, la température coïncide avec les mesures pendant la nuit mais son amplitude journalière est deux à trois fois trop faible. Le fait que SiSPAT modélise une température trop forte la nuit explique qu'on trouve un rayonnement net trop fort la nuit.

Si l'on s'attache à la température à 20 cm de profondeur, au niveau annuel (figure 3.12), le constat est le même que pour la température de surface. Pour les amplitudes journalières autour du jour 109 (figure 3.13), ISBA sous-estime la température de  $5^{\circ}\text{C}$ , et son amplitude journalière est également sous-évaluée. Par contre, SiSPAT surestime la température de  $1,5^{\circ}\text{C}$  et l'amplitude journalière est de  $4,5^{\circ}\text{C}$  alors qu'on ne mesure que  $3^{\circ}\text{C}$  d'amplitude.

La température du premier horizon de sol est correctement reproduit avec SiSPAT, ce qui explique les résultats corrects obtenus pour le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol.

### 3.2.2 Humidité dans le sol

Pour l'humidité dans le sol, avec ISBA, on n'arrive ni à reproduire ce qui se passe en saison sèche, ni en saison humide. Par contre, SiSPAT permet de bien reproduire la dynamique de l'humidité à 10 et 20 cm de profondeur (figure 3.14), mais pas à 1 m (figure 3.15). On a réalisé plusieurs simulations qui nous ont montré que l'humidité du sol est très sensible aux courbes de rétention, aux courbes de

conductivité hydraulique et à la définition des horizons de sol. Il reste encore à affiner la caractérisation du sol.

Nous avons réalisé plusieurs tests avec ISBA en faisant varier les paramètres caractéristiques du sol, de la surface et de la végétation, mais ceci n'a pas permis d'obtenir de meilleurs résultats. Finalement, on peut dire que le modèle ISBA simule relativement bien le flux d'évapotranspiration mais surestime le flux de chaleur sensible et le rayonnement net. Le modèle SiSPAT, quant à lui, donne de meilleurs résultats à l'exception du flux de chaleur latente qui est surestimé. Le modèle SiSPAT permet de retrouver les dynamiques journalière et annuelle observées sur le terrain en termes de rayonnement net, de flux de chaleur dans le sol et de température du sol. La teneur en eau des sols est également bien reproduite dans le premier horizon de sol.

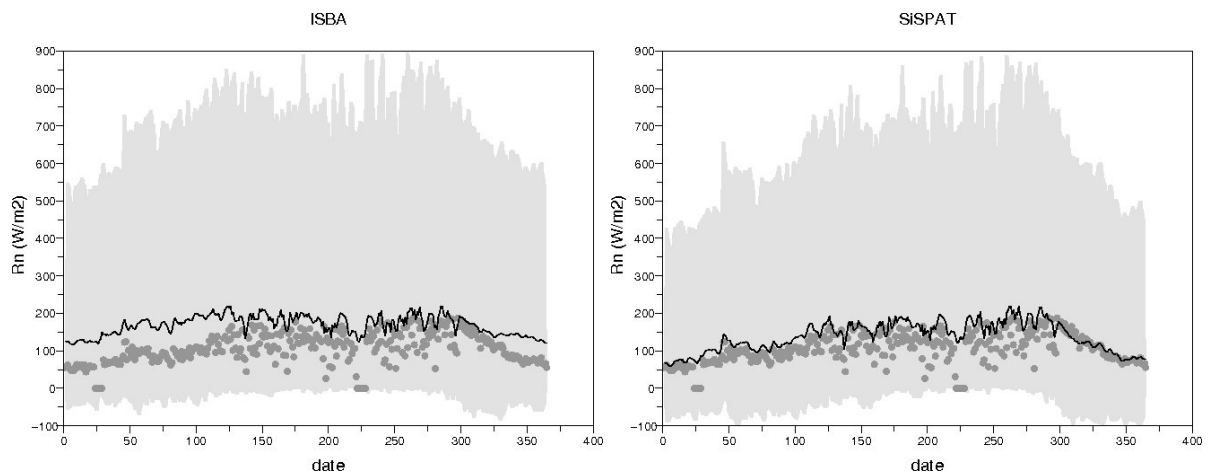


FIG. 3.1 – Rayonnement net. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : moyenne journalière mesurée

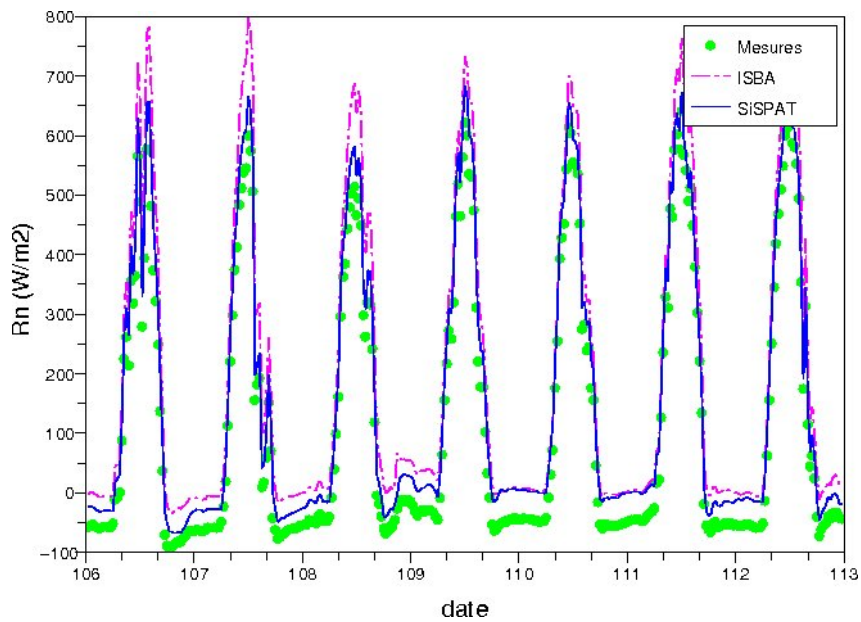


FIG. 3.2 – Rayonnement net

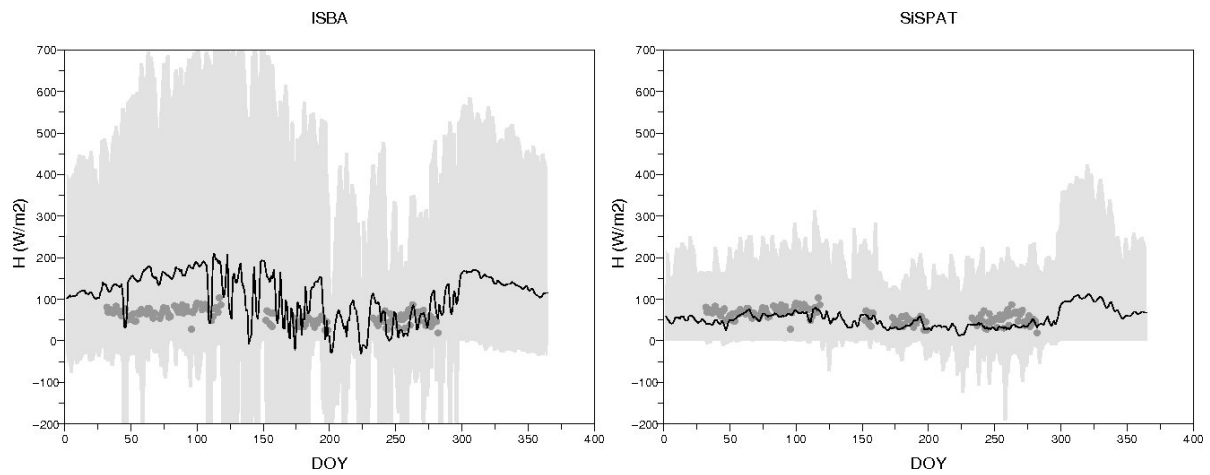


FIG. 3.3 – Flux de chaleur sensible. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : moyenne journalière mesurée

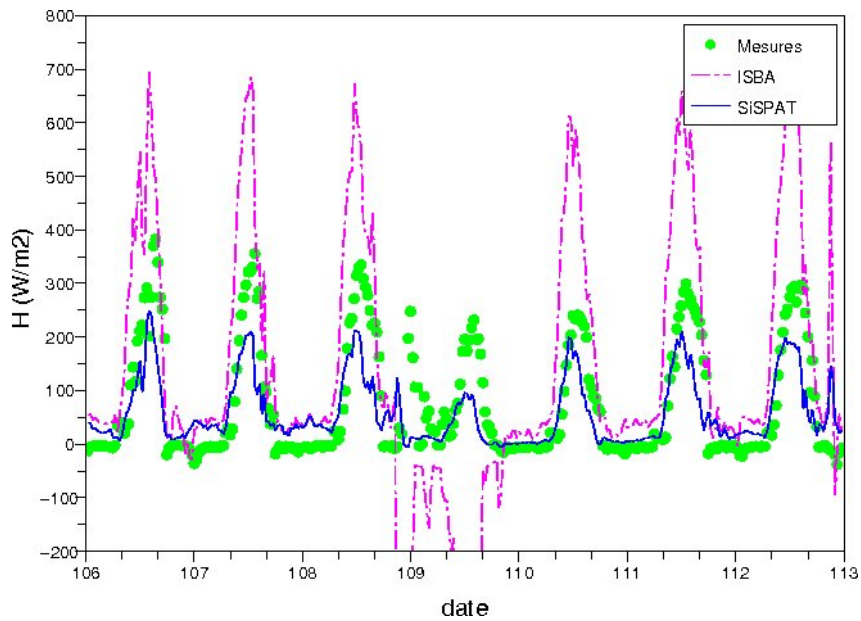


FIG. 3.4 – Flux de chaleur sensible

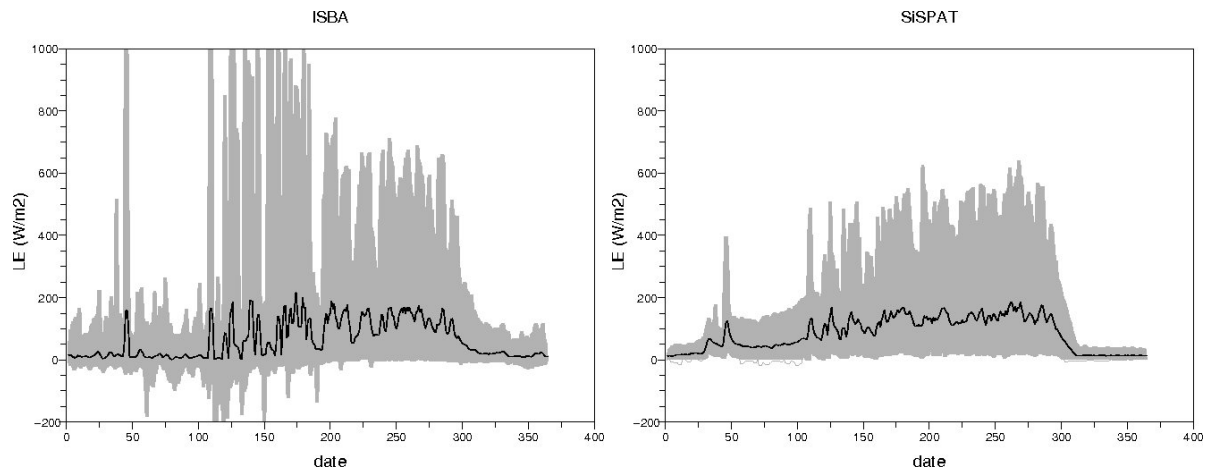


FIG. 3.5 – Flux de chaleur latente. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : moyenne journalière mesurée

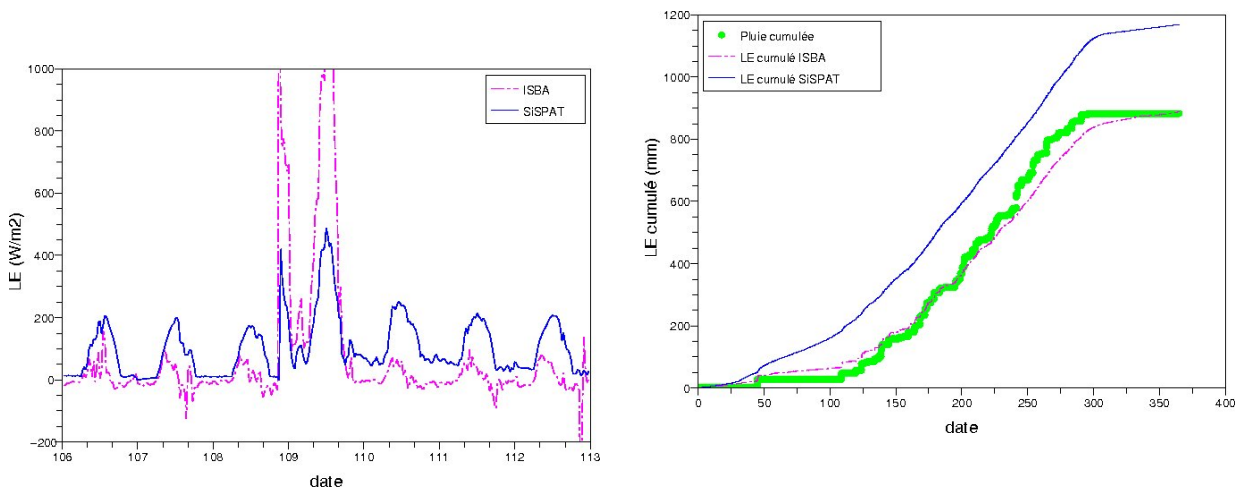


FIG. 3.6 – Flux de chaleur latente

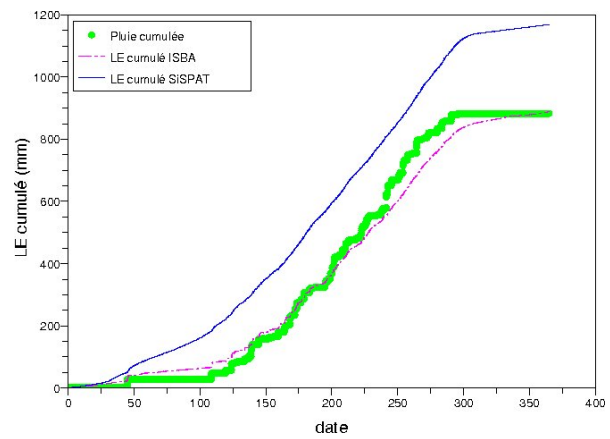


FIG. 3.7 – Flux de chaleur latente et précipitations cumulés

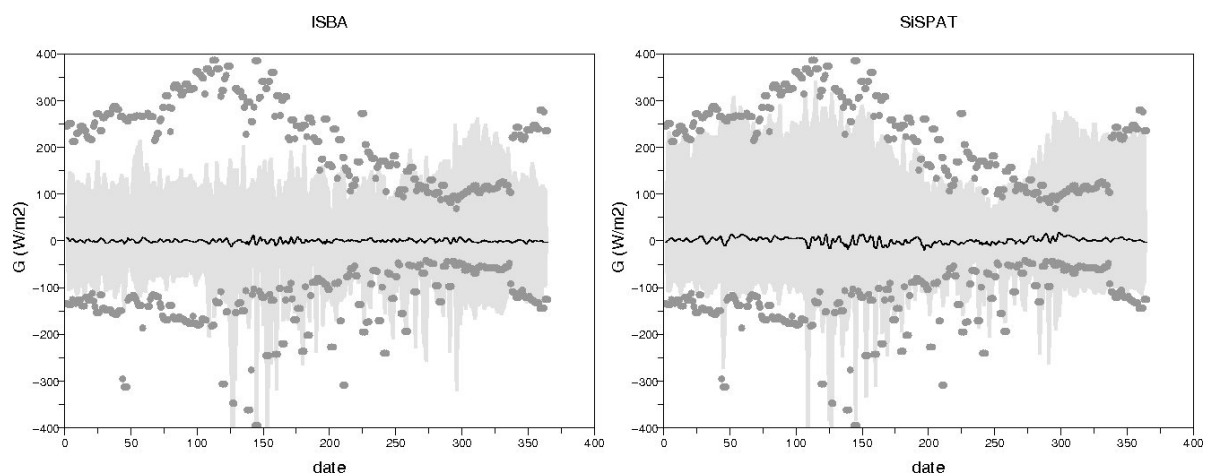


FIG. 3.8 – Flux de chaleur dans le sol. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : maxima et minima journaliers mesurés

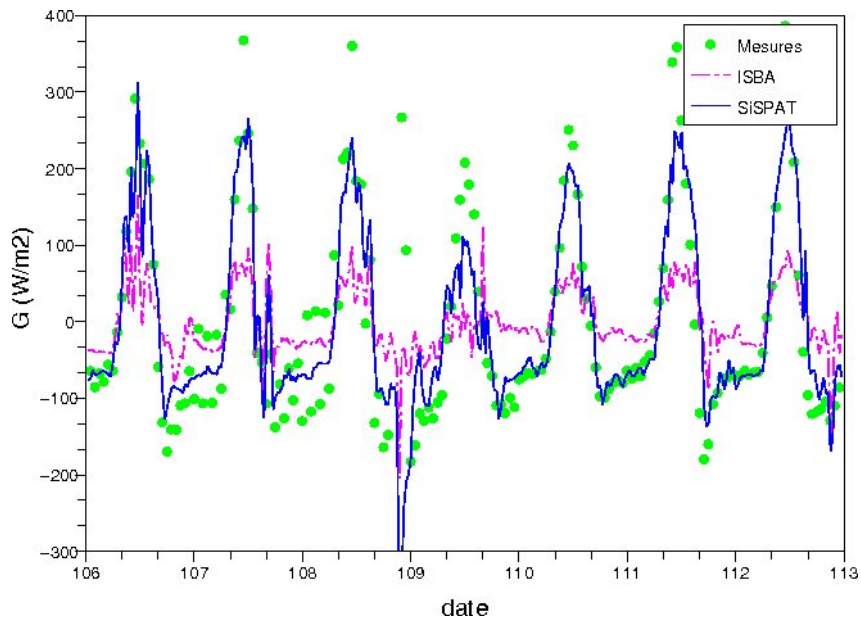


FIG. 3.9 – Flux de chaleur dans le sol

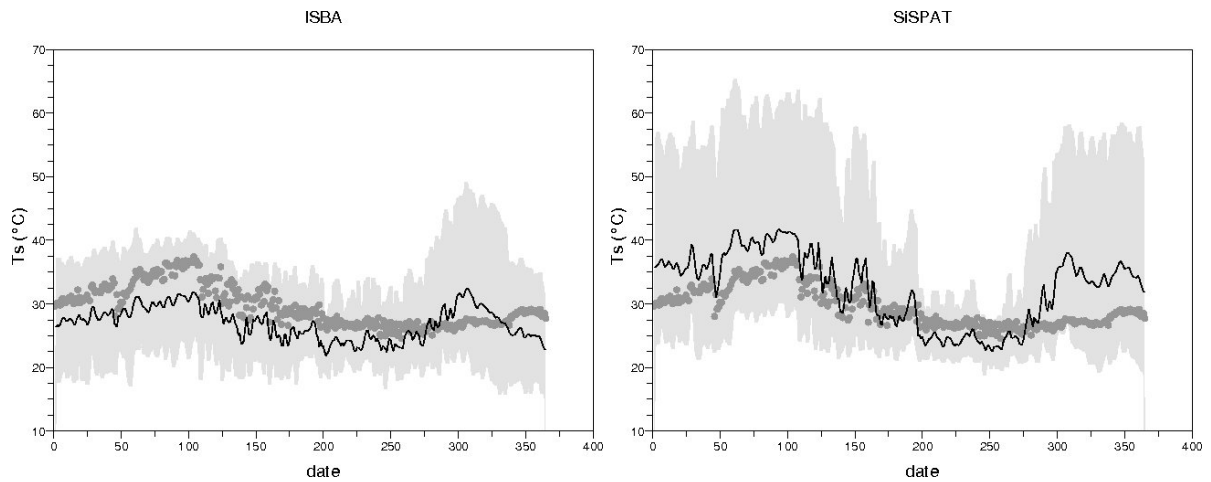


FIG. 3.10 – Température de surface. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : moyenne journalière mesurée

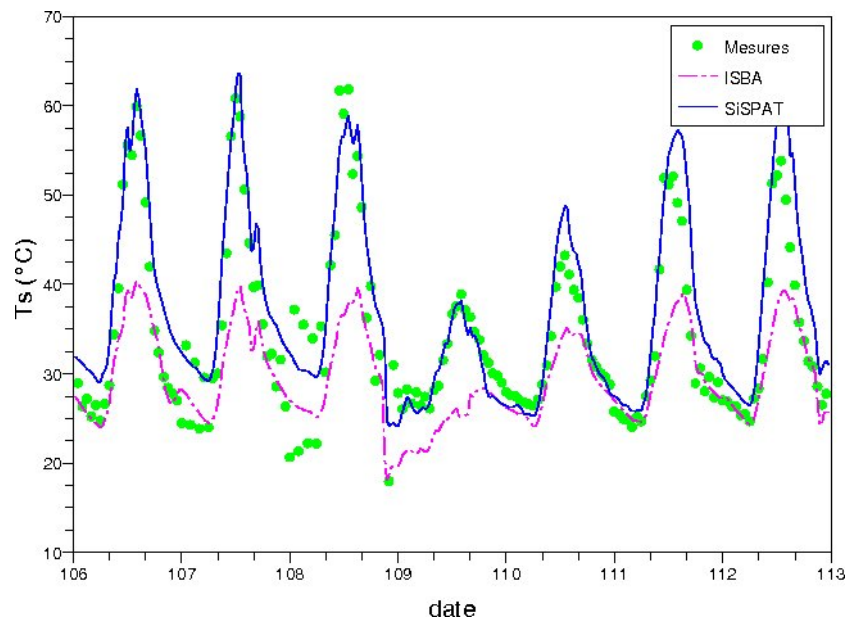


FIG. 3.11 – Température de surface

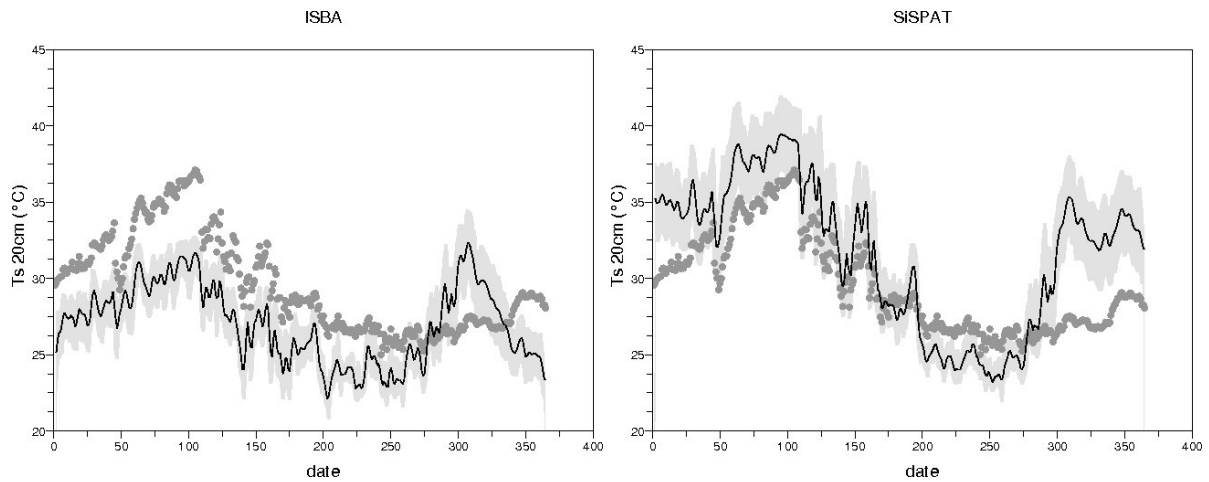


FIG. 3.12 – Température du sol à 20 cm de profondeur. Trait plein : moyenne journalière simulée. Grisé : amplitude journalière simulée. Points : moyenne journalière mesurée

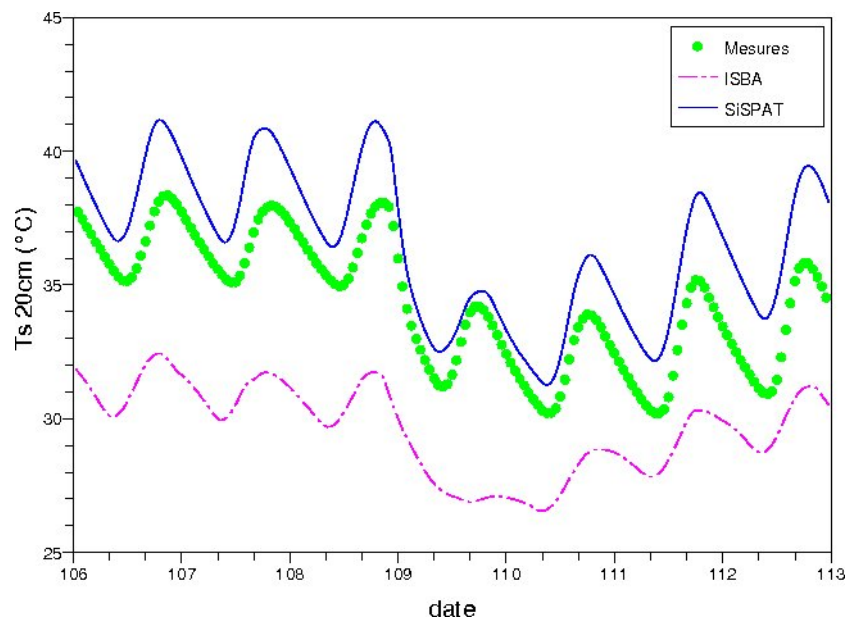


FIG. 3.13 – Température du sol à 20 cm de profondeur

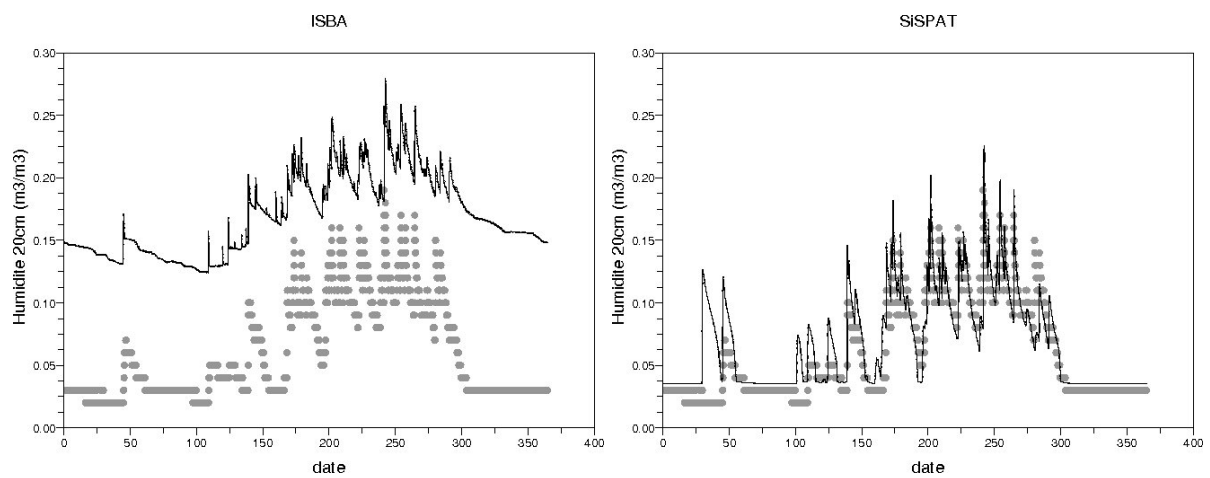


FIG. 3.14 – Humidité dans le sol à 20 cm de profondeur. Trait plein : valeurs simulées. Points : valeurs mesurées

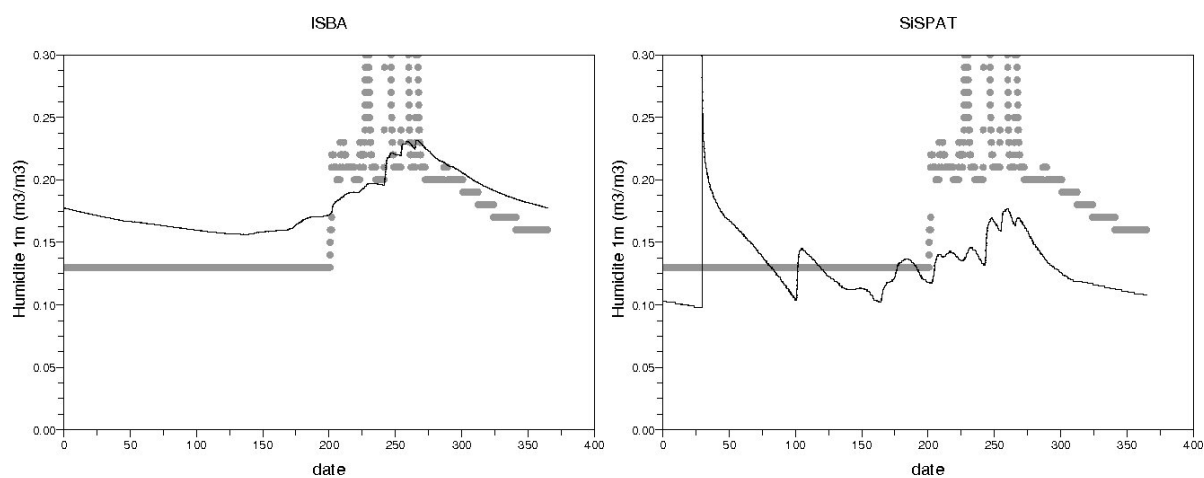


FIG. 3.15 – Humidité dans le sol à 1 m de profondeur. Trait plein : valeurs simulées. Points : valeurs mesurées

# Conclusion

Le travail effectué pendant ce stage a principalement permis de confronter les mesures effectuées en 2006 aux résultats de simulations utilisant deux modèles différents : ISBA et SiSPAT. D'une part, il faut bien renseigner le forçage atmosphérique. La première difficulté rencontrée a été de vérifier les données disponibles, et de retrouver les données manquantes. D'autre part, il est nécessaire de bien connaître la zone à modéliser : les caractéristiques du sol, de la surface et de la végétation. Ces caractéristiques peuvent avoir des répercussions importantes sur les résultats de modélisation, notamment sur le partitionnement de l'énergie disponible en surface entre le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente et le flux de chaleur dans le sol, ou sur l'infiltration de l'eau dans le sol.

Les deux modèles ne donnent pas les mêmes résultats. ISBA cacule la diffusion d'une couche à l'autre entre une couche de surface fine et très réactive, une couche racinaire et une couche profonde. Ce modèle semble bien reproduire le cycle annuel d'évapotranspiration (conservation de la masse) mais reproduit très mal les autres termes du bilan d'énergie : le rayonnement net, le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur dans le sol qui est calculé comme étant le résidu du bilan. SiSPAT est un modèle plus précis dans la description du sol, et différencie la température de la végétation de la température de l'air. Ce modèle ne respecte pas le bilan de masse et est particulièrement sensible aux courbes de rétention et de conductivité hydraulique. Il nécessite donc de nombreuses données pour être paramétré correctement. Toutefois, les premières simulations effectuées ont montré le bon potentiel de ce modèle pour simuler les températures et humidités dans le sol ainsi que les flux d'énergie (rayonnement net, flux de chaleur sensible et flux de chaleur dans le sol).

La première piste de travail à envisager pour poursuivre ce projet est donc de mieux soigner la caractérisation du milieu d'étude. En effet, les dernières simulations réalisées avec le modèle SiSPAT ont montré que la paramétrisation des courbes de rétention et de conductivité hydraulique a un impact important sur les résultats. Par la suite, on peut envisager reprendre ce travail sur les autres types de végétation présents à Nalohou : savanne arbustive et savanne arborée afin de pouvoir rendre compte de la dynamique globale du site. Ce travail pourra enfin permettre de reprendre les simulations pour les années suivantes où l'on possède également des données terrain (2007 et 2008) afin de valider la caractérisation du site d'étude.

# Bibliographie

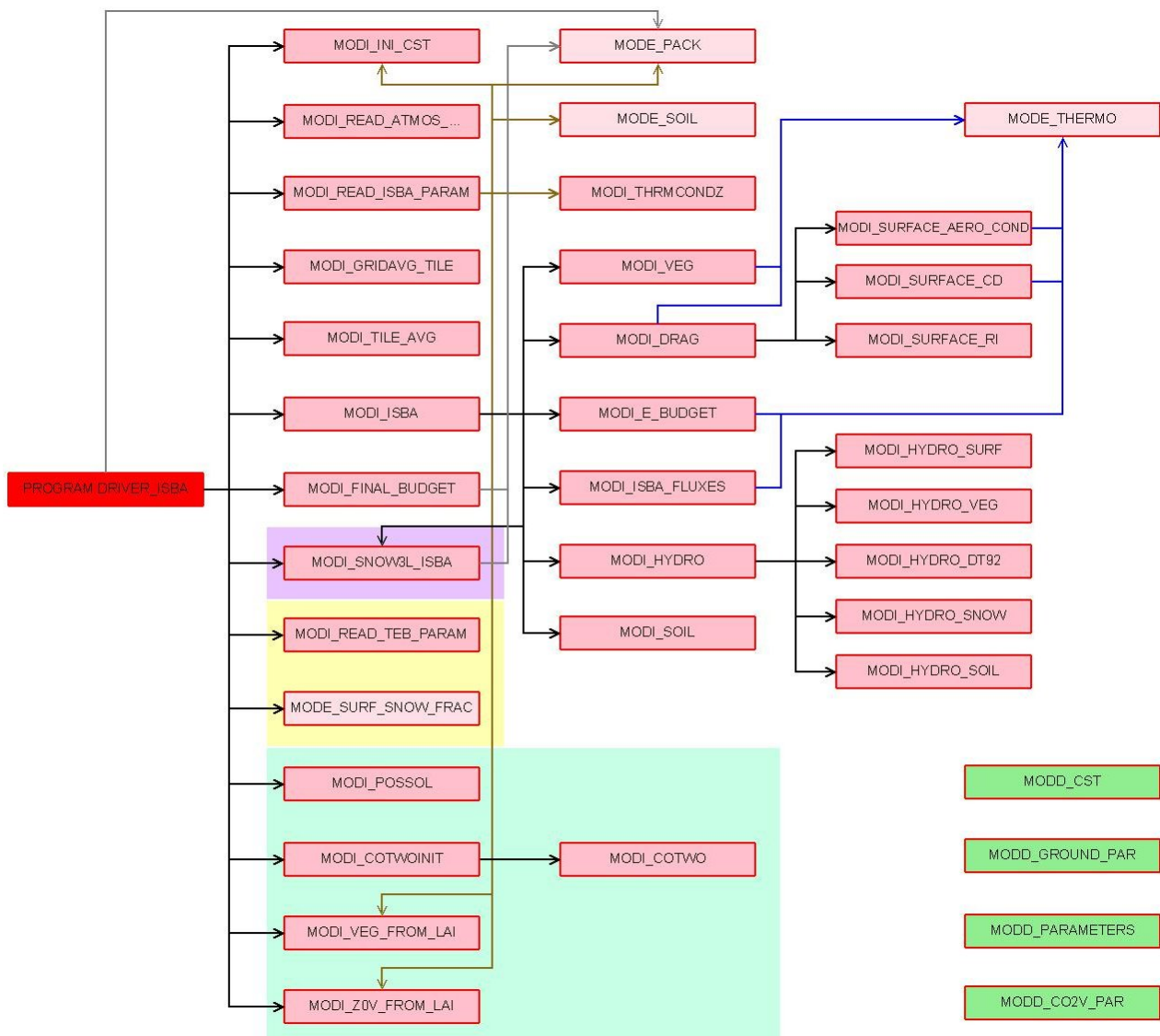
- [1] A. Boone, J.-C. Calvet, and J. Noilhan. Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force–restore method. *Journal of applied meteorology*, 38(11) :1611 – 1630, 1999.
- [2] I. Braud. *SiSPAT user’s manual (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model)*. *SiSPAT, a numerical model of water and energy fluxes in the soil-plant-atmosphere continuum*. LTHE, 3.0 edition, 2000.
- [3] I. Braud, P. Bessemoulin, B. Monteny, M. Sicot, J.-P. Vandervaere, and M. Vauclin. Unidimensional modelling of a fallow savannah during the hapex-sahel experiment using the sispat model. *Journal of Hydrology*, 188-189 :912 – 945, 1997. HAPEX-Sahel.
- [4] I. Braud, N. Varado, and A. Olioso. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. *Journal of Hydrology*, 301(1-4) :267 – 286, 2005.
- [5] J.-C. Calvet, J. Noilhan, J.-L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso, and J.-P. Wigneron. An interactive vegetation svat model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(2) :73 – 95, 1998.
- [6] J. G. Charney. Dynamics of deserts and drought in the sahel. *Quarterly Journal of the Royal Hydrological Society*, 101(428) :193–202, 1975.
- [7] A.C. Dantas-Antonino. *Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans le système sol-plante-atmosphère. Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques du sol*. PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble I, 1992.
- [8] D. de Condappa. ParamÉtrisation du bassin versant de la donga en vue de la modÉlisation avec power. 2006.
- [9] B. Decharme. *Développement et validation d’une modélisation hydrologique globale incluant les effets sous maille et la représentation des zones inondées*. PhD thesis, Université Toulouse III, 2005.
- [10] S. Galle. Rapport interne. 2007.
- [11] A. Guyot, J.-M. Cohard, S. Anquetin, and S. Galle. Three years of large aperture scintillometer measurements in west africa. European Geosciences Union, General Assembly, 2009.

- 
- [12] A. Guyot, J.-M. Cohard, S. Anquetin, S. Galle, and C. R. Lloyd. Combined analysis of energy and water balances to estimate latent heat flux of a sudanian small catchment. *Journal of Hydrology*, Article in press, 2009.
- [13] F. Habets, J. Noilhan, C. Golaz, J. P. Goutorbe, P. Lacarrère, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, C. Ottlé, and D. Vidal-Madjar. The isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the hapex-mobilhy area : Part i : Model and database. *Journal of Hydrology*, 217(1-2) :75 – 96, 1999.
- [14] T. Lebel, A. Diedhiou, A. Gaye, al., J.-L. Redelsperger, E. Van den Akker, F. Saïd, S. Janicot, L. Descroix, C. Peugeot, B. Cappelaere, S. Galle, and F. Timouk. Mousson africaine. *Sciences au Sud - Le journal de l'IRD*, (42), 2007.
- [15] J. Noilhan and J.-F. Mahfouf. The isba land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, 13(1-4) :145 – 159, 1996. Soil Moisture Simulation.
- [16] J. Noilhan and S. Planton. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117(3) :536 – 549, 1989.
- [17] D. Ramier, N. Boulain, B. Cappelaere, F. Timouk, M. Rabanit, C. R. Lloyd, S. Boubkraoui, F. Métayer, L. Descroix, and V. Wawrzyniak. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated sahel – 1. energy and water. *Journal of Hydrology*, Article in press, 2009.
- [18] F. Timouk, L. Kergoat, E. Mougin, C. R. Lloyd, E. Ceschia, J.-M. Cohard, P. de Rosnay, P. Hiernaux, V. Demarez, and C. M. Taylor. Response of heat and radiation fluxes to water regime and vegetation development in a sahelian landscape. *Journal of Hydrology*, Article in press, 2009.
- [19] N. Varado, I. Braud, and P.J. Ross. Development and assessment of an efficient vadose zone module solving the 1d richards' equation and including root extraction by plants. *Journal of Hydrology*, 323(1-4) :258 – 275, 2006.
- [20] I. Zin, M. Zribi, C. Ottlé, P. Hiernaux, R. Lacaze, S. Le Hégarat-Masclé, B. Sanou, C. André, S. Guibert, S. Saux-Picard, N. Dessay, N. Boulain, B. Cappelaere, L. Descroix, S. Galle, C. Peugeot, J. Seghieri, and L. Séguis. Land cover assessment on the three amma experimental sites from spot/hrvir data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Submitted, 2009.

# Annexes



# Organigramme d'ISBA simplifié pour les options utilisées





## Principaux paramètres d'entrée d'ISBA

### OPTIONS

=====

3-L            YISBA  
DEC           YTIME\_VEG  
NON           YPHOTO  
DT92          YRUNOFF  
DEF           YSOIL  
DEF           YRAIN  
GB93          YC1DRY  
NP89          YSCOND  
DEF           YDEEPF  
NO            YHYDRO  
DEF           YDIFSFCOND

### PARAMETRES DU MODELE

=====

Nature: 100%

Water: 0%

4 Tiles: - Tile1 (sol nu): 7%  
          - Tile2 (culture, jachere): 25%  
          - Tile3 (savane arbustive): 61%  
          - Tile4 (savane arboree): 7%

pas de temps de simulation: 5min

pas de temps du forçage: 30min

mesures de temperature, humidite, ... : a 2m

mesures du vent: a 2m

### SOL, FIXE

=====

	Tile1	Tile2	Tile3	Tile4
couche1	1cm	1cm	1cm	1cm
couche2	0.2m	0.5m	1m	2m
couche3	1m	1m	1m	5m

Clay (couche1) 16%    16%    16%    16%

ANNEXE B. PRINCIPAUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE D'ISBA

	(couche2)	16%	16%	16%	16%
	(couche3)	16%	16%	16%	16%
Sand	(couche1)	74%	74%	74%	74%
	(couche2)	74%	74%	74%	74%
	(couche3)	74%	74%	74%	74%

parametres prescrits:

capacite au champ (fc) pour chaque Tile  
 wsat pour chaque Tile  
 coeff C3  
 Tpro (-> temperature profonde variable)  
 GammaT (coeff de transfert de chaleur dans le sol)

parametres:

emissivite	0.94	0.97	0.97	0.97
runoffb	0.50	0.50	0.50	0.50
runoffd	0.2	0.5	1	2
Wdrain	0	0	0	0
Z0 relief	0.01	0.01	0.01	0.01

VEGETATION, FIXE

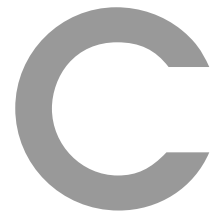
=====

Rsmin (resistance de surface min)	0	110	110	152
gamma (coeff intervenant dans la resistance de surface)	pr	0	0	0.04
rgl (coeff intervenant dans la resistance de surface)	pr	100	100	30
Cv (capacite calorifique de la vegetation)	pr	2e-5	2e-5	1e-5
wwilt (point de fletrissement) pour chaque couche	pr	pr	pr	pr
Z0_0_ZOH (longueur de rugosite moment/chaleur)	10	10	10	10
Wrmx_cf (coeff pour le max de capa. de stockage d'eau intercep.)	0.2	0.2	0.2	0.2
RootFrac (fraction racinaire) pour chaque couche	pr	pr	pr	pr

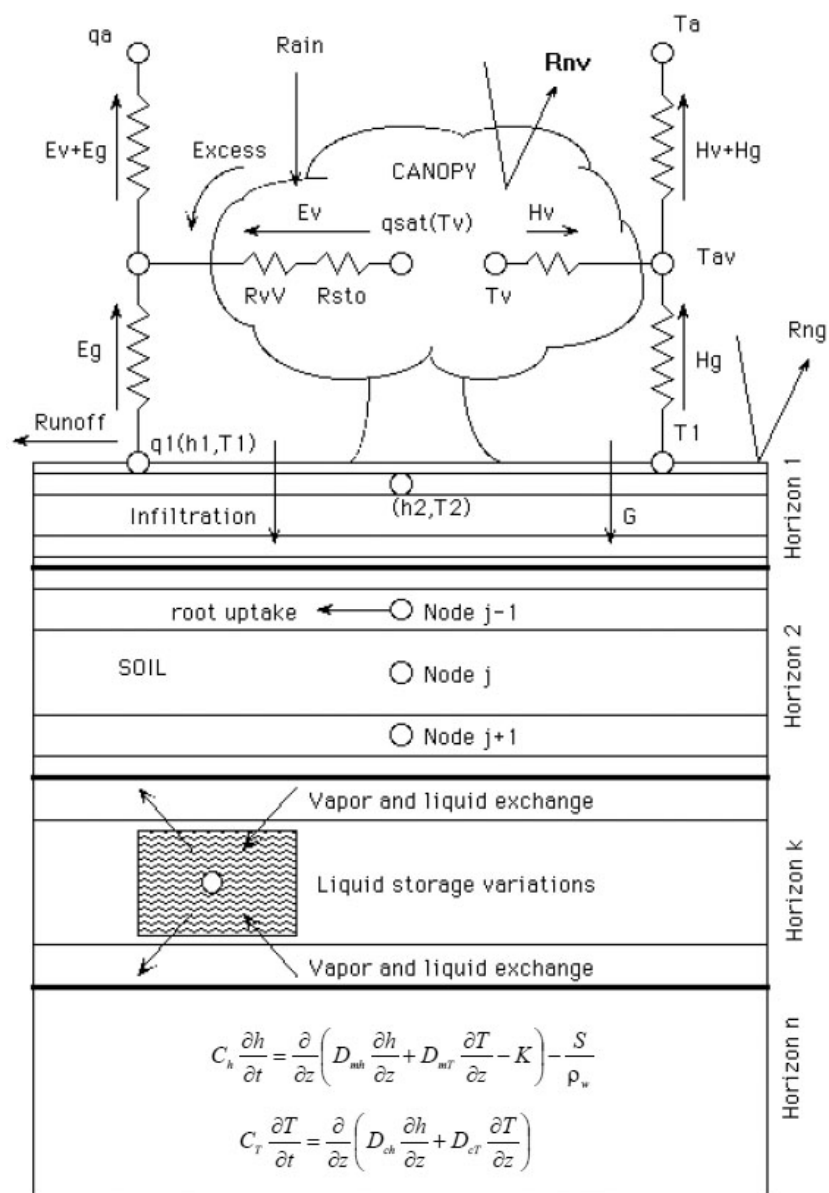
VEGETATION, VARIABLE

=====

Albedo (min)	0.200	0.121993	0.119431	0.162314
Albedo (max)	0.200	0.206082	0.179666	0.162314
LAI (min)	0	0.00000	0.10000	0.40000
LAI (max)	0	2.10000	2.60000	2.00000
VEG (min)	0	0.000000	0.045000	0.220000
VEG (max)	0	0.781421	0.843749	0.755128
Z0 (min)	0.03294	0.08070	0.88000	0.75600
Z0 (max)	0.13157	0.88000	0.88000	0.75600



## Schéma de SiSPAT





## Paramètres d'entrée de SiSPAT

nombre de couches= 3  
nombre total de noeuds= 187  
Nombre de noeuds par couche=  
couche 1 nbre de noeuds 47  
couche 2 nbre de noeuds 57  
couche 3 nbre de noeuds 83

Profondeurs des noeuds=

noeud	1	profondeur	0.0000E+00
noeud	2	profondeur	0.1175E-02
noeud	3	profondeur	0.2643E-02
noeud	4	profondeur	0.4478E-02
noeud	5	profondeur	0.6773E-02
noeud	6	profondeur	0.9640E-02
noeud	7	profondeur	0.1323E-01
noeud	8	profondeur	0.1771E-01
noeud	9	profondeur	0.2331E-01
noeud	10	profondeur	0.3031E-01
noeud	11	profondeur	0.3906E-01
noeud	12	profondeur	0.5000E-01
noeud	13	profondeur	0.6200E-01
noeud	14	profondeur	0.7400E-01
noeud	15	profondeur	0.8600E-01
noeud	16	profondeur	0.9800E-01
noeud	17	profondeur	0.1100E+00
noeud	18	profondeur	0.1220E+00
noeud	19	profondeur	0.1340E+00
noeud	20	profondeur	0.1460E+00
noeud	21	profondeur	0.1580E+00
noeud	22	profondeur	0.1700E+00
noeud	23	profondeur	0.1820E+00
noeud	24	profondeur	0.1940E+00
noeud	25	profondeur	0.2060E+00
noeud	26	profondeur	0.2180E+00
noeud	27	profondeur	0.2300E+00
noeud	28	profondeur	0.2420E+00
noeud	29	profondeur	0.2540E+00
noeud	30	profondeur	0.2660E+00

noeud	31	profondeur	0.2780E+00
noeud	32	profondeur	0.2900E+00
noeud	33	profondeur	0.3020E+00
noeud	34	profondeur	0.3140E+00
noeud	35	profondeur	0.3260E+00
noeud	36	profondeur	0.3380E+00
noeud	37	profondeur	0.3500E+00
noeud	38	profondeur	0.3609E+00
noeud	39	profondeur	0.3697E+00
noeud	40	profondeur	0.3767E+00
noeud	41	profondeur	0.3823E+00
noeud	42	profondeur	0.3868E+00
noeud	43	profondeur	0.3904E+00
noeud	44	profondeur	0.3932E+00
noeud	45	profondeur	0.3955E+00
noeud	46	profondeur	0.3974E+00
noeud	47	profondeur	0.3988E+00
noeud	48	profondeur	0.4000E+00
noeud	49	profondeur	0.4012E+00
noeud	50	profondeur	0.4026E+00
noeud	51	profondeur	0.4045E+00
noeud	52	profondeur	0.4068E+00
noeud	53	profondeur	0.4096E+00
noeud	54	profondeur	0.4132E+00
noeud	55	profondeur	0.4177E+00
noeud	56	profondeur	0.4233E+00
noeud	57	profondeur	0.4303E+00
noeud	58	profondeur	0.4391E+00
noeud	59	profondeur	0.4500E+00
noeud	60	profondeur	0.4929E+00
noeud	61	profondeur	0.5357E+00

---

noeud	62	profondeur	0.5786E+00	noeud	119	profondeur	0.2245E+01
noeud	63	profondeur	0.6214E+00	noeud	120	profondeur	0.2310E+01
noeud	64	profondeur	0.6643E+00	noeud	121	profondeur	0.2375E+01
noeud	65	profondeur	0.7071E+00	noeud	122	profondeur	0.2440E+01
noeud	66	profondeur	0.7500E+00	noeud	123	profondeur	0.2505E+01
noeud	67	profondeur	0.7929E+00	noeud	124	profondeur	0.2570E+01
noeud	68	profondeur	0.8357E+00	noeud	125	profondeur	0.2635E+01
noeud	69	profondeur	0.8786E+00	noeud	126	profondeur	0.2700E+01
noeud	70	profondeur	0.9214E+00	noeud	127	profondeur	0.2765E+01
noeud	71	profondeur	0.9643E+00	noeud	128	profondeur	0.2830E+01
noeud	72	profondeur	0.1007E+01	noeud	129	profondeur	0.2895E+01
noeud	73	profondeur	0.1050E+01	noeud	130	profondeur	0.2960E+01
noeud	74	profondeur	0.1093E+01	noeud	131	profondeur	0.3025E+01
noeud	75	profondeur	0.1136E+01	noeud	132	profondeur	0.3090E+01
noeud	76	profondeur	0.1179E+01	noeud	133	profondeur	0.3155E+01
noeud	77	profondeur	0.1221E+01	noeud	134	profondeur	0.3220E+01
noeud	78	profondeur	0.1264E+01	noeud	135	profondeur	0.3285E+01
noeud	79	profondeur	0.1307E+01	noeud	136	profondeur	0.3350E+01
noeud	80	profondeur	0.1350E+01	noeud	137	profondeur	0.3415E+01
noeud	81	profondeur	0.1393E+01	noeud	138	profondeur	0.3480E+01
noeud	82	profondeur	0.1436E+01	noeud	139	profondeur	0.3545E+01
noeud	83	profondeur	0.1479E+01	noeud	140	profondeur	0.3610E+01
noeud	84	profondeur	0.1521E+01	noeud	141	profondeur	0.3675E+01
noeud	85	profondeur	0.1564E+01	noeud	142	profondeur	0.3740E+01
noeud	86	profondeur	0.1607E+01	noeud	143	profondeur	0.3805E+01
noeud	87	profondeur	0.1650E+01	noeud	144	profondeur	0.3870E+01
noeud	88	profondeur	0.1693E+01	noeud	145	profondeur	0.3935E+01
noeud	89	profondeur	0.1736E+01	noeud	146	profondeur	0.4000E+01
noeud	90	profondeur	0.1779E+01	noeud	147	profondeur	0.4065E+01
noeud	91	profondeur	0.1821E+01	noeud	148	profondeur	0.4130E+01
noeud	92	profondeur	0.1864E+01	noeud	149	profondeur	0.4195E+01
noeud	93	profondeur	0.1907E+01	noeud	150	profondeur	0.4260E+01
noeud	94	profondeur	0.1950E+01	noeud	151	profondeur	0.4325E+01
noeud	95	profondeur	0.1961E+01	noeud	152	profondeur	0.4390E+01
noeud	96	profondeur	0.1970E+01	noeud	153	profondeur	0.4455E+01
noeud	97	profondeur	0.1977E+01	noeud	154	profondeur	0.4520E+01
noeud	98	profondeur	0.1982E+01	noeud	155	profondeur	0.4585E+01
noeud	99	profondeur	0.1987E+01	noeud	156	profondeur	0.4650E+01
noeud	100	profondeur	0.1990E+01	noeud	157	profondeur	0.4715E+01
noeud	101	profondeur	0.1993E+01	noeud	158	profondeur	0.4780E+01
noeud	102	profondeur	0.1996E+01	noeud	159	profondeur	0.4845E+01
noeud	103	profondeur	0.1997E+01	noeud	160	profondeur	0.4910E+01
noeud	104	profondeur	0.1999E+01	noeud	161	profondeur	0.4975E+01
noeud	105	profondeur	0.2000E+01	noeud	162	profondeur	0.5040E+01
noeud	106	profondeur	0.2001E+01	noeud	163	profondeur	0.5105E+01
noeud	107	profondeur	0.2003E+01	noeud	164	profondeur	0.5170E+01
noeud	108	profondeur	0.2004E+01	noeud	165	profondeur	0.5235E+01
noeud	109	profondeur	0.2007E+01	noeud	166	profondeur	0.5300E+01
noeud	110	profondeur	0.2010E+01	noeud	167	profondeur	0.5365E+01
noeud	111	profondeur	0.2013E+01	noeud	168	profondeur	0.5430E+01
noeud	112	profondeur	0.2018E+01	noeud	169	profondeur	0.5495E+01
noeud	113	profondeur	0.2023E+01	noeud	170	profondeur	0.5560E+01
noeud	114	profondeur	0.2030E+01	noeud	171	profondeur	0.5625E+01
noeud	115	profondeur	0.2039E+01	noeud	172	profondeur	0.5690E+01
noeud	116	profondeur	0.2050E+01	noeud	173	profondeur	0.5755E+01
noeud	117	profondeur	0.2115E+01	noeud	174	profondeur	0.5820E+01
noeud	118	profondeur	0.2180E+01	noeud	175	profondeur	0.5885E+01

---

noeud 176	profondeur	0.5950E+01	noeud 182	profondeur	0.5990E+01
noeud 177	profondeur	0.5961E+01	noeud 183	profondeur	0.5993E+01
noeud 178	profondeur	0.5970E+01	noeud 184	profondeur	0.5996E+01
noeud 179	profondeur	0.5977E+01	noeud 185	profondeur	0.5997E+01
noeud 180	profondeur	0.5982E+01	noeud 186	profondeur	0.5999E+01
noeud 181	profondeur	0.5987E+01	noeud 187	profondeur	0.6000E+01

couche numero 1

Proprietes hydrodynamiques

porosite= 0.4000  
coefficients de la formule de Van Genuchten Burdine  
hg= -0.7000 q= 3.0000 m= 0.3333  
Teneur en eau a saturation= 0.3000cm3//cm3  
point de fletrissement= 0.0360cm3/cm3

coefficients de la formule de Van Genuchten modifiée sec  
hg2=-3690.0000 q2= 2.0470 m2= 0.0230  
Pression limite entre portions= -100.0000m  
Pression limite sèche= -60000.0000

conductivite hydraulique Brooks Corey=  
K(theta)= 0.10000E-04\*(theta/thetasat)\*\* 8.00  
Teneur en eau residuelle= 0.0350

Proprietes thermiques

Teneur en eau critique= 0.0150cm3/cm3  
Teneur en quartz= 0.8200o/o  
Teneur en autres mineraux= 0.1700o/o  
Teneur en matiere organique= 0.0100o/o  
Capacite thermique volumique seche= 0.16000E+07J/m3/K  
Temperature de reference de h(theta)= 0.0000K  
Parametre vch de dependance h(T)= 0.000E+00K-1

Modèle de De Vries pour la conductivité thermique

couche numero 2

Proprietes hydrodynamiques

porosite= 0.4500  
coefficients de la formule de Van Genuchten Burdine  
hg= -0.5000 q= 2.6000 m= 0.2308  
Teneur en eau a saturation= 0.3500cm3//cm3  
point de fletrissement= 0.1480cm3/cm3

coefficients de la formule de Van Genuchten modifiée sec  
hg2=-4000.0000 q2= 2.1115 m2= 0.0528  
Pression limite entre portions= -50.0000m  
Pression limite sèche= -60000.0000

conductivite hydraulique Brooks Corey=  
K(theta)= 0.50000E-05\*(theta/thetasat)\*\* 9.00  
Teneur en eau residuelle= 0.0800

Proprietes thermiques

Teneur en eau critique= 0.0150cm3/cm3  
 Teneur en quartz= 0.6200o/o  
 Teneur en autres minerais= 0.3700o/o  
 Teneur en matiere organique= 0.0100o/o  
 Capacite thermique volumique seche= 0.16000E+07J/m3/K  
 Temperature de reference de h(theta)= 0.0000K  
 Parametre vch de dependance h(T)= 0.000E+00K-1

Modèle de De Vries pour la conductivité thermique

couche numero 3

Proprietes hydrodynamiques

porosite= 0.3000  
 coefficients de la formule de Van Genuchten Burdine  
 hg= -0.7000 q= 3.0000 m= 0.3333  
 Teneur en eau a saturation= 0.2500cm3//cm3  
 point de fletrissement= 0.0360cm3/cm3

coefficients de la formule de Van Genuchten modifiée sec

hg2= -435.0000 q2= 2.0470 m2= 0.0230  
 Pression limite entre portions= -100.0000m  
 Pression limite sèche= -60000.0000

conductivite hydraulique Brooks Corey=

K(theta)= 0.50000E-05\*(theta/thetasat)\*\* 6.00  
 Teneur en eau residuelle= 0.0500

Proprietes thermiques

Teneur en eau critique= 0.0150cm3/cm3  
 Teneur en quartz= 0.8200o/o  
 Teneur en autres minerais= 0.1700o/o  
 Teneur en matiere organique= 0.0100o/o  
 Capacite thermique volumique seche= 0.16000E+07J/m3/K  
 Temperature de reference de h(theta)= 0.0000K  
 Parametre vch de dependance h(T)= 0.000E+00K-1

Modèle de De Vries pour la conductivité thermique

Résolution des équations couplées demasse et de chaleur  
 Hauteur de surface maxi 5.000000000000000E-003 m

Caracteristiques de la vegetation

Nombre de jours de mesures de LAI et zf= 37  
 Potentiel foliaire critique= -0.14000E+03m  
 Resistance stomatique minimale= 110.0000s  
 Resistance stomatique maximale= 5000.0000s  
 Resistance totale de la plante= 0.3200E+13s/m racine  
 Parametre de la fonction de stress de D= 0.2500E-03Pa-1  
 Taux de couverture de la vegetation= 1.0000

Jour	LAI	hveg	Albedo				
				41	0.1230	0.4000	0.2300
1	0.0030	0.4000	0.2200	51	0.1530	0.4000	0.1800
11	0.0330	0.4000	0.2100	61	0.1830	0.4000	0.1800
21	0.0630	0.4000	0.2300	71	0.2130	0.4000	0.2300
31	0.0930	0.4000	0.2200	81	0.2430	0.4000	0.2200

91	0.2730	0.4000	0.2300	231	1.9080	0.7290	0.1700
101	0.3030	0.4000	0.2200	241	2.1000	0.7170	0.1800
111	0.3330	0.4000	0.1700	251	2.1000	0.8390	0.2100
121	0.3630	0.4000	0.1700	261	2.1000	1.2500	0.1600
131	0.3930	0.4000	0.1700	271	1.9500	1.2260	0.1600
141	0.4230	0.4000	0.1500	281	1.4500	1.1930	0.1600
151	0.4680	0.4000	0.1600	291	0.9500	1.1500	0.1500
161	0.6480	0.4000	0.1600	301	0.4500	1.5370	0.1500
171	0.8280	0.4000	0.1600	311	0.0150	1.4000	0.1500
181	1.0080	0.4630	0.1700	321	0.0150	1.4000	0.1500
191	1.1880	0.5880	0.1700	331	0.0150	1.4000	0.1500
201	1.3680	0.7130	0.1600	341	0.0150	0.4000	0.1600
211	1.5480	0.8000	0.1700	351	0.0150	0.4000	0.1700
221	1.7280	0.7850	0.1700	361	0.0150	0.4000	0.1700

## Profondeurs caracteristiques du systeme racinaire

Jour zri (m)	zrm1 (m)	zrm2 (m)	zrpm	zrt	pmr	drmax (m rac/m3sol)	
527	0.0300	0.0500	0.1500	0.7000	0.6400	1.6500	10000.0000

## Caracteristiques des donnees climatiques

Nombre d'observations=17520

Pas de temps des obs= 1800.0000 s

Hauteur de mesure de la temperature et de l'humidite de l'air= 2.0000 m

Hauteur de mesure du vent= 2.0000 m

Pression atmospherique= 0.9610E+05 Pa

## d et zom brutsaert

izoh=0 zoh=zom/rapzoh 10.0000

Resistances Shuttleworth et Wallace

Albedo végétation= 0.2200

Emissivité végétation= 0.9600

Albedo sol recalculée pour respecter l'albedo totale

Emissivité sol fonction humidité

Coefficient d'extinction de sigmaf= 0.5000

Depart de l'integration le 1 1 2006 a 0.00 Heure 0.00 Minute

Longitude= 1.6000 degrees

Latitude= 9.7400 degrees

## CONDITIONS LIMITE

## Flux de masse et de chaleur imposes en surface

Flux impose au dernier noeud= 0.0000

Temperature sinusoidale au fondmoyenne=28.120C amplitude= 0.000C phase=158.890