

Mémoire de stage M2R

Université Joseph Fourier - Grenoble 1
Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
Master 2 Recherche Sciences de la Terre et de l'Environnement
Spécialité Océan Atmosphère Hydrologie Génie de l'Environnement

Modélisation simplifiée de la redistribution de l'eau sur un versant au Bénin Sensibilité aux caractéristiques du sol et à la végétation



Aloïs RICHARD

Tutrice de stage : Sylvie GALLE



Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
Année 2009 - 2010

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont permis de réaliser ce stage.

Mes premiers remerciements vont à ma tutrice Sylvie Galle. Je lui suis reconnaissant pour son investissement, sa persévérance et ses éclairages multiples. Je la remercie de m'avoir guidé dans l'appréhension des processus hydrologiques en zone subtropicale.

Je remercie tous les membres du LTHE et en particulier les membres du bâtiment G pour leur accueil, leur dynamisme, leur bonne humeur, leur soutien. Je pense en particulier à Cédric Legout, Dorothée Robert, Théo Vischel, Isabella Zin, Laurent Bonnifait, Renaud Marty, Eric Jabot, Guillaume Quantin et Aurélien Claude. Ils m'ont appris, expliqué, guidé, conseillé, assisté, expliqué de nouveau, montré, et laissé réfléchir. Ils ont pris du temps pour moi et je les en remercie.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont travaillé à l'obtention des mesures de terrain au Bénin. Je pense en particulier à Simon, Théo, Maxime.

Les données nécessaires à cette étude ont été obtenues dans le cadre de l'Observatoire AMMA-CATCH. Je remercie Luc Séguis, Adrien Guyot, Jean-Martial Cohard pour m'avoir transmis les données dont ils disposaient.

Finalement, je tiens à mentionner mes camarades Adrien et Pierre avec qui j'ai partagé des moments de doutes, de réflexions et d'évasion.

Résumé

Durant les années 1970-1980, l'Afrique de l'Ouest a connu une période de sécheresse généralisée qui fut le plus significatif des événements climatiques régionaux du 20^{ème} siècle. Le programme de recherche de l'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) vise à mieux comprendre la mousson et sa variabilité, dans un contexte de changement climatique. Sur le site d'étude situé en zone soudanienne, les recherches ont montré l'importance de mieux connaître les échanges hydriques entre la nappe phréatique et l'atmosphère. Dans ce contexte, l'étude propose une modélisation bidimensionnelle simplifiée de la zone non saturée d'un versant du bassin de la Donga (Bénin). Les mesures disponibles sur ce versant sont les précipitations, l'évapotranspiration, la teneur en eau, la succion et la profondeur de nappe à différents niveaux du versant. Le modèle numérique employé est Hydrus. Les simulations réalisées montrent une bonne adéquation avec les observations de terrain. Les principaux processus d'échanges sont correctement simulés. Une étude de sensibilité est réalisée sur la conductivité hydraulique du sol et sa distribution en profondeur et sur le type de couvert végétal. Une Analyse en Composantes Principales (ACP) des simulations montre le caractère prédominant du type de végétation pour la zone saturée et son influence de deuxième ordre pour la zone non saturée. La conductivité hydraulique est prédominante pour la zone non saturée mais n'influence pas la nappe. C'est actuellement le manque de connaissances sur la végétation qui entraîne les plus importantes incertitudes pour la modélisation du versant.

Abstract

During the 1970 and 1980 decades, West Africa was affected by a generalised drought which was the most significant regional climatic event of the 20th century. In a climate change context, the aim of the international AMMA program (African Monsoon Multidisciplinary Analyses) is to enhance the understanding of the monsoon mechanisms and their variability. On the Soudanian study site, former works have underlined the importance of a better understanding of the water transfer between groundwater and atmosphere. In this context, we propose a simplified bidimensionnal modelisation of a toposequence of the Donga watershed (Benin). The selected software is Hydrus. The results show that the model representation of the lateral distribution of water is quite realistic. The main exchange processes are well-simulated. We study the model sensibility to the hydraulics conductivity, its spatial distribution and the type of vegetation. As results of a Principal Component Analysis (PCA), the vegetation parameter is the most important one considering the groundwater dynamics. Within the vadoze zone, the vegetation parameter is the second order explaining factor. The hydraulics conductivity value is the most important parameter for the vadose zone dynamics but its value does not make an impact on the groundwater level. At the moment, the largest uncertainties on the hydrodynamics modelisation are due to the lack of knowledge on vegetation parameters.

Table des matières

Introduction	1
1 Contexte d'étude	2
1.1 Le programme AMMA	2
1.2 Compréhension du bilan hydrologique de la Donga	3
1.3 Contexte géographique et climatique de la Donga	4
1.4 Toposéquence étudiée	5
2 Dispositif expérimental sur la toposéquence	6
2.1 Instrumentation	6
2.2 Caractéristiques pédologiques	7
2.3 Caractéristiques hydrodynamiques	8
3 Modélisation numérique	10
3.1 Objectifs de la modélisation	10
3.2 Le logiciel Hydrus	11
4 Démarche et essais	13
4.1 Période de simulation	13
4.2 Hypothèses et schématisation	13
4.3 Conditions initiales	15
4.4 Conditions aux limites	15
4.5 Qualité du modèle	16
4.6 Etat de référence	17
4.7 Etude de sensibilité	18
5 Résultats et discussion	21
5.1 Analyse de la simulation de référence	21
5.2 Analyse en Composantes Principales	25
5.3 Discussion	26
Conclusion et perspectives	29
Bibliographie	32
A Instrumentation du programme AMMA	i
B Positions des capteurs sur le versant	ii
C Environnement de simulation Hydrus	iii
D Post-traitement avec le code R	v
E Visualisation de la configuration Hydrus	vii
F Modèle hydrodynamique du sol	ix

G ACP par position sur le versant	xi
H Evolutions temporelles des variables simulées	xiv
Symboles et abréviations	xvi
Table des figures	xix
Liste des tableaux	xx

Introduction

Le suivi hydrologique intense du bassin de la Donga (Bénin), possible grâce à l'Observatoire AMMA-CATCH, a permis de quantifier les transferts hydriques entre les différents réservoirs du cycle hydrologique. Les récentes avancées sur la compréhension des processus hydrologiques de cette zone à climat soudanien ont orientées les recherches vers une analyse des interactions entre la nappe phréatique et l'atmosphère. Or, malgré une relativement bonne connaissance du versant en tant que support au cycle hydrologique, la redistribution latérale de l'eau au sein du versant reste peu connue. Cette étude cherche à savoir si l'analyse de la zone non saturée, en tant que zone d'échanges, et sa redistribution hydrique à l'échelle du versant nous renseigne sur l'interaction entre la nappe et l'atmosphère. De plus, le versant est une unité fonctionnelle simple qui possède l'avantage d'intégrer la totalité des termes du bilan hydrologique. Une étape préalable à une telle démarche est la détermination des éléments nécessaires à une modélisation correcte des différents termes du bilan hydrologique (niveau de la nappe, évapotranspiration, débits du cours d'eau).

L'objectif de cette étude est de modéliser la redistribution spatiale de l'eau au sein du versant pour améliorer la compréhension des processus la régissant. Notre démarche s'appuie sur des observations pédologiques et hydrodynamiques du sol, sur le suivi de la dynamique végétale et celle de l'évolution des termes du bilan hydrologique au cours du temps, pour extraire les caractéristiques du système qui ont un impact fort sur l'hydrodynamique du versant. Pour cela nous utilisons la modélisation numérique et effectuons une étude de sensibilité du modèle à quelque uns des paramètres de celui-ci grâce à une Analyse en Composantes Principales.

Dans un premier temps, nous donnerons un bref aperçu de la compréhension actuelle des processus qui gouvernent le système hydrologique de la zone soudanienne de la Donga. Puis nous décrirons l'ensemble des dispositifs déployés sur le versant de Nalohou (site d'étude) pour la mesure des termes du bilan hydrologique et particulièrement ceux mis en place pour la compréhension de l'hydrodynamique du versant. Dans une troisième partie, nous détaillerons les caractéristiques du modèle numérique employé pour cette étude. Ensuite nous énoncerons les hypothèses nécessaires à la modélisation numérique ainsi que la démarche suivie pour analyser nos résultats. Finalement, dans une cinquième partie, nous présenterons les principaux résultats de cette étude et nous réaliserons un bilan de ce travail.

Chapitre 1

Contexte d'étude

1.1 Le programme AMMA

Durant les années 1970-1980, l'Afrique de l'Ouest a connue une période de sécheresse généralisée qui fut le plus significatif des événements climatiques régionaux du 20^{ème} siècle. Le déficit pluviométrique annuel moyen de ces années par rapport à celui de la période 1950-1969 est d'environ 200 mm au Sahel [Lebel et al., 2009] et 140 mm en climat soudanien.

Le programme de recherche AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) est issu principalement, de la motivation à comprendre ce processus climatique régional et ses variations. Il s'est bâti sur une double ambition, scientifique et sociétale. Le programme a pour objectif d'améliorer la connaissance et la compréhension de la mousson d'Afrique de l'Ouest. Or une meilleure prévision des composantes de cette mousson serait bénéfique aux populations locales dans un contexte de forte pression démographique où l'on constate une dégradation des sols, la raréfaction des ressources en eau, la résurgence ou le renforcement de certaines endémies et épidémies. AMMA s'attache à l'analyse des interactions entre les systèmes atmosphériques, océaniques et terrestres de l'échelle journalière à l'échelle interannuelle [Redelsperger et al., 2006]. Une vue d'ensemble du dispositif AMMA est donnée en annexe A.

L'observatoire AMMA-CATCH¹ est la composante du programme qui comprend l'observation et l'analyse du cycle hydrologique. AMMA-CATCH se focalise sur trois sites de méso-échelle disposés selon un gradient eco-climatique, installés au Mali, au Niger et au Bénin. La période d'observation du programme AMMA a commencée en 2001 et se poursuit actuellement. Une phase d'observations renforcées destinées à la compréhension des processus a eu lieu de 2005 à 2007 [Lebel et al., 2009].

La communauté scientifique de AMMA possède une bonne connaissance des processus physiques dans la zone sahélienne. Pour la zone soudanienne, l'étude des processus reste un axe de recherche actuel. De plus, les scientifiques de AMMA cherchent à développer des études inter-sites ; extrapoler les connaissances hydrologiques des sites de méso-échelles à l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest.

1. Couplage de L'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

1.2 Compréhension du bilan hydrologique de la Donga

Cette étude est réalisée au sein du site béninois de l'Observatoire AMMA-CATCH, sur le bassin de la Donga. Ce bassin hydrographique, de 584 km², a fait l'objet de nombreuses études hydrologiques. Les précipitations, en tant qu'apport hydrique à la surface terrestre, ont toujours fait l'objet d'une attention particulière sur le bassin de la Donga. Les estimations du bilan hydrologique ont été réalisées grâce à plusieurs modèles dont REW [Varado et al., 2006] ou TOPAMMA [Le Lay et al., 2008]. Ce dernier est une adaptation de TOPMODEL au contexte Ouest africain de AMMA. Dans un premier temps, le choix a volontairement été orienté vers des modèles simplifiés dans l'optique d'une bonne représentation des débits en rivière et d'une adaptation aux données disponibles. Ces études se sont appuyées sur l'ensemble des instruments de mesures permanents de l'observatoire disponible à l'époque (piézomètres, limnigraphes, pluviomètres)(figure 1.1). Le Lay [Le Lay et al., 2008] a conjecturé une déconnexion entre la nappe phréatique et le cours d'eau pour simuler correctement les débits en rivière. Kamagaté a confirmé cette hypothèse par un suivi géochimique des eaux de pluies, du sol, de la nappe et de la rivière [Kamagaté et al., 2007]. La question posée suite à ces travaux est de savoir quels sont les processus d'alimentation et de vidange de la nappe phréatique qui présente un cycle annuel marqué. Les études des processus hydrologiques sur la Donga se sont alors tournées vers une meilleure estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle et du versant. La variation du stock d'eau dans le sol à l'échelle du bassin versant est le dernier élément du bilan hydrologique qu'il reste à déterminer. A l'heure actuelle, les points bloquants identifiés sur le site béninois portent sur la compréhension des liens entre l'évapotranspiration et le cycle annuel de l'eau du sol. Sa modélisation nécessite, outre la mesure de l'ensemble des termes du bilan, une caractérisation des paramètres qui la déterminent. L'objectif de ce mémoire est d'analyser ce lien à l'échelle du versant.

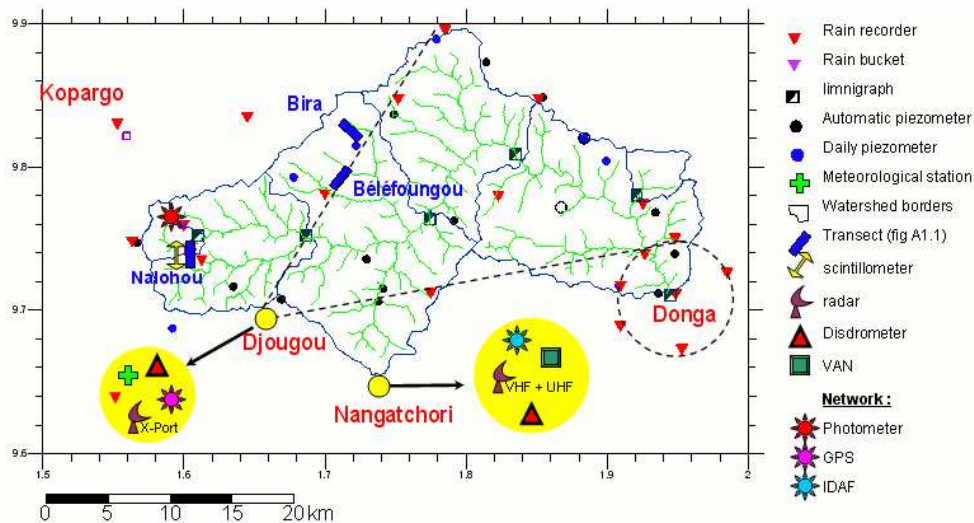


FIGURE 1.1 – Carte de l'instrumentation du bassin de la Donga

1.3 Contexte géographique et climatique de la Donga

1.3.1 Précipitations

Le bassin de la Donga possède un climat soudanien. Les saisons sèches et pluvieuses sont contrastées. La saison des pluies dure environ 8 mois mais 60% des précipitations annuelles sont observées entre le mois de juillet et le mois de septembre (voir figure 1.2). En saison des pluies, les précipitations convectives sont intenses. Les cumuls annuels de précipitations des périodes 1950-1969 et 1970-1989 sont significativement différents avec un écart de 130 mm soit 10%². Cette diminution fut observée plus largement à l'échelle régionale [Le Barbé et al., 2002]. Le cumul annuel moyen pour la décennie 2000-2009 est remonté à 1300 mm. Toutefois les années sont très contrastées, l'écart entre le cumul annuel maximum et le cumul annuel minimum de cette décennie atteint 700 mm. L'année 2006 est l'année de la décennie qui possède le cumul annuel minimal à Djougou (1005 mm).

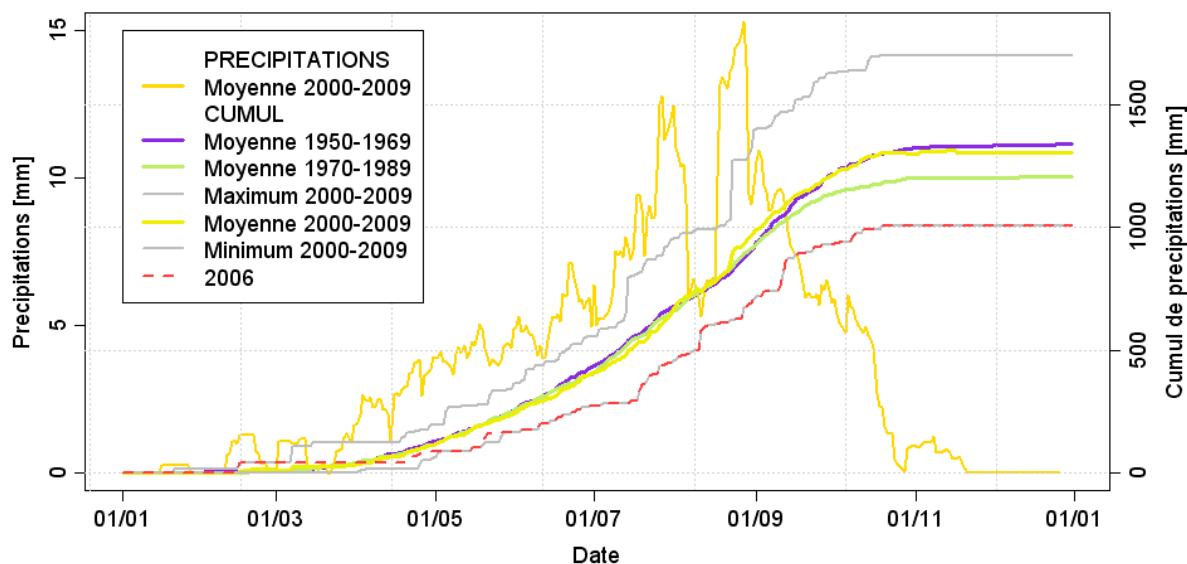


FIGURE 1.2 – Précipitations annuelles à Djougou

1.3.2 Evapotranspiration

La chaleur sensible est mesurée par scintillométrie infra-rouge *LAS*³ et par *Eddy correlation (EC)*. Couplée à l'analyse du bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère, elle permet une estimation du terme d'évapotranspiration (chaleur latente). Cette approche a permis d'estimer à 85% la part des précipitations annuelles qui retournent dans l'atmosphère par évapotranspiration pour l'année 2008 [Guyot, 2010], seule année complète actuellement. Guyot [Guyot, 2010] et Mamadou [Mamadou, 2009] ont montré que durant la saison des pluies l'évapotranspiration réelle ET_r est pratiquement égale à l'évapotranspiration de référence ET_0 ce qui signifie que les plantes trouvent suffisamment d'eau et ne sont limitées que par la

2. Pour les données chiffrées, nous utilisons celles de la ville de Djougou située au Sud-Ouest du bassin (figure 1.1).

3. *Large Aperture Scintillometer*

capacité évaporative de l'atmosphère durant cette période.

1.3.3 Occupation des sols et végétation

L'analyse de clichés satellite de la région, réalisée par I. Zin (communication personnelle), a permis de dresser une carte d'occupation des sols du bassin de la Donga en 2006. Cette analyse distingue cinq classes d'occupation des sols de densité d'arbres croissante : sols nus et villes, cultures, savanes arbustives, savanes arborées, forêts. La superficie de sols non anthropisés est estimée à 69% (figure 1.3). Néanmoins, dans un contexte de pression anthropique, la proportion des surfaces cultivées augmente régulièrement par défrichage des forêts.

L'analyse de photographies hémisphériques de la végétation sur quatre faciès du bassin a permis d'estimer l'évolution annuelle de l'indice foliaire (LAI^4) de végétaux caractéristiques du bassin versant en 2006 [Blanchard, 2007]. On distingue les herbacées annuelles qui se développent avec les pluies et chutent rapidement en fin de saison, et les arbres qui ont une activité stable au cours de l'année, baissent en décembre-janvier. La savane boisée et la savane arbustive sont composées d'un mélange d'herbes et d'arbres.

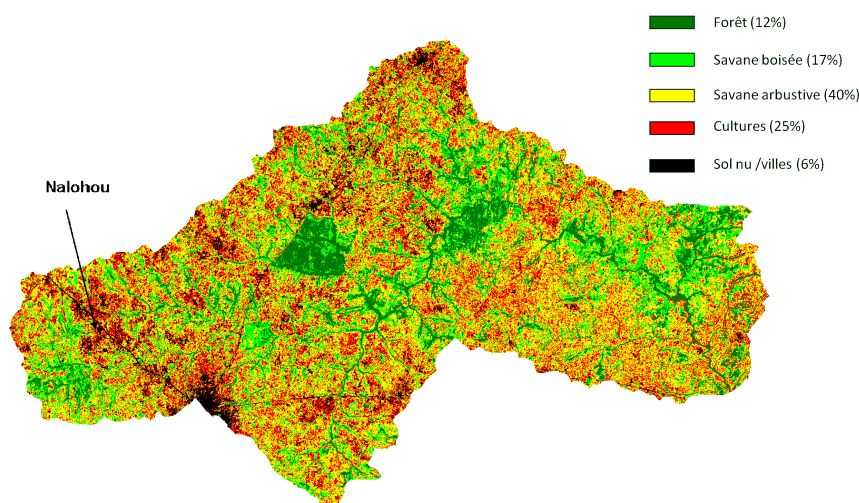


FIGURE 1.3 – Photographie satellite de l'occupation des sols

1.4 Toposéquence étudiée

Trois toposéquences ont été instrumentées pour le suivi du bilan hydrologique sur le bassin de la Donga, aux environs de la ville de Djougou. Elles se situent à Béléfoungou (forêt), Bira (savane arbustive) et Nalohou (culture et strate herbacée)(figure 1.1). Notre site d'étude est celui de Nalohou qui représente un des couverts principaux actuels, et à venir.

4. *Leaf Area Index*

Chapitre 2

Dispositif expérimental sur la toposéquence

La mosaïque de cultures et de jachères de Nalohou est parsemée de quelques arbres conservés par les villageois pour leur intérêt nutritif et médical (karité, néré, baobab). Les parcelles cultivées (igname, coton, mil, arachide, maïs, manioc) représentent le couvert végétal majoritaire. La photographie de la couverture de ce rapport montre un champ d'ignames sur le versant de Nalohou.

La toposéquence étudiée s'étend de l'interfluve à une ravine suivant la pente principale. Elle représente une succession de sols typiques de la zone d'étude. Elle possède une étendue de 560 mètres et un dénivelé de 20 mètres, entre 426 et 446 m d'altitude. La ravine en aval du versant n'est pas un cours d'eau pérenne mais produit des débits en saison des pluies. Cette ravine est bordée par une forêt ripisylve assez dense mais peu large (20 m) comme tous les cours d'eau de cette région.

2.1 Instrumentation

Le dispositif de mesures de l'humidité des sols sur le versant de Nalohou (9,7453°N - 1,60635°E) est constitué de mesures de succion ψ , de teneur en eau volumique θ , de température T à différentes profondeurs et de mesures de la nappe phréatique. Ces mesures sont regroupées sur trois profils : le haut de versant, proche de l'interfluve ; le milieu de versant et le bas de versant, proche de la ravine. Cette répartition des lieux de mesures est motivée par la volonté de maximiser l'obtention d'information quant à l'hydrodynamique du versant. Par la suite, nous nommerons ces positions Haut, Milieu et Bas. L'annexe B résume les informations relatives aux différentes mesures d'humidité des sols du site de Nalohou.

A ces mesures dans le sol sont associés des mesures de la pluie, de météorologie, de l'évapotranspiration (par méthodes *EC* et *LAS*) et des écoulements temporaires du cours d'eau Ara qui draine le versant.

2.1.1 Mesures de succion

Les mesures de succion ψ sont réalisées par des *WaterMark Soil Moisture Sensors* fabriqués par l'enseigne *Irrrometer Compagny*. Ces instruments fournissent la succion de sol sur la gamme de 0 à 200 cbar. L'obtention de la succion est basée sur une mesure de résistivité électrique du sol. Il existe plusieurs

relations d'étalonnage de l'appareil. Nous avons utilisé celle définie par Shock et al. [Shock et al., 1998], conseillée par le constructeur¹. La précision de mesures des *WaterMark* dépend de la valeur mesurée. La précision varie de 5 kPa pour des mesures inférieures à 20 kPa à 40 kPa pour des mesures proches de 200 kPa.

2.1.2 Mesures de teneur en eau

Les teneurs en eau volumiques θ sont mesurées par des appareils *CS616 water-content reflectometer sensors*, produits de marque *Campbell Scientific*. Ces sondes de type *TDR*² mesurent l'impact de la variation de la constante diélectrique du milieu sur une onde électromagnétique le long d'un guide d'onde. Les appareils fournissent une durée de propagation du signal électrique qui est traduit en teneur en eau volumique (sans unité) par une relation de calibration. Ce procédé de mesures est dépendant de deux paramètres que sont le type de sol et la teneur en eau du sol. Cette dépendance nécessite une calibration de l'appareil sur le terrain. Western et Seyfried proposent une relation quadratique de calibration de ce modèle de *TDR* [Western and Seyfried, 2005]. Suite à un étalonnage in situ, les mêmes coefficients sont utilisés pour tous les sites de mesure. La précision de la mesure est de 5% pour la mesure absolue ; la précision relative est de l'ordre de 0,1%³.

2.1.3 Mesures piézométriques

Les hauteurs de nappe sont relevées quotidiennement par un observateur avec une sonde manuelle, de marque *Solinst*⁴. Trois piézomètres sont creusés à 2, 10 et 20 mètres à chaque position sur le versant pour suivre les nappes pérenne et temporaire.

2.2 Caractéristiques pédologiques

Le versant de Nalohou est composé d'une couche de sol altéré qui repose sur un socle de roche mère [Faure and Volkoff, 1995]. La roche mère peut être considérée comme une couche imperméable aux transferts hydriques. La couche altérée est épaisse d'une quinzaine de mètres. Le forçage climatique en zone subtropicale, essentiellement les précipitations et les amplitudes thermiques, ont deux effets notoires sur les sols. Le premier effet est de créer une couche de subsurface ayant une granulométrie plus fine et une conductivité hydraulique plus faible que la couche de surface. Le second effet amène à ce que le sol possède une courbe granulométrique bimodale [de Condappa et al., 2008]. En d'autres termes, la proportion de limons est faible devant celle de sable et celle d'argile. Ceci est en lien avec les propriétés hydrodynamiques des différents horizons.

1. www.irrometer.com/sensors.html

2. *Time Domain Reflectometry*

3. www.campbellsci.com/documents/manuals/cs616.pdf

4. www.solinst.com/

Des mesures granulométriques ont été réalisées sur l'épaisseur [0-1 m], proche des instruments de mesure d'humidité du sol. Nous disposons de 18 granulométries pour les 3 positions sur le versant. La figure 2.1 synthétise la granulométrie de ces sols sur le triangle des textures. Les traits épais délimitent les types de sol selon la classification de l'*USDA*⁵. La position des différents sols sur le triangle des textures montrent bien leur faible teneur en limons, teneur relativement stable autour de 10%. Quelle que soit la position sur le versant, la couche de surface [0-50 cm] possède une granulométrie grossière (catégories *Sand*, *Loamy sand* et *Sandy loam*). L'horizon sous-jacent contient plus d'argile mais toujours une proportion de limons proche de 10% (catégorie *Sandy clay loam*).

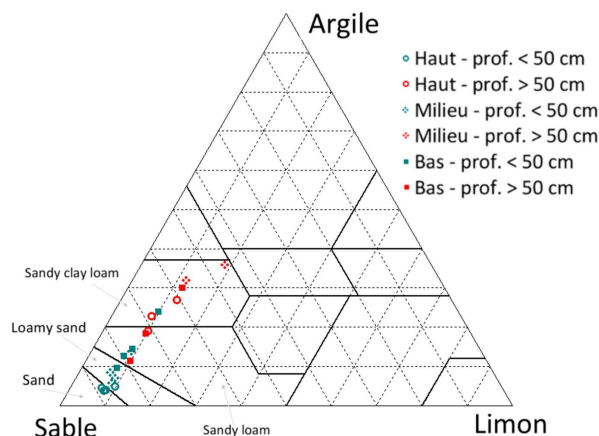


FIGURE 2.1 – Triangle des textures avec la position d'échantillons du versant de Nalohou

2.3 Caractéristiques hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques sont exprimées par deux relations que sont la courbe de rétention $h(\theta)$ et l'expression de la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau volumique $K(\theta)$. La succion ψ étant l'opposé de la pression h .

Pour les courbes de rétention de Nalohou, nous disposons (1) de mesures de succion et de teneur en eau in situ sur le premier mètre de sol, (2) des estimations de ces courbes tirées des mesures de porosité Mercure effectuées sur des échantillons profonds (figure 2.2).

Les mesures de succion in situ sont bornées à 200 kPa (2000 cm de hauteur d'eau). Les sols Haut et Milieu ont des comportements semblables. Les mesures font ressortir deux faisceaux de courbes. Un premier faisceau regroupe les sols Haut et Milieu de faibles profondeurs (profondeur inférieure à 50 cm). Les sols de 50 cm à 100 cm définissent un second faisceau. Les sols Bas de faibles profondeurs se trouvent aussi dans ce second faisceau. Pour le sol Bas, à 60 cm de profondeur, la courbe de rétention est singulière. Ce comportement traduit peut-être la présence localisée d'argile.

5. *United States Department of Agriculture*

Les échantillons utilisés pour la mesure de porosité Mercure ont été prélevés à des profondeurs plus importantes (2, 4, 5, 6 et 7 mètres). Cette mesure couvre une large gamme de la courbe de rétention. Ces courbes de rétention montrent un double infléchissement qui traduit le caractère bimodal de ce sol.

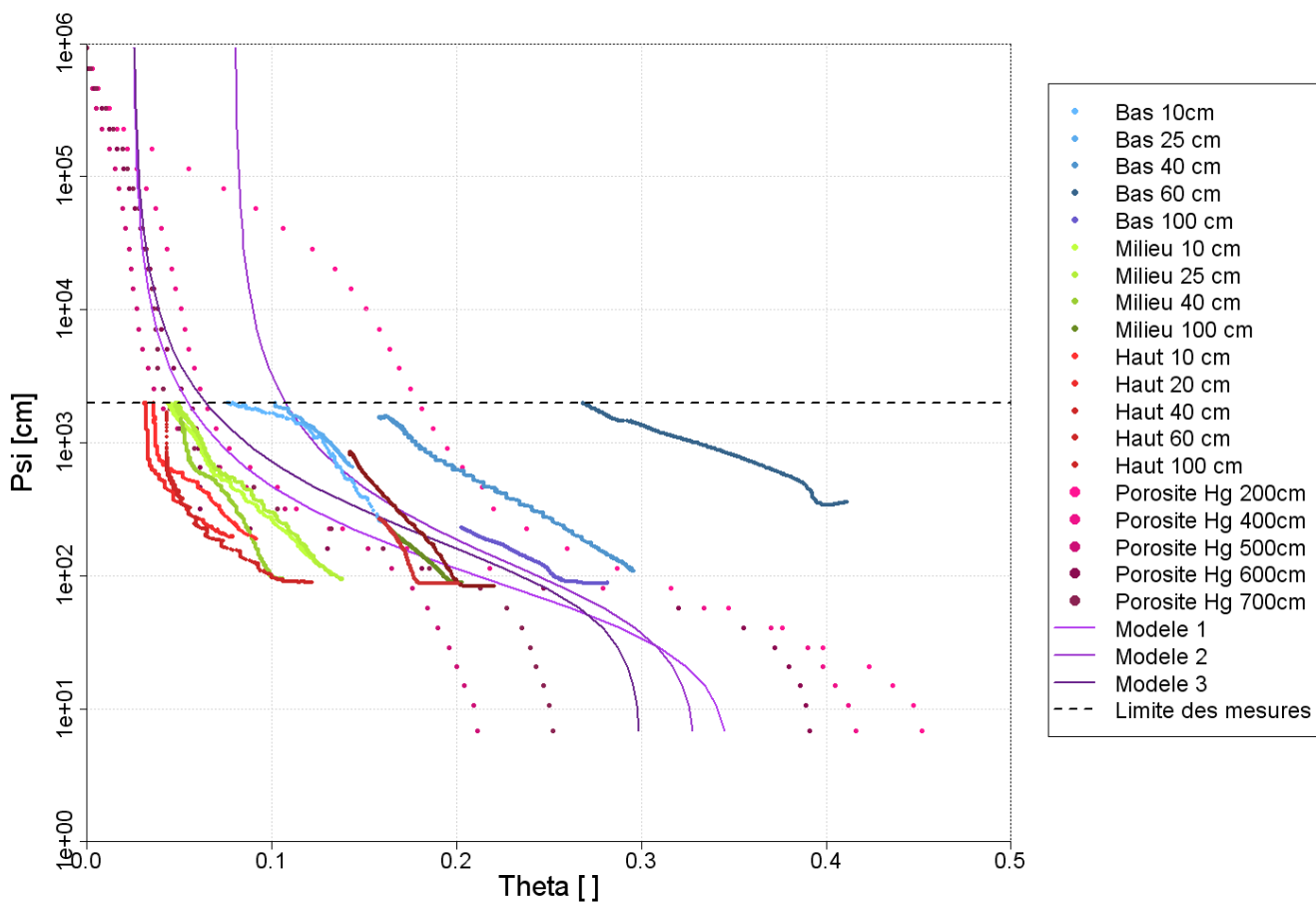


FIGURE 2.2 – Courbes de rétention $\psi(\theta)$

Chapitre 3

Modélisation numérique

3.1 Objectifs de la modélisation

La modélisation numérique est un outil qui permet de synthétiser et reproduire des observations. Elle demande une démarche propre et des questions préalables.

Qu'est-ce que je cherche à modéliser ? Qu'est-ce que j'attends de mon modèle ? Quel logiciel choisir ? Comment évaluer la qualité de mon modèle ? Quels sont les variables qui portent une information et de quelle information s'agit-il ? Les lignes qui suivent tentent d'amener des éléments de réponses à ces questions afin d'illustrer l'optique dans laquelle l'outil de modélisation numérique a été utilisé durant cette étude.

Tout d'abord, nous avons utilisé l'outil numérique dans le but de simuler la dynamique saisonnière de la redistribution de l'eau dans la zone non saturée d'un versant. Il s'agit là d'améliorer la compréhension qualitative des processus hydrodynamiques au sein du versant. La modélisation n'a pas été utilisée dans une perspective de prédiction quantitative. Dans un premier temps, nous chercherons à vérifier une certaine cohérence physique et un bon degré de réalisme des sorties de simulations. Ceci par la comparaison entre observations et simulations. Si cette étape semble satisfaisante, nous considérerons alors une vraisemblance du modèle sur l'ensemble du domaine de calcul. Nous développerons ensuite différents outils permettant de comprendre l'hydrodynamique simulée du versant. Finalement, un des objectifs à moyen terme pourrait être de définir un ensemble de paramètres caractérisant la dynamique du versant, ensemble le plus petit possible, qui puissent décrire, avec la plus grande précision, la dynamique du versant.

Nous avons choisi le logiciel Hydrus car il s'agit d'un logiciel spécialisé dans la modélisation de la zone non saturée avec les équations de Richards. De plus, ce logiciel possède des qualités ergonomiques reconnues. Enfin, ce logiciel est utilisé par d'autres membres du LTHE.

Hormis la comparaison visuelle de graphiques, l'évaluation de la qualité du modèle doit être objective et chiffrée. Cette phase demande de définir quelles sont les caractéristiques à évaluer. Il faut définir des critères, de préférence sans dimension, qui puissent traduire la qualité du modèle.

3.2 Le logiciel Hydrus

Pour effectuer la modélisation numérique, nous avons utilisé le logiciel Hydrus 3D, version 1.10. Nous avons utilisé uniquement la partie bidimensionnelle du logiciel. La gamme de logiciels Hydrus est développée par l'*U.S. Salinity Laboratory* en coopération avec l'*International Groundwater Modeling Center, University of California Riverside*. Ces logiciels sont commercialisés par *PC-Progress*¹. Ce logiciel modélise les flux hydriques dans la zone non saturée du sol par la résolution de l'équation de Richards. Le calcul aux éléments finis s'appuie sur un maillage triangulaire.

Hydrus propose un ensemble de processus principaux pouvant être combinés : écoulement d'eau, transport de solutés, transport de chaleur et prélèvement racinaire d'eau (transpiration végétale). Nous avons utilisé l'écoulement d'eau et le prélèvement racinaire d'eau. La description qui suit concerne ces deux processus. Une description complète du logiciel Hydrus se trouve dans le manuel technique [Simunek et al., 2007].

Concernant les unités de pression, Hydrus utilise une unité de longueur traduisant une hauteur de colonne d'eau. La conversion est réalisée par l'application de la loi d'hydrostaticité : $p = \rho_{eau}gz$ (p : pression ; ρ_{eau} : masse volumique de l'eau ; g : accélération de la gravité). Pour conserver une cohérence du système d'unité, nous exprimerons dans ce rapport la pression en hauteur de colonne d'eau : $10^5 Pa = 1bar = 10m$.

3.2.1 Modèle hydrodynamique

Hydrus résout une forme modifiée de l'équation de Richards (équation 3.1) où C est la capacité capillaire et K la conductivité hydraulique.

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (3.1)$$

Différents modèles hydrodynamiques des sols sont disponibles pour la courbe de rétention et la courbe $K(\theta)$. L'utilisation de ces deux modèles nécessite la définition de paramètres pour chacun des matériaux utilisés dans la modélisation. Le logiciel propose des fonctionnelles basées sur les relations de pedotransfert.

3.2.2 Modèles de précipitations et d'évaporation

Les précipitations et l'évaporation potentielle sont des forçages appliqués aux limites définies comme des frontières atmosphériques. L'utilisateur définit une pression limite inférieure h_{CritA} (valeur négative) en dessous de laquelle la condition à la limite atmosphérique devient une condition de charge égale à h_{CritA} . Dans ce cas, l'évaporation réelle diffère de l'évaporation potentielle. Le même principe est

1. www.pc-progress.com

appliquée proche de la saturation pour les précipitations. La pression h_{CritS} est imposée par Hydrus à 0 cm d'eau. Ainsi, sur une frontière atmosphérique, lorsque la saturation est atteinte, la charge est fixée à h_{CritS} . Le terme de précipitations se répartit en un terme d'infiltration sous une condition de charge nulle et un terme de ruissellement égale à la différence. Le ruissellement est évacué de la toposéquence sans pouvoir se réinfiltrer ultérieurement.

3.2.3 Modèle de transpiration végétale

Hydrus modélise la transpiration végétale comme un terme puits de l'équation de continuité. En présence de racines, le prélèvement racinaire S s'exprime selon la relation 3.2 où β la fonction de réponse au stress hydrique et S_p le taux potentiel de prélèvement d'eau.

$$S(h) = \beta(h)S_p \quad (3.2)$$

Le taux potentiel de prélèvement d'eau est égal au taux de prélèvement d'eau lorsque la plante n'est pas en stress hydrique. S_p est définie selon l'équation 3.3. b est la distribution normalisée de prélèvement racinaire, S_t la longueur de sol associée à la transpiration et T_p la transpiration potentielle. La variable b modélise la structure racinaire du versant.

$$S_p = b(x, z)S_tT_p \quad (3.3)$$

La fonction de réponse au stress hydrique est sans dimension et respecte $0 \leq \beta \leq 1$. Hydrus propose deux modèles pour cette fonction. Nous avons utilisés la formulation *S-shaped* [van Genuchten, 1987] définie par l'équation 3.4 où h_{50} est la pression pour laquelle l'extraction d'eau est réduite de 50%, p une constante expérimentale et h_w la pression de flétrissement.

$$\beta(h) = \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p\right)^{-1} & \text{pour } h > h_w \\ 0 & \text{pour } h < h_w \end{cases} \quad (3.4)$$

De plus, Hydrus propose une modélisation de la compensation racinaire. Lorsqu'une partie de la zone racinaire se trouve en stress hydrique, la compensation racinaire permet un prélèvement plus important de la zone racinaire qui n'est pas en stress hydrique.

L'environnement de travail du logiciel Hydrus est décrit dans l'annexe C.

L'annexe D détaille le post-traitement réalisé avec le code R.

Chapitre 4

Démarche et essais

4.1 Période de simulation

Nous avons choisi de travailler sur une année pour reproduire un cycle hydrologique complet (saison des pluies, saison sèche) et son influence sur le contenu en eau du versant dans la zone non saturée comme dans la nappe. L'année choisie est l'année 2006 qui dispose d'un jeu de données complet concernant l'hydrologie et la végétation.

4.2 Hypothèses et schématisation

Pour pouvoir simuler le fonctionnement hydrodynamique de la zone non saturée du versant de Nalohou, nous avons dû émettre différentes hypothèses simplificatrices.

4.2.1 Espace de travail bidimensionnel

Nous avons travaillé en deux dimensions. Le plan de travail est perpendiculaire au cours d'eau qui se trouve en aval du versant. Ainsi nous avons fait l'hypothèse de flux bidimensionnels. Cela revient à considérer le versant comme un volume infiniment long dans l'axe du cours d'eau et ayant des propriétés invariantes selon ce même axe. Dans le cadre de notre étude, cette hypothèse est acceptable. Par contre, si l'objectif est de comprendre le fonctionnement singulier d'une zone du versant, l'approche en deux dimensions s'avèrera sans doute insuffisante.

4.2.2 Maillage

Nous disposons de la topographie du versant à une précision de l'ordre du mètre. Cependant, nous n'avons pas utilisé un tel degré de précision dans le modèle numérique. La topographie fine fait apparaître les microreliefs du versant. Or, lorsque le logiciel de calcul crée le maillage, il s'appuie sur les points de la topographie. Nous avons obtenu un maillage qui était précis mais dont les mailles n'étaient pas régulières. Nous avons observés sur les premiers calculs que l'irrégularité des mailles avait un impact

sur les simulations. Nous avons préféré simplifier la topographie, dégrader l'information locale tout en conservant les caractéristiques géomorphologiques principales du versant, pour privilégier une régularité relative du maillage. Nous avons ainsi retenu une information topographique tous les 10 mètres. Nous avons imposé le raffinement du maillage proche de la frontière atmosphérique avec une hauteur de maille de 10 cm sur les 40 premiers centimètres, puis la hauteur augmente avec la profondeur, le maillage est de moins en moins contraint jusqu'à atteindre l'objectif global fixé à 50 cm. Le facteur d'allongement sur l'axe horizontal est égal à 8. Le maillage retenu pour l'ensemble des simulations possède 3747 nœuds de calcul et 7163 éléments 2D. Nous n'avons pas quantifié l'impact du maillage sur les résultats des simulations.

Nous avons défini des points de suivis des grandeurs simulées. Ces points sont placés sur le maillage de telle sorte que leur position soit similaire à celle des points de mesures de terrain. Le maillage et la position des points de suivi sont donnés en annexe [E.1](#).

4.2.3 Evapotranspiration

L'évapotranspiration de référence ET_0 est l'évapotranspiration qu'aurait un gazon suffisamment bien irrigué sous les mêmes conditions climatiques [[Allen et al., 1998](#)]. Dans notre cas, l'évapotranspiration de référence est calculée au pas de temps horaire à partir des données de la station météorologique de Nalohou. Nous avons utilisé l'expression de Ritchie [[Ritchie, 1972](#)] pour estimer la transpiration potentielle T_p , équation [4.1](#).

$$T_p = ET_0 \left(-0,21 + 0,70 \cdot LAI^{1/2} \right) \text{ pour } 0,1 < LAI < 2,7 \quad (4.1)$$

La transpiration potentielle dépend donc des conditions climatiques à travers l' ET_0 et du couvert végétal considéré à travers le LAI . Celui-ci ne dépasse pas 2,2 à Nalohou. L'évaporation potentielle E_p est le complément de T_p à ET_0 .

4.2.4 Modèle hydrodynamique

Nous avons choisi de reprendre les 3 horizons et les courbes caractéristiques utilisées par D. Robert pour la modélisation 1D des sols de Nalohou [[Robert, 2009](#)]. Il faut cependant noter que D. Robert a utilisé le modèle de van Genuchten - Burdine alors que nous avons choisi le modèle van Genuchten - Mualem. L'annexe [F](#) détaille ce modèle. La différence entre ces modèles se trouve dans l'expression des exposants de la courbe de rétention. Sur la figure [2.2](#), les trois courbes (modele 1, modele 2 et modele 3) illustrent la relation de van Genuchten - Mualem que nous avons utilisée pour les trois horizons : horizon 1 [0-50 cm], horizon 2 [50-350 cm], horizon 3 [350-600 cm]. Les courbes diffèrent par le jeu des six paramètres les caractérisant, à savoir θ_r la teneur en eau volumique résiduelle, θ_s la teneur en eau volumique à saturation, α l'inverse de la pression correspondant aux pores les plus représentés, n l'indice de distribution de tailles de pores, K_s la conductivité hydraulique à saturation et L le paramètre de

connectivité des pores. Les modèles 1 et 3 passent par le premier faisceau de courbes alors que le modèle 2 passe par le second faisceau. Les sols singuliers ne sont pas pris en compte par nos modèles.

4.3 Conditions initiales

4.3.1 Choix de la période d'initialisation

Nous avons choisi des conditions initiales qui puissent avoir un impact le plus faible sur les simulations tout en reproduisant un cas le plus proche de la réalité. Situé sous un climat soudanien, le versant de Nalohou subit une période sèche, sans pluies après une période de pluies soutenues. Nous avons utilisé cette particularité hydrologique pour initialiser notre modèle numérique. Ainsi, nous avons considéré un sol proche de la saturation, $\theta = 0,25$, juste après la dernière pluie de l'année. Dans notre cas, ceci correspond au 12 octobre 2005. Nous avons réalisé une simulation du 12 octobre 2005 au 1^{er} janvier 2006 en imposant uniquement des forçages d'évaporation et de transpiration. Cette période de 81 jours permet une redistribution de l'eau à toutes les profondeurs. Au 1^{er} janvier 2006 le modèle est supposé posséder une répartition réaliste de l'eau.

4.3.2 Mise en régime du système

Après avoir simulé l'année 2006, nous l'avons simulée une seconde fois pour détecter d'éventuelles modifications de grandeurs d'une simulation à l'autre. Il en ressort (1) que d'une simulation à l'autre, les variables ont une allure semblable, (2) que les résultats de simulations ne sont pas exactement superposées en début d'année. La similitude des simulations indique que le transitoire numérique est achevé au 1^{er} janvier 2006. En d'autres termes, les 81 jours simulés de 2005 suffisent à affranchir les résultats de l'influence des conditions initiales. Cependant, les grandeurs analysées ne sont pas exactement superposées. Cela provient du fait que la variation du stock d'eau du versant pour l'année 2006 n'est pas nulle. Il en résulte un ajustement en début d'année du second cycle.

4.4 Conditions aux limites

4.4.1 Frontières latérales

Les frontières latérales sont définies en bas du versant par l'axe du cours d'eau et en haut par le point de partage des eaux, l'interfluve. En faisant l'hypothèse d'une symétrie des processus d'écoulements par rapport à ces axes, nous pouvons contraindre ces frontières à un flux nul.

4.4.2 Frontière basse

La frontière basse du domaine est également une frontière à condition de flux nulle. Pour choisir celle-ci nous nous sommes appuyés sur deux éléments. La nappe pérenne est toujours au dessus du socle de roche

mère. De plus ce socle est considéré comme imperméable. Nous avons donc choisi de ne pas modéliser l'ensemble de la zone saturée pour éviter la complexité de la topographie de la roche mère sous-jacente. Nous avons modélisé le battement annuel de la nappe pérenne. L'imposition de cette condition demande d'être vigilant quant à l'interprétation lors de l'absence de zone saturée sur la frontière basse du modèle.

4.4.3 Frontières atmosphériques

La frontière haute du modèle est définie comme une frontière atmosphérique. Ce type de frontière est traité spécifiquement par Hydrus (paragraphe 3.2). Nous avons renseigné les forçages au pas de temps de la demi-heure du début du mois de mars à la fin du mois d'octobre et pour l'épisode de précipitations du 15 février. Pour les autres périodes, le pas de temps est horaire. Les précipitations sont lissées par des moyennes glissantes sur 4 heures. Ceci permet d'éviter les difficultés numériques posées par l'intensité de certaines pluies.

4.4.4 Cours d'eau

En bas de versant, l'interface avec le cours d'eau est modélisée par une frontière d'exfiltration. Sur cette interface, le flux reste nul tant que le sol n'est pas à saturation. Lorsque la saturation est atteinte, la pression désormais positive permet l'exfiltration. Cette zone d'exfiltration contribue au débit du cours d'eau. Néanmoins, le débit d'exfiltration du versant et le débit du cours d'eau ne sont pas directement comparable. Le cours d'eau collecte les débits d'exfiltration d'une multitude de versants aux caractéristiques variées ainsi que le ruissellement généré lorsque le sol du versant est saturé.

La figure annexe E.2 illustre ces conditions limites.

4.5 Qualité du modèle

4.5.1 Validation

Nous avons vérifié la conservation de la masse d'eau au cours du calcul. Le logiciel Hydrus fournit l'erreur absolue et relative sur le bilan de masse d'eau du domaine, à chaque pas de temps. Nous avons tracé la variation du stock d'eau dans le domaine et la résultante des flux aux frontières du domaine.

4.5.2 Evaluation

Nous avons évalué le modèle par rapport aux mesures de terrain. Pour cela nous avons comparé les profondeurs de nappe, les succions et les teneurs en eau mesurées aux mêmes grandeurs simulées. Nous avons retenu deux critères qui renseignent sur la qualité du modèle du point de vue statique (biais) et du point de vue dynamique (cofluctuation).

Pour quantifier le biais du modèle, nous avons construit la variable B définie par l'équation 4.2 où x_{Obs} est la variable observée et x_{Mod} la variable modélisée. Cette variable sans dimension est comparable pour des grandeurs n'ayant pas les mêmes gammes de variation. La valeur absolue permet de traiter les grandeurs à valeurs négatives. Ainsi pour la nappe, lorsque la nappe simulée est plus haute en altitude que la nappe observée, B reste positif.

$$B = \frac{Moy(x_{Mod} - x_{Obs})}{|Moy(x_{Obs})|} \quad (4.2)$$

Pour quantifier la co-fluctuation, nous avons utilisé le coefficient de détermination r^2 qui exprime la part de variance observée, expliquée par le modèle.

Pour avoir une vision synthétique de la qualité de la simulation pour l'ensemble des variables étudiées, nous avons tracé sur un même graphique le coefficient de détermination r^2 en fonction du biais B pour chaque grandeur étudiée.

4.6 Etat de référence

Nous avons défini un état de référence du jeu des paramètres de Hydrus. Cet état de référence n'a pas vocation à être un état optimal quant à la simulation des processus. Il s'agit plutôt d'un état qui s'appuie sur la connaissance actuelle du site. Nous avons utilisé un jeu de paramètres comparable à celui de D. Robert pour caractériser les horizons de sol et leurs propriétés.

Ainsi, nous avons défini trois couches de sols ayant les propriétés hydrodynamiques indiquées dans le tableau 4.1. Pour une visualisation des matériaux sur le versant, voir la figure annexe E.1. Les courbes de rétention définies par les paramètres du tableau 4.1 sont tracées sur la figure 2.2. Dans l'état de référence nous avons considéré la conductivité hydraulique isotrope verticalement et horizontalement.

Couche	Profondeur [cm]	θ_r []	θ_s []	α [cm ⁻¹ d'eau]	n []	K_s [cm.jr ⁻¹]	L []
1	0-50	0.025	0.35	0.02	1.8	86	0.5
2	50-350	0.08	0.33	0.015	1.8	86	0.5
3	350-600	0.025	0.30	0.01	1.8	86	0.5

TABLE 4.1 – Caractéristiques hydrodynamiques des trois couches de sol

Les valeurs des paramètres de transpiration végétale sont définies dans le tableau 4.2.

Critical Stress Index []	h_{50} [cm d'eau]	p []	h_w [cm d'eau]
0.01	-8000	3	-16000

TABLE 4.2 – Paramètres du modèle de transpiration végétale

Nous avons considéré une structure racinaire de végétation qui comprend un mélange d'herbes et d'arbres. La répartition des termes d'évaporation et de transpiration est basé sur un LAI mixte (herbes et arbres) tel que nous l'observons sur la toposéquence (80% d'herbacée, 20% d'arbres). La compensation

racinaire (paramètre *Critical Stress Index*) est autorisée. Ceci car en saison sèche, les arbres compensent le déficit d'eau en surface par un prélèvement en profondeur qui leur permet de survivre.

4.7 Etude de sensibilité

Les paramètres nécessaires à la modélisation ne sont pas connus de façon parfaite à l'échelle du versant. Nous avons donc effectué une étude de sensibilité du modèle numérique à différents paramètres qui le caractérisent. Nous avons exploré l'influence de quatre paramètres pour des valeurs autour de l'état de référence défini dans la section 4.6.

4.7.1 Définition et gamme de variation des paramètres

Nous nous sommes focalisés sur quatre éléments qui sont ceux pour lesquels nous avons la plus grande incertitude : la valeur de la conductivité hydraulique à saturation ; la distribution des conductivités hydrauliques à saturation selon les couches de sol ; l'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation et la végétation du versant. Nous n'avons pas testé les paramètres de la courbe de rétention dont on considère dans un premier temps posséder une estimation satisfaisante avec les mesures in situ.

D'un point de vue pratique, nous avons associé une lettre à la valeur que prend chaque paramètre. Par exemple, la lettre A est associée à une conductivité hydraulique à saturation de $10^{-4}m.s^{-1}$. Les simulations sont nommées par une séquence de 4 lettres qui définit leur jeu de paramètres. L'état de référence précédemment présenté correspond à la simulation BFIN.

Valeur de la conductivité hydraulique à saturation Pour le K_s , nous avons exploré une gamme de 2 ordres de grandeurs centrée sur la valeur de référence (tableau 4.3).

Lettre	K_s [m.s ⁻¹] (K_s [cm.jr ⁻¹])
A	10^{-4} (860)
B	10^{-5} (86)
C	10^{-6} (8,6)

TABLE 4.3 – Tableau des valeurs de K_s

Distribution des conductivités hydrauliques à saturation La distribution de K_s avec la profondeur est encore largement inconnue. L'observation d'une nappe de subsurface implique la présence d'une couche sous-jacente moins perméable que celle de surface. Les cas E, F et G (tableau 4.4) explorent différents rapports de conductivité de la couche sous-jacente avec ses voisines, pour analyser son influence. Avec le cas H, nous cherchons à nous approcher de l'hypothèse de décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique à saturation définie dans TOPAMMA. Cette décroissance reste discontinue et grossière. A priori les cas G et H sont plus proches de la connaissance que nous avons de la distribution du K_s .

Anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation Nous avons testé l'effet de l'anisotropie

Lettre	$K_{s,1}/K_{s,1}$ [-]	$K_{s,2}/K_{s,1}$ [-]	$K_{s,3}/K_{s,1}$ [-]
E	1	10	1
F	1	1	1
G	1	0,1	1
H	1	0,3	0.1

TABLE 4.4 – Tableau des distributions du K_s sur la profondeur

de la conductivité hydraulique à saturation sur la redistribution de l'eau sur le versant. Nous restreignons l'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation au rapport de la composante parallèle au versant (par) sur la composante perpendiculaire au versant (per). Un rapport d'anisotropie de 10 est couramment employé en hydrologie (C. Obled, communication personnelle). Un rapport 100 a été estimé sur la Donga avec une modélisation de type TOPAMMA [Le Lay et al., 2008] (tableau 4.5).

Lettre	$K_{s,par}/K_{s,per}$ [-]
I	1
J	10
K	100

TABLE 4.5 – Tableau des rapports d'anisotropie de K_s

Végétation du versant Nous avons considéré le LAI des arbres et des herbes mais nous n'avons pas de connaissance précise de la structure racinaire du versant. Quelle est l'extension des racines des arbres isolés sur le versant et quelle est la densité racinaire de la ripisylve ? Nous avons défini 2 cas simples où le versant est couvert d'un seul type de plantes (herbe ou arbre) pour identifier leur impact sur la distribution de l'eau sur le versant. Le troisième cas dit "mixte" combine les 2 types de plantes, tel que nous l'avons observé. Dans ces 3 cas, nous avons fait varier 2 paramètres : le LAI et la structure racinaire. La profondeur racinaire des herbes et des arbres est respectivement estimée à 1 m et 6 m, avec une plus forte densité en surface [10-50 cm]. Le cas mixte a un LAI qui est une combinaison des LAI herbe (80%) et arbre (20%) avec le profil racinaire des arbres sur tout le versant. La figure annexe E.3 montre la distribution normalisée de prélèvement racinaire. Le tableau 4.6 indique les combinaisons LAI /Structure racinaire retenues pour l'étude.

Lettre	T_p	Structure racinaire
L	Herbe	Herbe
M	Arbre	Arbre
N	Mixte	Arbre

TABLE 4.6 – Tableau du paramètre de végétation, LAI /Structure racinaire associée

4.7.2 Simulations disponibles

Nous avons réalisé la simulation d'une année complète pour l'ensemble des combinaisons de ces paramètres. Cela amène théoriquement à 108 simulations.

Sept simulations n'ont pas abouti à cause de problèmes de divergence numérique. Il s'agit des simulations : BGKN, CGJL, CGJM, CGJN, CGKM, CGKN et CHKN. Pour ces 7 simulations, le problème

numérique apparaît principalement lors des précipitations ayant les plus fortes intensités de l'année (29 août 2006). Le modèle n'arrive pas à intégrer des précipitations intenses sur un sol relativement sec en surface avec un K_s faible en surface (cas C) et encore plus faible en subsurface (cas G). Les mailles de frontière atmosphérique se saturent. On observe même des valeurs de pression positives. La divergence numérique débute quelques pas de temps après. Peut-être y-a-t-il un lien entre ces deux faits ?

4.7.3 Outil statistique

Nous avons donc un jeu de 101 simulations. Pour chacune, 27 variables sont stockées. Les teneurs en eau et les succions à 10, 20, 40, 100 cm, pour les positions Haut, Milieu, Bas et les profondeurs de nappe pour les positions Haut, Milieu, Bas $((2 * 4 * 3) + 3)$. Chaque variable possède 365 occurrences, un an au pas de temps journalier. Nous devons analyser 995355 valeurs $(101 * 27 * 365)$.

Pour synthétiser ces informations, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP). Cet analyse statistique permet de réduire le nombre de dimensions pour représenter les données. Pour cela, l'ACP change le point de vue de la représentation en proposant une représentation qui maximise la variance des données.

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1 Analyse de la simulation de référence

Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus pour la simulation de référence.

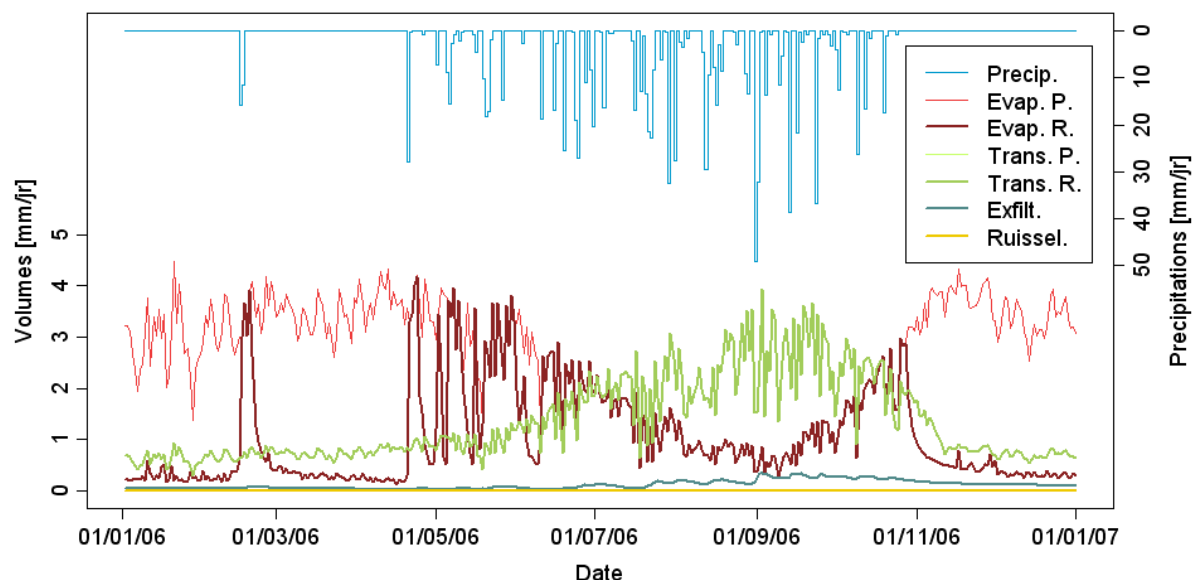


FIGURE 5.1 – Evolution annuelle des flux simulés (simulation BFIN)

La figure 5.1 montre l'évolution annuelle des flux simulés par Hydrus. Sur la courbe des précipitations, les saisons sèches et humides sont bien distinctes. La saison des pluies s'étend du 20 avril au 24 octobre 2006. La saison sèche, sans précipitation, occupe le reste de l'année. Une importante pluie isolée a lieu le 15 février 2006.

L'évaporation réelle E_r simulée peut être décrite en 4 phases. En saison sèche l' E_r est faible (quelques dixièmes de mm.jr^{-1}). Lors de précipitations isolées en saison sèche, l' E_r croit rapidement jusqu'à l'évaporation potentielle E_p puis retrouve sa valeur faible en quelques jours. En début de saison des pluies, l' E_r est encore dépendant des précipitations mais sa valeur croit progressivement jusqu'à atteindre l' E_p autour du 15 juin. En saison des pluies, l' E_r est confondu avec l' E_p . Finalement, l' E_r retrouve une valeur

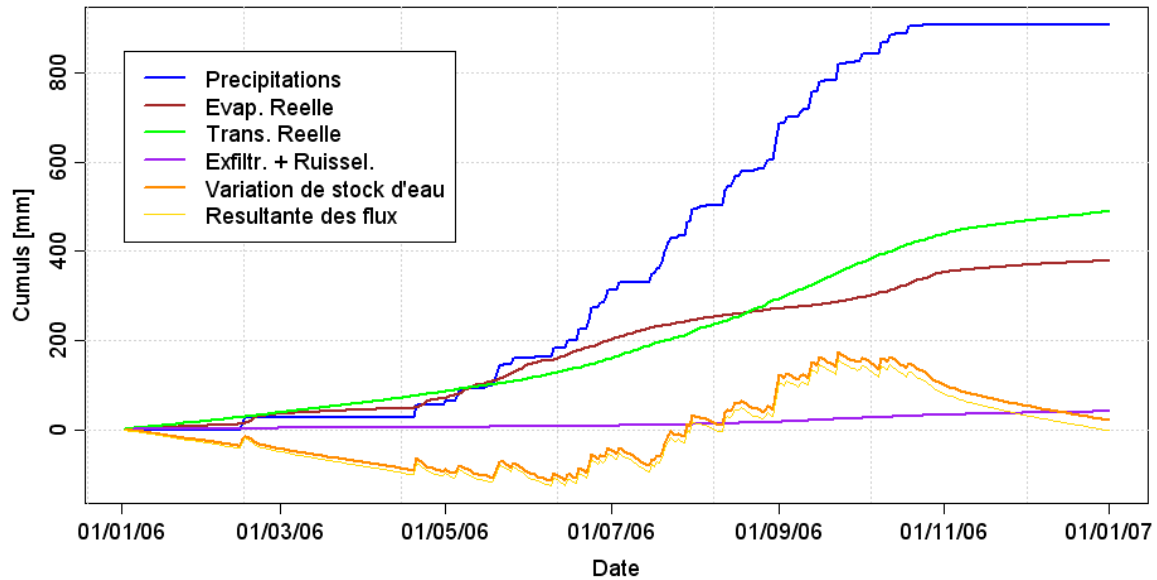


FIGURE 5.2 – Cumuls des flux et du stock d'eau simulés (simulation BFIN)

basse une quinzaine de jours après les dernières pluies de l'année.

La transpiration réelle T_r simulée est pratiquement toujours égale à la transpiration potentielle T_p . Cette dernière est par construction fonction du LAI considéré et modulé par les conditions climatiques (équation 4.1). La T_p se décompose en 3 phases principales sur l'année qui reflètent la dynamique du LAI . La période sèche est une période de transpiration minimale (principalement assurée par les arbres), la T_p reste relativement stable. En début de saison des pluies T_p croît jusqu'à la fin du mois d'août où le LAI est maximal. T_p retrouve sa valeur moyenne de saison sèche relativement rapidement, une quinzaine de jours après les dernières pluies de l'année. L'exfiltration du versant est faible sur l'ensemble de l'année et semble synchronisée bien qu'en retard avec les précipitations. Le ruissellement est quasiment nul sur l'ensemble de l'année.

Le graphique 5.2 représente les cumuls des mêmes variables. Tout d'abord, les précipitations, entrées du modèle, ont le cumul annuel le plus important (906 mm¹). Au premier ordre, l'évaporation (379 mm) et la transpiration (490 mm) compensent les précipitations (96%). Ceci car la variation du stock d'eau sur l'année est pratiquement nulle (20 mm). En d'autres termes, l'exfiltration (40 mm) et le ruissellement (inférieur à 1 mm) jouent un rôle mineur dans le bilan hydrologique de la toposéquence. En saison sèche, la transpiration représente pratiquement la totalité de l'évapotranspiration car la surface du sol est sèche. En début de saison des pluies, l'évaporation devient la composante majeure de l'évapotranspiration car la végétation est encore peu développée ; puis la transpiration reprend le dessus. Nous avons tracé la variation du stock d'eau et la résultante des flux. Nous constatons une bonne fermeture du bilan de masse par le logiciel tout au long de l'année (biais cumulé inférieur à 23 mm).

1. Le cumul annuel de Nalohou en 2006 diffère de 99 mm par rapport à celui de Djougou indiqué au chapitre 1.

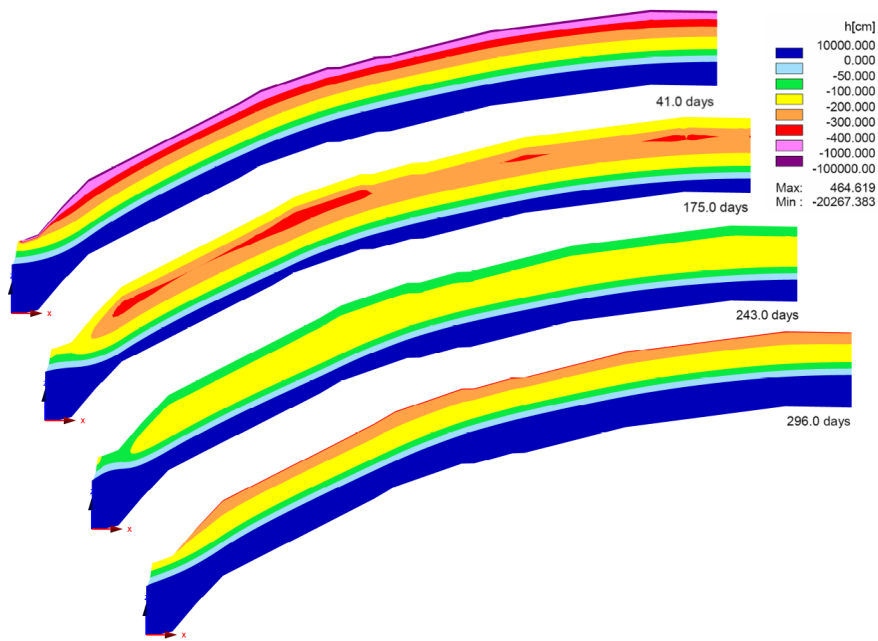


FIGURE 5.3 – Champ de pression simulé, 2006, le 10 février (jour 41), le 24 juin (jour 175), le 31 août (jour 243), et le 23 octobre (jour 296) (simulation BFIN)

La figure 5.3 montre le champ de pression dans le versant pour 4 dates de l'année 2006. La couleur bleu foncé représente la zone saturée du versant. Avant les premières précipitations de l'année (jour 41 - 10 février), le profil de pression diminue avec la profondeur. La nappe affleure au point bas de la zone d'exfiltration avec, depuis le début d'année, une exfiltration cumulée faible (inférieure à 2 mm). Au jour 175 (24 juin), la saison des pluies a démarrée, la surface a une valeur de succion plus faible (bande jaune). En profondeur, la transpiration végétale a abaissé le niveau de la nappe. Il persiste une couche intermédiaire de forte succion (zones rouge et orange). Au jour 243 (31 août), un jour après l'épisode de pluies le plus important de l'année, la structure de pression est semblable à celle du jour 175 mais avec des succions plus faibles car la saison des pluies est déjà bien avancée. Finalement, au jour 296 (23 octobre) en fin de saison des pluies, le niveau de la nappe est bien remontée. Le niveau de nappe ainsi que le profil de charge vont progressivement retrouver un état semblable à celui du jour 41 sous l'effet du forçage unique de l'évapotranspiration.

Sur la figure 5.4 nous comparons la dynamique des valeurs simulées et observées de cinq variables dans les 3 couches de sol modélisés : ψ à 20 cm, ψ à 100 cm, θ à 20 cm, θ à 100 cm et la profondeur de nappe pour les trois positions sur le versant. θ à 20 cm possède une bonne coiffuctuation pour l'ensemble des positions (Haut, Milieu, Bas). Pour θ à 100 cm la coiffuctuation est légèrement moins bonne. On note que le modèle ne reproduit pas l'augmentation marquée des teneurs en eau en milieu de saison des pluies en bas de versant. Pour la couche plus profonde, le modèle au contraire surestime la hauteur de nappe en Bas. Ceci est sans doute dû à une sous estimation de la reprise par la végétation. ψ , comme θ , est mieux simulé à 20 cm qu'à 100 cm où il est fortement sous estimé.

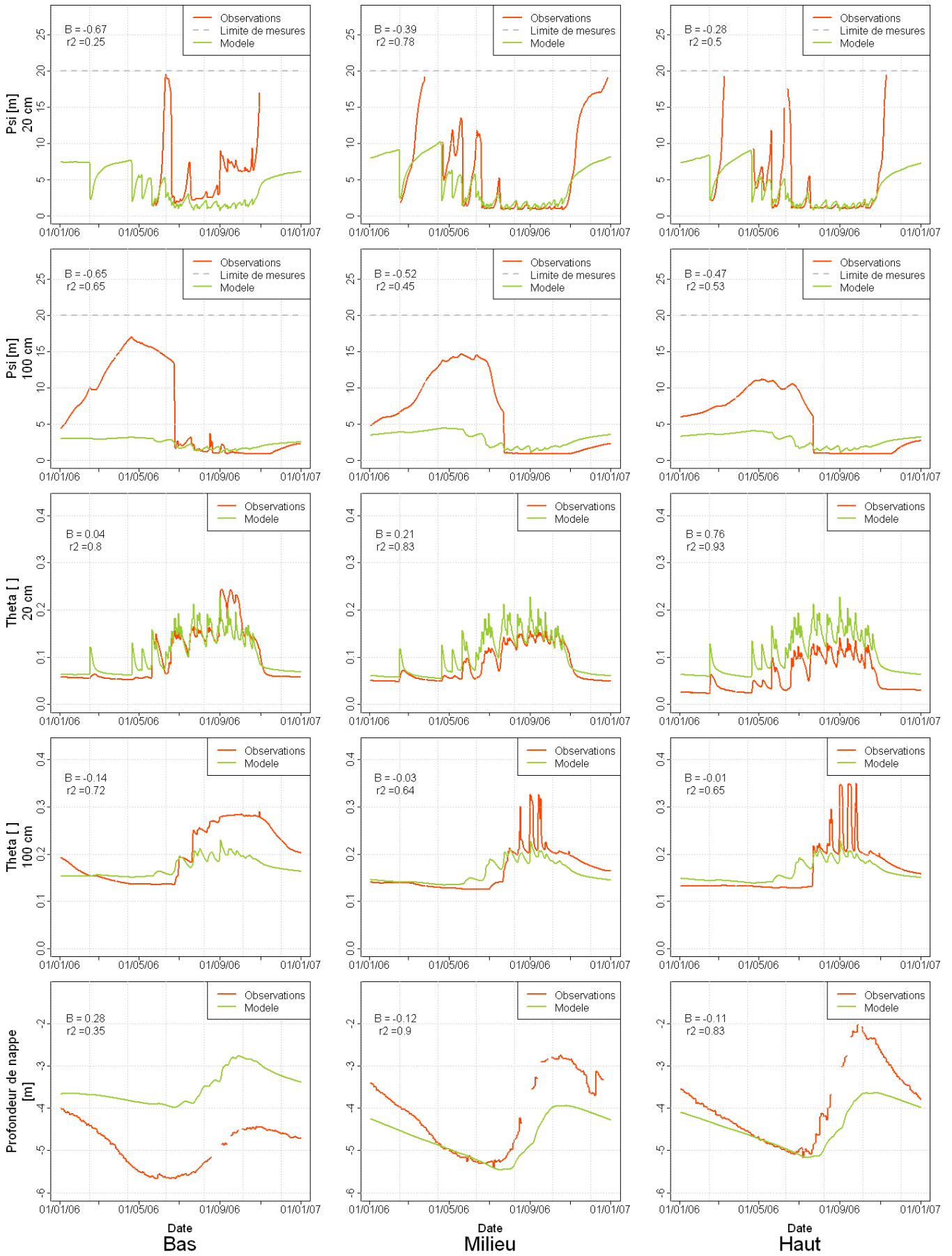


FIGURE 5.4 – Evolutions annuelles de ψ à 20 cm, ψ à 100 cm, θ à 20 cm, θ à 100 cm et de la profondeur de nappe (simulation BFIN)

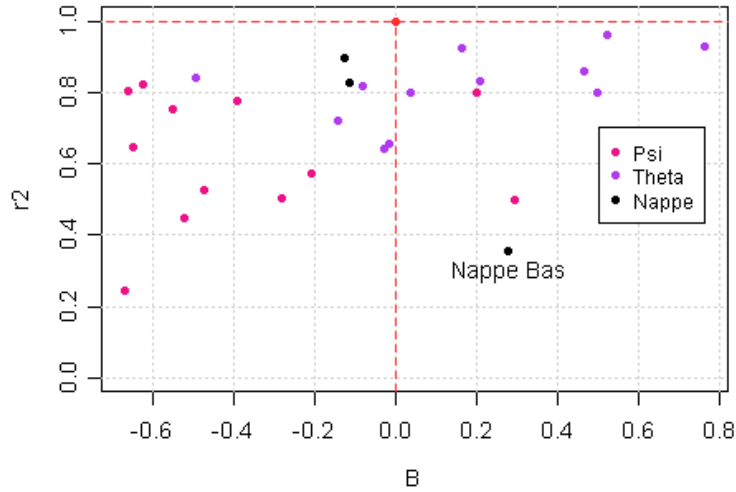


FIGURE 5.5 – Evaluation du modèle, $r^2 = f(B)$ (simulation BFIN)

Ces graphes peuvent être synthétisées par les variables B et r^2 (figure 5.5). Concernant les r^2 , ils sont tous assez élevés. C’est ce que l’on pouvait espérer du modèle. Les coefficients de détermination sont compris entre 0,24 et 0,96 avec une moyenne de 0,71. Les teneurs en eau sont en moyenne mieux corrélées que les succions qui ont une dynamique peu réactive. Les coefficients de détermination des nappes Haut et Milieu sont bons (0,82 et 0,89), celui de la nappe Bas est significativement moins bien corrélée (0,35). Nous constatons que les teneurs en eau ont un biais en moyenne positif contrairement aux succions. Le biais des 3 profondeurs de nappe présente des valeurs proportionnellement plus faible que ψ et θ .

5.2 Analyse en Composantes Principales

Pour étudier la sensibilité du modèle à différents paramètres nous avons réalisé 101 simulations. Nous avons choisi une grandeur par couche de sol : θ à 20 cm, θ à 100 cm et la nappe. Pour chacune des Analyses en Composantes Principales réalisées, les variables sont les 365 jours de l’année, les individus sont les 101 simulations. Plus de 96% de la variance est expliquée par les 3 premières composantes de l’ACP (plus de 98% pour la nappe). Les positions Haut et Milieu ont des comportements semblables. Nous présentons ici les positions Milieu et Bas. Les résultats complets des 3 positions sont en annexe G.

La figure 5.6 présente les simulations des teneurs en eau θ à 20 cm et à 100 cm au Milieu. La figure 5.7 présente les simulations de la nappe du Milieu et en Bas. Sur les colonnes de gauche, les simulations sont projetées sur les axes principaux 1 et 2, sur les colonnes de droite, sur les axes principaux 2 et 3. Nous avons colorié les simulations en fonction du paramètre expliquant le mieux la variance des individus dans le plan considéré. La position des lettres (A,B,C,L,M,N) sur le graphique correspond au barycentre des individus possédant ce paramètre. Lorsque nous n’avons pas coloriés les simulations (couleur grise), toutes les lettres (les paramètres) apparaissent.

Pour les teneurs en eau à 20 et 100 cm (figure 5.6), le paramètre K_s (lettres A,B,C) est le premier

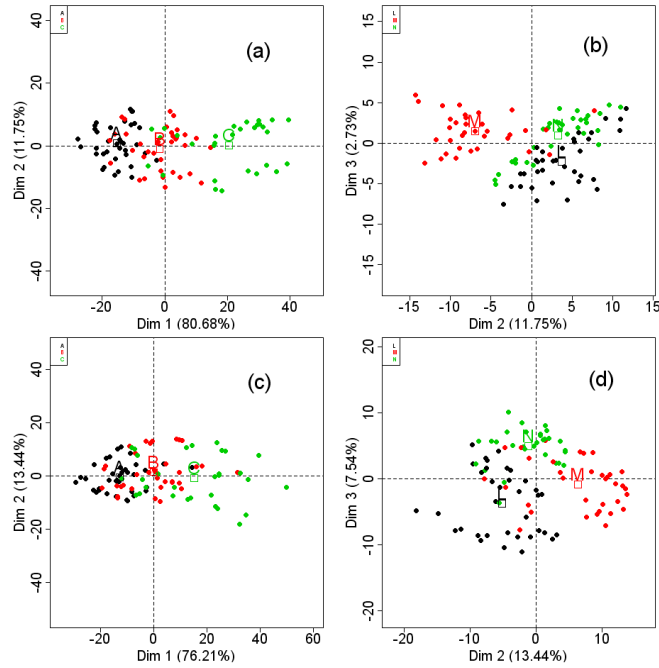


FIGURE 5.6 – Projection des simulations sur les axes principaux, **teneur en eau θ , position Milieu**. (a) 20 cm, axes 1-2 ; (b) 20 cm, axes 2-3 ; (c) 100 cm, axes 1-2 ; (d) 100 cm, axes 2-3. Sur la 1^{ère} colonne, les simulations sont coloriées selon leur valeurs de K_s . Sur la 2^{ème} colonne, les simulations sont coloriées selon leur paramètre de végétation.

facteur explicatif de la variance des individus sur le premier axe principal. C'est ensuite le paramètre de végétation qui discrimine au mieux les individus sur les axes 2 et 3.

Concernant la nappe, le premier axe principal de l'ACP exprime environ 90% de la variance des simulations. C'est le paramètre de végétation (lettres L,M,N) qui explique au mieux cette dispersion. Pour les 10% de variance restant, aucun des autres paramètres testés ne se distingue clairement. C'est pourquoi nous n'avons pas coloriés les individus.

Nous avons tracé l'évolution annuelle de ces variables pour chacune des simulations en annexe H. Les couleurs sont choisies en fonction du paramètre explicatif majeur du plan des axes principaux 1 et 2.

Les paramètres de distribution verticale des K_s et d'anisotropie du K_s n'apparaissent pas comme significatifs dans cette analyse pour les grandeurs considérées.

5.3 Discussion

Avec la modélisation mise en place, nous avons bien reproduit la simulation de D. Robert (haut de versant) avec une performance équivalente dans la zone non saturée. Par contre, l'approche bidimensionnel permet une évacuation de la nappe par transfert latéral là où D. Robert observe la formation d'une nappe en profondeur. La forme de cette nappe est correctement reproduite sur le versant, elle suit la topographie, sans que l'on ait changé les caractéristiques du sol le long du versant. Par contre, en bas de versant, la hauteur de nappe est surestimée (simulation BFIN) et produit même de forts débits si l'on ne considère pas de racines profondes (arbres).

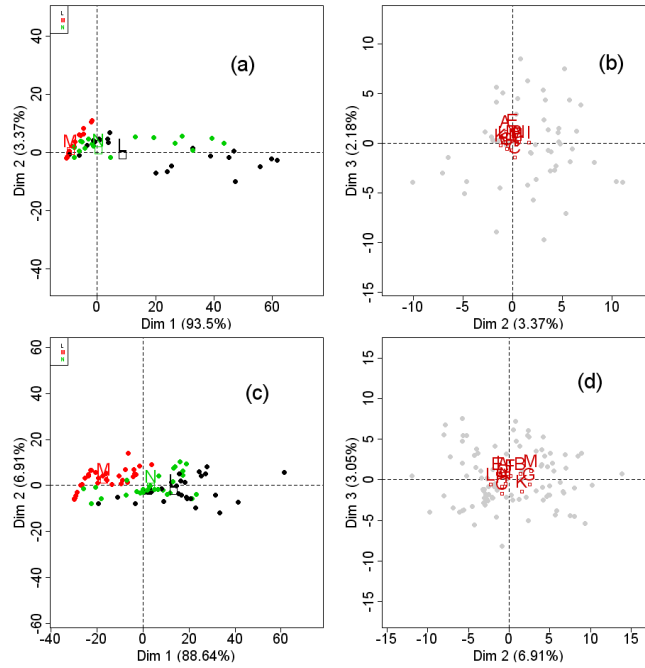


FIGURE 5.7 – Projection des simulations sur les axes principaux, **profondeur de nappe**. (a) position Milieu, axes 1-2 ; (b) position Milieu, axes 2-3 ; (c) position Bas, axes 1-2 ; (d) position Bas, axes 2-3. Sur la 1^{ère} colonne, les simulations sont coloriées selon leur paramètre de végétation. Sur la 2^{ème} colonne, il n’y a pas de coloration selon un paramètre.

L’amplitude du battement de nappe est trop faible. Cela peut provenir d’une sous estimation du LAI maximum [Blanchard, 2007] ou bien d’une mauvaise conceptualisation de la transpiration (simplement basée sur la T_p). Vu son importance dans les simulations de la nappe et de la zone non saturée, il faudrait mieux explorer cette relation. Ceci passe d’abord par une meilleure connaissance du LAI et de la densité racinaire sur le versant. Il faut noter que la transpiration réelle simulée a toujours été égale à la transpiration potentielle. Ce résultat est cohérent car les pressions dépassent rarement 15 m d’eau en saison des pluies et de plus nous avons simulé des succions trop faibles. Néanmoins, la modélisation de la reprise d’eau dans la zone racinaire doit être approfondie.

La relative mauvaise adéquation des simulations de ψ avec les observations par rapport à θ traduit l’erreur commise sur l’ajustement de la courbe de rétention. Celle-ci sous-estime ψ pour les θ faibles en saison sèche. Cette relation doit être mieux ajustée, notamment pour la couche 2 (profondeur [50-350 cm]), pour la gamme de ψ observée [0-20 m] grâce au paramètre d’échelle α . Pour la position Haut à 20 cm, le paramètre de forme n permettrait de supprimer le biais entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Or ce biais n’est pas reproduit sur les autres positions. Se pose alors la question de la définition de n sur l’ensemble de la toposéquence, en dehors des profils mesurés.

Etant donnée l’importance de nos incertitudes sur les paramètres de ce système complexe et de leur distribution en deux dimensions, nous avons fait une première étude de sensibilité qui montre (1) l’importance de la végétation dans les zones saturée et non saturée, (2) l’importance du K_s dans la zones non saturée. L’anisotropie et la distribution de la conductivité ne sont pas apparu comme des paramètres explicatifs

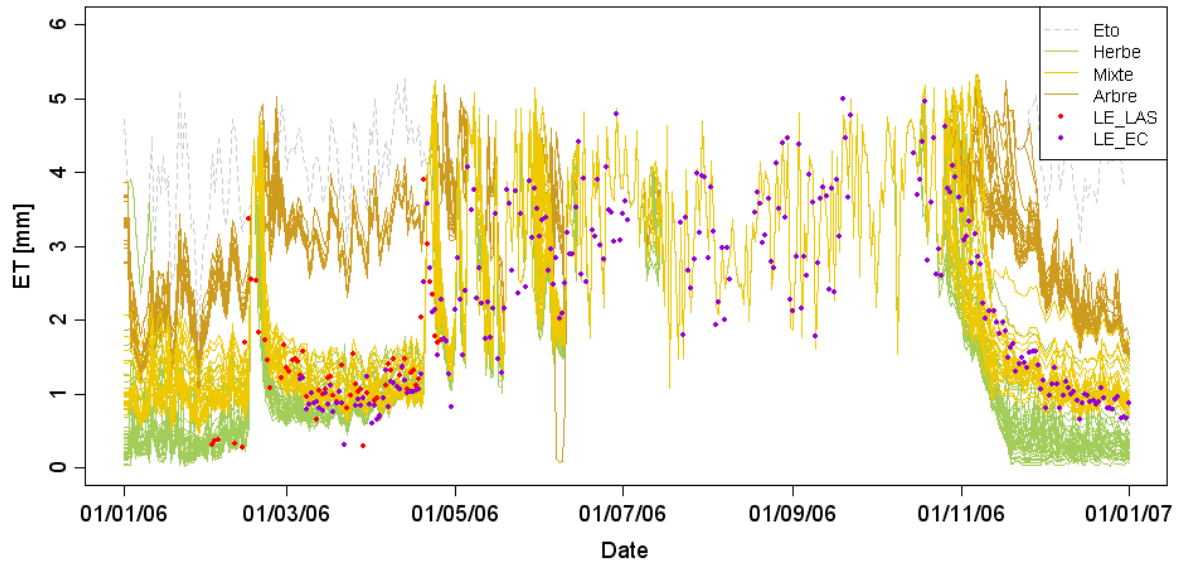


FIGURE 5.8 – Evolutions annuelles des évapotranspirations mesurées et simulées (simulation BFIN)

de la variance des simulations. Cependant dans de nombreux cas, nous avons asséché la nappe pérenne. Il serait sans doute instructif de réaliser cette étude avec une épaisseur de sol plus importante. Ainsi les paramètres actuellement "muets" pourraient peut-être s'exprimer.

L'influence de la végétation est manifeste dans le sol mais aussi dans le terme d' ET_r qui est simulé à l'échelle du versant par Hydrus. La figure 5.8 illustre des faisceaux de courbes peu dispersés pour chacune des classes de végétation (Herbe/Arbre/Mixte). Les caractéristiques du sol sont ainsi secondaires par rapport à la végétation. Les observations indépendantes faites à l'échelle du versant (*LAS*) ou localement (*EC*) sont en accord remarquable avec les simulations de type Mixte. Et ce notamment pour les périodes discriminantes notés par Mamadou [Mamadou, 2009] et Guyot [Guyot, 2010], qui sont les débuts et fins de saison des pluies. Ceci nous montre qu'une conceptualisation simple de la T_p est efficace pour ce terme majeur du bilan hydrologique. Sous réserve de validation de l' ET_r d'un versant arboré, on voit que 2 périodes distinguent l' ET_r de ces deux types de végétation. Les mois de mars et avril durant lesquels le *LAI* des arbres est bien plus fort que le *LAI* des herbes, et la fin de la saison des pluies durant laquelle les arbres vont chercher l'eau plus profondément et donc plus longtemps. Les cumuls annuels de l' ET_r sont donc significativement différents pour les Arbres (1200 ± 17 mm) par rapport au Mixte (889 ± 30 mm). Dans le cas d'une végétation Arbre, le bilan annuel est déséquilibré (-200 mm) impliquant un déstockage de l'eau à l'échelle annuelle. Au fur et à mesure des années ce déstockage s'accompagnera d'une difficulté croissante à extraire l'eau et donc d'une diminution de la transpiration réelle. Ainsi, l'hypothétique abaissement de la nappe serait sans doute limitée par une régulation du couvert végétal. On constate qu'à Béléfoungou, versant recouvert de forêt, la nappe est bien plus profonde (20 m) qu'à Nalohou (3-6 m). Il faut toutefois noter que les sols ne sont pas les mêmes sur les 2 versants.

Conclusion et perspectives

Cette étude a montré l'intérêt de l'échelle de la toposéquence, malgré sa représentation simplifiée, pour l'étude des processus intervenant dans le bilan hydrologique du bassin. Nous obtenons de bonnes simulations de la redistribution de l'eau du sol dans les zones saturée et non saturée et une très bonne simulation de l' ET_r du versant. Nos simulations n'ont pas une qualité comparable pour la modélisation du ruissellement et de la nappe perchée. Une perspective est d'étudier la capacité du modèle à simuler la nappe perchée temporaire, identifiée comme clé pour les débits [Le Lay et al., 2008] [Kamagaté et al., 2007]. Il faut cependant être conscient que le versant est pertinent pour étudier la relation nappe-évapotranspiration mais s'avère limité pour les débits dans la mesure où il existe différents niveaux de complexité à l'échelle du bassin versant qui expliquent les débits observés comme par exemple les bas fonds d'ordre 1 [Séguis et al., 2010].

Nous avons mis en évidence des paramètres déterminants mais encore mal connus. Ce sont des paramètres que l'on doit chercher à mieux contraindre. La végétation, c'est à dire (1) sa distribution racinaire le long des versants et notamment près de la rivière et (2) la dynamique du LAI et sa valeur maximale. L'imprécision sur le LAI maximal des arbres impacte directement la dynamique de la nappe et au deuxième ordre celle des couches superficielles du sol. Pour cela les mesures de flux de sève à différents niveaux de la toposéquence sont nécessaires pour valider les périodes où la végétation est active et pour quantifier l'impact de la disponibilité en eau sur la transpiration.

La conductivité hydraulique à saturation peut varier sur plusieurs ordres de grandeurs, avec des conséquences majeures sur la zone non saturée. Il est important de mieux la contraindre avec des expérimentations dédiés in situ. La géophysique peut nous apporter des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques et sur les quantités d'eau [Descloitres, 2010]. Des expérimentations sur le versant sont prévues prochainement.

La courbe de rétention étant mieux connue, la sensibilité au paramètre de forme n'a pas été testée lors de ces premiers essais. Une analyse de sensibilité plus poussée nécessiterait de s'intéresser à l'influence de cette fonctionnelle.

Le caractère anisotrope du K_s du sol n'a pas joué un rôle clair dans nos simulations et il faudrait éviter d'assécher la nappe. En d'autres termes, cela demande de reprendre les simulations avec un sol plus profond atteignant la roche mère sous-jacente.

Les simulations ont été évaluées sur une seule année, plutôt sèche. Il faudrait simuler d'autres années

et vérifier si nos conclusions sur la simulation de référence et sur la sensibilité des paramètres varient pour des cumuls pluviométriques plus importants. Car on sait que pour des cumuls plus importants les débits écoulés en rivière croissent rapidement [Le Lay and Galle, 2005].

Cette étude confirme le rôle majeur de la végétation sur la dynamique de la nappe. Les études de sensibilités des processus sur une toposéquence avec le logiciel Hydrus sont limitées par la qualité de la représentation de la reprise évaporative. A terme, une simulation du bassin versant utilisera une modélisation tridimensionnelle des zones saturée et non saturée, couplée à un modèle *SVAT*² qui résout le bilan d'énergie. L'étude 2D de sites suffisamment petits pour mesurer tous les termes du bilan hydrologique et dont les caractéristiques sont bien documentées, est une étape nécessaire de cette démarche qui orientera le choix du modèle.

2. *Soil Vegetation Atmosphere Transfer*

Bibliographie

- [Allen et al., 1998] Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie, 300 pp.
- [Blanchard, 2007] Blanchard, M. (2007). Structure et dynamique saisonnière de la végétation sur quatre faciès du bassin versant de la donga. DEA, 58 pp.
- [de Condappa et al., 2008] de Condappa, D., Galle, S., Dewandel, B., and Haverkamp, R. (2008). Bimodal zone of the soil textural triangle : Common in tropical and subtropical regions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1) :33–40.
- [Descloitres, 2010] Descloitres, M. (2010). Aquifères, recharges et transferts d’eau en zone non-saturée : Caractérisation par spatialisation et suivi temporel géophysique. HDR, UJF, Grenoble, France, 85 pp.
- [Faure and Volkoff, 1995] Faure, P. and Volkoff, B. (1995). Regional soil zonation and litho-geomorphology on benin granite-gneiss basement in west africa. *Compte Rendu de l’Académie des Sciences*, 322(IIa) :393–400.
- [Guyot, 2010] Guyot, A. (2010). *Estimation de l’évapotranspiration sur un couvert complexe par utilisation de la scintillométrie infrarouge*. PhD thesis, Université de Grenoble, France, 229 pp.
- [Husson et al., 2009] Husson, F., Lê, S., and Pagès, J. (2009). *Analyse de données avec R*. PU Rennes, France, 220 pp.
- [Kamagaté et al., 2007] Kamagaté, B., Séguis, L., Favreau, G., Seidel, J., Descloitres, M., and Affaton, P. (2007). Processus et bilan des flux hydriques d’un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (donga, haut ouémé). *Comptes Rendus Geosciences*, 339(6) :418–429.
- [Le Barbé et al., 2002] Le Barbé, L., Lebel, T., and Tapsoba, D. (2002). Rainfall variability in west africa during the years 1950-90. *Journal of Climate*, 15(2) :187–202.
- [Le Lay and Galle, 2005] Le Lay, M. and Galle, S. (2005). How changing rainfall regimes may affect the water balance : a modelling approach in west africa. In *Regional hydrological impacts of climatic changes - Hydroclimatic variability*, pages 203–210, Foz do Iguaçu, Brazil. IAHS publ. 296.
- [Le Lay et al., 2008] Le Lay, M., Saulnier, G., Galle, S., Seguis, L., Métadier, M., and Peugeot, C. (2008). Model representation of the sudanian hydrological processes : Application on the donga catchment (Benin). *Journal of Hydrology*, 363(1-4) :32–41.

- [Lebel et al., 2009] Lebel, T., Cappelaere, B., Galle, S., Hanan, N., Kergoat, L., Levis, S., Vieux, B., Descroix, L., Gosset, M., and Mougin, E. (2009). AMMA-CATCH studies in the sahelian region of West-Africa : an overview. *Journal of Hydrology*, 375(1-2) :3–13.
- [Mamadou, 2009] Mamadou, O. (2009). Contribution à l'étude de l'évapotranspiration sur le bassin de la donga (bénin). comparaison du bilan d'énergie de 3 périodes de 15 jours. DEA, UAC, Bénin, 75 pp.
- [Redelsperger et al., 2006] Redelsperger, J., Diedhiou, A., Flamant, C., Janicot, S., Lafore, J., Lebel, T., Polcher, J., Caniaux, G., de Rosnay, P., Desbois, M., Eymard, L., Fontaine, B., Geneau, I., Ginoux, K., Hoepffner, M., Kane, C., Law, K., Mari, C., Marticorena, B., Mougin, E., Pelon, J., Peugeot, C., Protat, A., Roux, F., Sultan, B., and Van Den Akker, E. (2006). Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie*, 54 :22–32.
- [Ritchie, 1972] Ritchie, J. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with imcomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5) :1204–1213.
- [Robert, 2009] Robert, D. (2009). Evaluation de modèles SVAT appliqués à un petit bassin versant en zone soudanienne : interaction des bilans d'eau et d'énergie. M2R, UJF, France, 35 pp.
- [Séguis et al., 2010] Séguis, L., Boulain, N., Cappelaere, B., Cohard, J., Demarez, V., Demarty, J., Descroix, L., Descloitres, M., Favreau, G., Galle, S., Grippa, M., Guichard, F., Guyot, A., Hiernaux, P., Kamagaté, B., Kergoat, L., Lebel, T., Dantec, V. L., Le Lay, M., Massuel, S., Mougin, E., Peugeot, C., Ramier, D., Seghieri, J., Timouk, F., and Trichon, V. (2010). Contrasted land surface processes along a west african rainfall gradient. submitted.
- [Shock et al., 1998] Shock, C., Barnum, M., and Seddigh, M. (1998). Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management. In *Proceedings of the International Irrigation Show*, San Diego, USA.
- [Simunek et al., 2007] Simunek, J., van Genuchten, M., and Šejna, M. (2007). Hydrus 3D. Technical manual, PC-Progress, Czech Republic, 213 pp.
- [van Genuchten, 1987] van Genuchten, M. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report 121, U.S. Salinity laboratory, USDA, USA.
- [van Genutchen, 1980] van Genutchen, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 :892–898.
- [Varado et al., 2006] Varado, N., Braud, I., Galle, S., Le Lay, M., Séguis, L., Kamagate, B., and Depraetere, C. (2006). Multi-criteria assessment of the representative elementary watershed approach on the donga catchment (Benin) using a downward approach of model complexity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10 :427–442.
- [Western and Seyfried, 2005] Western, A. W. and Seyfried, M. S. (2005). A calibration and temperature correction procedure for the water-content reflectometer. *Hydrological Processes*, 19(18) :3785–3793.

Annexe A

Instrumentation du programme AMMA

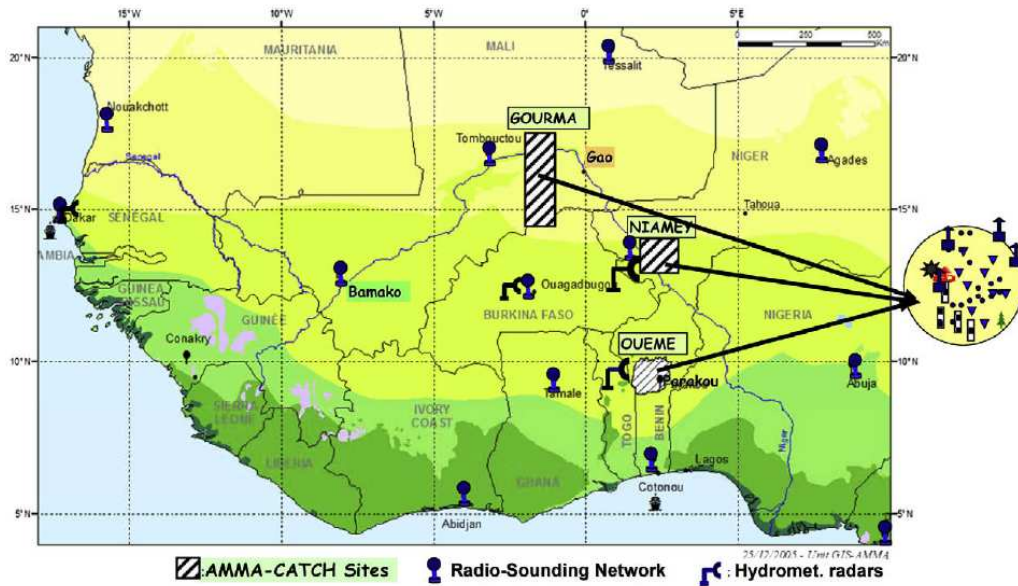


FIGURE A.1 – Carte d’Afrique de l’Ouest avec le dispositif de mesures de AMMA

Annexe B

Positions des capteurs sur le versant

Grandeur	Nappe		ψ										Position
Date d'installation	17/04/2004		16/11/2003										Haut
Profondeur (cm)	193	931	1671	10	20	40	60	100	150	190	200	300	
Date d'installation	17/04/2004		26/01/2005										Milieu
Profondeur (cm)	198	997	1981	10	20	40	60	120	150	180	190	290	
Date d'installation	18/04/2004		26/01/2005										Bas
Profondeur (cm)	213	1027	1868	10	25	40	60	100	150	190	200	280	
Grandeur	θ						T						Position
Date d'installation	16/11/2003						16/11/2003						Haut
Profondeur (cm)	5	10	20	40	60	100	5	10	20	40	60	100	
Date d'installation	26/01/2005						26/01/2005						Milieu
Profondeur (cm)	5	10	20	40	120	5	10	20	40	60	120	150	
Date d'installation	26/01/2005						26/01/2005						Bas
Profondeur (cm)	5	10	25	40	60	100	5	10	25	40	60	100	

* : installation le 07/07/2007

TABLE B.1 – Instrumentation pour la mesure d'humidité du sol et de la nappe du versant de Nalohou

Annexe C

Environnement de simulation Hydrus

Objets géométriques Le domaine de calcul est défini grâce à un ensemble de points et lignes. Ces objets permettent la construction de surfaces, supports du maillage. Une bonne définition des points et des surfaces permet respectivement de contraindre le maillage et de manipuler des sections du domaine.

Unités et paramètres de calcul L'utilisateur choisit les unités de temps et de longueurs. Hydrus conserve une homogénéité des unités pour l'ensemble de son travail. L'utilisateur définit les critères du calcul numériques comme le nombre maximum d'itérations. Le pas de temps utilisé pour le calcul est indépendant de celui des forçages. Il est variable et fonction de critères de convergence numérique. Il est limité à des valeurs renseignées par l'utilisateur.

Maillage Le maillage de Hydrus est conçu pour un calcul aux éléments finis. Les mailles sont triangulaires. La construction de maillages simples est élémentaire. Par contre, elle peut devenir délicate lorsque l'on désire attribuer certaines particularités au maillage, par exemple, définir des zones ayant un maillage raffiné.

Propriétés du domaine Les matériaux, ayant chacun leurs propriétés hydrodynamiques, sont associés à des zones du domaine. La densité racinaire est renseignée, l'éventuelle anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation est définie, les points d'observations sont précisés.

Conditions initiales Deux types de conditions initiales sont possibles. Soit la prescription de la teneur en eau ou de la succion par un champ de valeurs (uniforme, suivant une distribution linéaire avec la profondeur ou respectant le profil d'équilibre). Soit la récupération d'un champ de teneur en eau ou de succion issu d'une simulation précédente.

Conditions aux limites et forçages atmosphériques Il existe 15 conditions aux limites possibles. Mise à part les conditions sur les flux ou sur les charges, Hydrus propose des conditions de teneur en eau constante, de drainage libre, de drainage profond, d'exfiltration et des forçages atmosphériques. Les trois

forçages atmosphériques (précipitations, évaporation potentielle, transpiration potentielle) sont traitées spécifiquement.

Interface utilisateur L'interface utilisateur d'Hydrus est très ergonomique. La définition des paramètres de simulation se fait par étapes bien structurées. La gestion des simulations est claire. La manipulation du logiciel est aisée à l'instar de la visualisation des variables.

Sorties du modèle L'interface utilisateur du logiciel Hydrus permet de visualiser les variables de sorties de la simulation. Hydrus stocke aussi ces informations dans des fichiers texte (format *out*) dans un dossier propre à la simulation. Hydrus stocke entre autres : le stock d'eau dans le domaine, les flux aux frontières et l'erreur numérique à chaque pas de temps ; les succions moyennes sur chaque type de frontières (frontière atmosphérique, frontière de drainage, frontière d'exfiltration ...) et des informations relatives au calcul (temps de calcul, pas de temps, nombre d'itérations). Ce sont ces fichiers qui ont permis le post-traitement.

Annexe D

Post-traitement avec le code R

Du fait du grand nombre de simulations à traiter, j'ai utilisé le langage de programmation R¹ pour lire et mettre en forme les différentes sorties du modèle pour l'analyse. J'ai aussi utilisé ce langage pour programmer l'analyse statistique car R est bien adapté dans ce cas. Voici un bref aperçu des routines programmées en R. La figure D.1 propose un schéma conceptuel de l'organisation du post-traitement.

Pour chaque simulation, la routine "Stockage.r" lit les fichiers textes produit par Hydrus. Ensuite, elle extrait les différents termes du bilan de masse sur le domaine, les flux aux frontières, les succions et teneurs en eau à différentes profondeurs. Enfin elle calcule les moyennes journalières et écrit les grandeurs correspondantes dans le fichier "*nom_de_la_simulation_stockage-jour.csv*". Elle lit dans des fichiers d'observations les succions, teneurs en eau et les profondeurs de nappe et écrit les moyennes journalières correspondantes dans le même fichier "*nom_de_la_simulation_stockage-jour.csv*".

La routine "Evaluation_modele.r" calcule les critères retenus pour l'évaluation du modèle à partir des données du fichier "*nom_de_la_simulation_stockage-jour.csv*".

La routine "Prepa_ACP.r" récupère les fichiers "*nom_de_la_simulation_stockage-jour.csv*" de toutes les simulations à traiter et génère des fichiers pour chaque variable considérée "*table_nom_de_la_variable.csv*".

"ACP.r" réalise une Analyse en Composantes Principales (ACP). Pour la mise en œuvre de cette analyse nous avons utilisé la librairie *FactoMineR* [Husson et al., 2009].

D'autres routines R sont tournées vers la visualisation des résultats.

1. www.r-project.org

Pour la simulation 048_BFIN :



Pour l'ACP :

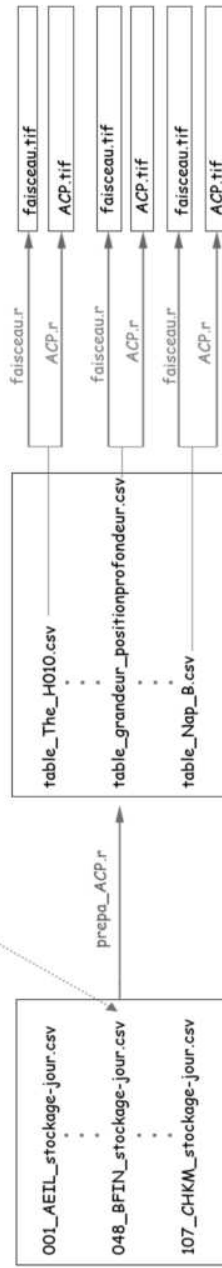


FIGURE D.1 – Schéma conceptuel de la structure du post-traitement

Annexe E

Visualisation de la configuration Hydrus

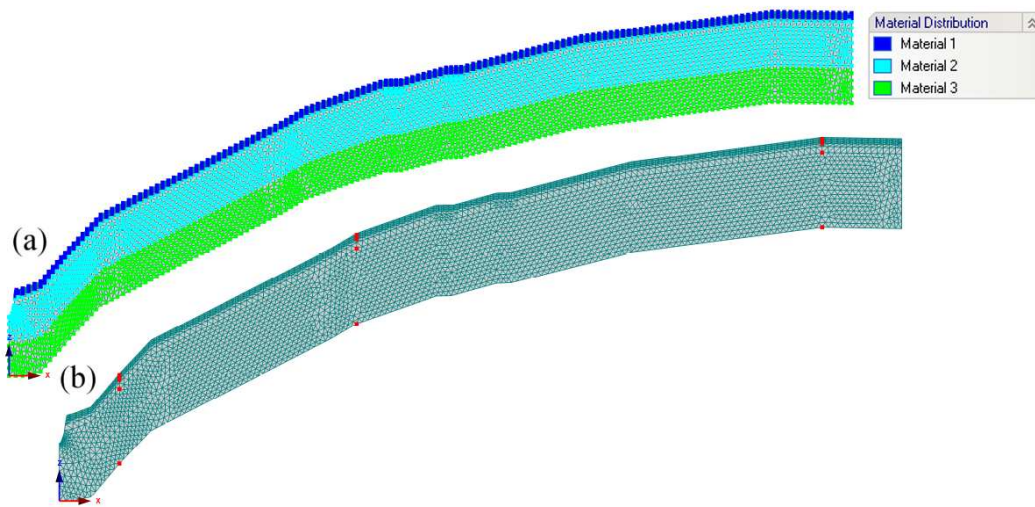


FIGURE E.1 – Interface graphique d’Hydrus. (a) répartition des 3 matériaux sur la toposéquence, (b) maillage et points de suivis (points rouge)

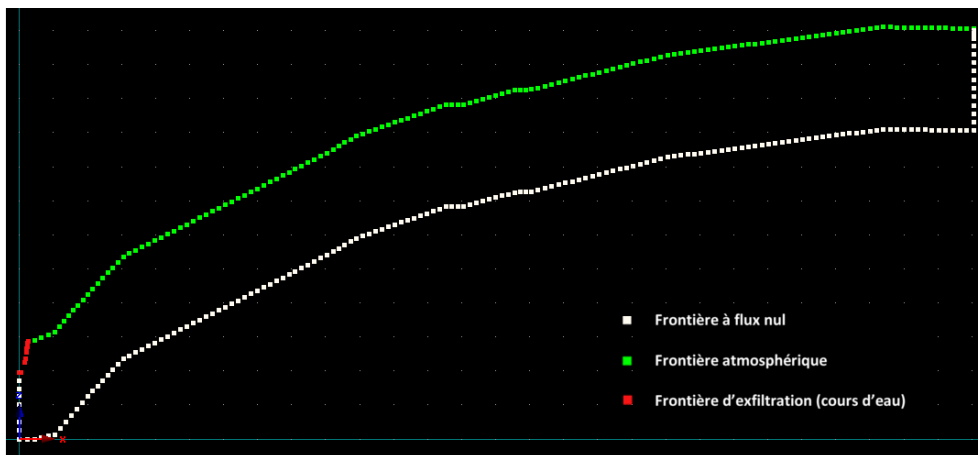


FIGURE E.2 – Interface graphique d’Hydrus. Conditions aux limites.



FIGURE E.3 – Interface graphique d’Hydrus. Visualisation de la distribution normalisée de prélèvement racinaire (paramètre b). (a) structure racinaire de type herbe, (b) structure racinaire de type arbre

Annexe F

Modèle hydrodynamique du sol

Grâce aux mesures de succion et de teneurs en eau, nous avons défini trois fonctionnelles utilisées dans le cadre de la modélisation. Il s'agit du modèle de van Genuchten [van Genuchten, 1980], équation F.2, associé au modèle statistique de distribution de tailles de pores de Mualem, équation F.3. De plus, nous avons fait l'hypothèse d'une absence d'hystérésis pour la courbe de rétention. Définissons la saturation relative S_e d'une matrice poreuse (équation F.1).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{F.1})$$

θ_r : teneur en eau volumique résiduelle []
 θ_s : teneur en eau volumique à saturation []

$$S_e(h) = \begin{cases} (1 + |\alpha h|^n)^{-(1-1/n)} & \text{pour } h < 0 \\ 1 & \text{pour } h \geq 0 \end{cases} \quad (\text{F.2})$$

α : inverse de la pression correspondant aux pores les plus représentés [m^{-1} d'eau]
 n : indice de distribution de tailles de pores []

$$K(S_e) = K_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{n/(n-1)} \right)^{1-1/n} \right]^2 \quad (\text{F.3})$$

L : paramètre de connectivité des pores []

La figure F.1 illustre la fonctionnelle $K(S_e)/K_s$.

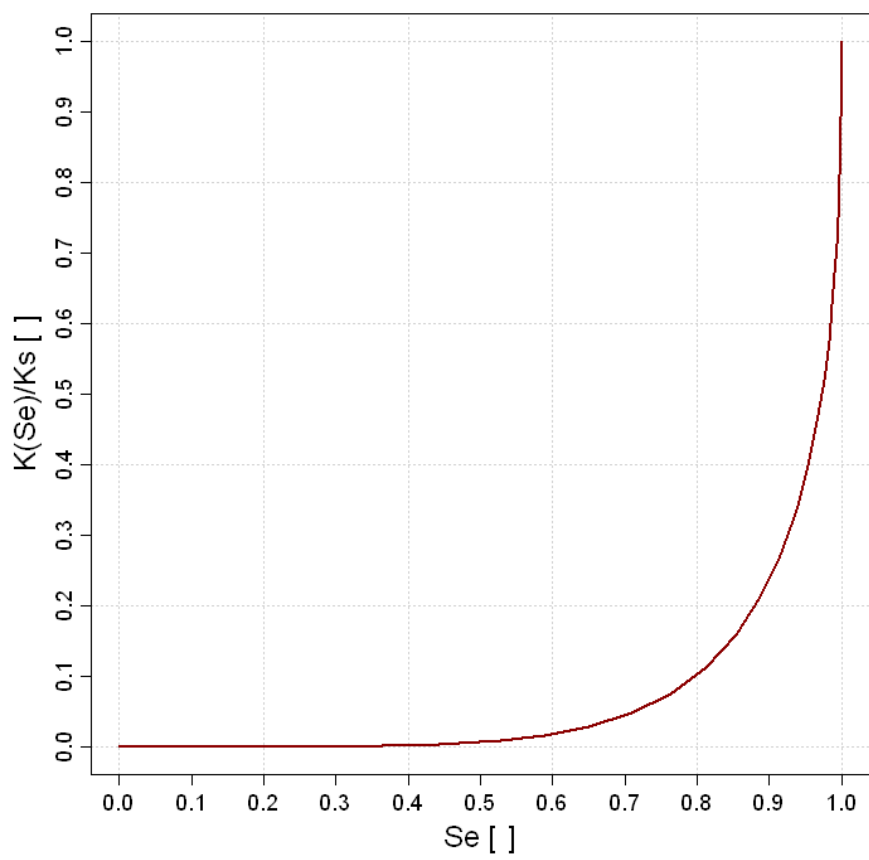


FIGURE F.1 – Courbe $K(S_e)/K_s$

Annexe G

ACP par position sur le versant

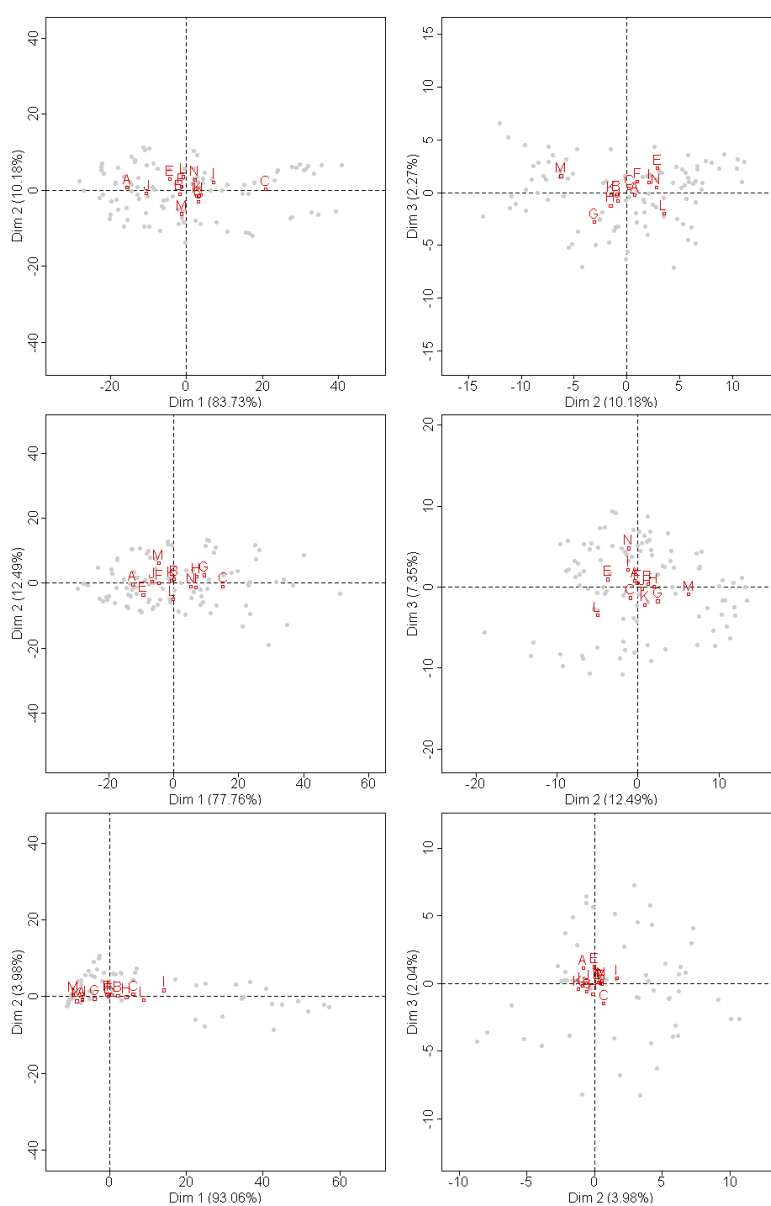


FIGURE G.1 – Graphiques des individus de l’ACP. **Haut de Versant** : ψ à 20 cm (1^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3^{ème} ligne).

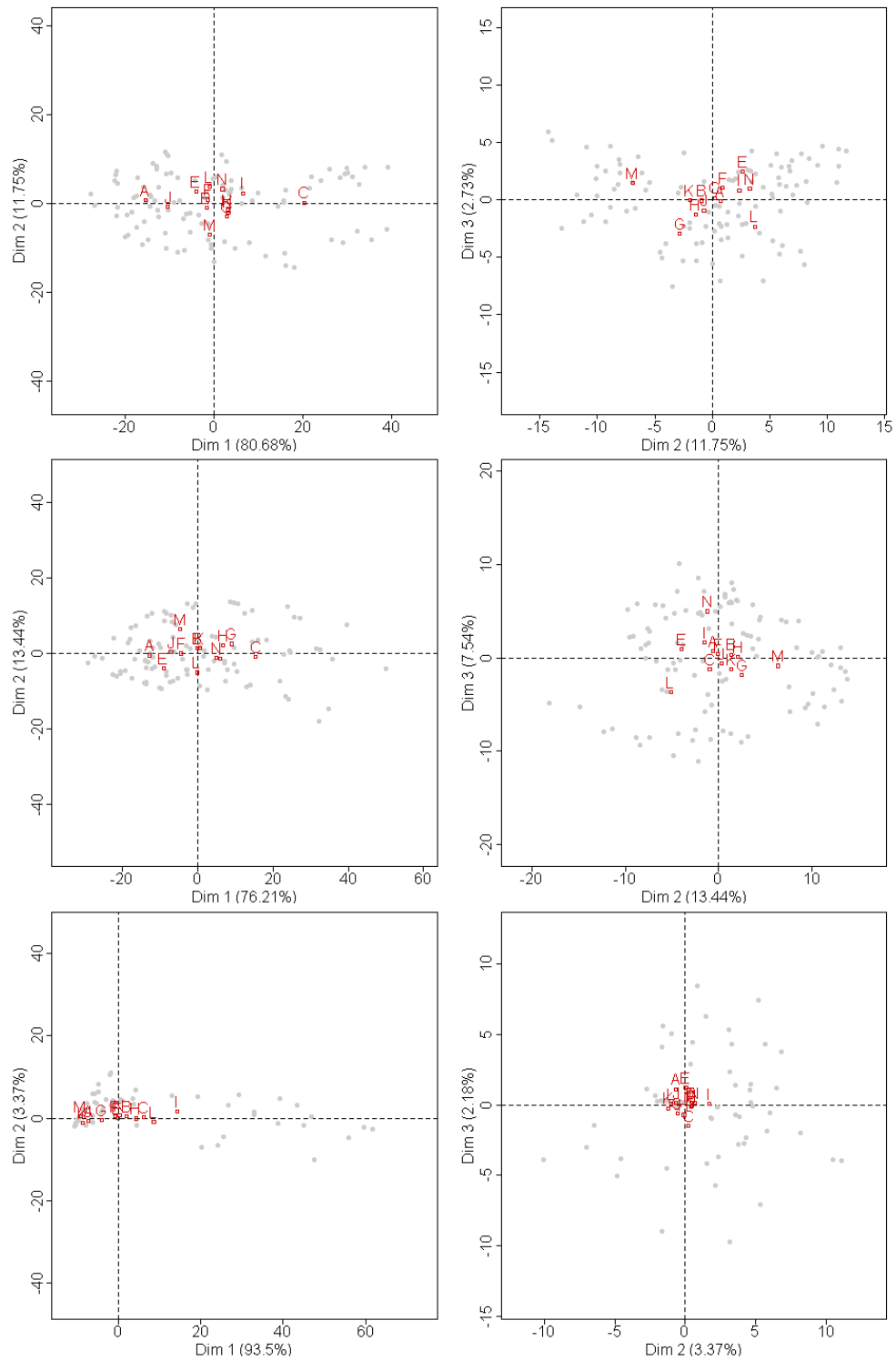


FIGURE G.2 – Graphiques des individus de l'ACP. Milieu de Versant : ψ à 20 cm (1^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3^{ème} ligne).

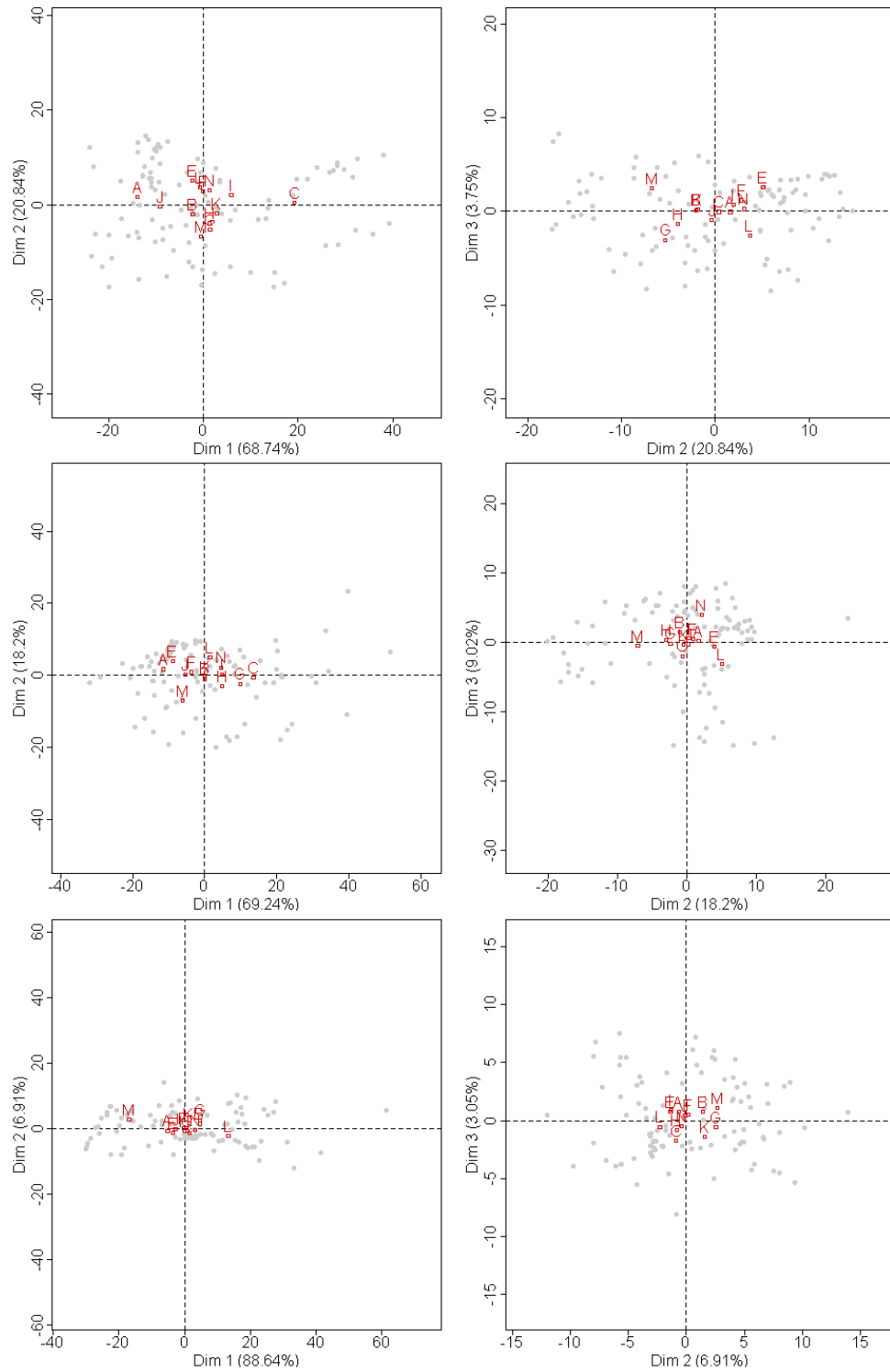


FIGURE G.3 – Graphiques des individus de l'ACP. **Bas de Versant** : ψ à 20 cm (1^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3^{ème} ligne).

Annexe H

Evolutions temporelles des variables simulées

Nous avons tracé l'évolution annuelle des variables étudiées lors de l'ACP, pour l'ensemble des simulations réalisées. Les simulations sont coloriées selon le paramètre explicatif prédominant.

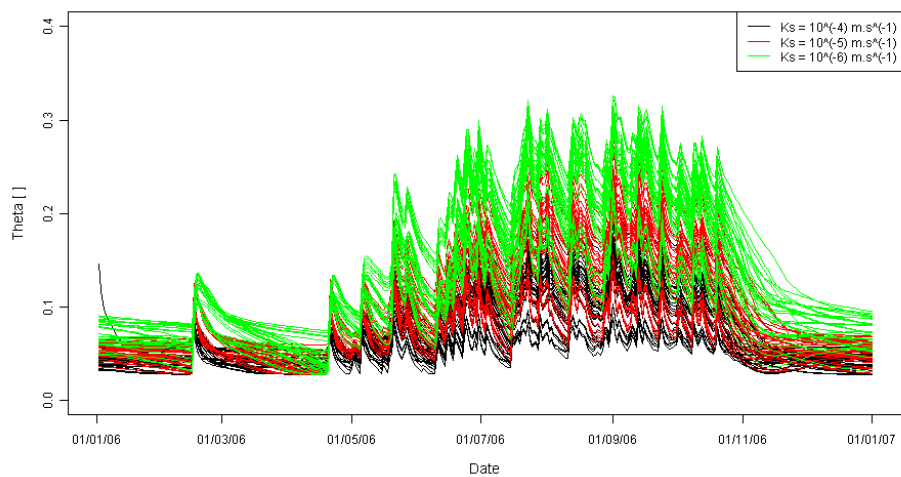


FIGURE H.1 – Evolutions annuelles de θ à 20 cm, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon la valeur du K_s .

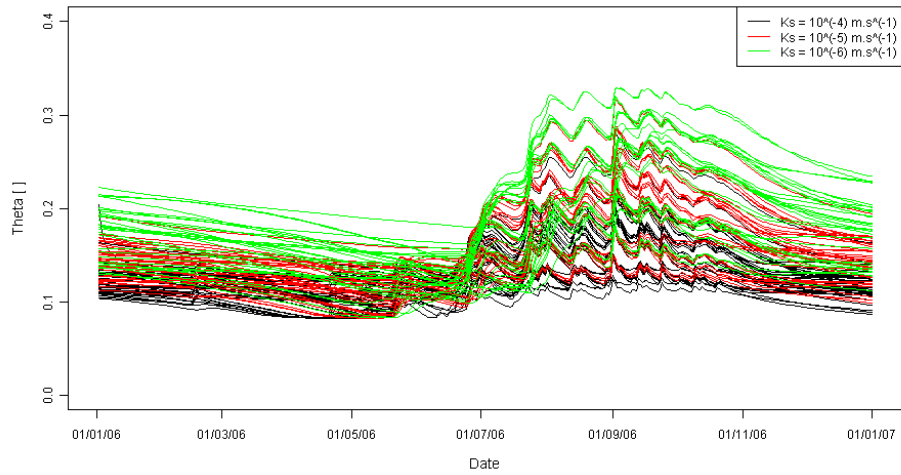


FIGURE H.2 – Evolutions annuelles de θ à 100 cm, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon la valeur du K_s .

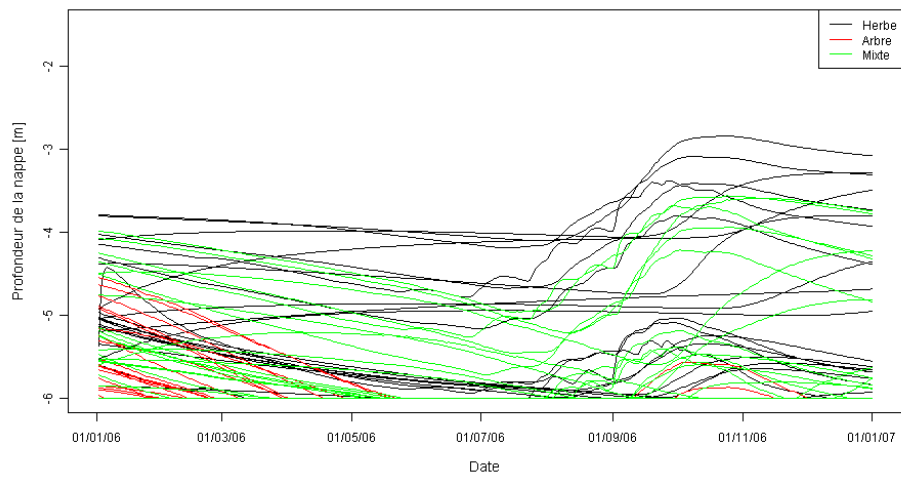


FIGURE H.3 – Evolutions annuelles de la profondeur de nappe, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon le paramètre de végétation.

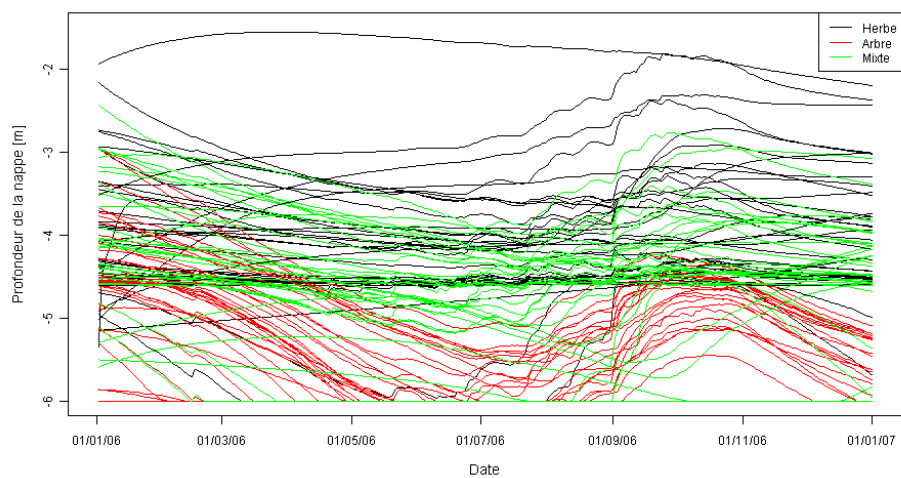


FIGURE H.4 – Evolutions annuelles de la profondeur de nappe, position Bas. Chaque simulation est coloriée selon le paramètre de végétation.

Symboles et abréviations

Liste des symboles

h	m d'eau	pression
ψ	m d'eau	succion
K_s	m.s ⁻¹	conductivité hydraulique à saturation
θ	-	teneur en eau volumique
θ_r	-	teneur en eau volumique résiduelle
θ_s	-	teneur en eau volumique à saturation
S_e	-	saturation relative
C	m ⁻¹ d'eau	capacité capillaire
α	m ⁻¹ d'eau	inverse de la pression correspondant aux pores les plus représentés
n	-	indice de distribution de tailles de pores
L	-	paramètre de connectivité des pores
S	s ⁻¹	terme puits de prélèvement racinaire d'eau
β	-	fonction de réponse au stress hydrique
S_p	s ⁻¹	taux potentiel de prélèvement d'eau
b	m ⁻²	distribution normalisée de prélèvement racinaire
S_t	m	longueur de sol associée à la transpiration
h_{50}	m d'eau	pression pour laquelle l'extraction d'eau est réduite de 50%
p	-	constante expérimentale
h_w	m d'eau	pression de flétrissement
x_{Mod}	-	variable modélisée
x_{Obs}	-	variable observée
ET_0	mm.jr ⁻¹	évapotranspiration de référence
ET_r	mm.jr ⁻¹	évapotranspiration réelle
T_p	mm.jr ⁻¹	transpiration potentielle
T_r	mm.jr ⁻¹	transpiration réelle
E_p	mm.jr ⁻¹	évaporation potentielle
E_r	mm.jr ⁻¹	évaporation réelle
LAI	-	Indice foliaire (<i>Leaf Area Index</i>)
B	-	paramètre de biais
r^2	-	coefficient de détermination

Liste des abréviations

AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
ACP	Analyse en Composantes Principales
CATCH	Couplage de L'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
<i>EC</i>	<i>Eddy correlation</i>
<i>LAS</i>	<i>Large Aperture Scintillometer</i>
LTHE	Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
OSUG	Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
<i>SVAT</i>	<i>Soil Vegetation Atmosphere Transfer</i>
<i>TDR</i>	<i>Time Domain Reflectometry</i>
UJF	Université Joseph Fourier
<i>USDA</i>	<i>United States Department of Agriculture</i>

Table des figures

1.1	Carte de l'instrumentation du bassin de la Donga	3
1.2	Précipitations annuelles à Djougou	4
1.3	Photographie satellite de l'occupation des sols	5
2.1	Triangle des textures avec la position d'échantillons du versant de Nalohou	8
2.2	Courbes de rétention $\psi(\theta)$	9
5.1	Evolution annuelle des flux simulés (simulation BFIN)	21
5.2	Cumuls des flux et du stock d'eau simulés (simulation BFIN)	22
5.3	Champ de pression simulé, 2006, le 10 février (jour 41), le 24 juin (jour 175), le 31 août (jour 243), et le 23 octobre (jour 296) (simulation BFIN)	23
5.4	Evolutions annuelles de ψ à 20 cm, ψ à 100 cm, θ à 20 cm, θ à 100 cm et de la profondeur de nappe (simulation BFIN)	24
5.5	Evaluation du modèle, $r^2 = f(B)$ (simulation BFIN)	25
5.6	Projection des simulations sur les axes principaux, teneur en eau θ, position Milieu. (a) 20 cm, axes 1-2 ; (b) 20 cm, axes 2-3 ; (c) 100 cm, axes 1-2 ; (d) 100 cm, axes 2-3. Sur la 1 ^{ère} colonne, les simulations sont coloriées selon leur valeurs de K_s . Sur la 2 ^{ème} colonne, les simulations sont coloriées selon leur paramètre de végétation.	26
5.7	Projection des simulations sur les axes principaux, profondeur de nappe. (a) position Milieu, axes 1-2 ; (b) position Milieu, axes 2-3 ; (c) position Bas, axes 1-2 ; (d) position Bas, axes 2-3. Sur la 1 ^{ère} colonne, les simulations sont coloriées selon leur paramètre de végétation. Sur la 2 ^{ème} colonne, il n'y a pas de coloration selon un paramètre.	27
5.8	Evolutions annuelles des évapotranspirations mesurées et simulées (simulation BFIN)	28
A.1	Carte d'Afrique de l'Ouest avec le dispositif de mesures de AMMA	i
D.1	Schéma conceptuel de la structure du post-traitement	vi
E.1	Interface graphique d'Hydrus. (a) répartition des 3 matériaux sur la toposéquence, (b) maillage et points de suivis (points rouge)	vii
E.2	Interface graphique d'Hydrus. Conditions aux limites.	vii
E.3	Interface graphique d'Hydrus. Visualisation de la distribution normalisée de prélèvement racinaire (paramètre b). (a) structure racinaire de type herbe, (b) structure racinaire de type arbre	viii
F.1	Courbe $K(S_e)/K_s$	x
G.1	Graphiques des individus de l'ACP. Haut de Versant : ψ à 20 cm (1 ^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2 ^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3 ^{ème} ligne).	xi
G.2	Graphiques des individus de l'ACP. Milieu de Versant : ψ à 20 cm (1 ^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2 ^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3 ^{ème} ligne).	xii
G.3	Graphiques des individus de l'ACP. Bas de Versant : ψ à 20 cm (1 ^{ère} ligne), ψ à 100 cm (2 ^{ème} ligne) et profondeur de nappe (3 ^{ème} ligne).	xiii
H.1	Evolutions annuelles de θ à 20 cm, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon la valeur du K_s	xiv

H.2	Evolutions annuelles de θ à 100 cm, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon la valeur du K_s .	xv
H.3	Evolutions annuelles de la profondeur de nappe, position Milieu. Chaque simulation est coloriée selon le paramètre de végétation.	xv
H.4	Evolutions annuelles de la profondeur de nappe, position Bas. Chaque simulation est coloriée selon le paramètre de végétation.	xv

Liste des tableaux

4.1	Caractéristiques hydrodynamiques des trois couches de sol	17
4.2	Paramètres du modèle de transpiration végétale	17
4.3	Tableau des valeurs de K_s	18
4.4	Tableau des distributions du K_s sur la profondeur	19
4.5	Tableau des rapports d'anisotropie de K_s	19
4.6	Tableau du paramètre de végétation, LAI /Structure racinaire associée	19
B.1	Instrumentation pour la mesure d'humidité du sol et de la nappe du versant de Nalohou	ii