

Mars 2007 / Septembre 2007



Mémoire de fin d'études de :

Séverine LABELLE

*Analyse du fonctionnement hydrogéologique du
bassin versant de la Donga (Bénin) :
observations et modélisation.*

Tuteurs :

M. Roger GUERIN, *Directeur des études à Polytech'Paris-UPMC*
M. Julio GONÇALVES, *Professeur à Polytech'Paris-UPMC*

Maîtres de stage :

M. Christophe PEUGEOT, *Chargé de recherche en hydrologie, IRD*
M. Luc SÉGUIIS, *Chargé de recherche en hydrologie, IRD*



Remerciements

A tous ceux qui de près ou de loin m'ont permis de réaliser ce travail, je souhaite adresser les plus sincères remerciements.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Henri ROBAIN sans qui je n'aurais pas eu l'occasion de travailler à l'IRD au Bénin.

Je remercie particulièrement Monsieur Christophe PEUGEOT qui m'a très bien accueillie au sein de son équipe de recherche. Il m'a encadré tout au long du stage et a été présent en toute circonstance. Il m'a guidée dans mon travail et m'a soutenue au quotidien. Je lui suis aussi très reconnaissante d'avoir été présent dans des moments difficiles physiquement et moralement.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Luc SEGUIS avec qui j'ai travaillé à l'interprétation de mes résultats. J'ai beaucoup appris en sa compagnie et je le remercie pour toutes les réflexions, les connaissances et le bon sens dont il m'a fait part. Sa gentillesse et son soutien m'ont beaucoup aidée à surmonter des étapes difficiles.

Je remercie Monsieur Julio GONÇALVES pour son aide et sa disponibilité.

J'adresse aussi mes remerciements à Madame Sylvie GALLE, à Monsieur Arnaud ZANNOU et sa femme Fabienne, et particulièrement à Monsieur Tobias EL FAHEM pour leur accueil, leur disponibilité et leurs conseils.

J'aimerais remercier tous mes collègues de travail avec qui j'ai tissé des liens d'amitié : Monsieur Maxime WUBDA, pour sa gentillesse et sa bonne humeur (et son excellent café !) ; Monsieur Simon AFOUDA, pour son infatigable humour, sa disponibilité et sa gentillesse ; Monsieur Théodore OUANI-YOSSIDE, pour sa bienveillance et son soutien tout au long du stage ; Monsieur Idrissou IMOROU, avec qui j'ai passé quelques jours très agréables.

Je n'ai pas eu l'occasion de travailler avec Monsieur Armand MARISCAL mais son excellent accueil, sa bonne humeur et sa gentillesse ne m'ont pas fait défaut. Je remercie aussi Madame Marielle GOSSET et Monsieur Frédéric CAZENAVE ainsi que sa famille pour leur soutien.

Je souhaite remercier mes amis et colocataires : Morgane, Julien et Yacine. Merci aussi à Antoine. Tous ont été présents pour moi et je n'oublierai pas tous ces moments passés avec eux.

A tous mes amis béninois qui m'ont fait découvrir leur pays et sans qui le stage n'aurait pas été aussi agréable : Madame Régina MEHINTO et sa famille ; Eric mon collègue et ami, Valérien, Jean-Louis et sa famille et ma très chère Louise.

Un grand merci aux familles PEUGEOT et SEGUIS pour leur accueil et leur gentillesse.

Je remercie enfin mes parents pour leur soutien sans bornes particulièrement pendant ce stage et sans lesquels je n'aurais pas pu en arriver là.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION	5
I. PRESENTATION DE L'INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT ET DU PROGRAMME AMMA	6
I.1. L'INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT	6
I.1.1. <i>La Recherche</i>	6
I.1.2. <i>L'IRD en chiffres</i>	6
I.1.3. <i>La représentation de l'IRD au Bénin</i>	7
I.2. ROLE DE L'IRD DANS LE PROGRAMME AMMA.....	8
I.2.1. <i>Le programme AMMA</i>	8
I.2.2. <i>L'observatoire AMMA-CATCH</i>	8
I.3. OBJECTIFS DU STAGE : <i>ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE LA DONGA, OBSERVATIONS ET MODELISATION.</i>	9
II. SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR LA HAUTE VALLEE DE L'OUEME ET BIBLIOGRAPHIE	10
II.1. INTRODUCTION	10
II.2. BREVE SYNTHESE DES CONNAISSANCES SUR LA HAUTE VALLEE DE L'OUEME.....	10
II.3. BILAN DES CONNAISSANCES SUR LE BASSIN DE LA DONGA.....	11
II.3.1. <i>Connaissances générales</i>	11
II.3.2. <i>Connaissances hydrogéologiques</i>	14
III. MATERIEL ET METHODES	16
III.1. LE BASSIN INSTRUMENTE DE LA DONGA.....	16
III.2. LES SITES ETUDIES	18
III.2.1. <i>Site de Nalohou : cultures et jachère</i>	19
III.2.2. <i>Site de Béléfoungou : la forêt</i>	21
III.2.3. <i>Descriptif des caractérisations hydrodynamiques effectuées</i>	23
III.3. MISE EN ŒUVRE DU MODELE	25
III.3.1. <i>Géologie et hypothèses du modèle</i>	26
III.3.2. <i>Propriétés du modèle</i>	27
IV. RESULTATS ET INTERPRETATION	29
IV.1. REGIME PERMANENT.....	29
IV.2. NALOHOU	30
IV.2.1. <i>Calage du régime transitoire</i>	30
IV.2.1.a. Paramètres supplémentaires pour le régime transitoire.....	30
IV.2.1.b. Observations.....	30
IV.2.2. <i>Résultats et interprétation</i>	31
IV.2.2.a. Simulation du 1 ^{er} octobre 2005 au 1 ^{er} mai 2006	31
IV.2.2.b. Simulation du 1 ^{er} janvier au 1 ^{er} mai 2006.....	34

IV.2.2.c. Simulation avec reprise évapotranspiratoire	36
IV.2.2.d. Ajout de la baisse de perméabilité au marigot	37
IV.2.2.e. Intégration du module recharge sur l'année entière	38
IV.3. BELEFOUNGOU.....	40
IV.3.1. Calage du régime transitoire.....	40
IV.3.2. Résultats et interprétation.....	41
IV.3.1.a. Simulation du 1 ^{er} octobre 2005 au 1 ^{er} mai 2006 avec évapotranspiration.....	41
IV.3.1.b. Simulation du 1 ^{er} janvier au 1 ^{er} mai 2006 avec évapotranspiration	42
IV.3.1.c. Recharge et observations piézométriques	44
IV.4. COMPARAISON DES SITES ET SYNTHESE	46
IV.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	48
CONCLUSION GENERALE	49
LISTE BIBLIOGRAPHIQUE.....	50
LISTE DES FIGURES	51
LISTE DES PHOTOS.....	52
ANNEXES	53

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), le bassin de la haute vallée de l'Ouémé, d'une superficie de 14.000 km² au centre du Bénin, a été équipé d'instruments de mesures (pluie, débit) depuis presque 10 ans.

Le sous-bassin de la Donga (586 km²) est le cadre d'observations intensives de plusieurs instituts de recherche, notamment de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour déterminer les processus hydrologiques essentiels et quantifier les termes du bilan hydrique.

Sur ce bassin, la recherche entreprise vise donc à déterminer le fonctionnement hydrologique du bassin de la Donga par confrontation des données de précipitation, d'écoulement de surface, de nappe et d'évapotranspiration d'une part et d'autre part, à déterminer l'origine des écoulements par caractérisation géochimique et isotopique des différents compartiments du cycle hydrologique. Ainsi, le croisement des informations hydrodynamiques et hydrogéochimiques permettra de reconstituer un schéma cohérent du fonctionnement hydrologique du bassin qui servira à la modélisation hydrologique. Le but ultime de ces études étant la prévision des impacts des changements climatique et anthropique sur les ressources en eau.

Mon stage de fin d'études au sein de l'IRD s'est donc inscrit dans le cadre du projet AMMA et ma mission était plus particulièrement de modéliser la dynamique annuelle observée de la nappe à l'échelle des versants en vérifiant la cohérence des hypothèses de fonctionnement introduites dans le modèle suite aux travaux antérieurs sur le bassin (Kamagaté, 2006).

Dans ce rapport, nous allons d'abord situer l'IRD dans le cadre du programme AMMA, pour continuer ensuite sur la synthèse des connaissances existantes sur la haute vallée de l'Ouémé et sur le sous-bassin de la Donga. Ensuite, pour introduire le travail de modélisation que j'ai réalisé tout au long du stage, nous présenterons les deux sites concernés ainsi que les méthodes utilisées pour la détermination des paramètres initiaux nécessaire à toute modélisation. Enfin, les résultats et leur interprétation seront présentés.

I. Présentation de l'Institut de Recherche pour le Développement et du programme AMMA

Créé en 1944 sous le nom d'ORSTOM, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est depuis 1984 un établissement public français à caractère scientifique et technologique, placé sous la double tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération. Nous présenterons successivement et brièvement cet établissement et son rôle au sein du programme international d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA, Cf. <http://www.amma-international.org/>).

I.1. L'Institut de Recherche pour le Développement

L'IRD conduit des programmes scientifiques centrés sur les relations entre l'homme et son environnement dans les pays du Sud, dans l'objectif de contribuer à leur développement. Il remplit les missions fondamentales de :

- Recherche
- Expertise et Valorisation
- Soutien et Formation
- Information scientifique

Nous allons nous concentrer ici sur la recherche : un **axe stratégique de développement**.

I.1.1. La Recherche

Les travaux effectués par les chercheurs de l'IRD sont coordonnés par trois départements scientifiques :

- Milieux et Environnement (DME)
- Ressources Vivantes (DRV)
- Sociétés et Santé (DSS)

L'IRD mène surtout des recherches en partenariat avec les acteurs scientifiques, sociaux et politiques des pays du Sud, d'où l'importance d'une représentation physique à l'étranger. Implanté en Afrique, en Asie, dans l'Océan Indien, en Amérique latine et dans le Pacifique, il dispose de 35 centres et représentations dans le monde, dont la représentation du Bénin qui m'a accueillie.

I.1.2. L'IRD en chiffres

- 193,8 M€ de budget total
- 2172 agents dont 789 chercheurs, 799 ingénieurs et techniciens et 584 personnels locaux et non titularisés
- 938 agents hors métropole
- 83 unités de recherche et de service dont 26 unités mixtes avec d'autres organismes de recherche français ou des universités

- 234 bourses attribuées à des étudiants et équipes du Sud dont 147 bourses de thèse, 53 bourses d'échanges scientifiques et 34 bourses de formation continue.

1.1.3. La représentation de l'IRD au Bénin

Dans le cadre d'un accord signé avec le Gouvernement de la République du Bénin, l'IRD développe ses activités en partenariat avec des institutions béninoises. La coopération repose sur la réalisation de programmes de recherche conjoints qui sont menés par des équipes mixtes. Il y a deux thématiques principale : le cycle de l'eau et la santé, celle qui nous préoccupe étant la première citée.



Photo I.1 : Site de la représentation de l'IRD à Cotonou

Accueillis au service hydrologique de la Direction Générale de l'Eau (DGE) à Cotonou, les hydrologues de l'IRD et leurs partenaires mènent des recherches dans le cadre du programme AMMA présenté ci-après.

Voici les membres de l'équipe hydrologique avec lesquels j'ai plus particulièrement travaillé sur le site de la DGE :

Christophe PEUGEOT, chercheur et coordinateur

Luc SÉGUIS, chercheur

Sylvie GALLE, chercheur

Maxime WUBDA, ingénieur

Arnaud ZANNOU, ingénieur DG-Eau en thèse

Simon AFOUDA, aide hydrologue

Idrissou IMOROU, chauffeur

Théodore OUANI-YOSSIDE, aide hydrologue

I.2. Rôle de l'IRD dans le programme AMMA

I.2.1. Le programme AMMA



Le projet d'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA) rassemble plus de 450 chercheurs de 140 instituts ou agences dans 25 pays. Il a pour objectif de comprendre les processus atmosphériques, océaniques et hydrologiques qui conditionnent le régime de mousson Ouest-Africain pour en estimer les impacts sur les ressources en eau, sur l'agriculture et la santé, dans la perspective du changement climatique en cours.

I.2.2. L'observatoire AMMA-CATCH

L'observatoire AMMA-CATCH vise à documenter cette variabilité et est construit autour de trois sites de méso-échelle (environ 100 000 km²) au Mali, au Niger et au Bénin (Figure I.1) qui échantillonnent le gradient climatique et le gradient de végétation associé, caractéristiques de l'Afrique de l'Ouest. Cet observatoire est actuellement coordonné par l'IRD.

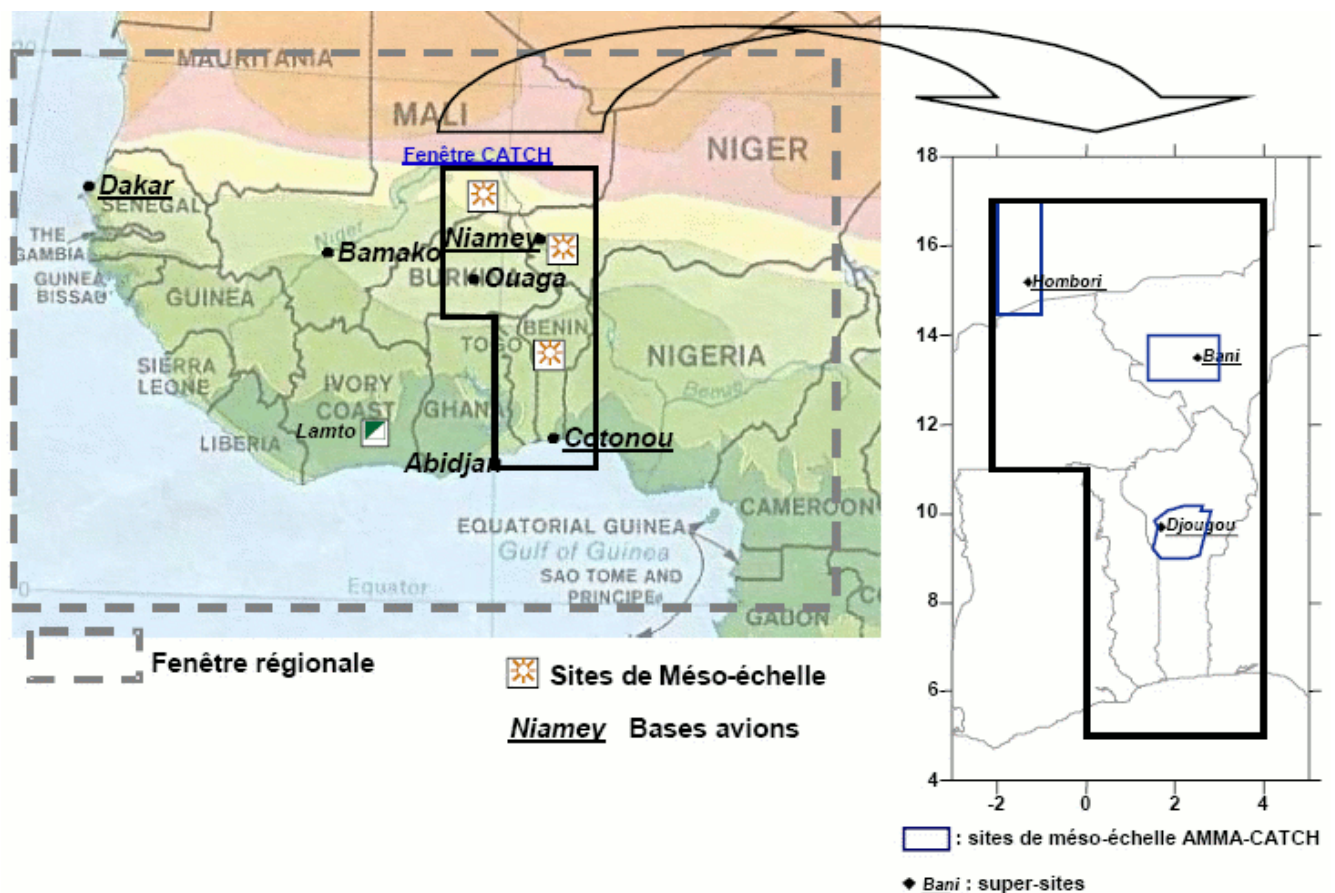


Figure I.1 : Sites choisis pour le programme AMMA

Au Bénin, la stratégie d'observation mise en œuvre est multi-échelle, tant dans l'espace que dans le temps. Un petit bassin versant (Donga : 586 km²) a été équipé pour étudier les processus grâce à un équipement renforcé. Un suivi des processus de versants est réalisé sur ce bassin, pour l'étude des interactions entre écoulements (de surface et de sub-surface) et végétation et une étude de la variabilité des précipitations aux échelles convectives. On dispose aussi sur ce bassin, d'un intense réseau de suivi d'aquifères pour l'étude des relations entre les écoulements eux-mêmes (surface, sub-surface et souterrain). Le bassin du Haut Ouémé (HO, 14 000km²) permet d'étendre ces connaissances sur des zones de sols et de végétation différents.

Enfin, la durée d'observation visée est de 10 ans, découpée en plusieurs période où des mesures renforcées peuvent être mises en place, ce qui est actuellement le cas (période 2005-2007). Les observations réalisées servent de base à des études diagnostiques sur les différents facteurs qui conditionnent la forte irrégularité des précipitations en Afrique de l'Ouest. Elles fournissent également des éléments de validation pour les travaux de modélisation comme ceux effectués pendant mon stage.

1.3. Objectifs du stage : Analyse du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Donga, observations et modélisation.

Dans le cadre du programme AMMA, l'observatoire hydro-pluviométrique AMMA-CATCH a donc été mis en place sur la haute vallée de l'Ouémé pour documenter la variabilité intra-saisonnière et inter-annuelle du cycle hydrologique. Voici un résumé du contexte scientifique dans lequel s'inscrit ma mission :

Les résultats actuels obtenus sur le sous-bassin intensivement instrumenté de la Donga montrent une dominance des écoulements de sub-surface (localisés jusqu'à environ 2 m de profondeur) dans l'alimentation des rivières, ces dernières étant déconnectées des nappes d'altérites dont le toit fluctue entre 6 et 15 m de profondeur selon la période de l'année. Ces nappes d'altérites sont en continuité hydraulique avec l'eau disponible plus en profondeur dans les fractures du substrat. Les nappes d'altérites et de socle sont actuellement les sources essentielles d'alimentation des populations de la région à travers des puits traditionnels et des forages, mais les mécanismes de recharge et de vidange des nappes sont encore mal connus. En particulier, la vidange annuelle des nappes d'altérites est attribuée à la reprise évapo-transpiratoire de la végétation, mais cette hypothèse est à vérifier. Des éléments de réponse seront présentés à la fin de ce rapport.

Le travail qui m'a été proposé a donc pour but de faire progresser les connaissances dans ce domaine, et s'est articulé en 2 volets :

- Synthèse bibliographique et analyse des données existantes (cartes géologiques, coupes de forage, faciès géochimiques), associée à des campagnes sur le terrain pour identifier les processus souterrains sur le bassin de la Donga, bassin représentatif de la haute vallée de l'Ouémé.
- Première analyse par modélisation hydrogéologique de la dynamique de la nappe d'altérites, sur des cas d'étude simplifiés sur deux versants bien instrumentés et de végétation contrastée (forêt et cultures) : transects de piézomètres du haut au bas du versant, stations de mesure de l'humidité du sol, profils géophysiques (sondages électriques et Résonance Magnétique des Protons (RMP)). L'objectif étant d'évaluer la ou les causes de la fluctuation saisonnière de la nappe d'altérites, et en particulier la nécessité de prendre en compte des écoulements souterrains en supplément à la reprise par la végétation.

II. Synthèse des connaissances sur la haute vallée de l'Ouémé et bibliographie

II.1. Introduction

Comprendre le fonctionnement hydrodynamique des nappes et de la zone non saturée est primordial dans l'étude du cycle hydrologique. Les seules investigations hydrogéologiques jusqu'alors effectuées sont des études de pré faisabilité et des rapports de chantiers relatifs à des campagnes de puits et de forages qui ont été effectués dans les régions de socle du Bénin avec pour objectif principal l'évaluation de l'épaisseur de la couche d'altérites.

En prenant comme modèle des études déjà réalisées dans d'autres pays de l'Afrique de l'Ouest (Akouvi, 2005 ; Dakoure, 2005 et le Ministère de la Coopération et du développement, 1991), nous allons ici faire bilan des connaissances sur la haute vallée de l'Ouémé et sur le sous bassin versant de la Donga. Bien que les informations restent très succinctes, nous allons les synthétiser ici dans le but d'aboutir à une connaissance plus approfondie de la structure et du fonctionnement des aquifères présentés. Nous pourrons ainsi étendre les conclusions de l'étude du bassin de la Donga à tout l'Ouémé puisque ce bassin a été jugé régionalement représentatif.

II.2. Brève synthèse des connaissances sur la Haute Vallée de l'Ouémé

Les données sur la Haute Vallée de l'Ouémé (HVO, Figure II.1) prise dans son ensemble sont quasi inexistantes du fait du peu d'instruments de mesure qui existe sur le bassin. Même s'il existe des sous-bassins intensivement instrumentés comme celui de la Donga, il reste très peu d'informations sur les nappes à l'échelle régionale.

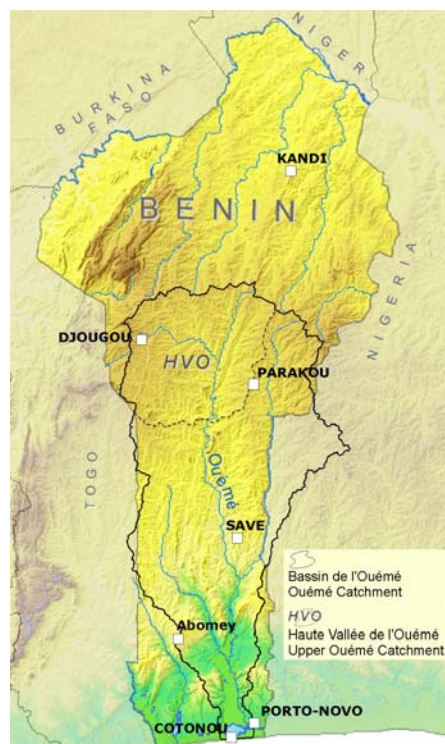


Figure II.1 : Localisation du bassin de la Haute Vallée de l'Ouémé (HVO)

Située sur un socle cristallin ancien, la HVO peut-être caractérisée par une topographie modérée (250-550 m) et est composée de nombreuses variétés de végétation. Le climat est dominé par une seule saison des pluies qui a lieu d'avril à octobre, environ 1200 mm/an (Bormann, 2005)

Une base de données intégrée (BDI) existe à la DGE où sont répertoriées les valeurs journalières de débit des rivières et de pluie. Mais pour avoir la correspondance entre les différentes échelles des données, il a fallu se ramener à l'échelle locale en étudiant plus précisément des sites plus petits grâce à des mesures locales intensives.

Ainsi, plusieurs sous-bassins ont été étudiés comme celui d'Aguima (étudié par le projet allemand IMPETUS). Le bilan de l'étude hydrogéologique de ce bassin (Bormann, 2005) conclut que, localement, les écoulements préférentiels sont les écoulements de subsurface. Des analyses chimiques ont confirmé que les eaux souterraines des nappes d'altérites ne participent pas directement au cycle de l'eau. Cette hypothèse a aussi été retenue en s'appuyant sur l'analyse de la signature chimique des écoulements sur plusieurs sous bassins de la Donga (Kamagaté et al., 2007).

Dans la BDI se trouvent aussi toutes les données concernant les puits de forage installés sur la HVO. D'un point de vue hydrogéologique, cette base nous fournit principalement le nombre de puits de la région étudiée, leurs localisations, une description technique (profondeur, diamètre, etc.), une description géologique ainsi que les résultats des tests pratiqués, s'ils existent, (pompage d'essai, par exemple). Ainsi, 518 puits ont été répertoriés à l'intérieur de la HVO. Mais les données ne sont pas toutes fiables (subjectivité des descriptions) et seuls 358 rapports ont été jugés exploitables (Communication personnelle).

La principale conclusion apportée à partir des données fournies par la BDI porte sur la piézométrie : le toit de la nappe phréatique des altérites varie de 6 à 14m de profondeur. Et l'amplitude de fluctuation de la nappe entre la saison sèche et la saison des pluies peut aller jusqu'à 5m.

II.3. Bilan des connaissances sur le bassin de la Donga

II.3.1. Connaissances générales

- Géographie

Situé dans le nord ouest du Bénin, à 450 Km de Cotonou, la capitale économique, le bassin versant de la Donga (Figure II.2) est un sous bassin de l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO). Il est administrativement présent dans le département du même nom. Ce bassin présente une superficie de 586 km². Il est développé sur la pénélaine dahoméenne dont la pente générale orientée NO-SE présente une déclivité de l'ordre de 0,075%. Les altitudes varient entre 250 et 550 m en moyenne.

Le réseau hydrographique en place correspond à la Donga et ses affluents qui drainent le bassin en direction de l'est.

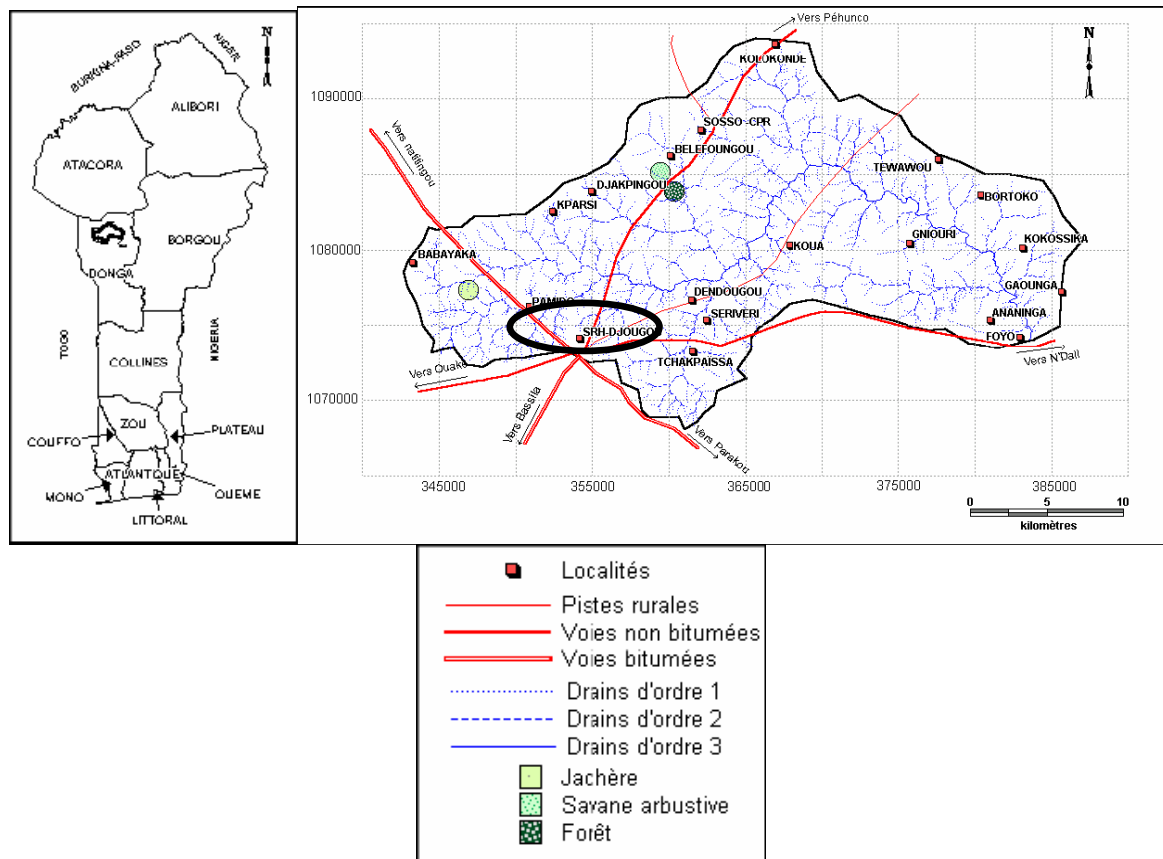


Figure II.2 : Localisation géographique du bassin de la Donga (Base de données ORE/CATCH, 2002)

- Géologie

Représentant une partie de l'unité structurale de la plaine du Bénin, le département de la Donga est caractérisé par trois grandes formations dérivées du socle Dahoméen (protérozoïque inférieur) par métamorphisme régional (Le Barbe, 1993). L'ensemble de ces formations, essentiellement constitué de gneiss, micaschistes et migmatites se présente en larges bandes orientées N°0-N°20. (Figure II.3)

Le démantèlement progressif de ces formations de socle donna naissance à une surface d'aplanissement (glacis à léger pendage sud-est) protégée par un manteau latéritique issu des phases d'érosions successives. Ce manteau latéritique a subi par la suite une érosion régressive importante, caractérisée par l'apparition de nombreuses ravines, liée à la mise en place du réseau hydrographique, qui a formé progressivement le modelé actuel. Le dépôt des dernières terrasses colluvio-alluviales dans les bas fonds est le résultat de l'important charriage de matériel de sol généré par les crues en saison pluvieuse.

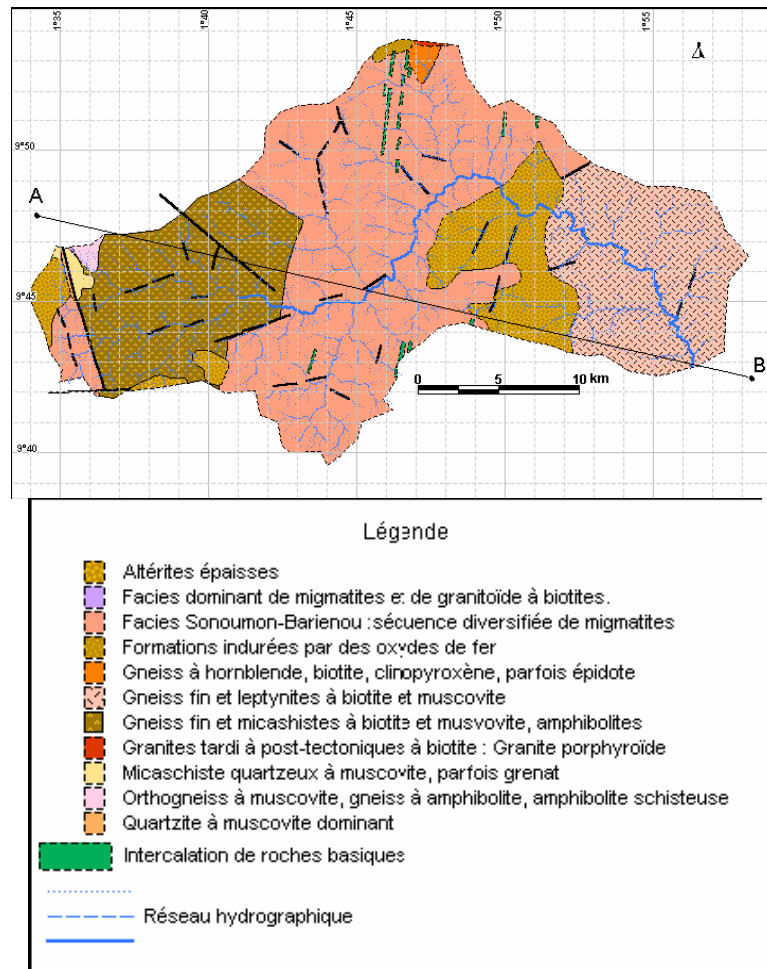


Figure II.3 : Extrait de la carte géologique. Feuille Djougou-Parakou-Nikki, 1984

- Géophysique locale

En vue d'améliorer la connaissance et la modélisation des flux d'eau souterrains, des mesures géophysiques ont été réalisées localement sur le bassin de la Donga. Une mission de tomographie de résistivité électrique a été réalisée sur deux sites du bassin considéré (Robain & Wubda, 2004) et une campagne de mesure de résistivités à l'aide de méthodes électromagnétiques sur le sous bassin versant d'Ara (Wubda, 2003).

Ces méthodes permettent, à partir de la surface, de caractériser avec une haute résolution spatiale les variations de résistivité électrique dans le sous-sol. Ce paramètre présente une variabilité importante principalement contrôlée par la nature et l'arrangement des constituants solides, par la teneur en eau et par la concentration en électrolytes mobiles. Elles permettent donc d'identifier les structures souterraines et de caractériser leur contenu en eau.

L'analyse et l'interprétation des différences de résistivité révélées par ces campagnes de mesures géophysiques permettent d'établir avec un détail satisfaisant l'organisation des couvertures d'altération de deux sites en particulier : Nalohou et Béléfoungou. Il s'agit de couvertures relativement complexes dont la géométrie présente une assez forte variabilité au niveau de chaque site, mais surtout entre ces derniers. L'étude géophysique menée a permis de déterminer les différentes épaisseurs des couches et d'avoir ainsi une première idée de la nature du sous-sol. En effet, une couche très résistante a été délimitée, avec une résistivité supérieure ou égale à $1500\Omega.m$, ce qui correspond au socle cristallin (Figure II.4).

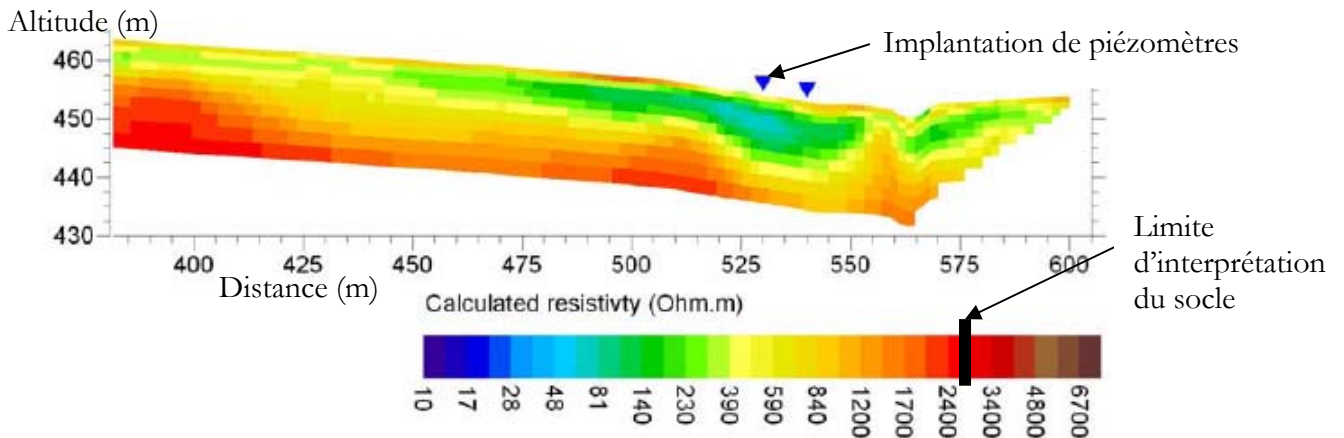


Figure II.4 : Extrait du graphique représentant le résultat d'une inversion des mesures de résistivités (Robain & Wubda, 2004) (bas de versant de Nalohou)

II.3.2. Connaissances hydrogéologiques

La zone d'étude se trouve sur un socle cristallin quasi imperméable si non fracturé ou non fissuré. Suite à l'altération des formations se trouvant au dessus de ce socle, il existe un aquifère, certainement discontinu, et un réservoir qui se développe suite à l'altération du substratum (Sarvan, 2005). Ce réservoir contient la nappe des altérites que nous étudierons ici.

Suite à l'analyse des colonnes stratigraphiques (Jacquin & Seyigona, 2004), on peut tirer une coupe générale de forage pour le bassin de la Donga (Figure II.5). Cette analyse met aussi en évidence la présence d'un niveau argileux dans les premiers horizons des altérites.

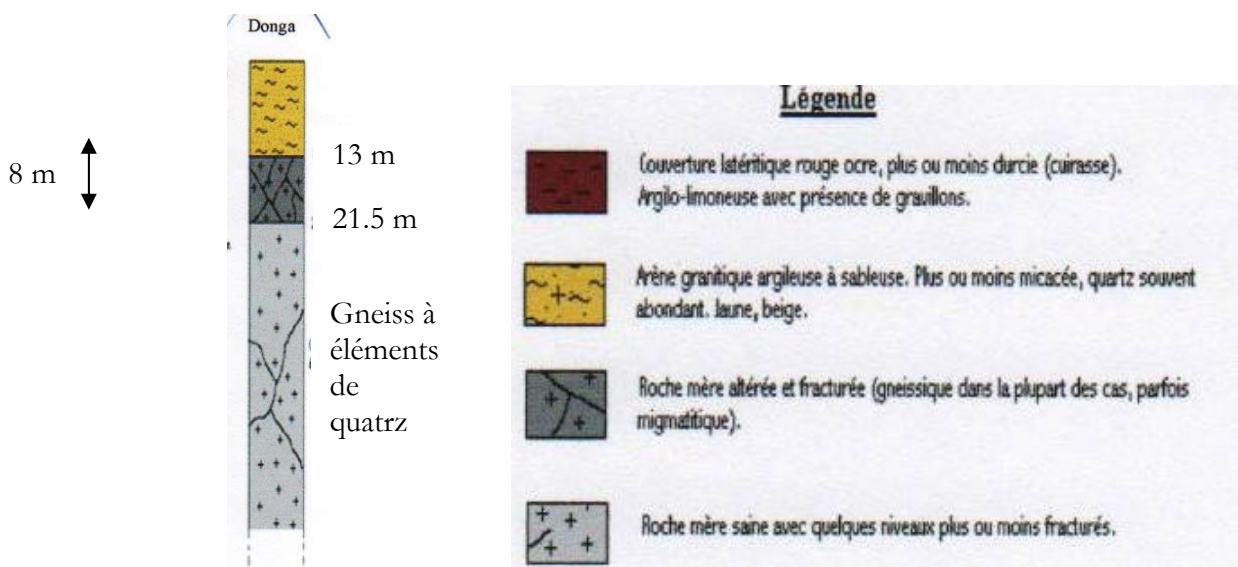


Figure II.5 : Coupe schématique de forage de la Donga et sa légende (Jacquin & Seyigona, 2004)

La région où se trouve le bassin de la Donga est à dominante granito-gneissique et il a fréquemment été observé la superposition de deux réservoirs aquifères : l'un superficiel, celui des altérites et l'autre plus en profondeur, celui de socle. Suite à l'étude des profils de versant (Jacquin & Seyigona, 2004), une coupe géologique simplifiée a été établie (Figure II.6, l'épaisseur de la couche de cuirasse étant surestimée) cherchant à synthétiser l'ensemble des faciès d'altérites observés sur le bassin de la Donga et son fonctionnement hydrogéologique.

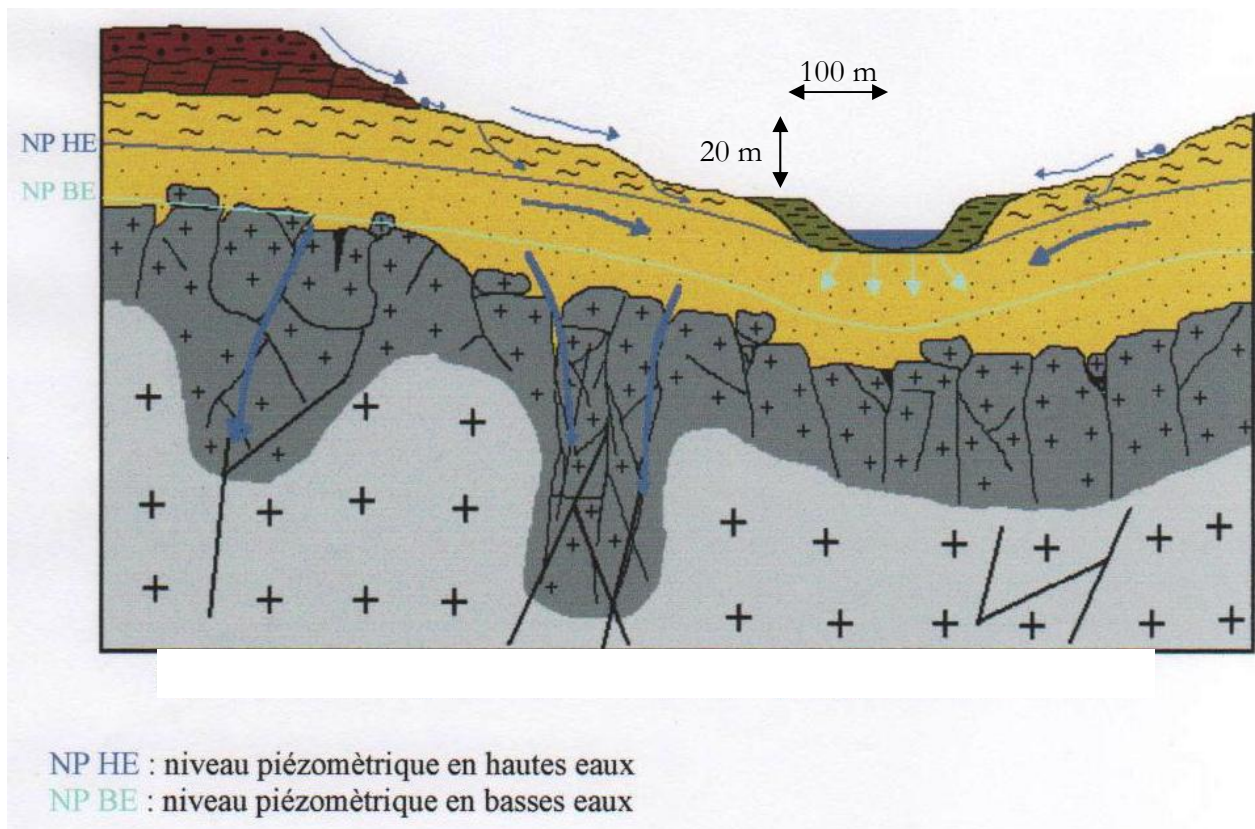


Figure II.6 : Schéma simplifié d'un versant type et de son fonctionnement hydrogéologique (Jacquin & Seyigona, 2004)

Caractéristiques principales du réservoir d'altérites :

Le réservoir d'altérites constitue un bon aquifère poreux. Les lois usuelles régissant les écoulements peuvent donc y être considérées comme applicables (Loi de Darcy, aquifère homogène, continuité du milieu, ...).

Le niveau piézométrique dans ce réservoir est souvent proche de la surface et les valeurs de perméabilité mesurées sont de l'ordre de 10^{-4} m/s (Jacquin & Seyigona, 2004).

Sur l'ensemble des coupes lithostratigraphiques issues des forages effectués sur le bassin de la Donga, nous distinguons trois couches : les altérites, le socle fissuré et le socle sain. Mais les connaissances sur la nature des fractures/fissures de la couche intermédiaire sont très restreintes, nous considérerons donc dans la suite qu'elle ne forme qu'une seule et même couche avec le socle sain. L'épaisseur du réservoir est variable du fait de l'irrégularité du socle.

A l'échelle du bassin, les paramètres hydrodynamiques connus de ce réservoir sont extrêmement rares. Ceux qui nous intéressent particulièrement sont la perméabilité ou la conductivité hydraulique à saturation et la porosité, ne font pas exception.

Seules quelques mesures de porosité (porosité RMP) existent et elles oscillent entre 1% et 5% (Descloîtres, 2007). A l'échelle du versant expérimental, des valeurs de perméabilité ont été obtenues par la méthode du Slug-Test (Cooper et al., 1967) par Luc Séguis et Marjolaine Métadier lors d'une campagne en février 2006. Les valeurs varient de $2.9 \cdot 10^{-7}$ m/s à $3.1 \cdot 10^{-6}$ m/s sur le versant de Nalohou (voir la description et les caractéristiques de ce site dans le chapitre suivant).

III. Matériel et méthodes

III.1. Le bassin instrumenté de la Donga

Voici brièvement comment le bassin de la Donga a été instrumenté (Figure III.1) (Séguis et al. 2003) :

- La Donga : pour analyser les écoulements de la rivière Donga, 5 stations de jaugeage sont implantées le long de son cours. Des campagnes de jaugeages en 2002 et 2003 ont permis d'établir les courbes de tarage de ces stations.
- Pluviométrie : 19 pluviographes sont répartis sur le bassin ou à proximité. La densité de ces appareils est plus importante à l'extrémité orientale du bassin car cette zone servira de cible au radar spécifique (bande X polarimétrique) qui est installé à Djougou. Ce réseau de pluviographes associé aux autres appareils répartis sur l'observatoire de la haute vallée de l'Ouémé permet de définir les caractéristiques spatio-temporelles des événements pluvieux sous climat soudanien.
- Piézométrie et origine des écoulements : la surface piézométrique est suivie à travers 22 puits villageois dont 12 équipés d'enregistreurs. Ceci permettra d'explorer les relations nappes-rivière à l'échelle du bassin. Pour rechercher l'origine des écoulements, deux conductimètres automatiques ont été installés à certaines stations de jaugeage et deux sondes ont été placées à deux autres stations.

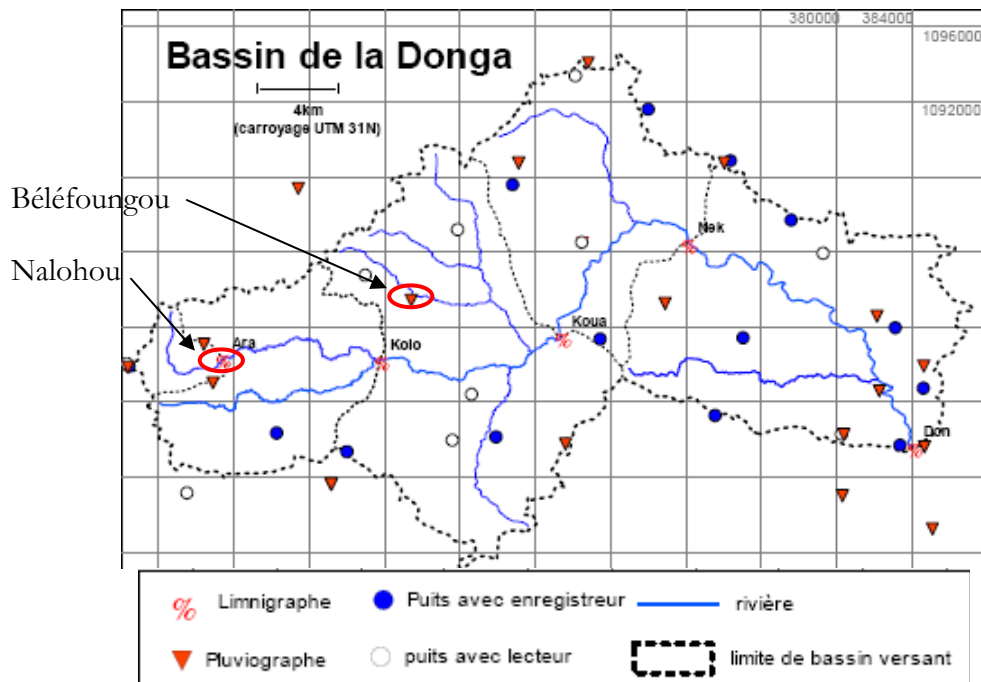


Figure III.1 : Équipement du bassin de la Donga avec délimitation des sous-bassins

Dans le but de quantifier l'influence de la végétation sur le bilan hydrologique, des stations de référence ont été implantées sur des toposéquences afin de suivre à l'échelle locale tous les termes du bilan hydrologique : pluie, infiltration, suivi d'humidité et du développement de la végétation, drainage vers la nappe mais aussi ruissellement et exhaure vers les drains.

Une station de mesure météorologique automatique a aussi été installée à proximité et des forages ont été effectués sur les toposéquences retenues afin d'étudier l'hydrodynamique sur les versants. A cette échelle locale, le suivi des réservoirs souterrains (nappe perchée de sub-surface, nappe dans les altérites, nappes dans le socle) permet d'évaluer la possibilité d'une mémoire inter-annuelle modulant le retard observé des écoulements par rapport aux pluies.

Un suivi de nappe s'effectue grâce au réseau de puits villageois et des remarques et conclusions sont apportées Malinur et al., 2007 et Kamagaté et al., 2007. Ainsi, sous l'influence directe des précipitations, la dynamique de la nappe est essentiellement verticale (l'évapotranspiration est très importante). Grâce au suivi sur plusieurs années (2002 à 2005), il a été montré que, de manière générale, une intensité journalière de précipitation plus forte entraîne un plus haut niveau piézométrique de la nappe. De plus, en dessous de 4mm/jour de précipitation, la nappe baisse.

Sur les figures III.2 et III.3 sont présentés respectivement une chronique des pluies et une chronique piézométrique journalière du site de Béléfongou .

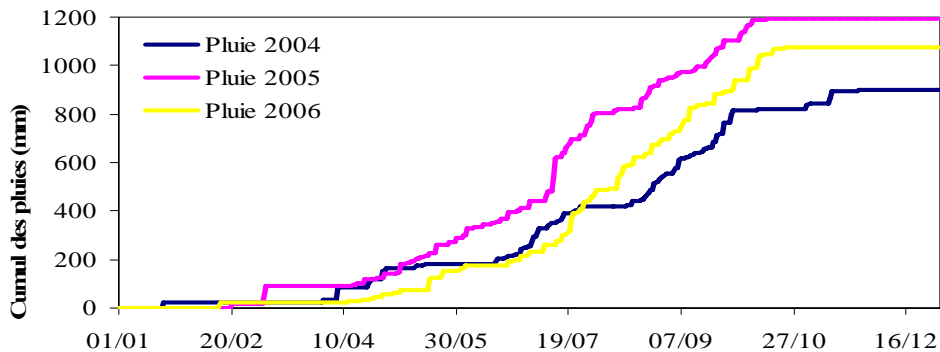
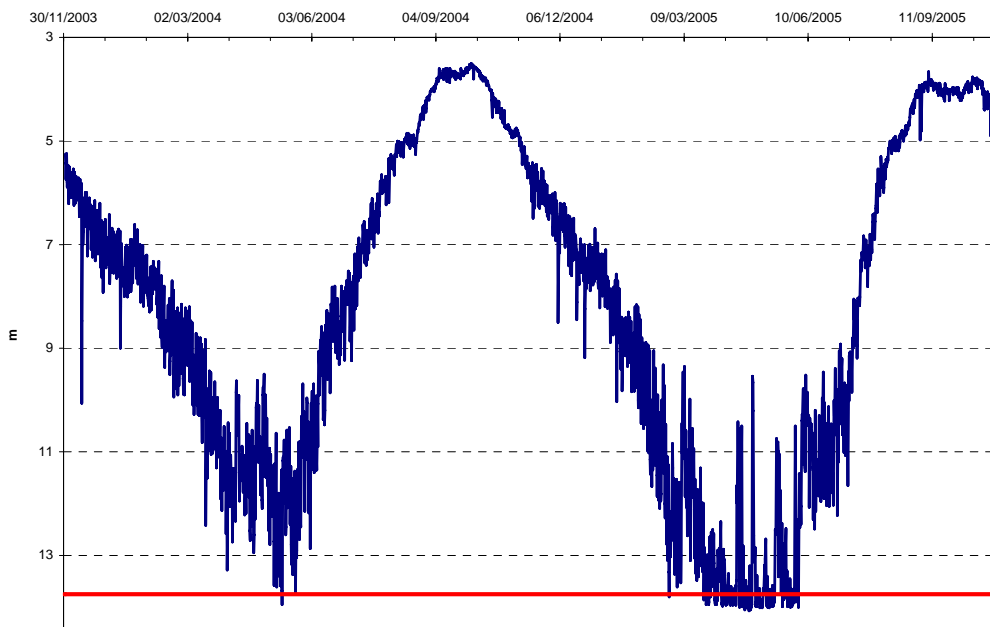


Figure III.2 : Chronique de pluie sur trois années à Béléfongou



E : profondeur du niveau piézométrique par rapport à la margelle du puits
Trait Rouge : profondeur du puits déterminée en 2003 (lorsque, pour certains puits, la profondeur piézométrique dépasse la profondeur du puits, on suppose un surcreusement récent du puits par les villageois).

Figure III.3 : Chronique piézométrique journalière du site de Béléfongou

Malgré une variabilité interannuelle importante de la pluviométrie, une dynamique piézométrique saisonnière revient : les nappes souterraines retrouvent en effet quasiment le même niveau chaque année. La rivière ne semble pas être alimentée par la vidange des nappes alors que le niveau est parfois supérieur au lit de la rivière, phénomène qui n'est pas retrouvé dans les études géochimique. Nous voulons donc vérifier par ce travail si les écoulements souterrains alimentent la rivière et ainsi en savoir un peu plus sur le bilan hydrologique.

A NOTER : Pour réaliser un profil piézométrique complet, les mesures dans les puits étant ponctuelles, nous avons interpolé les valeurs de charges hydrauliques en nous basant sur le fait que la surface libre de la nappe est quasiment parallèle à la topographie.

III.2. Les sites étudiés

En août 2003, une mission de reconnaissance a été réalisée sur le bassin de la Donga par une équipe de chercheurs afin de caractériser les différentes formations végétales de la zone et permettre la constitution d'une carte de la répartition des différents types de couvert végétal.

Le choix des sites s'est effectué à partir de cette carte en considérant essentiellement deux critères : d'une part l'accessibilité pendant la saison des pluies (temps de transport, état des pistes), d'autre part la nature de la végétation pour suivre plusieurs niveaux et avoir la possibilité d'établir une comparaison entre les évolutions des sites. Enfin les sites déjà instrumentés pour les études hydrologiques ont été prioritaires afin de pouvoir relier la structure, le fonctionnement et la dynamique de la végétation aux caractéristiques locales.

Trois sites ont été retenus mais nous ne nous intéresseront qu'à deux d'entre eux, nous limitant ainsi aux deux plus différents au sens du couvert.

- Le premier site est celui de **Nalohou** (Photo III.1). C'est une mosaïque de jachères et de parcelles cultivées (igname, coton, mil, arachide, maïs, manioc, anacardiés). Ce couvert est dominant sur le bassin versant.
- Le deuxième site se situe dans la forêt claire classée de **Béléfougou** (Photo III.2), vestige d'une forêt dense sèche, considérée ici comme formation pseudo-naturelle et exempte de culture récente.

Localisés autour de la ville de Djougou (entourée sur la figure III.4), ces sites de mesure sont présentés ci-après.

Localisation des sites de mesure

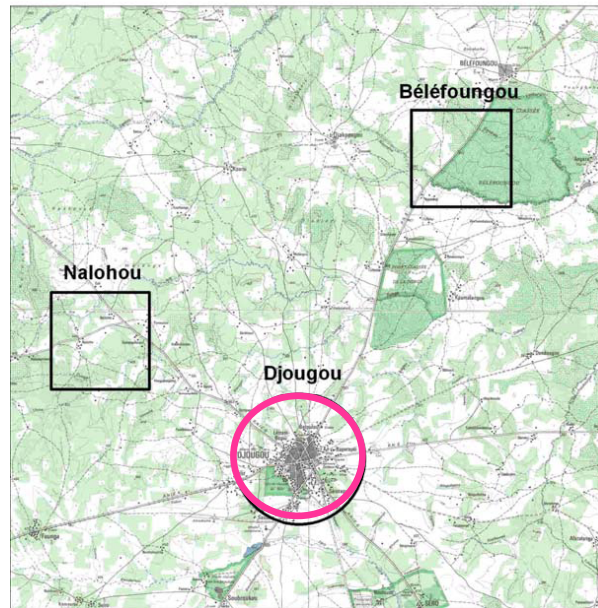


Figure III.4 : Localisation des sites

Les données existantes (cf.II.) ont été complétées par des mesures que nous avons réalisées visant à préciser les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères (perméabilité et porosité).

III.2.1. Site de Nalohou : cultures et jachère

- Présentation



Photo III.1: Site instrumenté de Nalohou

Le site de Nalohou (Photo III.1) est situé sur le bassin versant d'Ara (sous-bassin du bassin de la Donga). En haut, milieu et bas de versant sont implantés des stations de mesures de l'humidité et des piézomètres à différentes profondeurs (2, 10 et 20m) la pente faible se termine par un talus (pente de quelques pourcents) avant de rejoindre le lit majeur de la rivière Ara. Le versant a été divisé en cinq parcelles. Cette année, trois sont cultivées, une a été mise en jachère et la parcelle la plus en aval n'est jamais cultivée à cause du marigot et de la faible profondeur du sol.

Différents profils géophysiques ont été réalisés sur ce site mais nous nous focaliserons sur le profil P01 (Figure III.5), situé quasiment sur le transect instrumenté. La limite du socle est indiquée en noir.

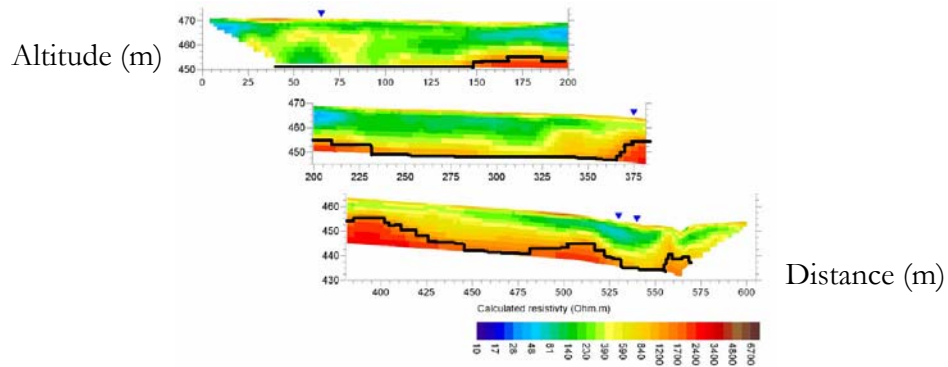


Figure III.5 : Profil P01 (Cf. Annexe 1)

- Caractéristiques

Instrumentation :

Le versant est équipé de trois stations (Figure III.6). Les piézomètres de 2 m de profondeur sont crépinés sur une hauteur de 1 m, ceux de 10 m sur 2 m et ceux de 20 m sur 4 m, à la base du forage. Pour mieux se repérer dans la suite, ceux de 20m seront nommés P1, ceux de 10m P2 et ceux de 2m P3.

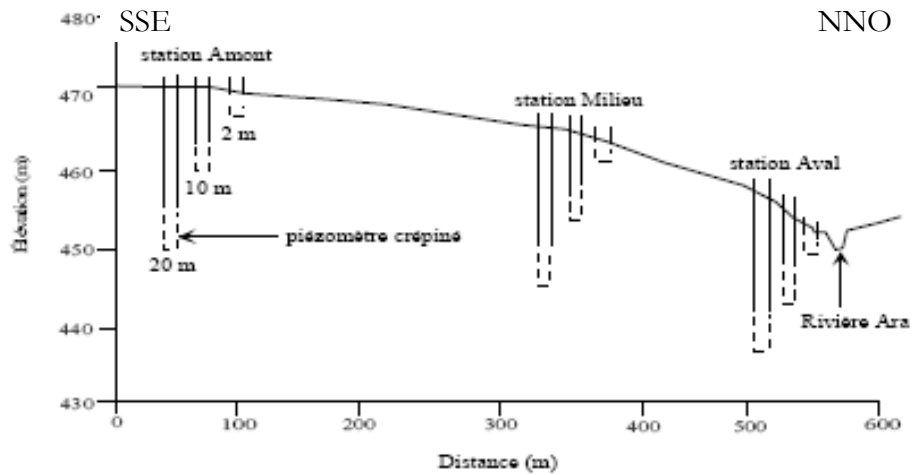


Figure III.6 : Schéma d'équipement du versant : 3 stations à 3 piézomètres chacune (à 2,10 et 20m)

Enfin, les piézomètres sont équipés de sondes mesurant la conductivité électrique de l'eau, la température. Les stations d'humidité mesurent la teneur en eau, la succion et la température dans la zone non saturée (jusqu'à 1,5m). Le site accueille en plus un pluviographe et une station de jaugeage sur une ravine d'ordre 1.



Photo III.2 : Site du bas de versant de Nalohou : 3 piézomètres (à 2, 10 et 20 m de profondeur) et une guérite blanche protégeant la centrale d'acquisition des données d'humidité)

Propriétés :

En nous reportant aux résultats des différents tests effectués, soit en amont de ce travail, soit pendant ce stage, voici les données que nous pouvons synthétiser :

	Perméabilité horizontale (m/s) (min ; max ; moy)	Porosité (min ; max ; moy)
Slug-test (Cf. II.)	$2,9.10^{-7}$; $3,1.10^{-6}$; $1,7.10^{-7}$	
Géophysique (RMP, Desclôîtres, 2007)	10^{-5}	3% ; 5 % ; 4%
Test d'infiltration (Cf. III.2.3.)	$3,1.10^{-8}$; $1. 10^{-5}$; $2,6. 10^{-6}$	
Test de porosité (Cf. III.2.3.)		1,7% ; 5,8% ; 2,7%
<i>Pour le site d'Aguima (Projet Impetus) : T. El-Fabem, 2005</i>	1.10^{-7} ; 9.10^{-7} ; 5.10^{-7}	2% ; 5% ; 2,5%

Figure III.7 : Différents résultats de perméabilité et de porosité pour Nalohou

III.2.2. Site de Béléfoungou : la forêt

- Présentation



Photos III.3 : Site instrumenté de Béléfoungou

La forêt claire de Béléfoungou (Photo III.3) est classée et considérée comme étant composée de végétation naturelle peu perturbée mis à part quelques pâturages clandestins, quelques prélèvements de bois de chauffe et de racines, de plantes et écorces médicinales. Le site est localisé en haut de toposéquences avec des pentes douces sur deux côtés se terminant dans un bas-fond éloigné du site même. La cuirasse ferrallitique est d'avantage visible sur ce versant.

Le profil P05 est l'un des différents profils géophysiques effectués sur le site et il est voisin du transect d'implantation des piézomètres et la limite du socle est indiquée par le trait noir (Figure III.8). Le socle est profond et non atteint par la géophysique sur toute la moitié haute du site, contrairement à Nalohou.

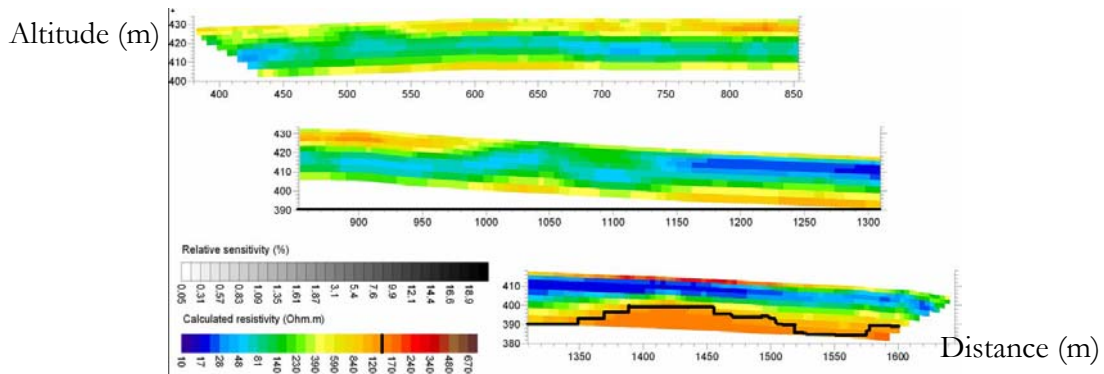


Figure III.8 : Profil P05 (Cf. Annexe 2)

- Caractéristiques

Instrumentation :

Le versant est équipé de 7 stations de piézomètres: de A à G (Figure III.9). 3 d'entre elles (A, D et G) sont équipées aussi d'une station d'humidité. Il y a aussi une station de mesure des flux évapotranspiratoires et un pluviographe.

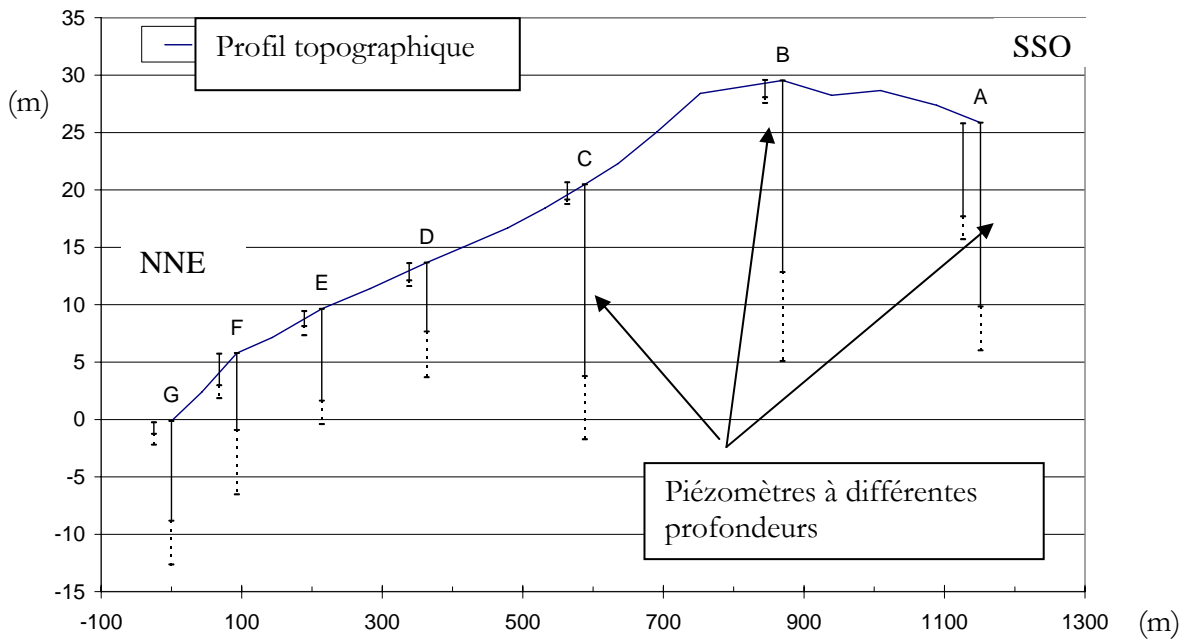


Figure III.9 : Profil topographique de la toposéquence étudiée sur Béléfoungou

Propriétés :

Comme pour le site de Nalohou, voilà un récapitulatif des données récoltées suite aux études précédentes ou aux différents tests effectués :

	Perméabilité horizontale (m/s) (min ; max ; moy)	Porosité (min ; max ; moy)
Géophysique (RMP, Descloîtres, 2007)	5.10^{-6} ; 10^{-5} ; $7,5.10^{-6}$	5% ; 12% ; 8,5%
Test d'infiltration	$1,5.10^{-6}$; $3,2.10^{-6}$; $2,3.10^{-6}$	
Test de porosité		0,6% ; 5,7% ; 2%

Figure III.10 : Différents résultats de perméabilité et de porosité pour Béléfoungou

III.2.3. Descriptif des caractérisations hydrodynamiques effectuées

Un test d'infiltration pour mesurer la perméabilité du sol a été mis en place pour le site de Nalohou et un calcul de la porosité a pu être réalisé pour les deux sites. Malheureusement, le pompage d'essai prévu au départ n'a pas pu aboutir suite à des difficultés rencontrées sur le terrain.

Prélèvement des échantillons

Trois puits (Un sur le versant de Nalohou, deux sur celui de Béléfougou) ont été creusés manuellement puis en fonction de la difficulté au marteau piqueur par des ouvriers. Les puits ont une profondeur de 8, 10 et 8m respectivement. A différentes profondeurs, les échantillons de sols sont prélevés à l'emporte-pièce par l'enfoncement à la masse d'un cylindre ouvert en tôle épaisse de 12 cm de hauteur et 9.5 cm de diamètre. L'échantillon dans son cylindre est ensuite rapporté à Cotonou pour les mesures en laboratoire.

➤ Calcul de porosité de drainage

Pour sa détermination, les échantillons saturés ont été pesés puis laissés s'égoutter à l'air libre pendant 24h puis repesés (Photo III.4). La différence de poids (pour une densité de l'eau de 1) est transformée en volume d'eau gravitaire que l'on rapporte au volume du cylindre pour avoir la porosité (%) :

$$\omega = \frac{\text{Volume d'eau gravitaire}}{\text{Volume total de l'échantillon}}$$

Les résultats nous donnent une valeur moyenne de 5% de porosité pour les deux sites étudiés (Cf. Annexe 3 et 4). (Dans un premier temps, nous avons passé à l'étuve (24h) les échantillons saturés avant de les peser, mais les porosités obtenues étaient trop fortes et ne correspondait pas uniquement à l'eau gravitaire).

➤ Test d'infiltration (Photo III.3) : évaluation de la perméabilité à charge constante

Principe

L'essai en laboratoire consiste à faire passer un écoulement dans des cylindres de sols prélevés à différentes profondeurs de l'aquifère. L'échantillon de sol est soumis à une charge hydraulique connue, ici constante mais elle peut être variable. On mesure alors le volume d'eau qui traverse l'échantillon pendant un temps donné. Les résultats obtenus servent à calculer le coefficient de perméabilité ou coefficient de Darcy.

$$Q = K * S * \frac{\Delta h}{L}$$

Q (m³/s) est le débit de sortie calculé manuellement par l'expérimentateur grâce à une éprouvette graduée et un chronomètre.

S (m²) est la surface de l'échantillon.

Δh (m) est la différence de charge hydraulique de part et d'autre de l'échantillon.

L (m) est la hauteur de l'échantillon (dans le sens de l'écoulement provoqué)

K (m/s) est la perméabilité ou conductivité hydraulique à saturation.



Niveau maintenu constant d'eau dans les tubes piézométriques pour qu'une charge constante soit appliquée à l'échantillon testé : Δh

Système de pompage pour assurer la constance de la charge imposée

Perméamètre avec deux pierres poreuses, des joints, une vanne d'entrée et une vanne de sortie

Echantillon avec couvercles



Sortie de l'eau

Entrée de l'eau

Photo III.4 : Test d'infiltration et zoom sur le perméamètre

Détails du mode opératoire

Introduire l'échantillon dans l'appareil 1 (Photo III.3) en veillant à ce que les joints rendent l'ensemble hermétique. Nous pouvons vérifier cela lorsque l'on ouvre la vanne d'entrée d'eau : il ne doit pas y avoir de fuites.

Ouvrir les vannes et du perméamètre.

Déclencher aussitôt le chronomètre. Récolter l'eau qui sort dans une burette graduée.

Alimenter le tube piézométrique de manière à y maintenir constant le niveau de l'eau.

Après quelques minutes ou quelques secondes selon le débit, stopper le chronomètre et mesurer le volume de l'eau ayant traversé l'échantillon. Cette mesure est réalisée plusieurs fois pour plus de précision.

Après avoir saturé l'échantillon (c'est-à-dire que l'eau a rempli tous les vides), il est testé et l'on obtient alors la vitesse d'infiltration ou débit de sortie. K est alors déterminé (Cf. Annexe 3 et 4).

➤ Mesure *in-situ* de la perméabilité par pompage d'essai

Sur le site de Nalohou (Photo III.4), trois forages de 10 m de profondeur et de 63 mm de diamètre intérieur avaient été réalisés au moyen d'une foreuse pneumatique équipé d'un marteau fond de trou. Dans un des forages, nous avons installé une pompe refoulante de 43 mm de diamètre. La mise au point du pompage s'est bien réalisée mais au moment de le démarrer, la pompe est restée inexplicablement bloquée dans le forage. Nous n'avons pas réussi à l'en sortir, l'essai n'a donc pas eu lieu pour le moment.



a : la pompe



b : la pompe restée bloquée dans un des piézomètres



c et d : Air comprimé injecté pour essayer de retirer la pompe puis essai avec une tige métallique mais sans succès



Photos III.5 : Pompage d'essai avorté

III.3. Mise en œuvre du modèle

Le logiciel utilisé ici pour la modélisation hydrogéologique est le logiciel Processing Modflow (www.pmw.in.net). Il résout les équations d'écoulement et le transport par la méthode des différences finies en trois dimensions. La version originale de Modflow permet de simuler les effets des rivières, de la recharge, de l'évapotranspiration tout en permettant d'intégrer graphiquement le maillage, les propriétés et les conditions aux limites.

Le travail de modélisation que j'ai effectué tout au long du stage sera présenté ci-après ainsi que l'interprétation que j'en ai faite avec mes encadrants dans la partie « Résultats et interprétation ».

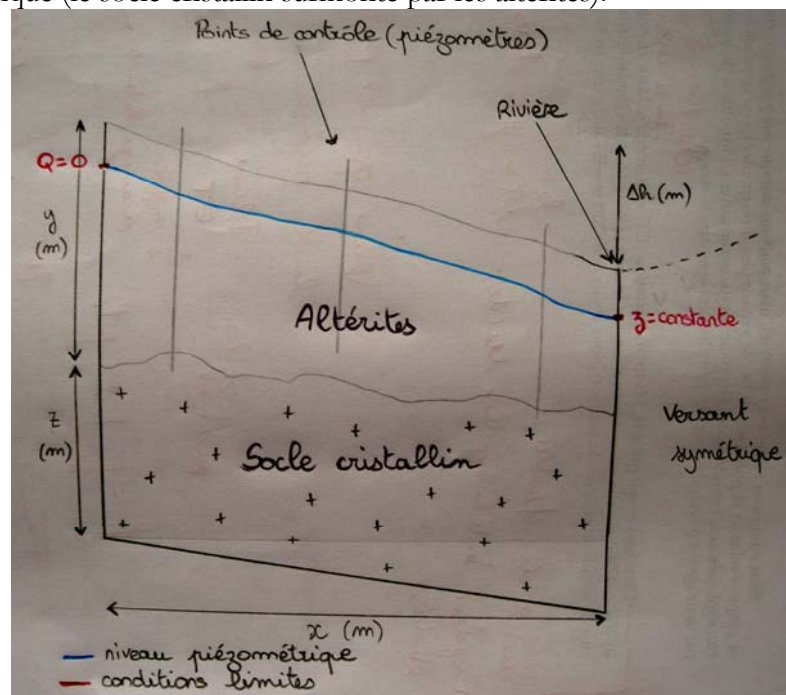
Le problème a d'abord été conceptualisé en passant de la géométrie réelle à la géométrie du modèle. Puis nous avons entré les données dans le logiciel ainsi que les conditions aux limites, nous avons choisi un état de référence (calage du régime permanent) et nous avons enfin calé les

paramètres pour obtenir des résultats aussi proches que possible de la réalité et ainsi caractériser le terrain qui nous concerne.

III.3.1. Géologie et hypothèses du modèle

➤ Géologie / Modèle

La réalité étant certainement complexe et surtout inconnue, il a fallu prendre en compte des hypothèses pour la simplifier. Ces hypothèses seront explicitées et justifiées dans la suite de ce rapport. Ainsi, nous avons obtenu un modèle simple mais représentatif (Figure III.11) : deux couches non horizontales et d'épaisseurs variables qui représentent les deux couches déterminées par la géophysique (le socle cristallin surmonté par les altérites).



Figures III.11 : Couches géologiques / Couches du modèle

➤ Hypothèses posées et justification

a. Le modèle ne possède que deux couches : la couche de cuirasse n'est pas prise en compte

La couche de cuirasse ne s'étend pas sur tout le versant. Comme j'ai pu le remarquer sur le terrain, elle est très discontinue. De plus, si nous nous reportons, dans la partie II.3., à la figure représentant une coupe de forage de la Donga, la couche de cuirasse n'est pas représentée, il est donc légitime de ne pas l'intégrer au modèle.

b. L'imperméabilité de la couche la plus profonde (le socle)

Deux types de socle avaient été déterminés dans des études précédentes (socle fissuré et socle sain) mais comme nous l'avons vu au III.3., leur délimitation n'étant pas très fiable, nous considérons uniquement le socle sain. Et ce socle est considéré comme quasi-imperméable. D'autre part, les caractérisations géochimiques des écoulements de base à l'échelle de la Haute Vallée de l'Ouémé montrent qu'il n'y a pas d'exhaure de l'aquifère de socle vers le réseau hydrographique (Kamagaté et al., 2007, Peugeot et al., 2005).

c. Les nombreuses failles du socle n'ont pas été intégrées dans le modèle

Le socle faillé est la partie supérieure du socle se trouvant sur le socle sain. Dans la partie II.3., nous avons vu que nous considérons les deux parties du socle comme une seule et même couche du fait du manque d'informations que l'on possède.

d. L'homogénéité des couches : mêmes propriétés sur une même couche

Hypothèse prise par simplification.

e. Charge imposée à la rivière en dessous de la topographie

Par observation, les écoulements dans la rivière en saison des pluies proviennent du ruissellement et des flux de sub-surface mais pas des nappes d'altérites (II.2.), la charge hydraulique de la nappe d'altérites se trouve donc en dessous du lit de la rivière.

f. La recharge est égale à Pluie- Evapotranspiration

Ne connaissant que très peu de termes du bilan, il est légitime au départ de prendre l'hypothèse la plus simplificatrice et de ne pas prendre en compte l'infiltration et le ruissellement. Ensuite, nous avons vérifié le bon fondement cette hypothèse.

III.3.2. Propriétés du modèle

➤ Taille du modèle

Avant de pouvoir utiliser un modèle, il faut définir des propriétés pour pouvoir calculer ce dont nous avons besoin et rendre des résultats cohérents, notamment la taille du modèle. La taille doit être suffisante pour ne pas obtenir d'erreurs liées aux effets de bord. Pour cela, assimilons la vidange de la nappe d'altérites à un pompage. En première approximation, nous pouvons calculer son rayon d'action R au cours du temps:

$$R = 1.5\sqrt{(K/Ss*t)} = 84 \text{ m}$$

Avec :

$$t = \text{temps} = 1\text{an} = 31\,536\,000 \text{ secondes}$$

$$Ss = \text{Stockage spécifique} = 10^{-4}$$

$$K = \text{Perméabilité} = 10^{-8} \text{ m/s}$$

Ainsi, si on définit une largeur et une longueur bien supérieure à 84 m (200m pour la largeur et plus pour la longueur), cela garantit la stabilité des charges hydrauliques (charges stabilisées du modèle) sur les bords du maillage et sur le temps de la simulation.

Nous avons supposé une homogénéité latérale du terrain et une autre hypothèse est que le versant modélisé possède un symétrique.

➤ Maillage

Le maillage utilisé ici est un maillage régulier de 2m sur 2m pour Nalohou et de 4m sur 4m pour Béléfoungou a été jugé suffisant (c'est l'espacement des données géophysiques utilisé pour le profil du socle sur chacun des sites). Ceci représentant un tableau de 100 colonnes et 284 lignes pour Nalohou et de 50 colonnes et 345 lignes pour Béléfoungou. Il a été jugé inutile de raffiner ce maillage, le phénomène à prendre en compte étant plus global que local.

➤ Conditions limites

La seule condition limite à imposer est la condition de charge constante à la rivière (Cf. les hypothèses au III.3.3).

➤ Paramètres et forçages

Les forçages suivants sont introduits:

- l'épaisseur des couches entrées en chargeant les valeurs de la topographie et de toit irrégulier du socle qui a été déterminé par lecture des résultats géophysiques
- la (ou les) période d'observation
- la porosité (5%)
- la charge hydraulique initiale que l'on affecte aux différentes couches (423,09m ou 390m)

Seuls les paramètres de perméabilité et la charge imposée à la rivière (ou marigot) ont été réellement calés.

Deux autres données ont été intégrées au modèle grâce à l'utilisation des modules du logiciel (l'évapotranspiration a été modifiée selon la végétation présente sur le site) :

- la recharge imposée sur la surface : 100mm/mois soit $3.8e-8$ m/s (pluie annuelle moyenne (1200 mm) divisée par 12)
- l'évapotranspiration (entre 3 à 6 mm/j en moyenne)

Les observations seront intégrées afin de les comparer aux simulations, ceci dans un second temps lorsque nous arriverons au régime transitoire après avoir calé le régime permanent.

IV. Résultats et interprétation

Dans cette partie sont présentés les résultats de mon travail. Les premières confrontations des simulations aux observations m'ont permis dans un second temps d'améliorer le modèle. La précision recherchée sur la valeur des charges hydrauliques (ou du niveau piézométrique) est de l'ordre de la dizaine de centimètres. Les résultats seront qualifiés de bons lorsqu'ils sont de cet ordre de grandeur. Le critère de comparaison que l'on prendra est la variance (racine carrée de la somme des résidus au carré), l'unité étant le mètre, nous cherchons une variance inférieure à $10 \cdot 10^{-2}$ m.

IV.1. Régime permanent

Le but du régime permanent est de régler le modèle de façon à simuler un état d'équilibre correspondant à une piézométrie moyenne. Le réglage est effectué en jouant sur les perméabilités, la porosité étant maintenue constante. Un test des conditions limites est alors possible, ce qui nous donne ensuite un ordre de grandeur des paramètres.

Dans le cas d'un régime permanent, la charge initiale imposée n'est pas d'une grande importance puisque dans ce système, le logiciel va tourner et changer la charge hydraulique sur les cellules où la charge n'est pas imposée jusqu'à obtenir l'équilibre. La seule condition pour que le logiciel obtienne des résultats satisfaisants est que la charge de départ ne soit pas trop éloignée de la charge finale (charge que le modèle calcule) pour qu'il puisse converger. Les valeurs calées obtenues sont répertoriées dans la figure IV.1.

NALOHOU

Couches	Charge hydraulique initiale (m)	Perméabilité horizontale (m/s)	Perméabilité verticale (m/s)	Porosité
<i>1 : Altérites</i>				
Valeurs biblio.		$1 \cdot 10^{-6}$		5%
Valeurs calées	415	$1 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	
2 : Socle cristallin	415	10^{-10}	$5 \cdot 10^{-11}$	5%

BÉLÉFOUNGOU

Couches	Charge hydraulique initiale (m)	Perméabilité horizontale (m/s)	Perméabilité verticale (m/s)	Porosité
<i>1 : Altérites</i>				
Valeurs biblio.		$5 \cdot 10^{-6}$		5%
Valeurs calées	396	$7 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}	
2 : Socle cristallin	396	10^{-10}	$5 \cdot 10^{-11}$	5%

Figure IV.1 : Tableaux des paramètres calés en régime permanent pour Nalohou et Béléfoungou

La structure du milieu suggère une anisotropie de perméabilité et conduit à retenir une valeur moyenne plus forte pour la composante horizontale. La perméabilité verticale correspond alors à une fraction de la perméabilité horizontale.

IV.2. Nalohou

IV.2.1. Calage du régime transitoire

Résumé de la démarche pas à pas de modélisation:

Après avoir calé le modèle en régime permanent, nous sommes passé au régime transitoire. Plusieurs modèles ont été définis selon la période de l'année étudiée car le but du modèle est de déterminer où et comment passe le flux d'eau après la saison des pluies. Après avoir calé le modèle sur la période voulue (sur l'année ou juste sur la période sèche), d'autres hypothèses ont été ajoutées telles que l'évapotranspiration ou la baisse de perméabilité au niveau du marigot. Voici le récapitulatif des différentes étapes qui visent à améliorer le modèle petit à petit:

- Simulation du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} avril 2006 : période sèche sans recharge pluviométrique
- Simulation du 1^{er} janvier au 1^{er} avril 2006 : période sèche sans aucune recharge
- Simulation avec une reprise évaporatoire
- Simulation avec une baisse de perméabilité au niveau du marigot
- Simulation sur l'année 2005 entière

IV.2.1.a. Paramètres supplémentaires pour le régime transitoire

Le pas de temps est la variable principale du régime transitoire. Nous avons pris un pas de temps mensuel

Le paramètre qui intervient en plus dans ce régime est la porosité de drainage, ou specific yield (Figure IV.2).

Couches	Specific yield
1 : Altérites	5%
2 : Socle cristallin	5%

Figure IV.2 : paramètre supplémentaire

IV.2.1.b. Observations

Pour caler la courbe de descente des charges hydrauliques modélisées sur celle des charges observées, nous avons eu besoin des valeurs de charges hydrauliques observées sur toute la longueur du transect à chaque pas de temps. Les charges observées aux trois piézomètres ont alors été interpolées linéairement à chaque nœud du maillage du modèle pour obtenir la matrice à charger dans le logiciel.

Ainsi, après avoir chargé dans le logiciel les valeurs de charges hydrauliques initiales voulues, c'est-à-dire les valeurs observées au début du mois précédent le début de la simulation, les paramètres de conductivité hydraulique horizontale pour la première couche ont été modifiés ainsi que la charge hydraulique initiale imposée à la rivière (charge non réellement connue jusqu'à maintenant, mais estimée aux alentours de 423m).

Le meilleur résultat a été obtenu avec une charge à la rivière estimée à 423.09m pour tous les modèles, soit 3m en dessous de la topographie.

Le calage des paramètres est effectué par des essais manuels et le résultat donnant la plus faible variance est identifié comme le meilleur.

IV.2.2. Résultats et interprétation

IV.2.2.a. Simulation du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} mai 2006

Il n'y a pas de recharge intégrée dans ce modèle.
Voici les perméabilités obtenues lors du calage du régime transitoire ainsi que la courbe de la charge hydraulique en fonction du temps :

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)
1 : Altérites	$4,5 \cdot 10^{-6}$
2 : Socle cristallin	10^{-10}

Figure IV.3 : Perméabilité horizontale obtenue

A noter : les charges (head) et les distances sont toujours données en mètre et le temps en seconde.

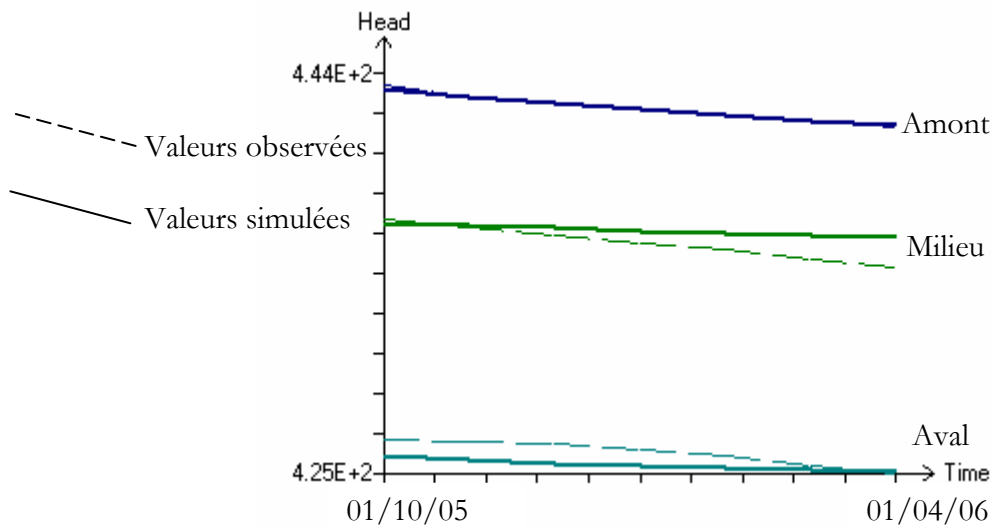


Figure IV.4 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006

Nous représentons la surface piézométrique en fonction du temps sur la figure IV.5.

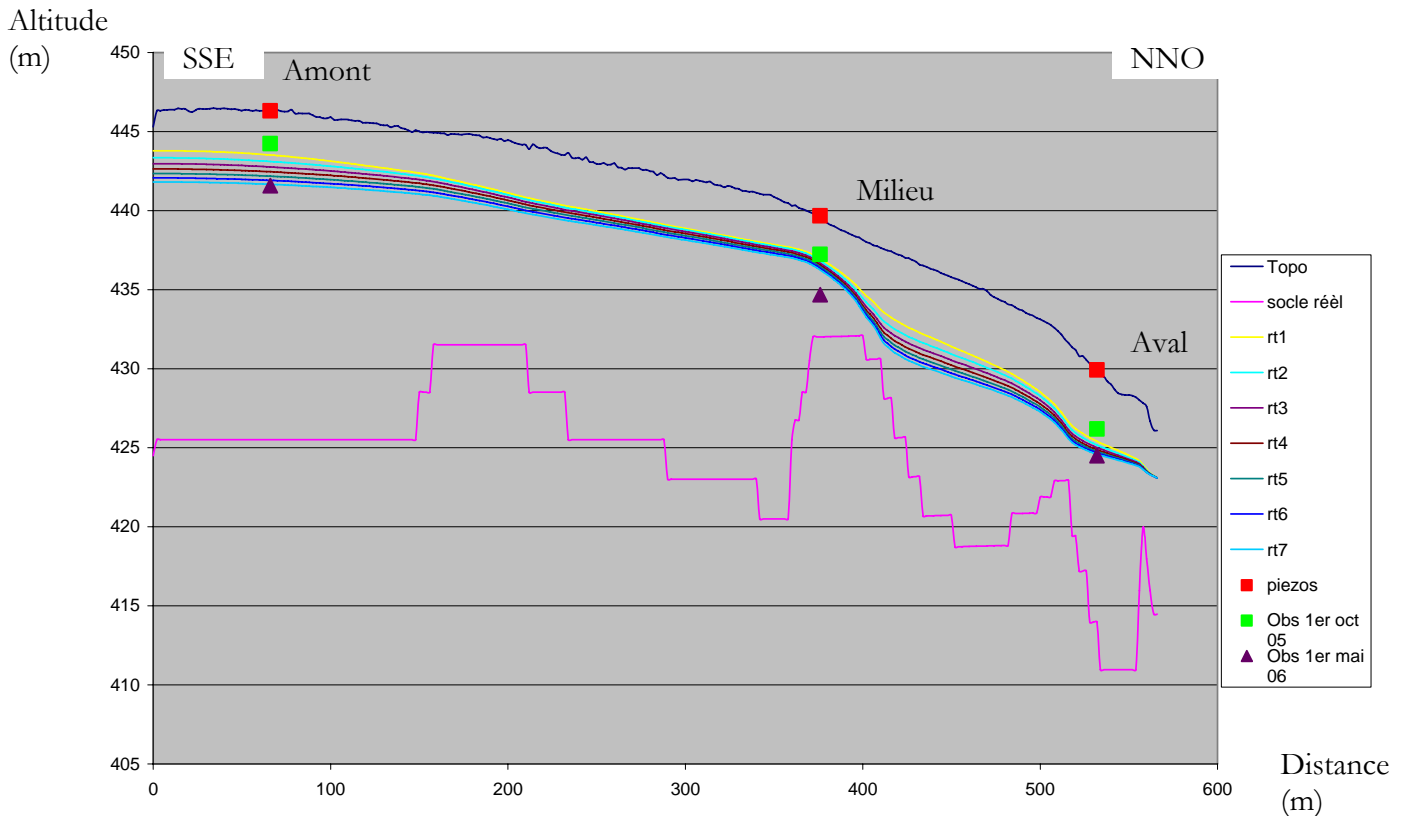


Figure IV.5 : Représentation du régime transitoire du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} mai 2006 avec la limite du socle directement issue de l'interprétation de la coupe géophysique

Tous les commentaires de figures représentant l'évolution du profil piézométrique en régime transitoire sont basés sur la comparaison des graphes des valeurs observées (« obs ») et des valeurs modélisées (« rt i », i pour le nombre de mois au bout desquels le calcul est fait).

Commentaire des figures IV.4 et IV.5 :

Le modèle ne reproduit bien la descente de charge que pour la station Amont. Il faut donc introduire d'autres hypothèses ou changer certaines conditions pour les deux autres stations.

Sur la figure IV.5, des ressauts hydrauliques sont identifiés au niveau des remontées de socle, assimilés à un comportement de surface libre. Le gradient et la baisse de charge importante juste après ces ressauts sont cohérents avec les observations. L'amplitude observée sur le terrain est respectée par les résultats du modèle en Amont et quasiment en Aval mais pas du tout au Milieu. Nous allons donc essayer de diminuer le « pic de socle » à ce niveau.

Comme nous l'avons vu dans la partie II.3., le socle est très irrégulier. L'hypothèse restrictive de le rendre moins irrégulier (de le « raboter » ou de le « couper ») a été prise car de manière générale, le socle a été déterminé par lecture graphique des profils géophysiques, le socle étant arbitrairement pris lorsque la résistivité est supérieure à 1500 Ω .m.

La précision de cette lecture restant aléatoire et le profil géophysique ne coïncidant pas exactement avec le profil piézométrique, le socle partiellement « raboté » permet d'éviter l'apparition de seuils hydrauliques (non observés) sur la surface piézométrique modélisée.

La modification de la conductivité hydraulique horizontale a donc permis de caler correctement la station Amont mais n'a presque aucun effet sur la station Milieu.

Pour l'Aval, la charge hydraulique initiale imposée à la rivière a été modifiée mais les courbes n'ont pas la même tendance et rien n'y change. Nous avons regardé ensuite l'effet de

l'irrégularité du socle sur cette différence, j'ai donc « raboté » le socle au niveau du piézomètre Milieu. Nous voyons sur la figure IV.6 l'amélioration du calage pour le piézomètre milieu.

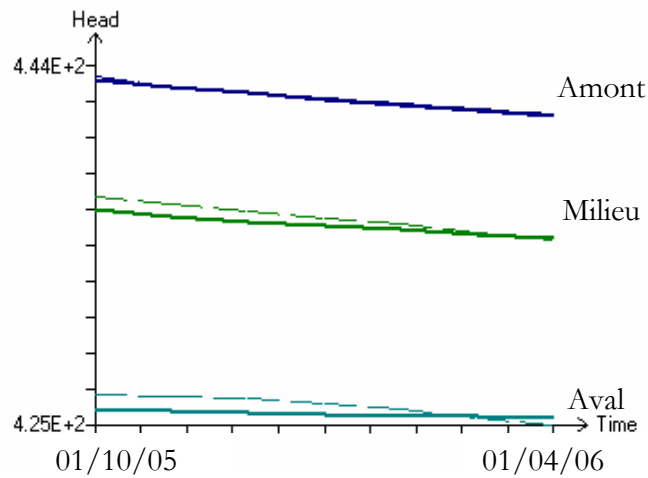


Figure IV.6 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006, socle « raboté »

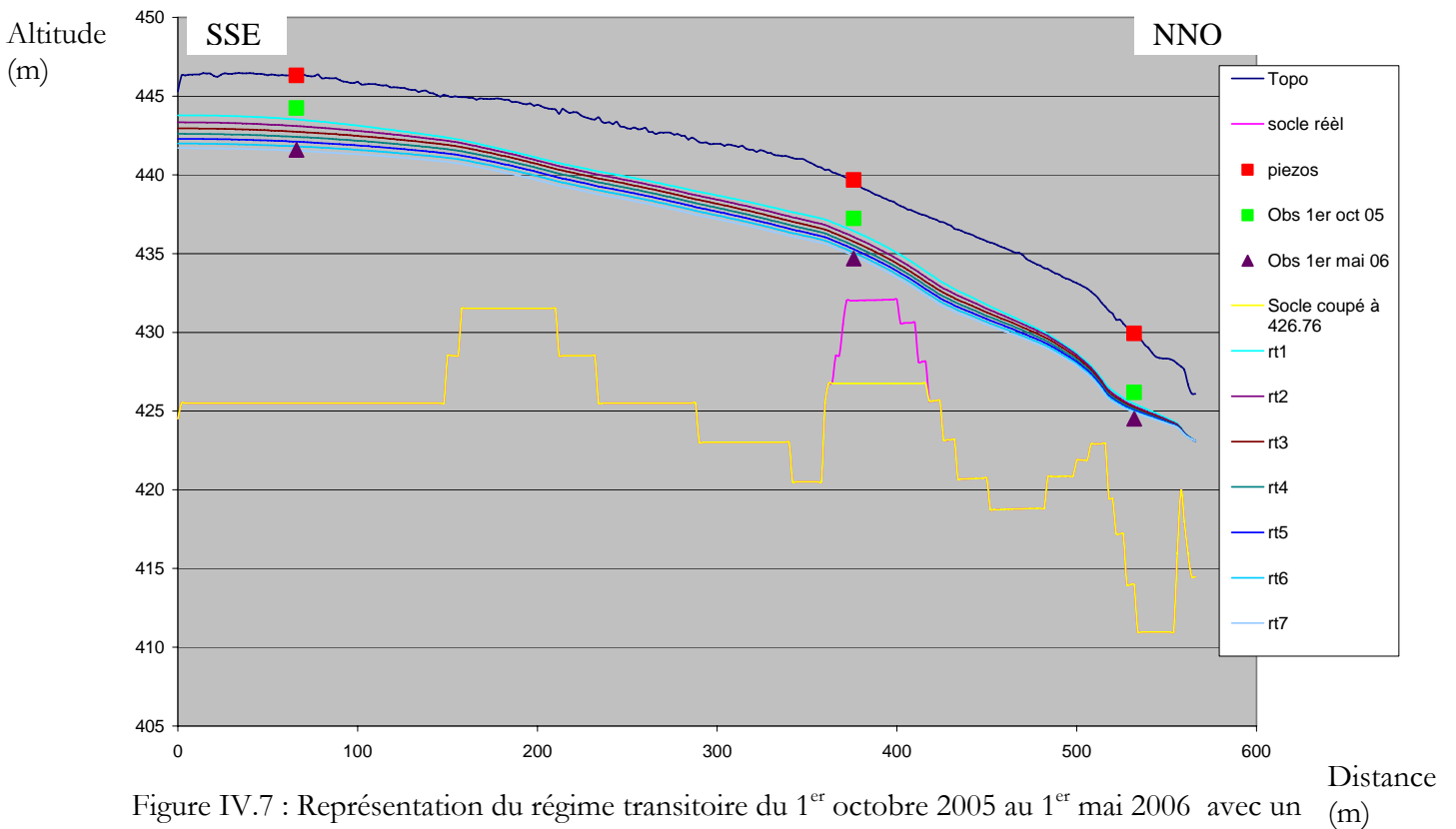


Figure IV.7 : Représentation du régime transitoire du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} mai 2006 avec un socle « raboté »

Commentaire de la figure IV.7 :

Le ressaut du milieu est bien plus faible, comme nous pouvions le prévoir, et l'amplitude est alors mieux respectée.

Nous garderons donc ce socle quelque peu modifié mais qui peut très bien représenter la réalité (le profil électrique n'étant pas strictement parallèle au versant instrumenté comme nous l'avons dit précédemment).

Pour le piézomètre Aval, il a fallu interpréter la différence entre les courbes observées et calculées différemment. En effet, suite à l'étude des chroniques des niveaux piézométriques des différents piézomètres, il a été remarqué que le niveau de la station Aval subit une recharge provenant de l'épuisement de la nappe perchée jusqu'en janvier (nappe suivie par le piézomètre à 2m, soit P3), recharge qui n'est pas considérée dans notre modèle : sur la figure IV.8 on voit que le niveau de P3 Aval, en jaune, décroît et la vitesse de ressuyage de P1 Aval diminue. La fin de cette recharge est marquée par l'évolution similaire de P1 Aval et de P1 Amont, les courbes sont en effet parallèles. A l'aval, la persistance de la nappe perchée (P3 aval) entraîne un tarissement plus lent de la nappe d'altérites jusqu'au début janvier.

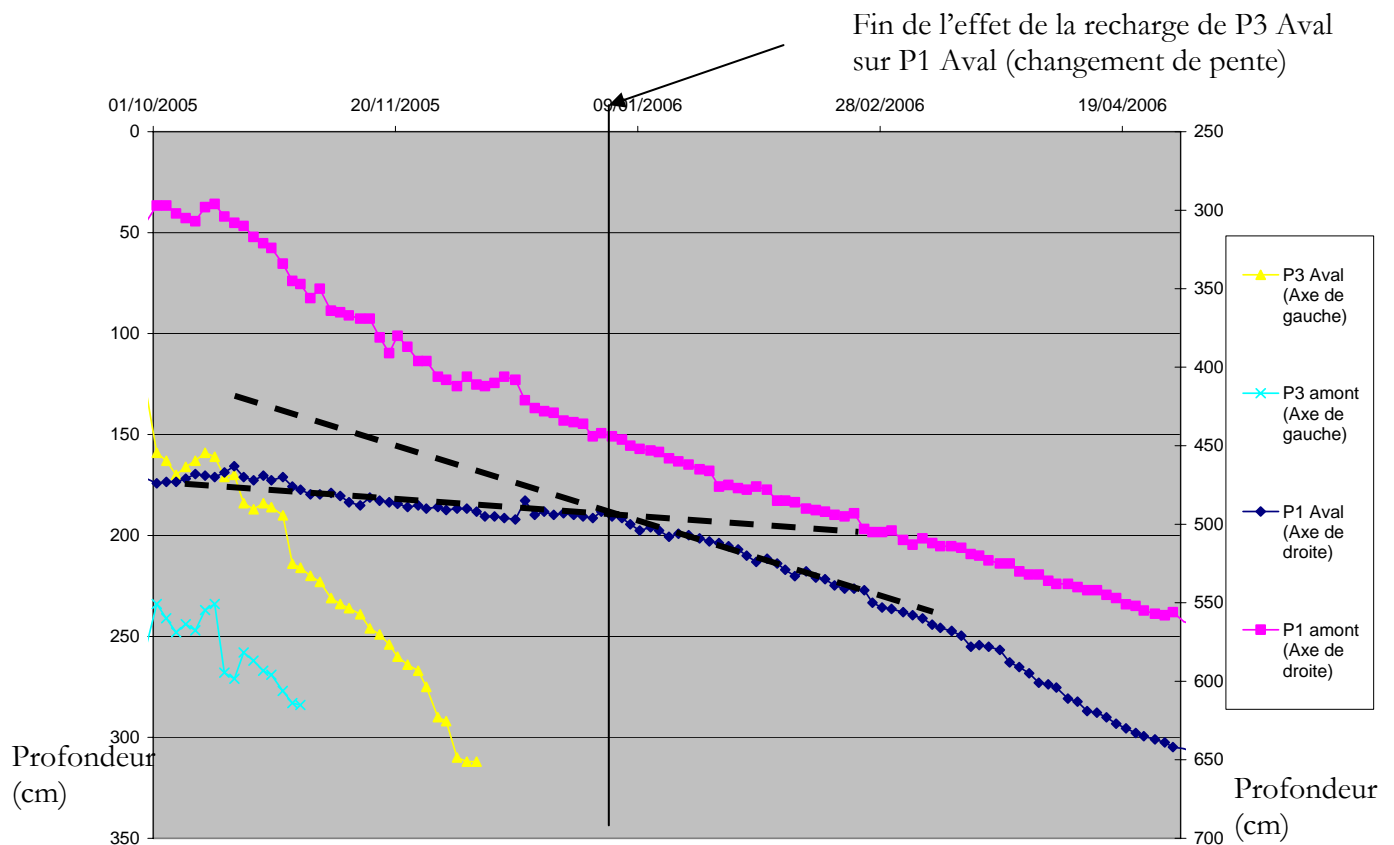


Figure IV.8 : Détail des chroniques piézométriques (profondeur par rapport aux margelles à + 100 cm)

Pour éviter de rencontrer ce problème, nous allons donc recalculer le modèle sur la période où il n'y a aucune recharge, soit à partir de janvier 2006.

IV.2.2.b. Simulation du 1^{er} janvier au 1^{er} mai 2006

La figure IV.9 renvoie les paramètres qui donnent le meilleur calage pour ce modèle (variance minimale), la courbe ainsi obtenue et la variance (plus elle est faible, plus l'erreur est faible car c'est l'erreur quadratique) : les perméabilités sont du même ordre de grandeur que précédemment ce qui est cohérent et nous voyons l'amélioration du calage, la précision voulue étant obtenue car la variance est plus faible que $10.10^{-2}m$.

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)
1 : Altérites	$2,5 \cdot 10^{-6}$
2 : Socle cristallin	10^{-10}

Figure IV.9 : Perméabilité horizontale obtenue

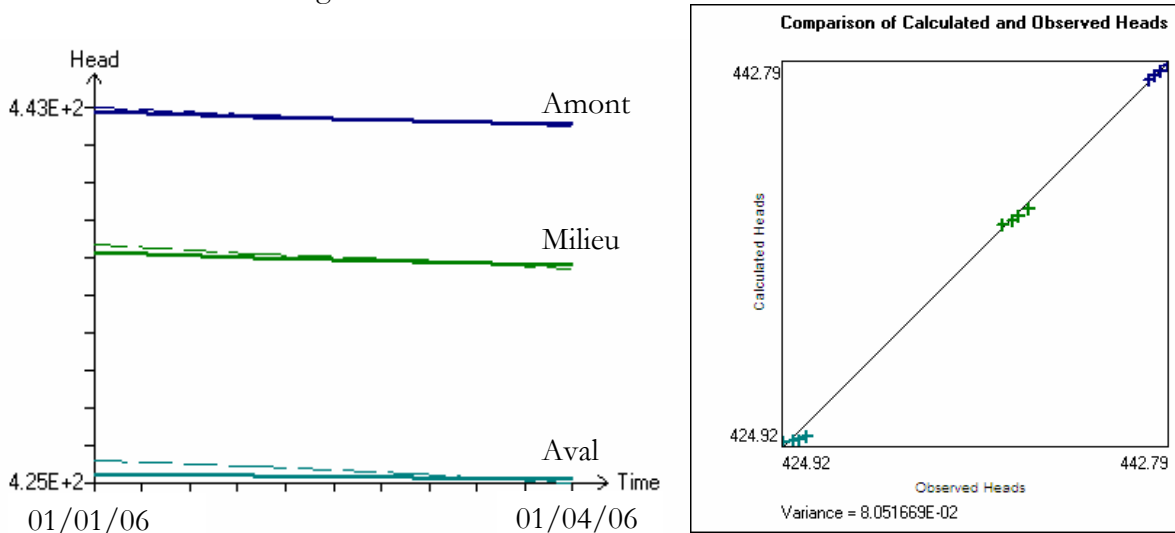


Figure IV.10 : Charge en fonction du temps, janvier/avril 2006 et sa variance

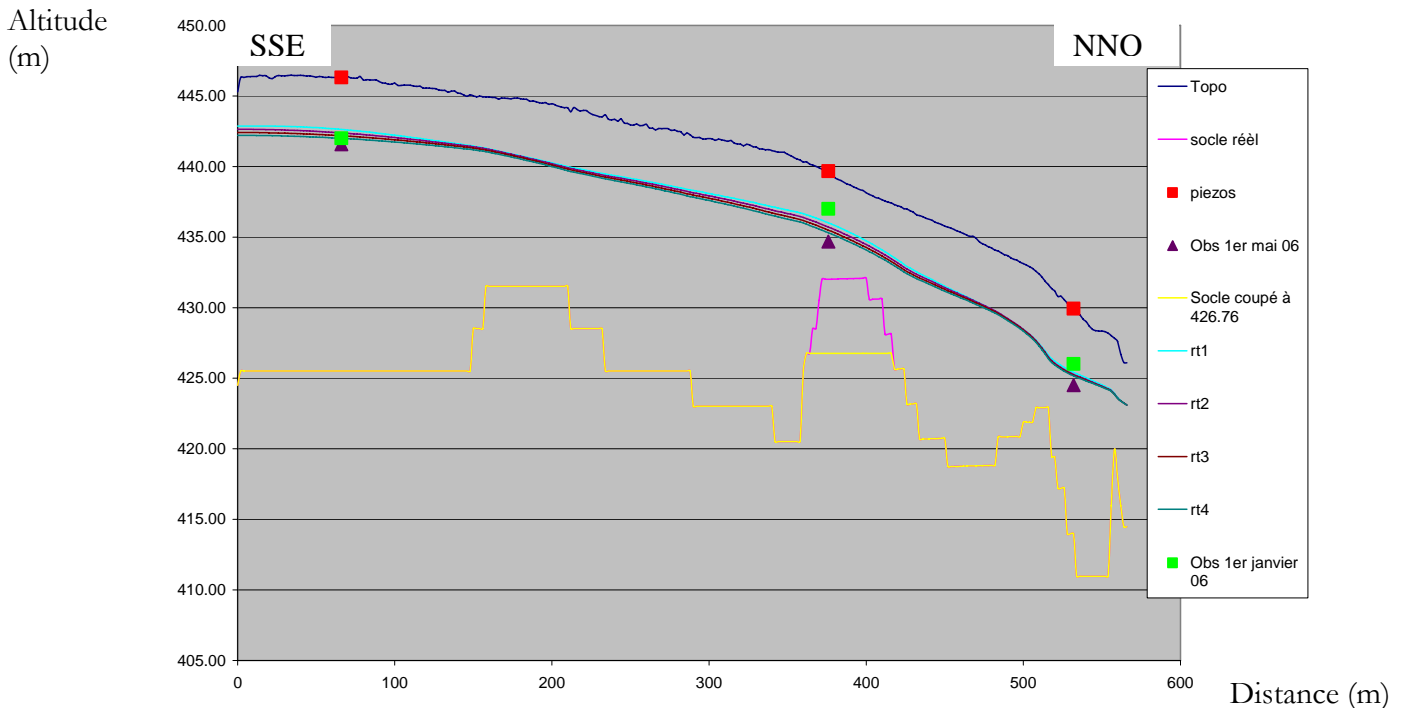


Figure IV.11 : Représentation du régime transitoire avec socle raboté

Commentaire de la figure IV.11 :

Les amplitudes sont assez correctement respectées de manière générale (variance 10^{-1} m). Le piézomètre Amont semble bien simulé sur la figure IV.10 mais on voit ici que la décroissance simulée ne correspond pas à celle observée. De plus, dans la simulation, la condition aval étant seulement à potentiel imposé, le système perd donc de l'eau latéralement, perpendiculairement au

transect. Nous allons donc simuler maintenant la décroissance de la nappe en introduisant une évapotranspiration.

IV.2.2.c. Simulation avec reprise évapotranspiratoire

L'évapotranspiration (ET) désigne toutes les pertes d'eau dues à l'évaporation (phénomène physique) et à la transpiration des plantes (phénomènes physiologiques). Dans ce travail, le rôle de la végétation dans le bilan hydrique est intégré grâce à ce module et les paramètres introduits dans la modélisation pour ce module sont donnés avec la figure IV.12.

Maximum ET rate (<i>Taux maximum d'ET</i>)	5.10^{-10} m/s (Valeur calée au départ)
Elevation of the ET surface (<i>Altitude de la nappe où ET est considérée égal à l'évapotranspiration potentielle</i>)	La surface topographique
ET extinction Depth (<i>Profondeur à laquelle ET est considérée comme nulle</i>)	Le mur de la couche d'altérites

Figure IV.12 : Données du module ET

Les résultats calés alors sont très faibles, de l'ordre de 0.04mm/j, et ne sont pas représentatifs de la réalité. En effet, les valeurs d'ET potentielle à cette époque varient entre 1,4 à 6 mm/j avec une moyenne de 3,7mm/j (Kamagaté, 2006).

En analysant les chroniques piézométriques, un zoom est présenté sur la figure IV.7, en 4 mois, nous avons une baisse de charge de 90cm à l'Amont, d'1.20m au Milieu et d'1.09m à l'Aval.

A l'Amont, nous pouvons attribuer cela à la gravité seule (écoulement horizontal du piézomètre Amont vers le piézomètre Aval) car il n'y a pas d'arbres sur le terrain, nous allons donc laisser cette faible valeur d'ET. Les observations montrent la présence d'une végétation arborée qui reste toujours verte durant la saison sèche, en bordure de la rivière tarie. Nous allons essayer de prendre en compte l'ET réelle à l'Aval.

La zone d'emprise de la végétation à l'Aval est de 50m en partant du marigot (observations de terrain) et la valeur correspondant au meilleur calage est de 3,5mm/j, soit 4.10^{-8} m/s (Figure IV.13). Valeur cohérente puisque du même ordre de grandeur que les valeurs observées en réalité qui sont de 4 à 6mm/j.

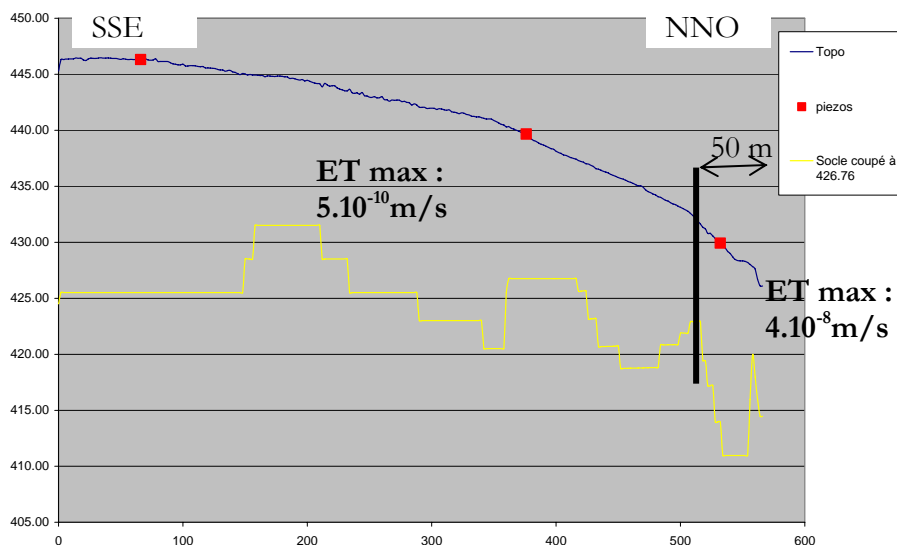


Figure IV.13 : Représentation des zones d'ET différente

Mais ce n'est pas suffisant pour reproduire la baisse de charge voulue car la variance est alors de 0,3m et nous devons donc prendre en compte une autre condition pour améliorer le modèle: la baisse de perméabilité près du marigot.

IV.2.2.d. Ajout de la baisse de perméabilité au marigot

Cette hypothèse a été prise en accord avec les observations de terrain déjà réalisées et est montrée sur la figure IV.14. En simulant une barrière hydraulique sur 6m en partant du marigot (perméabilité de l'ordre de celle du socle, soit 10^{-10}) et en ramenant la surface où l'on met de l'ET à 26m (toujours à partir des observations de terrain), on trouve une **ET d'environ $4.10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$** soit 3.5mm/j et une variance de $8,8.10^{-2} \text{ m}$ ce qui est satisfaisant.

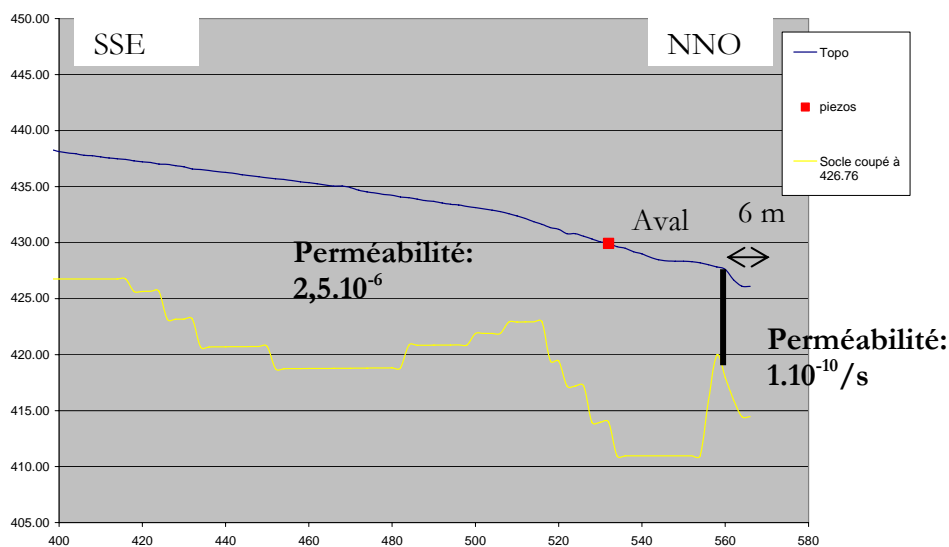


Figure IV.14 : Représentation de la baisse de perméabilité du marigot

Comme nous pouvons le remarquer sur la figure IV.15, un problème reste en suspens : la différence de charge entre les deux courbes pour la station Aval, déjà remarquable dès la première semaine de simulation. D'où vient-elle ?

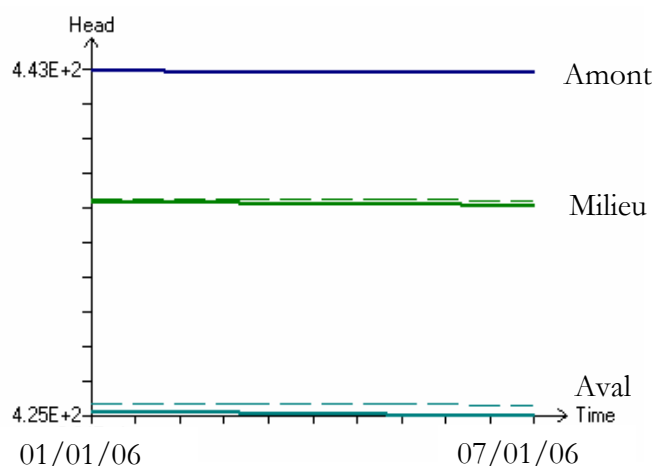


Figure IV.15 : Charge en fonction du temps, 1^{ère} semaine de janvier 2006, marigot imperméable

Nous nous focalisons sur la première semaine de janvier en utilisant un calcul au pas de temps journalier. Après avoir mis comme charges initiales les charges observées au 31/12/05 (interpolées linéairement entre les trois piézomètres), nous obtenons de bons résultats sur tout le

profil excepté localement au trois piézomètres justement. Cette baisse brutale au premier jour est de 8cm pour le piézomètre Amont et pour le piézomètre Milieu mais d'environ 30cm pour le piézomètre Aval.

Cette erreur est due au modèle.

IV.2.2.e. Intégration du module recharge sur l'année entière

Maintenant que nous avons simulé la décroissance de la nappe durant la saison sèche, nous abordons sa simulation sur un cycle annuel en prenant en compte la recharge verticale. Au stade actuel de l'étude, les données d'humidité et les gradients dans la zone non saturée sont en cours de dépouillement pour l'année 2006. Nous évaluerons donc la recharge verticale de la nappe de manière grossière par les 2 méthodes présentées ci-dessous en vue d'une comparaison des résultats uniquement pour l'année 2005 :

- Sur une période suffisamment longue (au moins une semaine, nous avons pris 10 jours), la recharge peut être estimée égale à la Pluie – ET Potentielle.
- Sur une semaine, la recharge d'un élément de nappe peut être estimée aussi comme la variation de la hauteur piézométrique (positive vers le haut) multiplié par la porosité plus le drainage latéral (appelée « stock + drainage », figure IV.16)

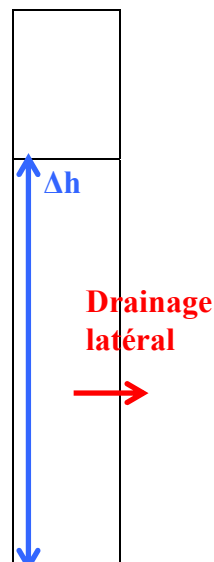


Figure IV.16 : Schéma d'une colonne d'eau

Comparaison des valeurs « pluie-ET Potentielle » et « stock + drainage », année 2005

Ce modèle a pour but de rendre compte de la remontée de la nappe phréatique en entrant manuellement les données de recharge considérée égale à « pluie-ETP » ou à « stock + drainage » et de comparer leurs résultats.

$$\text{Stock} = \Delta h * \Phi$$

Drainage latéral = flux sortant latéral – flux entrant latéral d'un même piézomètre

Avec : Δh = différence de charge hydraulique en m

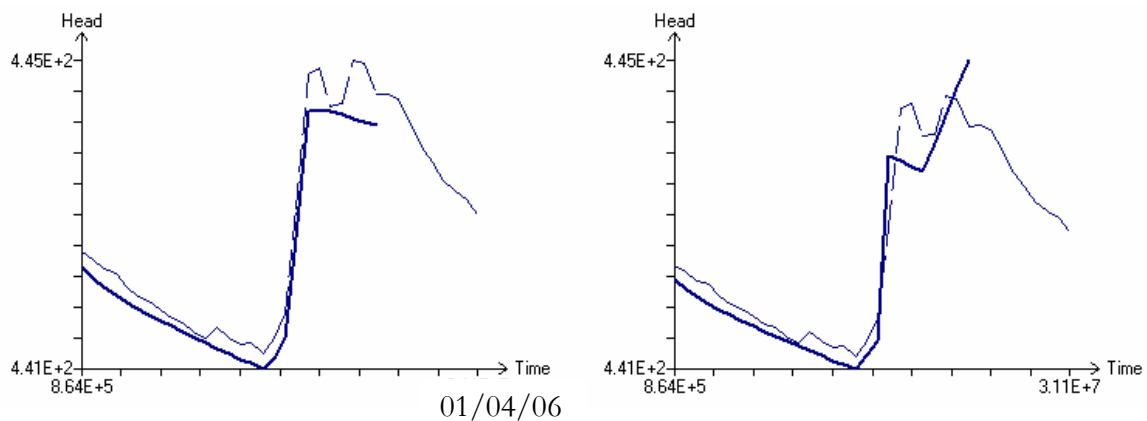
Φ = porosité en %

Cette étape nous permet d'évaluer, pour l'année 2005, la recharge à mettre pour correspondre au mieux aux variations subies par le piézomètre Amont. Nous avons choisi le piézomètre Amont car il est depuis le début le mieux modélisé, il était donc plus intéressant de continuer dans ce sens.

Comme les calculs de l'annexe 5 le montrent, les valeurs « pluie-ETP » et « stock + drainage » sont sensiblement les mêmes. Mais une question s'est posée quant aux valeurs que nous prenions pour la « Pluie – ETP ». En effet, nous avons fait une moyenne sur 10 jours mais peut-être que les bons résultats obtenus dans ce cas ne l'auraient pas été sans cette hypothèse.

Pour vérifier la cohérence de cette hypothèse nous avons comparé les résultats obtenus avec, comme valeur de « Pluie – ETP », la différence entre le 10^{ème} et le 1^{er} jour considéré au lieu de la moyenne sur 10 jours (Figure IV.17). Comme nous le constatons sur la figure IV.17, les résultats peuvent être considérés comme semblables pour les deux tiers de l'année et meilleur pour les calculs moyens ensuite. La variance est de plus faible dans le cas a ($7.10^{-2}m$) que dans le cas b ($12.10^{-2}m$), ce qui valide notre calcul.

Les valeurs de « pluie-ETP » et « stock + drainage » sont donc comparables pour l'année 2005.



a : « P-ETP moyenne sur 10 jours »

b : « P-ETP 10^{ème} jour » - « P-ETP 1^{er} jour »

Figure IV.17 : Evolution du piézomètre Amont au début de la recharge

Etablissons le bilan de la modélisation sur ce site (Figure IV.18). L'introduction progressive dans la modélisation des hypothèses déduites des observations (absence d'exhaure de la nappe vers le lit de la rivière, reprise évapotranspiratoire localisée à l'aval) montre qu'il est possible de reproduire la dynamique de vidange de la nappe d'altérite avec des jeux de paramètres réalistes (et proches des estimations de terrain (porosité, conductivité, évapotranspiration)).

La modélisation n'apparaît pas comme une fin en soi mais un élément supplémentaire aux faisceaux d'hypothèses déduites des observations pour expliquer le fonctionnement hydrogéologique de ce versant. On gardera notamment en tête que du fait d'une porosité et d'une perméabilité faibles, le drainage de la nappe peut s'expliquer par une reprise évapotranspiratoire en bordure du drain. Nous avons abordé la dynamique annuelle de la nappe en nous heurtant, faute de données issues de la zone non saturée, au « classique » problème de l'estimation de la recharge.

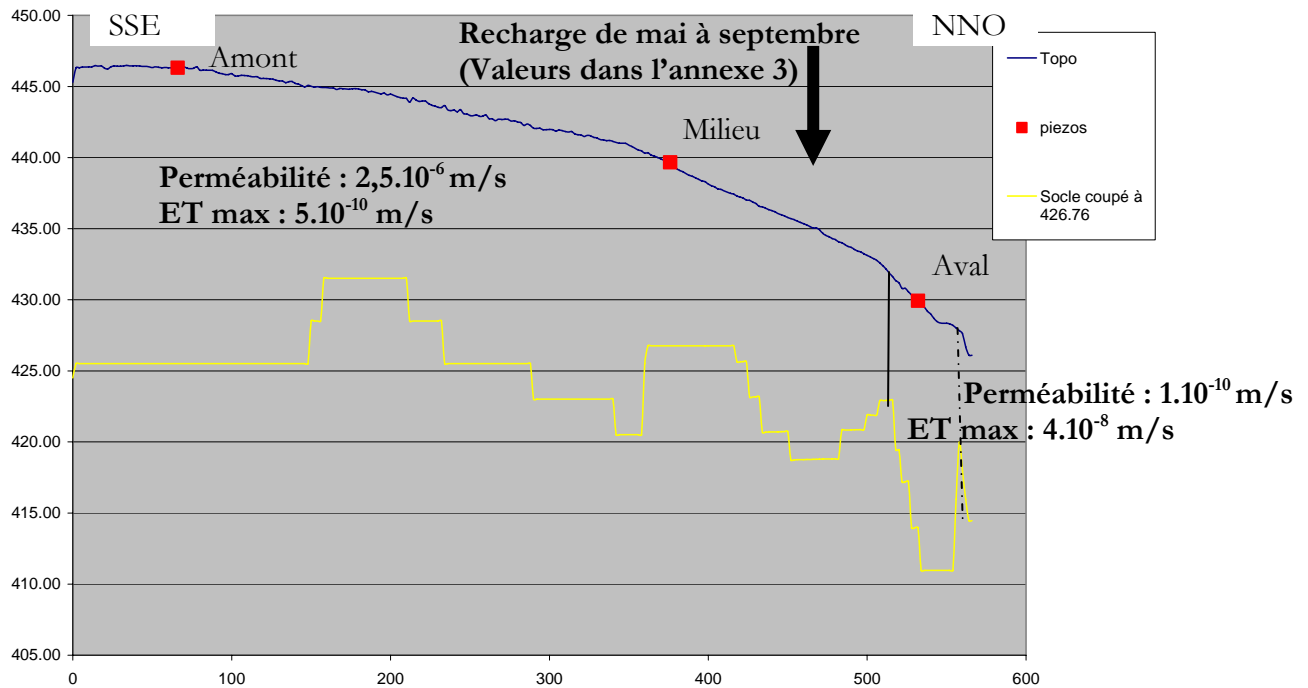


Figure IV.18 : Schéma récapitulatif des résultats du calage des données

IV.3. Béléfoungou

L'étude de ce site a été beaucoup plus rapide que celle de Nalohou, car la prise en main du modèle et la démarche de modélisation avaient été établies sur le versant de Nalohou.. De plus, le socle est bien moins irrégulier dans le cas de Béléfoungou ce qui nous a aussi facilité la tâche. Seule grande différence avec le site de Nalohou : la densité et la répartition spatiale de la végétation. Cela a donc changé les valeurs d'évapotranspiration sur le transect.

Enfin, seules les hypothèses aboutissant à un résultat satisfaisant sur le site de Nalohou ont été reprises ici.

IV.3.1. Calage du régime transitoire

Résumé de la démarche de modélisation:

Après avoir calé le modèle en régime permanent, nous avons travaillé en régime transitoire. Nous sommes ensuite directement passés au modèle en saison sèche. L'évapotranspiration et la baisse de perméabilité au niveau du marigot restent les hypothèses introduites dans le modèle, la première l'étant de façon inhomogène sur le versant.

La démarche pas à pas consiste donc en ces étapes :

- Simulation du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} avril 2006 avec reprise évaporatoire
- Simulation du 1^{er} janvier au 1^{er} avril 2006 avec reprise évaporatoire
- Recharge et observations piézométriques

Ce dernier point correspond à une réflexion sur l'hydrologie du site pour aider à la compréhension de son hydrogéologie.

Pour la suite du calage, se reporter au IV.1 car les paramètres sont les mêmes, seule la charge hydraulique initiale imposée change et est de 396 m au départ. On verra que l'on pourra la recalculer ensuite, suite aux différentes interprétations.

IV.3.2. Résultats et interprétation

Dans tout ce qui suit, l'évapotranspiration (ET) est intégrée. Mais ici, contrairement au site de Nalohou, elle est non homogène sur le site car il y a plus de végétation et notamment plus de grands arbres près du marigot (Figure IV.19). Nous avons donc mis une ET différente en haut et en bas du versant : sur une surface de longueur de 260m en partant du marigot (observations de terrain) le plafond a été calés à $4,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ et de $4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ sur le reste du profil. Nous sommes donc toujours dans le bon ordre de grandeur défini par les hydrologues (4 à 6 mm/j).

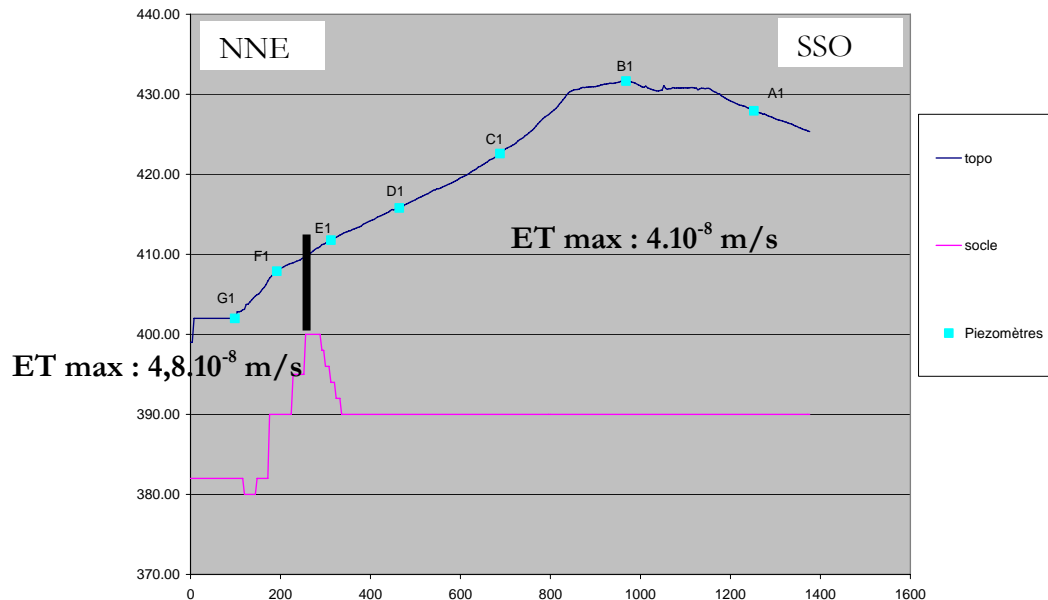


Figure IV.19 : Calage de l'ET lors du tarissement de la nappe de Béléfougou

IV.3.1.a. Simulation du 1^{er} octobre 2005 au 1^{er} mai 2006 avec évapotranspiration

On prend comme matrice de charges initiales les charges interpolées à partir des 4 piézomètres valables à cette époque au 1^{er} septembre (Le pas de temps est en effet mensuel, la première observation considérée est donc au 1^{er} octobre).

Les paramètres sont donc les mêmes que pour Nalohou à une différence près : les perméabilités introduites sont différentes dans la couche d'altérites. En effet, pour caler le piézomètre G il a fallu augmenter la perméabilité sur 140mètres à partir du marigot (observations de terrain), soit juste sur la section où G est implantée. Les résultats sont montrés par les figures IV.20 et IV.21.

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)
1 : Altérites	$5 \cdot 10^{-6}$ (G) / $1 \cdot 10^{-8}$
2 : Socle cristallin	10^{-10}

Figure IV.20 : Perméabilité horizontale obtenue

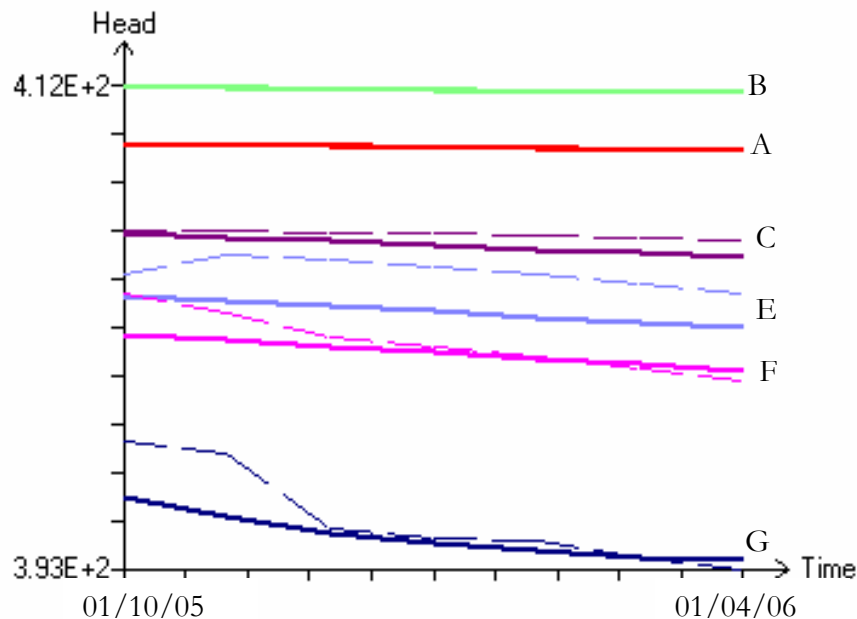


Figure IV.21 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006

La variance est de 0,82m, ce qui est un mauvais résultat.

Commentaire de la figure IV.21 :

Sur les 7 piézomètres de ce versant, nous ne considérons pas le piézomètre D qui est toujours sec d'octobre 2005 à avril 2006. En effet, nous considérons un milieu continu, hypothèse non compatible avec l'évolution de D qui a un comportement encore inexpliqué. Les piézomètres A, B et C ont sensiblement la même évolution (bien que A ne soit pas sur le même versant) et la modélisation arrive plutôt bien à reproduire les valeurs de charges hydrauliques observées.

Les résultats pour le piézomètre E ne sont pas bons et augmentent largement la variance (qui passe de 0,5m à 0,8m). Les hydrologues n'ont pas encore trouvé les causes de ce comportement différent des autres (augmentation de la charge au départ), ce qui ne nous donne pas de piste pour l'amélioration de sa modélisation. Au départ, nous ne considérerons que les courbes des 6 autres piézomètres pour le calage (A,B,C,D,F et G).

Enfin, les résultats pour les piézomètres F et G sont relativement bons si ce n'est au début de la période de temps considérée. Nous nous retrouvons en face du même problème de nappe perchée vu à Nalohou qui recharge les piézomètres F et G et que nous ne prenons pas en compte.

Passons donc maintenant aux simulations sur la période sans recharge par la nappe perchée pour obtenir de meilleurs résultats.

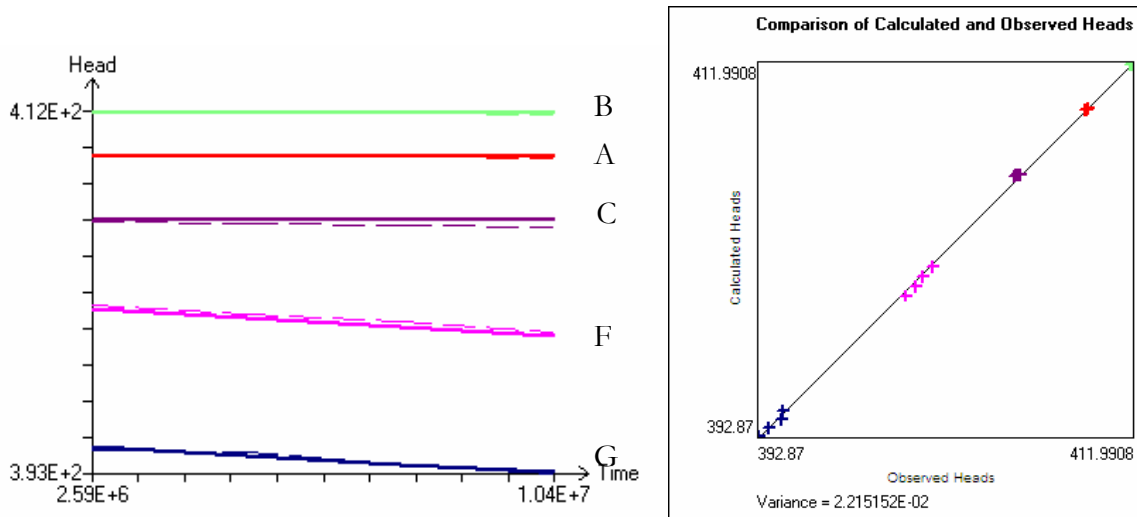
IV.3.1.b. Simulation du 1^{er} janvier au 1^{er} mai 2006 avec évapotranspiration

En laissant les mêmes perméabilités que précédemment, nous avons baissé la charge hydraulique imposée au marigot à 390m pour obtenir les meilleurs résultats. Cela signifie donc que la rivière n'est pas alimentée par les écoulements souterrains à cette époque.

Les paramètres donnant le meilleur calage pour ce modèle (variance de $2.10^{-2}m$) sont présentés sur la figure IV.22, la courbe ainsi obtenue et la variance (plus elle est faible, plus l'erreur est faible car c'est l'erreur quadratique) sur la figure IV.23. On voit bien que le calage est bien meilleur et la variance étant de $2.10^{-2}m$ est relativement satisfaisante.

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)
1 : Altérites	5.10^{-6} (G) ; 5.10^{-8}
2 : Socle cristallin	10^{-10}

Figure IV.22 : Perméabilité horizontale obtenue



Figures IV.23 : Charge en fonction du temps, janvier / avril 2006 et variance

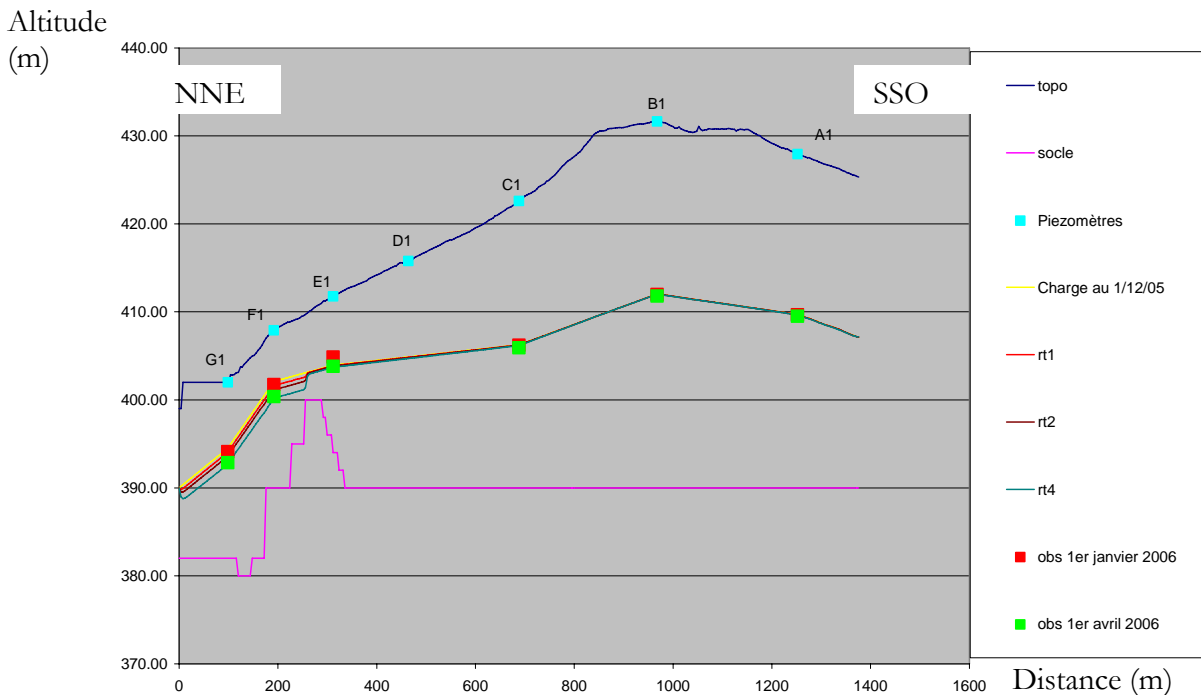


Figure IV.24 : Représentation du régime transitoire, janvier / avril 2006

Commentaire de la figure IV.24 :

De manière générale, le modèle se comporte bien et décrit correctement ce qu'il se passe dans la réalité : l'amplitude est bien respectée pour les piézomètres qui nous intéressent, c'est-à-dire A, B, C, F et G. Le ressaut est du aussi à la remontée de socle mais nous ne « raboterons » pas le socle puisque les résultats sont cohérents aux observations.

IV.3.1.c. Recharge et observations piézométriques

Avant d'intégrer la recharge, nous avons cherché à commenter la piézométrie pour mieux comprendre ce qu'il se passe réellement. Sur la figure IV.25 est représenté l'ensemble des piézomètres (A, B et C ont la même évolution, seul B est donc représenté ici dans un souci de clarté de la figure).

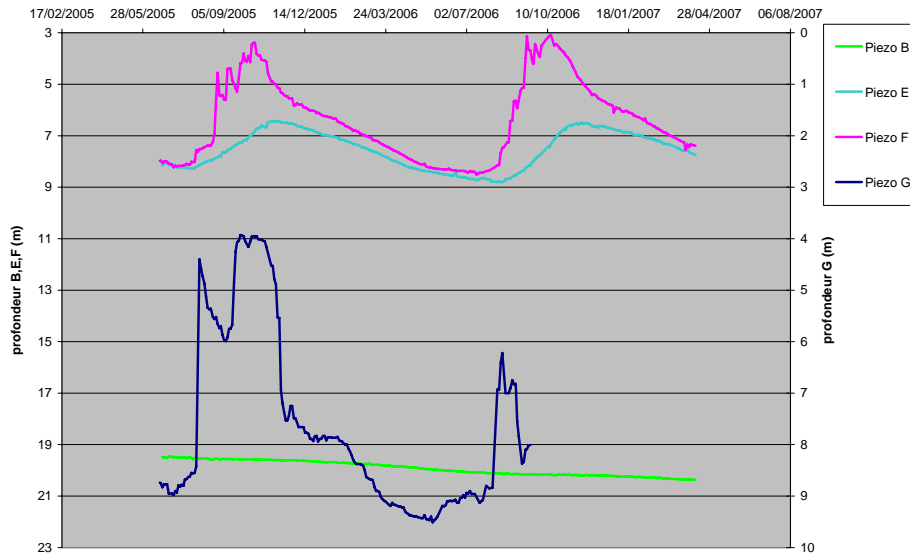


Figure IV.25 : Chroniques piézométriques de B, E, F et G

D'abord, il n'y a pas de remontée de la nappe au niveau des piézomètres A, B et C au contraire des autres piézomètres. En effet, l'épaisseur des altérites au niveau de ces piézomètres étant plus importante qu'en E, F et G, les arbres prélèvent l'eau dans sa descente dans la zone non saturée et moins d'eau arrive donc jusqu'à la nappe. De plus, le drainage latéral de la nappe entraîne une décroissance de la nappe en A,B et C que l'on peut voir sur la figure IV.27.

Les chroniques de la figure IV.26 montrent l'évolution des piézomètres E et F. La recharge est décalée d'environ un mois. Pourtant ils ne sont pas très éloignés (120 m les séparent). Nous avons pensé en premier à une différence de porosité, qui expliquerait ce décalage mais malheureusement nous n'avons pas eu d'échantillon de sol au niveau de E (Difficultés du terrain). Et si on l'assimile à D où nous avons des échantillons et des résultats, nous nous apercevons qu'il n'y a pas de différence de porosité. La perméabilité n'est pas non plus à l'origine de cette différence.

Le « retard » de E est donc du à autre chose et l'hypothèse d'un phénomène souterrain comme des apports latéraux différents est à exploiter. Penchons nous maintenant sur les observations piézométriques :

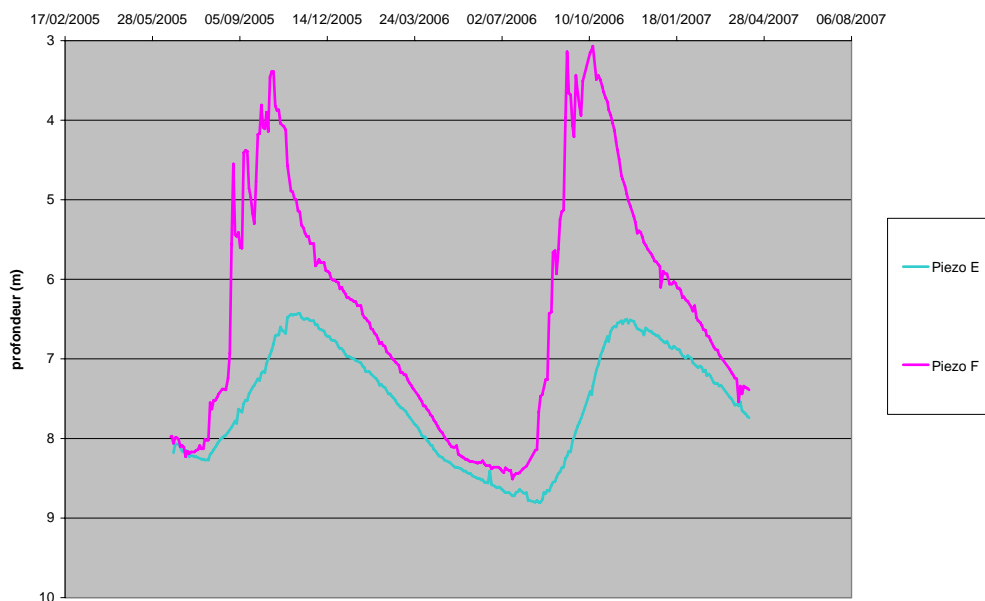


Figure IV.26 : Chroniques piézométriques de E et F

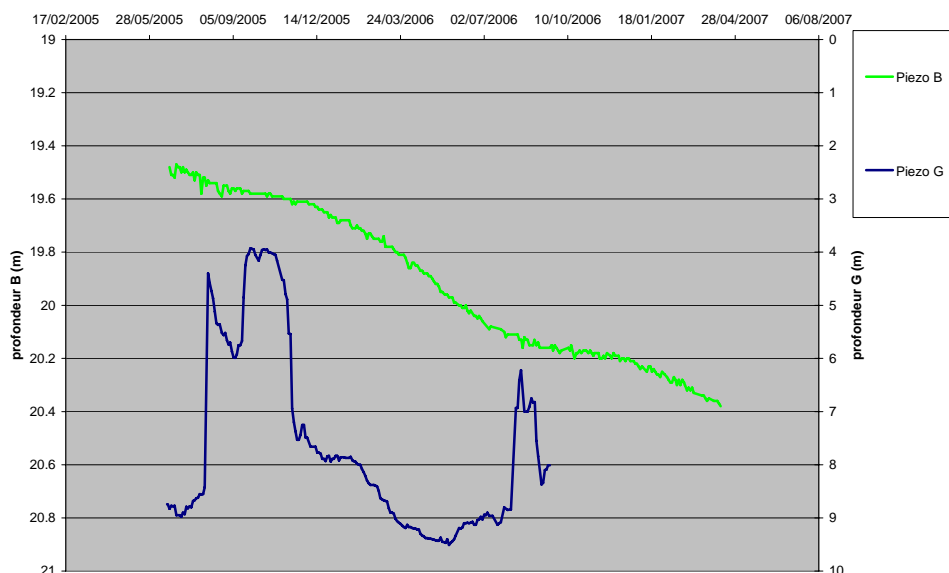


Figure IV.27 : Chroniques piézométriques de B et G

L'évolution de G sur la figure IV.27 est similaire à celle de F sur la figure IV.26, là encore un peu décalé dans le temps, d'une vingtaine de jours. Nous pouvons aisément remarquer que B varie faiblement mais décroît chaque année. Même s'il n'y a aucune recharge, nous observons un changement de pente qui coïncide avec les pics de la courbe de G : c'est une diminution de décroissance du niveau de la nappe.

Pour synthétiser toutes ces remarques, nous pouvons dire que chaque piézomètre possède sa propre évolution et plus il est en bas de versant plus il réagit vite. La piézométrie ne peut pas être expliquée sans considérer des phénomènes souterrains. Ainsi, l'hypothèse de transfert latéral par drainage (perpendiculairement au transect) est privilégiée pour expliquer les décalages dans le temps. Enfin, concernant la baisse de la nappe en amont du versant, il faudrait considérer les années humides et observer la tendance de la nappe pour mieux expliquer ce phénomène, le couvert végétal n'ayant que peu changé en 20 ans et la pluie n'étant pas déficitaire.

La complexité des phénomènes à considérer sur ce versant nous pousse à terminer l'étude de Béléfoungou sur ce point. De plus, les autres hypothèses prises sur le site de Nalohou n'ayant pas été concluantes, nous nous sommes arrêtés là pour le site de Béléfoungou. Pour conclure sur ce site, en appliquant directement le modèle acquis sur le site de Nalohou, nous arrivons à de bons résultats, sans changer beaucoup de paramètres. Le modèle ainsi créé est donc relativement satisfaisant. Mais comparons les résultats sur les deux sites pour mieux juger de sa pertinence après avoir synthétiser toutes les informations sur la figure IV.28.

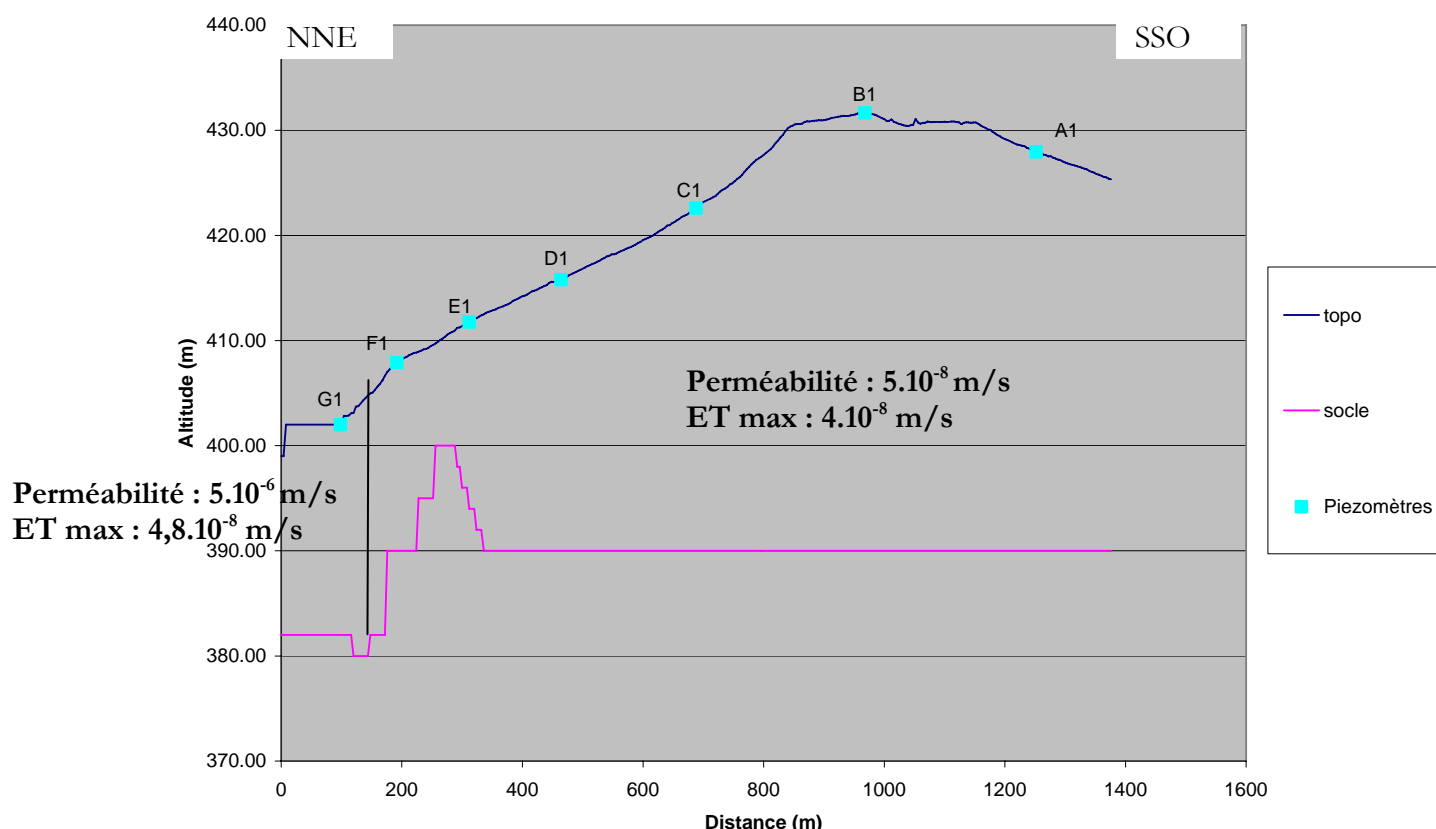


Figure IV.28 : Schéma récapitulatif des résultats du calage des données

IV.4. Comparaison des sites et synthèse

La principale différence entre les versants de Nalohou et de Béléfoungou est la densité et la répartition spatiale de la végétation, comme nous l'avons vu précédemment. C'est d'ailleurs la seule différence notable qui ait donné lieu à des changements dans l'entrée des paramètres. En effet, l'importance de la végétation sur Béléfoungou nous a fait augmenter les valeurs d'évapotranspiration sur tout le site, avec une plus forte augmentation près du marigot du fait de la plus forte densité d'arbres pouvant puiser dans la nappe souterraine.

Une autre différence est l'épaisseur des altérites, plus importante dans le cas de Béléfoungou ce qui joue sur le phénomène de reprise évaporatoire et de recharge de la nappe par les précipitations.

D'un point de vue hydrogéologique maintenant, nous pouvons conclure grâce aux modèles obtenus que les sites ne sont pas très différents. En effet, en appliquant le résultat du modèle sur le site de Nalohou, nous sommes arrivés rapidement, c'est-à-dire sans changer de manière très significative les paramètres, à de bons résultats.

Pourtant, nous pouvons remarquer sur la figure IV.28 que dans le cas de Nalohou les perméabilités horizontales et verticales sont du même ordre de grandeur alors que la perméabilité horizontale est 500 fois plus forte que la perméabilité verticale pour Béléfoungou. Les valeurs sont cohérentes avec ce que nous avons calculés lors de nos essais (Annexe 3 et 4) pour la bande où se trouve G.

NALOHOU

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)	Perméabilité verticale (m/s)	Porosité de drainage	Evapotranspiration (m ³ /s)
1 : Altérites (Marigot)	2,5.10 ⁻⁶ (1.10 ⁻¹⁰)	10 ⁻⁶	5%	4.10 ⁻⁸
2 : Socle cristallin	10 ⁻¹⁰	5.10 ⁻¹¹	5%	

BÉLÉFOUNGOU

Couches	Perméabilité horizontale (m/s)	Perméabilité verticale (m/s)	Porosité de drainage	Evapotranspiration (m ³ /s)
1 : Altérites (Piézomètre G)	5.10 ⁻⁸ (5.10 ⁻⁶)	10 ⁻¹⁰	5%	4.10 ⁻⁸ (4,8.10 ⁻⁸)
2 : Socle cristallin	10 ⁻¹⁰	5.10 ⁻¹¹	5%	

Figure IV.29 : Tableaux récapitulatifs des paramètres finaux résultant des simulations pour Nalohou et Béléfoungou : les valeurs en noir ont été fixées par la littérature ou l'expérience et les valeurs en bleu ont été calées grâce au logiciel

Les perméabilités pour la couche d'altérites sont différentes, 2,5.10⁻⁶m/s pour Nalohou contre 5.10⁻⁸m/s pour Béléfoungou mais restent réalistes en sachant que l'hypothèse de l'homogénéité du terrain est restrictive. Je n'ai pas d'explication certaine en ce qui concerne cette différence d'un facteur 200. En effet, les observations de terrain montrent que l'on appartient à la même catégorie de sol : sable limoneux. Cela correspond aussi aux valeurs trouvées par l'expérimentation (test d'infiltration). Pourtant, nous pouvons supposer que la cause est une couche de cuirasse plus présente sur le site de Béléfoungou. En effet, le rapport porosité/perméabilité doit caractériser le sol, hors nous gardons la porosité constante, donc la seule façon de trouver le bon rapport est de caler la perméabilité, ce que nous avons fait.

Nous n'avons donc peut-être pas le bon ordre de grandeur de perméabilité mais nous avons le bon ordre de grandeur du rapport porosité/perméabilité.

Pour la délimitation des couches et plus précisément la caractérisation du toit du socle, elle est aussi « fiable » sur les deux sites même si le site de Béléfoungou présente moins de contraintes, ce qui implique aussi qu'il n'y ait qu'un seul ressaut dans sa courbe de descente de charge hydraulique. Enfin, pour les deux sites, nous avons confirmé l'existence d'une nappe perchée qui se vide au moment de la saison sèche.

En posant un socle imperméable et en ne considérant que la reprise évaporatoire, nous avons réussi à reproduire les descentes de charges observées. Ainsi, nous obtenons les mêmes

conclusions que Kamagaté (2006) : le débit des cours d'eau est composé d'un flux rapide (ruissellement) et d'un flux retardé de sub-surface (nappe perchée saisonnière), sans contribution significative de la nappe des altérites. Autrement dit, la baisse du niveau piézométrique peut être expliquée uniquement par la reprise évaporatoire, la vidange dans la rivière n'est pas nécessaire. C'est ce que nous cherchions à savoir, Kamagaté l'avait prouvé par des études hydrogéochimiques et hydrologiques, la modélisation hydrogéologique le confirme.

IV.5. Conclusions et perspectives

Les hypothèses que nous avons prises tout au long du travail ont servi à obtenir ce que nous voulions comme résultat. Nous n'avons rien démontré mais nous avons prouvé que l'ensemble de nos hypothèses est réaliste ainsi que physiquement et géologiquement possible. Nous obtenons donc un résultat qui peut s'avérer être la réalité même si nous n'en sommes pas certains. Les perspectives principales de ce travail sont de valider l'ensemble de ces hypothèses. Les résultats obtenus dans cette étude ne seront validés que dans ce cadre.

Nos résultats étant satisfaisants sur deux sites, nous pouvons émettre l'hypothèse, réaliste mais restant à être vérifiée, que le schéma de fonctionnement hydrogéologique ainsi créé est applicable à d'autres versants du bassin de la Donga. Il serait aussi intéressant de tester le modèle sur d'autres années pour étudier sa fiabilité. En ce qui concerne la modélisation, le plus intéressant serait de pouvoir balayer l'espace des paramètres de manière automatique plutôt que de rechercher manuellement la solution optimale. De telles procédures sont d'emploi courant pour les modèles hydrologiques, il faudrait les introduire dans la modélisation hydrogéologique.

Les simulations pourront aussi être améliorées avec des études piézométriques complémentaires effectuées au sein même des marigots. Ainsi la charge imposée au marigot serait une donnée d'entrée imposée. Ces études seront disponibles dès 2008 sur le site de Nalohou puisqu'un piézomètre a été implanté en juin 2007 dans le marigot.

Des mesures de perméabilité pourront aussi être réalisées près de la rivière pour montrer la faible perméabilité.

Enfin, lorsque les données d'évapotranspiration (données issues de la station de flux) seront plus précises, il faudra vérifier leur cohérence avec celles de la modélisation.

De manière générale, les perspectives à envisager se fondent sur la nécessité du suivi à long terme des fluctuations piézométriques, l'amélioration des connaissances des distributions des paramètres hydrodynamiques. A l'avenir, l'anthropisation sera une donnée à prendre en compte, surtout par ses effets sur l'environnement : le déboisement pourrait en effet entraîner un accroissement du ruissellement et une diminution de l'évapotranspiration. Les bilans réalisés dans ce travail devront alors être modifiés.

CONCLUSION GENERALE

En quelques années, les recherches sur le bassin de la Donga ont progressé mais certaines hypothèses restent encore à être vérifiées. Après un rappel bibliographique des principaux résultats déjà obtenus sur ce bassin, principalement en hydrogéologie, j'ai étudié plus précisément deux sites (Nalohou et Béléfoungou) pour être à même de commencer la modélisation hydrogéologique, objectif principal de mon stage. Pour compléter les différentes études déjà menées, j'ai aussi pratiqué des tests sur des échantillons de sol (infiltration, mesure de porosité) afin d'obtenir d'autres valeurs pour les paramètres hydrodynamiques.

Les résultats présentés dans ce rapport constituent une première étape dans l'étude hydrogéologique du bassin versant de la Donga. En intégrant les données de précipitation, les paramètres hydrodynamiques et l'évapotranspiration, la modélisation effectuée a montré que les écoulements souterrains n'ont pas à être intégrés au bilan hydrologique, hypothèse que les chercheurs hydrologues avaient déjà montré à l'aide d'outils géochimiques. Cette hypothèse est donc confirmée. Il ressort que les transferts hydriques dans les altérites s'effectuent à l'intérieur du versant et que la reprise évapotranspiratoire seule et toujours au niveau du versant peut expliquer le tarissement de ces nappes de versants. A plus grande échelle, dans le cas d'une modélisation à méso-échelle, la nappe pourra donc être assimilée à un réservoir subissant uniquement des transferts verticaux (recharge ou vidange par évapotranspiration).

Les bons résultats de modélisation nous ont permis de mieux caractériser le sol avec des valeurs relativement précises de perméabilité. Les conclusions de ce travail serviront certainement de base à d'autres études plus approfondies qui détermineront précisément les impacts du changement climatique sur les ressources en eau, en sachant que l'anthropisation des sites étudiés devra être intégrée au modèle.

Liste Bibliographique

- Akouvi A-A., *Etude géochimique et hydrogéologique des eaux souterraines d'un bassin sédimentaire côtier en zone tropicale*, Thèse de Doctorat (Paris VI), 2001 (160p.).
- Bormann H. et al., *From local hydrological process analysis to regional hydrological model application in Benin: Concept, results and perspective*, Phys. Chem. Earth 30 347–356., 2005.
- Dakoure D., *Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso – Mali) – Essai de modélisation*, Thèse de Doctorat (Paris VI), 2003 (230p.).
- Descloîtres M., *Caractérisation des aquifères au Bénin et apport de la résonance magnétique des protons, premiers résultats (présentation power point, Strasbourg)*, 2007 (60p.).
- El-Fahem T., Reichert B., *Development of a three-dimensional finite element model for simulation of groundwater flow in the tropical river catchment of the Upper Ouémé (Benin, West Africa)*, Modelcare 2005, The Netherlands, (pp.568-573).
- Jacquin F., Seyigona Z., *Contribution à l'étude du fonctionnement hydrodynamique des aquifères du bassin versant de la Donga*, ORE AMMA-CATCH, 2004 (27p.).
- Kamagaté B., *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : Bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé)*, Thèse Université Montpellier-2, France, 2006 (319p.).
- Kamagaté B., Séguis L., Favreau G., Seidel J-L, Descloîtres M., et Affaton P., *Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, haut-Ouémé)*, C.R. Geoscience, v.339, iss.6, p.418-429 (2007).
- Le Barbe L., Ale G., Millet B., Texier H., Borel Y., Gualde R., *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*, IRD Editions, collection « Monographies hydrologiques », n°11, Paris, 1993 (469 p.).
- Malinur F., Séguis L., Afouda S., Ouani T., Arjounin M., Bouchez J.-M., *Piézométrie des puits villageois de la Haute vallée de l'Ouémé (Bénin) Période 2004-2005*, Rapport IRD 2007 (44p.).
- Ministère de la Coopération et du développement, *Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest, 2^{ème} édition collection Maîtrise de l'eau*, 1991 (147p.).
- Robain H., Wubda M., *Rapport de mission au Bénin du 12 octobre au 22 novembre 2004*, Rapport IRD 2004 (31p.).
- Sarvan M., El-Fahem T., Reichert B., Fass T., *Hydrochemical characterisation of the regolith aquifer in the tropical river catchment of the Upper Ouémé (Benin / West Africa)*, 2005 (31p.).
- Séguis L., Galle S., Peugeot C., Kamagaté B., Robain H., *Caractérisation des processus hydrologiques sur le super-site de la Donga. Haut bassin de l'Ouémé (Bénin)*, ORE AMMA-CATCH, 2004 (6p.).
- Wubda, M. « *Reconnaissance géophysique du bassin versant d'Ara (Djougou, Nord Bénin)* », DESS Géophysique appliquée, Paris VI, 2003 (66p.).

Liste des figures

Figure I.1 : Sites choisis pour le programme AMMA	8
Figure II.1 : Localisation du bassin de la Haute Vallée de l’Ouémé (HVO)	10
Figure II.2 : Localisation géographique du bassin de la Donga (<i>Base de données ORE/CATCH, 2002</i>)	12
Figure II.3 : Extrait de la carte géologique. Feuille Djougou-Parakou-Nikki, 1984.....	13
Figure II.4 : Extrait du graphique représentant le résultat d’une inversion des mesures de résistivités (Robain & Wubda, 2004) (bas de versant de Nalohou)	14
Figure II.5 : Coupe schématique de forage de la Donga et sa légende (Jacquin & Seyigona, 2004)	14
Figure II.6 : Schéma simplifié d’un versant type et de son fonctionnement hydrogéologique (Jacquin & Seyigona, 2004)	15
Figure III.1 : Équipement du bassin de la Donga avec délimitation des sous-bassins	16
Figure III.2 : Chronique de pluie sur trois années à Béléfoungou	17
Figure III.3 : Chronique piézométrique journalière du site de Béléfoungou.....	17
Figure III.4 : Localisation des sites	19
Figure III.5 : Profil P01 (Cf. Annexe 1)	20
Figure III.6 : Schéma d’équipement du versant : 3 stations à 3 piézomètres chacune (à 2,10 et 20m).....	20
Figure III.7 : Différents résultats de perméabilité et de porosité pour Nalohou.....	21
Figure III.8 : Profil P05 (Cf. Annexe 2)	22
Figure III.9 : Profil topographique de la toposéquence étudiée sur Béléfoungou.....	22
Figure III.10 : Différents résultats de perméabilité et de porosité pour Béléfoungou.....	22
Figures III.11 : Couches géologiques / Couches du modèle.....	26
Figure IV.1 : Tableaux des paramètres calés en régime permanent pour Nalohou et Béléfoungou	29
Figure IV.2 : paramètre supplémentaire.....	30
Figure IV.3 : Perméabilité horizontale obtenue	31
Figure IV.4 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006.....	31
Figure IV.5 : Représentation du régime transitoire du 1 ^{er} octobre 2005 au 1 ^{er} mai 2006 avec la limite du socle directement issue de l’interprétation de la coupe géophysique	32
Figure IV.6 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006, socle « raboté ».....	33
Figure IV.7 : Représentation du régime transitoire du 1 ^{er} octobre 2005 au 1 ^{er} mai 2006 avec un socle « raboté ».....	33
Figure IV.8 : Détail des chroniques piézométriques (profondeur par rapport aux margelles à + 100 cm)	34
Figure IV.9 : Perméabilité horizontale obtenue	35
Figure IV.10 : Charge en fonction du temps, janvier/avril 2006 et sa variance.....	35
Figure IV.11 : Représentation du régime transitoire avec socle raboté.....	35
Figure IV.12 : Données du module ET	36
Figure IV.13 : Représentation des zones d’ET différente	36
Figure IV.14 : Représentation de la baisse de perméabilité du marigot	37
Figure IV.15 : Charge en fonction du temps, 1 ^{ère} semaine de janvier 2006, marigot imperméable.....	37
Figure IV.16 : Schéma d’une colonne d’eau	38
Figure IV.17 : Evolution du piézomètre Amont au début de la recharge.....	39
Figure IV.18 : Schéma récapitulatif des résultats du calage des données.....	40

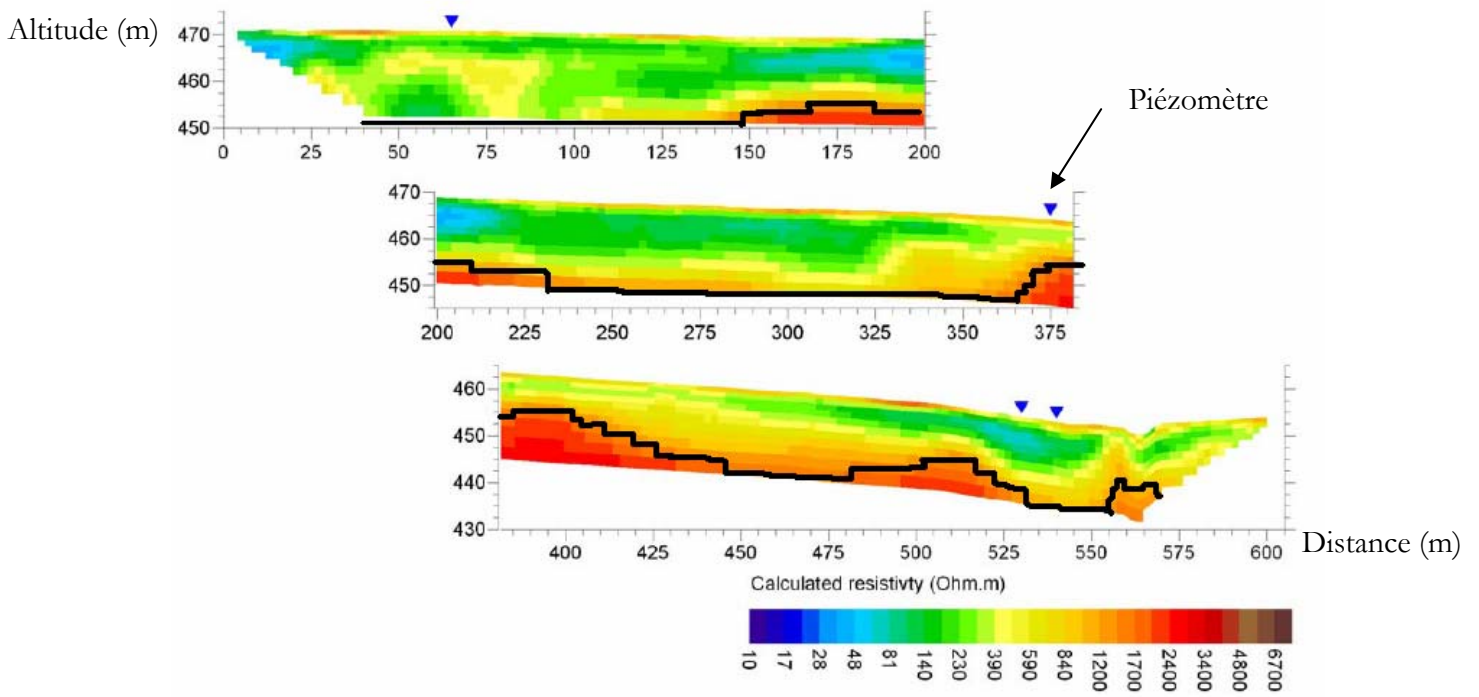
Figure IV.19 : Calage de l'ET lors du tarissement de la nappe de Béléfougou.....	41
Figure IV.20 : Perméabilité horizontale obtenue.....	41
Figure IV.21 : Charge en fonction du temps, octobre 2005 / avril 2006	42
Figure IV.22 : Perméabilité horizontale obtenue.....	43
Figures IV.23 : Charge en fonction du temps, janvier / avril 2006 et variance	43
Figure IV.24 : Représentation du régime transitoire, janvier / avril 2006	43
Figure IV.25 : Chroniques piézométriques de B, E, F et G.....	44
Figure IV.26 : Chroniques piézométriques de E et F	45
Figure IV.27 : Chroniques piézométriques de B et G	45
Figure IV.28 : Schéma récapitulatif des résultats du calage des données.....	46
Figure IV.29 : Tableaux récapitulatifs des paramètres finaux résultant des simulations pour Nalohou et Béléfougou : les valeurs en noir ont été fixées par la littérature ou l'expérience et les valeurs en bleu ont été calées grâce au logiciel.....	47

Liste des photos

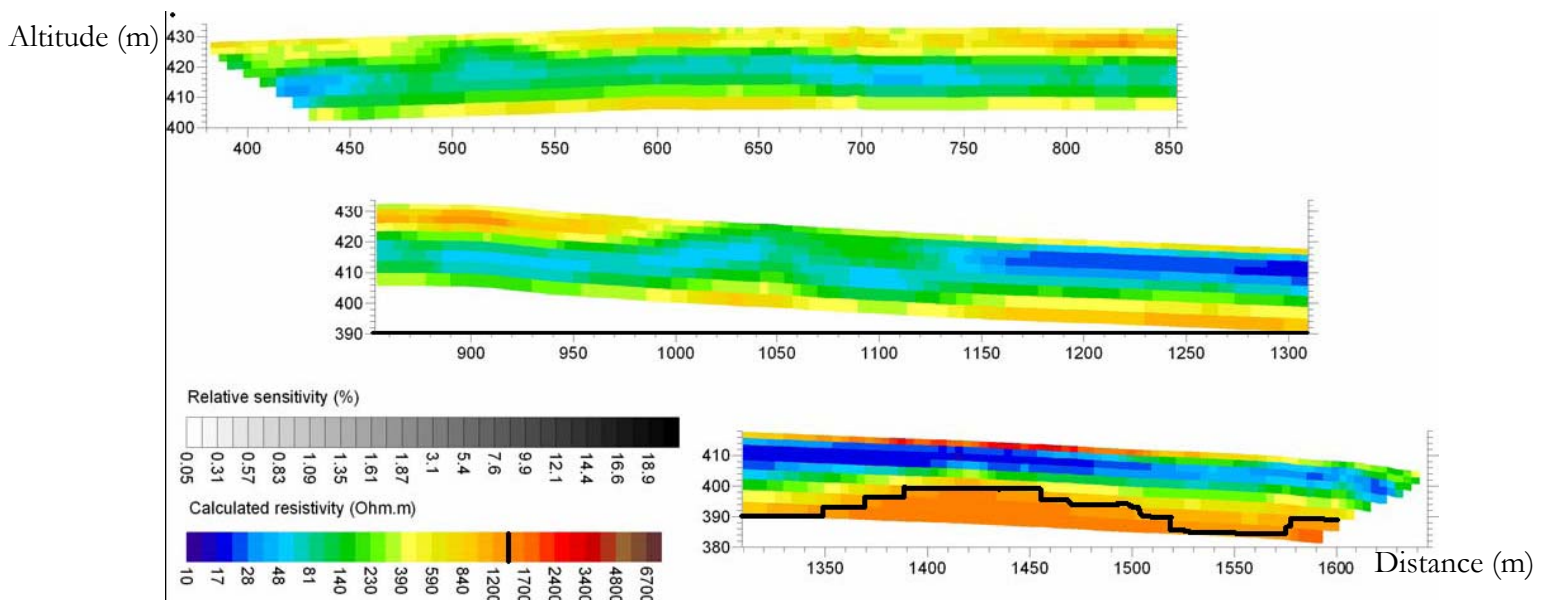
Photo I.1 : Site de la représentation de l'IRD à Cotonou	7
Photo III.1: Site instrumenté de Nalohou	19
Photo III.2 : Site du bas de versant de Nalohou : 3 piézomètres (à 2, 10 et 20 m de profondeur) et une guérite blanche protégeant la centrale d'acquisition des données d'humidité).....	20
Photos III.3 : Site instrumenté de Béléfougou	21
Photo III.4 : Test d'infiltration et zoom sur le perméamètre	24
Photos III.5 : Pompage d'essai avorté.....	25

ANNEXES

Annexe 1 : Profil géophysique de Nalohou



Annexe 2 : Profil géophysique de Béléfoungou



Annexe 3

Test d'infiltration et mesure de porosité pour le site de Nalohou																																																							
Echantillon	Diamètre (cm) Longueur (cm) V manquant (g)	Poids humide g	Poids sec g	Volume solide cm ³	Volume eau cm ³	Porosité	Poids humide g	Calcul de Porosité efficace		Temps (min)	Quantité passée (mL)	débits (m ³ /s)	K (m/s)																																										
								Poids à 24h g	Volume eau cm ³																																														
3.11m vertical	9.6 13 0 2=> 2481	2330	940.4928	135	0.14354769	2452	2467	25	0.026561809	6	7	19444E-08	3.64999E-07																																										
														4m vertical	9.6 13 0 2=> 2458	2353	940.4928	105	0.111643598	2469	2453	16	0.017012358	10	1	1.66667E-09	3.12856E-08																												
																												5m vertical	9.6 12.5 2088	1883	325.6552	205	0.62963352	0	22	3.66667E-07	6.5697E-06	1	22	3.66667E-07	6.5697E-06														
																																										AIE AIE AIE	578.7648	2427	361.728	138	0.381502123	2486	2474	12	0.033174098	10	4	3.33333E-09	6.25712E-08
3m latéral	9.6 13	2594	940.4928	100	0.106327236	2598	2586	12	0.012755268	21	18	1.46924E-08	2.75611E-07																																										
2m latéral	9.6 13 30.144	2481	910.3468	110	0.120832806	2582	2563	19	0.020871121	4	21	1.125E-07	2.11178E-06																																										
5m vertical bis	Boite occupée par le 7m		940.4928			2082		42	0.044657439	1	30	0.000000375	7.03926E-06																																										
6m latéral	9.6 13 578.76	2194	361.7328	130	0.359381289	2198	2177	21	0.056053901	12	12.5	1.73611E-08	3.25892E-07																																										
6m latéral	9.6 13 0	2330	940.4928	206	0.219034106	2379	2348	7	2.596563504	5	4	1.33333E-08	2.5028E-07																																										
7m vertical	9.6 13 578.76	2212	361.7328	219	0.605419249	2178	2139	39	0.07814387	0.5	10	3.33333E-07	6.25712E-06																																										
2m						2342	2672	17	0.01807563	1.5	24.5	2.72222E-07	5.10998E-06																																										
						2672	2642	30	0.0318981711																																														

Annexe 4 (suite)

Echantillon	Diamètre (cm) Longueur(cm) V manquant estimé(cm³)	Poids humide	Poids sec	Volume solide	Volume eau	Porosité	Calcul de Porosité efficace			
							Poids humide g	Poids à 24h g	Volume eau cm³	Porosité efficace
BELEFOUNGOU P05										
∠										
puits D 4m vertical	10.6 13.5 0	3476	3264	1190.7351	212	0.178041279	3557	3497	60	0.050389041
1										
puits D 4m vertical	10.6 13.5 0	3585	3423	1190.7351	162	0.136050411	3651	3601	50	0.041990868
2										
puits F 4m vertical	10.6 14.5 0	3696	3598	1278.9377	98	0.076626094	3793	3762	31	0.024238866
1										
puits F 4 m vertical	10.6 13.4 0	4110	4000	1181.91484	110	0.093069311	4143	4123	20	0.016921693
2										
puits D 2m vertical	10.6 12.7 0	3825	3670	1120.17302	155	0.138371481	3465	3433	32	0.028567015
1										
puits D 2m vertical	10.6 13 0	3405	3230	1146.6338	175	0.152620654	3820	3791	29	0.025291423
2										
puits D 6m vertical	11.2 12.4 0	3130	2805	1221.03296	325	0.266168081	3096	3045	51	0.041767914
puits D 4m horizontal	10.6 13 0	3488	3317	1146.6338	171	0.149132182	3566	3500	66	0.057559789
puits D 6m horizontal	10.6 13 0			1146.6338			3167	3139	28	0.024419305
puits D 6m vertical	10.6 13 0			1146.6338			3451	3437	14	0.012209652
puits D 8m vertical	10.6 13 0			1146.6338			3409	3386	23	0.020058714
droite										
puits D 8m vertical	10.6 13 0			1146.6338			3604	3572	32	0.027907777
gauche										
puits D 8m horizontal	10.6 13 0			1146.6338			3728	3707	21	0.018314478
puits D 10m vertical	10.6 13 0			1146.6338			3428	3408	20	0.01744236
puits F 2m vertical	10.6 13 0			1146.6338			2666	2659	7	0.006104826
gauche										
puits F 2m vertical	10.6 13 0			1146.6338			2691	2658	33	0.028779895
droite										
puits F 7m vertical	10.6 13 0			1146.6338			3879	3853	26	0.022675069

Annexe 5 : Calculs de pluie-ETP

Calculs avec moyenne des charges hydrauliques sur 10 jours									
Recharge = Stock + Drainage		Recharge (m/10j)		Recharge (m/s)		Drainage		flux sortant du piezo 34	
Période	Stock (m/10j) Drainage (m)	Recharge (m/10j)	Recharge (m/s)	Drainage	flux entrant au piezo 34	flux sortant du piezo 34	Drainage = quantité d'eau qui part moins quantité d'eau qui arrive dans une cellule		
16	6.62E-04	1.10E-08	6.62E-04	7.67E-10	1.10E-08	3.98E-07	4.07E-07	4.00E-07	
17	-6.46E-03	1.10E-08	-6.46E-03	-7.48E-09	1.10E-08	3.89E-07	3.83E-07	3.95E-07	
18	9.00E-03	1.20E-08	9.00E-03	1.04E-08	1.20E-08	3.88E-07	3.78E-07	3.89E-07	
19	1.36E-02	1.10E-08	1.36E-02	1.57E-08	1.10E-08	3.78E-07	3.78E-07	3.85E-07	
20	5.88E-02	1.00E-08	5.88E-02	6.81E-08	1.00E-08	3.69E-07	3.62E-07	3.76E-07	
21	7.40E-02	1.10E-08	7.40E-02	8.57E-08	1.10E-08	3.65E-07	3.62E-07	3.73E-07	
22	3.38E-03	1.10E-08	3.38E-03	3.92E-09	1.10E-08	3.62E-07	3.59E-07	3.65E-07	
23	-2.07E-02	1.10E-08	-2.07E-02	-2.40E-08	1.10E-08	3.58E-07	3.58E-07	3.65E-07	
24	1.50E-03	4.20E-08	1.50E-03	1.74E-09	4.20E-08	3.58E-07	3.58E-07	3.65E-07	
25					1.00E-08	3.58E-07	3.58E-07	3.65E-07	

Comparaison Recharge à Pluie-ETP			
Période	Recharge (m/s)	Pluie - ETP	Rapport
16	7.67E-10	5.90311E-09	1.30E-01
17	-7.48E-09	-6.1753E-09	1.21E+00
18	1.04E-08	9.16886E-09	1.14E+00
19	1.57E-08	2.56719E-08	6.13E-01
20	6.81E-08	1.98046E-07	3.44E-01
21	8.57E-08	9.34295E-08	9.17E-01
22	3.92E-09	-2.09137E-08	-1.87E-01
23	-2.40E-08	-2.1188E-08	1.13E+00
24	1.74E-09	9.11191E-08	1.91E-02

x1 / y1	0	0	
x2 / y2	9.22743E-08	8.98994E-09	Equation 1ere partie: y=ax
x3 / y3	1.98046E-07	1.39468E-07	Equation 2eme partie: y=ax+b
a =	0.097209509	y=9.72e-2*x	y est la recharge et x est la Pluie-ETP
b =	0.511288233	y=0.5113*x - 3.821e-8	
	-3.82088E-08		

Calculs avec différence de charges hydrauliques au 1er et au 10ème jour																				
Recharge = Période	Stock + Drainage		Recharge (m ¹⁰)		Recharge (m/s)		Niveau piezo (m)		Dh fin-début période (m)		Stock		Pluie		ETP		Pluie-ETP (mm/10)		Pluie-ETP (m/s)	
	Stock (m ¹⁰)	Drainage (m)	Recharge (m ¹⁰)	Recharge (m/s)	Niveau piezo (m)	Dh fin-début période (m)	Stock	Pluie	ETP	Pluie-ETP (mm/10)	Pluie-ETP (m/s)									
16	0.000692022	1.10E-08	6.92E-04	8.01E-10	441.3951596	1.38E-02	6.92E-04	47.4	42.2997124	5.100287628	5.90311E-09									
17	-0.0015	1.10E-08	-1.50E-03	-1.74E-09	441.409	-3.00E-02	-1.50E-03	30.5	35.8354573	-5.33547311	-6.1753E-09									
18	0.011	1.20E-08	1.10E-02	1.27E-08	441.519	2.20E-01	1.10E-02	45.3	37.3761069	7.921893128	9.1688E-09									
19	0.0205	1.00E-08	1.20E-02	1.39E-08	441.289	2.40E-01	1.20E-02	52.2	30.0195049	22.18049511	2.56719E-08									
20	-0.0055	1.00E-08	1.21E-01	1.39E-07	441.289	2.41E+00	1.21E-01	213.7	42.5879248	171.1120752	1.9804E-07									
21	-0.0155	1.00E-08	-5.50E-03	-6.37E-09	441.519	-1.10E-01	-5.50E-03	121.8	41.0769331	80.72306686	9.3429E-08									
22	-0.0155	1.00E-08	-1.55E-02	-1.79E-08	441.589	-3.10E-01	-1.55E-02	17.5	35.568441	-18.0844097	-2.09137E-08									
23	-0.0155	1.00E-08	-1.55E-02	-1.79E-08	441.229	-3.10E-01	-1.55E-02	9.4	27.7064163	-18.39641629	-2.1168E-08									
24	0.021	4.20E-08	2.10E-02	2.43E-08	441.789	4.20E-01	2.10E-02	113.8	35.0730396	78.1289043	9.11191E-08									
Comparaison Recharge à Pluie - ETP																				
Période	Recharge (m/s)	Pluie - ETP	Rapport	Recharge (m/s)	Pluie - ETP	Rapport														
16	8.01E-10	5.90311E-09	8.01E-10	8.01E-10	5.90311E-09	8.01E-10														
17	-1.74E-09	-6.1753E-09	3.54E-01	-1.74E-09	-6.1753E-09	3.54E-01														
18	1.27E-08	9.1688E-09	1.39E+00	1.27E-08	9.1688E-09	1.39E+00														
19	1.39E-08	2.56719E-08	1.84E+00	1.39E-08	2.56719E-08	1.84E+00														
20	1.98E-07	1.9804E-07	1.00E+00	1.98E-07	1.9804E-07	1.00E+00														
21	-6.37E-09	9.3429E-08	-6.81E-02	-6.37E-09	9.3429E-08	-6.81E-02														
22	-1.79E-08	-2.09137E-08	1.16E+00	-1.79E-08	-2.09137E-08	1.16E+00														
23	-1.79E-08	-2.1168E-08	1.18E+00	-1.79E-08	-2.1168E-08	1.18E+00														
24	2.43E-08	9.11191E-08	3.75E+00	2.43E-08	9.11191E-08	3.75E+00														

