



**ELABORATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE GESTION
DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU DE SOCLE : CAS
DU SITE EXPERIMENTAL DE SANON, BURKINA FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC
GRADE DE MASTER DANS LA SPECIALITE GENIE CIVIL ET
HYDRAULIQUE**

Présenté et soutenu publiquement le 28 janvier 2017 par :

Boureima TIONO

Directeur de mémoire : **Prof. Hamma YACOUBA, Professeur Titulaire CAMES**

Encadreur, **Dr Mahamadou KOITA, Maître Assistant CAMES**

Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH)

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr Angelbert BIAOU**

Membres et correcteurs : Prof. Hamma YACOUBA, 2iE

Dr. Mahamadou KOITA, 2iE

Dr Jean Pierre SANDWIDI, ENSI-FADA

M Richard SANON, ISAG

Promotion [2015/2016]

AVANT PROPOS

Ce travail de mémoire de fin d'études a été réalisé dans le cadre du projet interafricain de recherche sur la ressource en eau souterraine dénommé **GRIBA (Groundwater Resources in Basement Rocks of Africa)** financé par l'Union Européenne (UE) et l'Union Africaine (UA). Lancé en 2012, ce projet a une durée de 3 ans et réunit des partenaires de 3 pays africains: le Bénin (l'Université d'Abomey Calavi), le Burkina Faso (l'Université de Ouagadougou et l'institut 2iE), l'Ouganda (la Direction de l'Eau et l'Université Makerere) ; ainsi que deux partenaires européens, à savoir la Queen's University de Belfast en Irlande du Nord et l'IRD. Dans le but de mieux connaître les ressources en eau souterraine en zone de socle africain, le projet GRIBA s'est fixé les objectifs suivants :

- **Quantifier les propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle** (y compris les volumes d'eau qui y sont stockés) grâce au développement d'une nouvelle approche qui s'appuie sur des outils complémentaires, notamment la méthode de Résonance Magnétique des Protonique (RMP) ;
- **Élaborer des scénarios de gestion durable des eaux souterraines.** La nouvelle connaissance des propriétés hydrogéologiques des aquifères permettra de construire des modèles prédictifs pour définir des scénarios d'exploitation appropriés ;
- **Soutenir la mise en place d'un réseau de chercheurs africains concernés par les aquifères de socle.**

DEDICACE

Je dédie ce mémoire ... 

A Dieu le maître de l'univers, lui qui a permis que tout cela se passe bien.

A la mémoire de mon Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

A mon très cher oncle

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jours et nuits pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère

Tes prières et tes bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire ne saurait être une œuvre solitaire. C'est donc l'occasion pour moi d'exprimer ma profonde gratitude à l'endroit des personnes qui de loin ou de près ont participé à son élaboration. Je tiens à témoigner ma profonde gratitude à mon directeur de mémoire, Dr Mahamadou KOÏTA, enseignant chercheur au Laboratoire Hydrologie et Ressources en eau (LEAH) à 2iE; pour le suivi et l'aide qu'il m'a apporté tout au long de mon stage.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury de la soutenance de ce mémoire :

Dr. Angelbert BIAOU, Dr Jean Pierre SANDWIDI et M. Richard SANON

J'adresse mes vifs remerciements au Dr Justine YOFE TIROGO pour sa disponibilité et le partage de son savoir-faire.

Je remercie :

Mr Dimitri SORO, Mr Gnenakantanhan COULIBALY, Doctorants au (LEAH),

Je remercie également : Albdoul Aziz SORE, Emmanuel DARA, Fabien YONLI, Nancy DILMA, Gabin FOUGOU, Franck KABORE, Héritier RUTABARA, Korotimi ZONGO et Rasmané OUEDRAOGO, pour leurs aides et conseils.

Je remercie enfin tous les enseignants de 2iE et mes collègues au cours de ces cinq (5) dernières années de formation.

RESUME

Situé dans une zone caractérisée par les aquifères de socle; le site expérimental de Sanon est représentatif de la géologie du Burkina Faso. Dans certaines régions du pays, en particulier les zones caractérisées par les aquifères de socle cristallin, sous climat sahélien, les incertitudes sur les débuts et fins de saisons, l'augmentation des poches de sécheresses en saison pluvieuse, la rareté ou la saisonnalité des eaux de surface accentuent la pression sur les ressources en eau souterraine à l'échelle. C'est dans le but d'apporter une contribution à la gestion durable de ces ressources que la présente étude a été initiée. Compte-tenu de l'objectif recherché, et des données disponibles, l'approche milieu poreux équivalent a été choisie pour l'élaboration d'un modèle numérique d'écoulement en régime permanent et transitoire à l'aide des différences finies du code Modflow. A l'issue de ce modèle numérique, deux scénarios de gestion ont été proposés pour une gestion durable de la ressource.

La modélisation en régime permanent du 19/01/1989 a permis de caractériser la distribution spatiale de la perméabilité, et de la recharge (respectivement $2,20 \cdot 10^{-6}$ à $5,79 \cdot 10^{-5}$ m/s et 11,77 et 118,882 mm/an), et quantifier aussi les flux d'eau qui transitent dans le modèle. Il révèle que les principaux flux qui transitent dans le modèle proviennent de la recharge et l'alimentation à travers ses frontières. Aussi, il en ressort que l'influence des prélèvements sur le fonctionnement global de l'aquifère de Sanon est négligeable.

Le modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement (10^{-4} à 10^{-2}) de l'aquifère de Sanon. La comparaison des chroniques piézométriques mesurées et simulées a révélé une assez bonne restitution de la piézométrie par le modèle. Le bilan hydrique issu du calage du régime transitoire a mis en évidence les entrées et les sorties d'eau du modèle. Enfin, ces deux scénarios projetés prévoient une croissance continue des prélèvements et une baisse du niveau de la nappe de Sanon.

Mots Clés :

Sanon

Gestion durable

Modélisation numérique

Aquifère de socle

Burkina Faso

ABSTRACT

Located in a zone of basement aquifers, the experimental site of Sanon is representative of Burkina Faso geology. In some areas of this country, especially areas characterized by crystalline basement aquifers, under a sahelian climate, uncertainties on the starts and ends of seasons, the increase in pockets of droughts during the rainy season, the scarcity or the seasonal variation of surface water accentuate the pressure on the groundwater resources at the local scale. It is with an aim to contribute to the sustainable management of these resources, that this study was initiated. Taking into account the goal aimed for, and available data, the equivalent porous environment approach was selected for the development of a digital model of flow in steady-state and transient state, using the finite differences of the code Modflow. Resulting from this digital model, two scenarios of management were proposed for a sustainable management of the resource.

The modeling in steady-state of the 1/19/1989 made it possible to characterize the spatial distribution of the permeability, and of the groundwater recharge (respectively $2.20 \cdot 10^{-6}$ to $5.79 \cdot 10^{-5}$ m/s and 11.77 and 118.882 mm/year), and made it possible to quantify water flows which pass in the model. It reveals that the main flows which pass in the model come from the groundwater recharge and the supplying through its borders. It's also revealed that the influence of the water taking away on the overall working of the aquifer in Sanon is negligible.

The model in transient state made it possible to refine spatial distribution of the storage coefficient (10^{-4} to 10^{-2}) of the aquifer in Sanon. The comparison of the measured and simulated piezometric chronicles revealed a rather good restitution of piezometry by the model. The flow budget resulting from the calibration of the transient state highlighted the inputs and outputs of water in the model. Finally, these two projected scenarios envisage a continuous increase in the water taking away and a decrease in the level of the groundwater of Sanon.

Key Words:

Sanon

Sustainable management

Digital modeling

Crystalline basement aquifer

Burkina Faso

LISTE DES ABBREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AEP : Adduction en Eau Potable

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CLE : Comités Locaux de l'Eau

ERT: Electrical Resistivity Tomography

ETM: Evapotranspiration Maximale

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

GRIBA: Groundwater Ressources In Basement Rock of Africa

MNT: Modèle Numérique de Terrain

NRC : National Research Council

PAGIRE : Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressource en Eau

PHI : Programme Hydrologique International

PMH : Pompe à Motricité Humaine

RCP : Representative Concentration Pathway

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RMP: Résonance Magnétique protonique

RMS: Root-Mean-Squared

SMA: Système Multi-Agents

UNESCO: Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres hydrodynamiques par rapport au dôme piézométrique (Toé 2004) ...	13
Tableau 2: Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'année de 2014	42
Tableau 3: Recharge pour l'année 2014 du site expérimental de Sanon	43
Tableau 4: Récapitulatif de la conductivité hydraulique.....	45
Tableau 5: Valeurs de recharge du régime permanent (1989).....	48
Tableau 6: Indicestatistique des résultats du calage du modèle.....	51
Tableau 7: Bilan global de la nappe de Sanon.....	52
Tableau 8: Comparaison modèle calé et modèle validé.....	53
Tableau 9: Résultats de calage en régime transitoire	56

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de situation du site expérimental de Sanon	4
Figure 2: Zones climatiques du Burkina Faso (1961-1990) d'après la direction de la météorologie.	5
Figure 3: Pluviométrie mensuelle de 2013 à 2016.....	6
Figure 4: Carte géologique de Sanon d'après BRGM-AQUATER (1991).....	8
Figure 5: <i>Modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle d'après Dewandel (2006)</i>	9
Figure 6: Coupe lithologique d'un forage du site expérimental de Sanon (modifié d'après BRGM, 1991).....	11
Figure 7: Profil de crête en crête passant par le forage S15 modifié d'après Soro et al. (2015).....	11
Figure 8: Carte de fractures majeures (en rouge) validées par l'ERT (Soro et al.,(2015).....	12
Figure 9 : Carte de transmissivité du site expérimental de Sanon proposé par Yonli (2016).....	13
Figure 10: Carte piézométrique en basses eaux du site de Sanon, de l'année 1989.....	14
Figure 11: Limite du domaine considéré pour la modélisation.....	25
Figure 12: Carte topographique du domaine à modéliser.....	25
Figure 13: Morphologie du substratum du site.....	26
Figure 14: Localisation des ouvrages de captages.....	29
Figure 15: Principe de la méthode des différences finies.....	31
Figure 16: Domaine discrétisé vue en 2D et 3D.....	32
Figure 17: Méthode de détermination des conditions aux frontières	34
Figure 18: Carte de localisation des piézomètres du site de Sanon.....	35
Figure 19: Schéma explicatif de la lecture d'erreur	36
Figure 20: Répartition de la recharge sur le site.....	44
Figure 21: Carte de conductivité hydraulique	46
Figure 22: Limites aux frontières de la zone modélisée.....	47
Figure 23: Répartition de la recharge sur le site expérimental.....	47
Figure 24: Evolution du volume d'eau prélevé a Sanon (1989-1991)	48
Figure 25: Carte piézométrique de Sanon	49
Figure 26: Piézométrie avant calage de 1989.....	49
Figure 27: Zones de conductivités hydrauliques avant calage du modèle.....	50
Figure 28: Zones de conductivités hydrauliques après calage du modèle.....	50

Figure 29: (a) Piézométrie avant calage ; (b) piézométrie après calage	51
Figure 30: Diagramme de dispersion des hauteurs piézométriques calculées et mesurées (régime permanent 19/01/1989).....	52
Figure 31: Résultat de la validation du modèle de l'année 2014.....	54
Figure 32: Restitution de la piézométrie de 01/11/1990.....	55
Figure 33: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées dans la zone du dôme piézométrique	57
Figure 34: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées à l'exutoire	57
Figure 35: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées dans la zone hors dôme piézométrique	58
Figure 36: a). Evolution de la recharge sur 1991-2030, (b).Evolution des besoins en eau sur la période 1991-2030.....	59
Figure 37: Carte de rabattement de la piézométrie simulée en 2030.....	60

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : CADRE GENERAL	3
I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	4
I.1.1 Situation géographique.....	4
I.1.2 Climat de la zone d'étude.....	4
I.1.3 Vents.....	6
I.1.4 Relief	6
I.1.5 Végétation	7
I.1.6 Géologie	7
I.1.7 Hydrogéologie	8
I.2 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE DES ETUDES ANTERIEURES DU SITE EXPERIMENTAL DE SANON	9
I.2.1 Géologie	10
I.2.2 Discontinuités.....	12
I.2.3 Paramètres hydrodynamiques.....	12
I.2.4 Piézométrie.....	14
I.2.5 Recharge.....	14
I.3 ETAT DE L'ART SUR LES MODELES UTILISES POUR LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES	15
I.3.1 Modèles conceptuels hydrogéologiques.....	15
I.3.2 Modèles numériques de gestion	16
I.3.2.1 Modèles réductionnistes	17
I.3.2.2 Modèles mixtes ou intégrés	18
I.3.2.3 Modèles SMA (système multi-agents)	18
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	19
II.1 Matériel et données	20
II.2 Méthodologie.....	20
II.2.1 Estimation de la recharge	20
II.2.2 Elaboration du modèle conceptuel hydrogéologique	24
II.2.2.2 Géométrie du modèle	24
II.2.2.3 Modèle conceptuel hydrogéologique.....	26

II.2.3	Elaboration du modèle numérique.....	29
II.2.3.1	Discrétisation spatiale.....	31
II.2.3.2	Discrétisation temporelle.....	32
II.2.3.3	Conditions aux limites.....	33
II.2.3.4	Piézométrie de référence et conditions d'écoulement	34
II.2.4	Simulation du modèle numérique.....	35
II.2.4.1	Simulation en régime permanent.....	35
II.2.4.2	Simulation en régime transitoire	38
II.2.4.3	Simulations prévisionnelles.....	38
TROISIEME PARTIE : RESULTATS INTERPRETATION ET DISCUSSION.....		41
III.1.	Résultats et Interprétations	42
III.1.1	Estimation de la recharge	42
III.1.2	Paramètres d'entrées du modèle	45
III.1.2.1	Modèle conceptuel hydrogéologique.....	45
III.1.2.2	Conditions aux limites.....	46
III.1.3.3	Sollicitations.....	47
III.1.3.4	Conditions d'écoulement.....	48
III.1.4	Calage du modèle en régime permanent	49
III.1.4.1	Validation du modèle.....	53
III.1.4.2	Analyse de sensibilité	54
III.1.5	Résultat et interprétations du calage en régime transitoire.....	55
III.1.6	Simulations Prévisionnelles.....	59
III.2	DISCUSSION	60
CONCLUSION ET RECONMANDATIONS		62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		63
ANNEXES.....		a

INTRODUCTION

Les chiffres de l'UNESCO font apparaître que les nappes constitueraient 97% de l'eau douce disponible sur Terre (Feuillette, 2001). En Afrique subsaharienne, plus de 500 millions de personnes dépendent des réserves en eau souterraine ; en l'espace d'une génération, cette population avoisinera un milliard d'individus (Jaunat, 2012). En terme d'usages, les eaux souterraines couvrent plus de 60% des besoins humains en eau de boisson et la majeure partie des besoins agricoles en zones arides et semi-arides (Feuillette, 2001). Dans ces zones, les eaux souterraines constituent parfois la seule eau douce qui y soit disponible en raison de la non pérennité des eaux de surface et du coût élevé des moyens à déployer pour leur traitement.

Par ailleurs, la qualité des eaux souterraines, « leur rôle tampon », le fait qu'elles résistent mieux aux pollutions, contrairement aux fluctuations des écoulements de surface sont autant de facteurs qui militent en faveur de l'exploitation de l'eau souterraine dans ces zones aux conditions climatiques sévères. En outre, les eaux souterraines donnent de faibles signaux face à la variabilité climatique (Taylor *et al.* 2009).

Au Burkina Faso, le recours aux eaux souterraines pour la satisfaction des besoins en eau a atteint un taux de 85%, pour seulement 15% assurés par les eaux de surface (Simo, 2010). Par ailleurs, le gouvernement a entrepris la réalisation de 1100 forages positifs en vue de répondre aux besoins de la population en matière d'eau potable (Traoré, 2013). Cependant, dans certaines régions du pays, en particulier les zones caractérisées par les aquifères de socle cristallin, des signes inquiétants indiquent une diminution des ressources en eaux souterraines. Ces signes se traduisent par une baisse du niveau de la nappe, une diminution des débits, le tarissement de certaines sources.

Il s'impose alors un véritable devoir de gestion durable et de protection de nos ressources en eau souterraine. Cela passe par une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique des réserves en eau, une caractérisation des aquifères et l'élaboration de modèles prédictifs sur le comportement hydrodynamique de ces aquifères. Les modèles numériques de simulations des eaux souterraines s'avèrent être non seulement des instruments de synthèse hydrogéologique, de compréhension mais aussi des outils de gestion et de prédiction (ressources et/ou de la qualité des eaux) (Cabaret, 2012). L'utilisation de modèles numériques permettrait alors de comprendre le mode de fonctionnement de l'aquifère du site expérimental de Sanon ainsi que sa sensibilité aux exploitations, à la fluctuation climatique et

aux changements environnementaux à travers une étude intitulée: « **élaboration d'un modèle numérique de gestion durable des eaux souterraines en milieu de socle, cas du site expérimental de Sanon** ».

Le site expérimental de Sanon a été identifié comme cas d'étude en raison de sa localisation en zone de socle et de la disponibilité de divers types de données (géologique, hydrogéologique, météorologique etc.)

Objectifs de l'étude

L'objectif global est de contribuer à une gestion durable des eaux souterraines en milieu de socle.

Pour atteindre cet objectif il est important d'avoir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique des aquifères du site. De façon spécifique il sera question de :

- ✚ Estimer la recharge de l'aquifère de Sanon ;
- ✚ Elaborer un modèle conceptuel hydrogéologique représentatif des aquifères du site ;
- ✚ Elaborer un modèle de simulation numérique de l'écoulement souterrain en régime permanent et transitoire ;
- ✚ Proposer et tester des scénarios de gestion durable tenant compte des changements globaux.

Organisation du document

Le présent mémoire s'articule autour de trois grandes parties, dont une synthèse bibliographique, la méthodologie de cette étude et la présentation des résultats obtenus.

La première partie traite de la revue bibliographique, dans laquelle sont présentés le contexte géologique et hydrogéologique du Burkina Faso en général et du site en particulier aussi, quelques résultats des études antérieures menées à Sanon y sont discutés. Pour terminer, nous présentons les modèles hydrogéologiques utilisés pour la gestion des eaux souterraines.

La deuxième partie met l'accent sur la présentation des méthodes adoptées pour atteindre chaque objectif spécifique.

Enfin, la troisième partie est consacrée d'abord à la présentation des principaux résultats puis respectivement, à l'interprétation et à la discussion. Le mémoire s'achève par une conclusion et des recommandations.

PREMIERE PARTIE : CADRE GENERAL

I.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1 Situation géographique

Le site expérimental de Sanon est situé dans la province du Kourweogo, (dans la région du plateau central) à 30 km au Nord de la ville de Ouagadougou (figure 1). L'accès au site est facile même en période hivernale grâce à une route bitumée (20 km environ) jusqu'à Laye, le reste du chemin est une piste secondaire. Il s'étend sur une superficie de 14km² environ entre les latitudes 12°26'18''N et 12°28'11''N et les longitudes 1°48'47''W et 1°43'81''W.

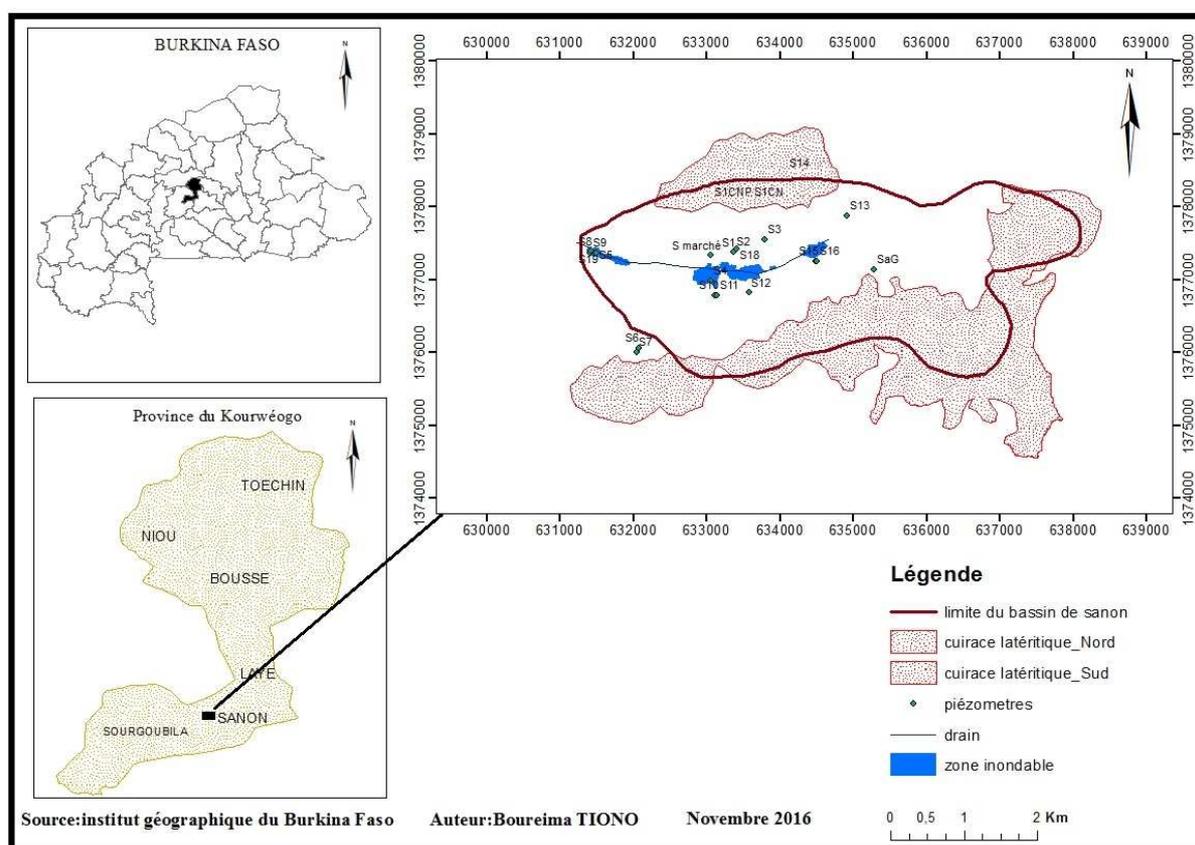


Figure 1: Carte de situation du site expérimental de Sanon

I.1.2 Climat de la zone d'étude

Le site expérimental de Sanon est sous l'influence du climat soudano-sahélien, l'une des trois (3) zones climatiques qui caractérisent le Burkina Faso (figure 2). Le climat est marqué par l'alternance :

- d'une saison sèche qui s'étale d'Octobre à Mai, et qui se caractérise par des vents secs d'harmattan qui soufflent du Nord-Est au Sud-Ouest, originaire des hautes pressions sahariennes. Le mois d'Avril constitue un mois charnière qui voit l'arrivée des vents humides ou alizés chargés de mousson.
- d'une saison des pluies qui s'étale de Juin à Septembre caractérisée par des vents humides provenant des hautes pressions océaniques de l'hémisphère Sud. Les mois de Juillet à Août accusent le maximum des pluies.



Figure 2: Zones climatiques du Burkina Faso (1961-1990) d'après la direction de la météorologie.

La hauteur de pluie annuelle maximale oscille entre 700 mm et 900 mm sur le site. A Sanon, la station météorologique a mesuré pour les années 2013, 2014, 2015 et 2016 respectivement 674,6 ; 803,3 ; 622,7 et 654,6 mm de pluie. La moyenne annuelle pour ces quatre années est de 688,8 mm. La figure (3) montre les précipitations mensuelles de ces quatre années.

Les valeurs mensuelles d'évapotranspiration potentielle (136,3 mm en moyenne pour les années de 1988 à 1994) sont généralement supérieures aux précipitations toute l'année à l'exception des mois de juillet et d'août qui sont au cœur de la saison des pluies (Compaoré, 1997).

Les températures maximales mensuelles peuvent atteindre 40 °C pendant les mois de Mars, Avril et Mai. Le minimum des températures mensuelles (15 °C à 20 °C) est observé durant la

période d'harmattan, vent sec chargé de poussières et fines qui soufflent pratiquement de novembre à février (Compaoré, 1997).

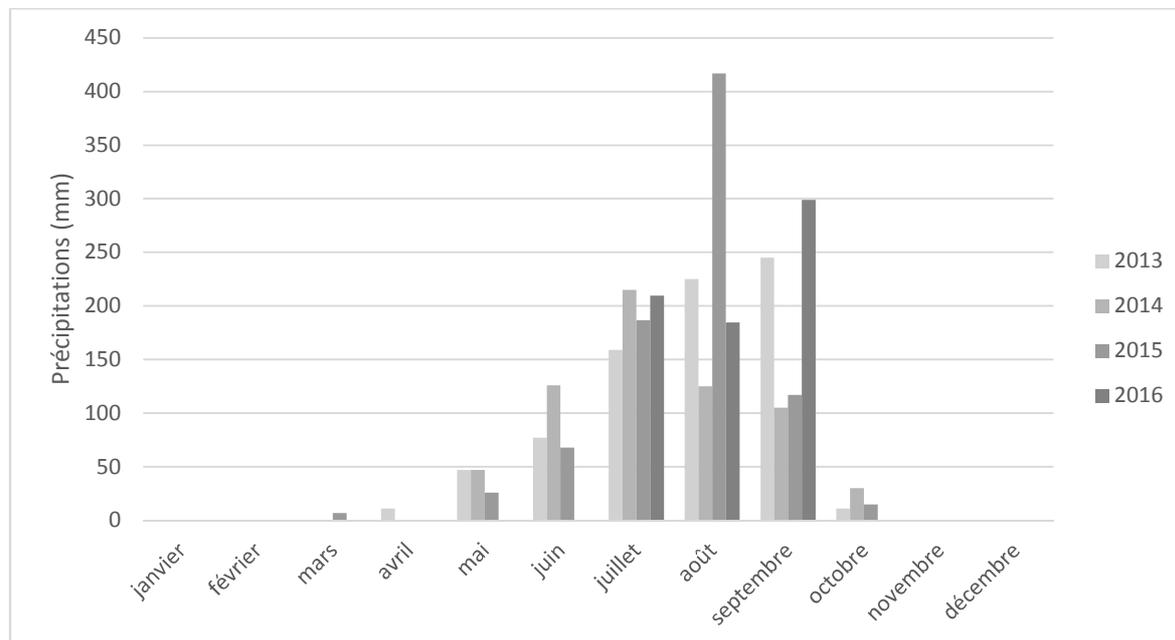


Figure 3: Pluviométrie mensuelle de 2013 à 2016

I.1.3 Vents

En début de saison pluvieuse les vents sont très violents avec des vitesses moyennes avoisinant 2.5 m/s en Mai et Juin. Ils s'adoucissent au cœur de la saison des pluies, à partir du mois d'Août jusqu'en Novembre avec une vitesse moyenne de 1,3 m/s. L'arrivée de l'harmattan en Décembre entraine un accroissement de la vitesse du vent qui atteint presque 2m/s

I.1.4 Relief

Le relief est constitué par des collines latéritiques au sommet tubulaire culminant entre 360 et 370 m. Ces cuirasses latéritiques qui affleurent au Nord et au Sud du site dominant d'une cinquantaine de mètre de dénivelée une large vallée à fond relativement plat, de pente générale orientée vers l'Ouest. Elle est drainée par une rivière temporaire coulant d'Est en Ouest. Le site expérimental de Sanon est un sous bassin versant du vaste bassin versant du Nazinon (ex Volta Rouge).

I.1.5 Végétation

La végétation de la zone d'étude est caractérisée par la savane steppe arbustive. On rencontre aussi le plus souvent les espèces telles que *Khaya senegalensis*, *Lanhea acida*, *Zizyphus Mauritiana*, *Anogeissus leocapus*, *Acacia albida*, *Ficus gnafalocarpa* (Ringtounda, 1991). Et des arbustes du genre *Pilostigma reticulatum* abondent dans les zones non cultivées situées dans la vallée.

I.1.6 Géologie

Au Burkina Faso, les formations de socle sont dominantes. Elles couvrent 80% du territoire contre 20% de terrains sédimentaires (Vouillamoz, 2005). Le site de Sanon situé dans la zone de socle est représentatif de la géologie du pays, il possède une épaisseur d'altération importante souvent saturée et recouverte par une épaisse cuirasse latéritique. Les coupes géologiques des forages réalisés sur le site indiquent que le sous-sol est constitué par des formations d'amphibolites (roche verte) à filonnets de quartz, de gneiss, de migmatites et de granites. Il y a une dominance de formation granito-gneissiques voir migmatitiques au sein desquelles s'intercalent des roches vertes (amphibolites). Le substratum est recouvert par un manteau d'altérite d'épaisseur variable (Compaoré, 1997). **La figure (4)** illustre la cartographie des domaines occupés par ces formations.

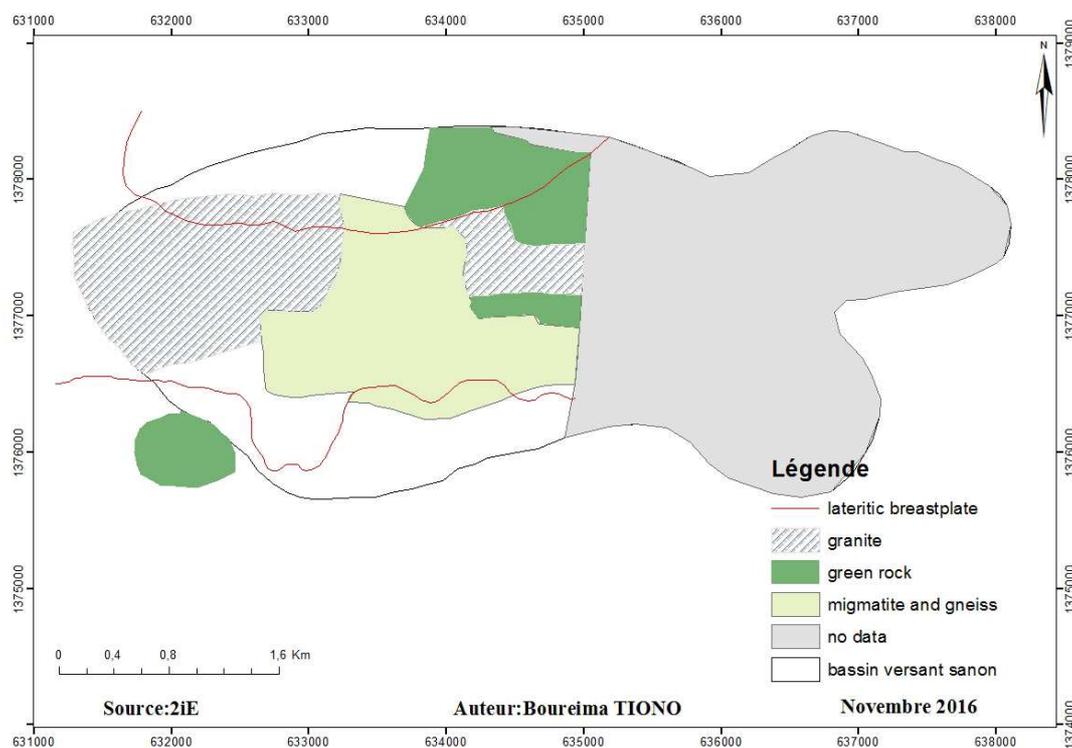


Figure 4: Carte géologique de Sanon d'après BRGM-AQUATER (1991)

I.1.7 Hydrogéologie

L'hydrogéologie du site expérimental de Sanon est similaire au schéma simplifié (**Figure 5**) par Dewandel (2006). Il s'agit de trois (3) horizons ayant chacun leurs propriétés propres. De la surface vers la profondeur on rencontre :

Des altérites ou arènes, argileuses ou argilo-sableuses, développées en surface sur plusieurs mètres d'épaisseur (Courtois *et al.* 2010), recouvertes d'une cuirasse ferrugineuse souvent absente car érodée. Ces matériaux sont issus de la décomposition prolongée de la roche mère (Courtois *et al.* 2010). Très meubles car bien altérées, elles peuvent atteindre une porosité efficace importante en fonction de la lithologie de la roche mère. En revanche, leur conductivité hydraulique est généralement faible. Par conséquent, quand elles sont saturées en eau, les altérites constituent un compartiment peu perméable mais capacitif. Cet horizon d'altération joue donc un rôle principal de stockage des ressources en eau (Dewandel *et al.* 2006).

Entre la roche saine imperméable et les altérites de surface, on observe un horizon intermédiaire appelé horizon fissuré caractérisé par deux principaux réseaux de fissures subhorizontales et subverticales assurant une bonne connexion hydraulique de l'aquifère (Maréchal *et al.* 2004). Il assure également la fonction capacitive de l'aquifère composite (Wyns *et al.* 2004). En terme de production d'eau souterraine, les aquifères fissurés constituent une cible hydrogéologique prioritaire car ils assurent une fonction conductrice (forte transmissivité). C'est cet horizon qui est majoritairement capté par les forages en milieu de socle.

L'horizon le plus profond correspond à la roche saine imperméable. Il n'est perméable que localement au droit de fractures tectoniques. Ces fractures tectoniques peuvent présenter une perméabilité comparable à celle de l'horizon fissuré mais par contre elles ont une densité en profondeur très faible comparée à celle de l'horizon fissuré. Dans le cadre de la caractérisation de ressources en eau exploitables, du fait des difficultés techniques pour atteindre ces fractures, cet horizon peut être considéré comme imperméable (Maréchal *et al.* 2004).

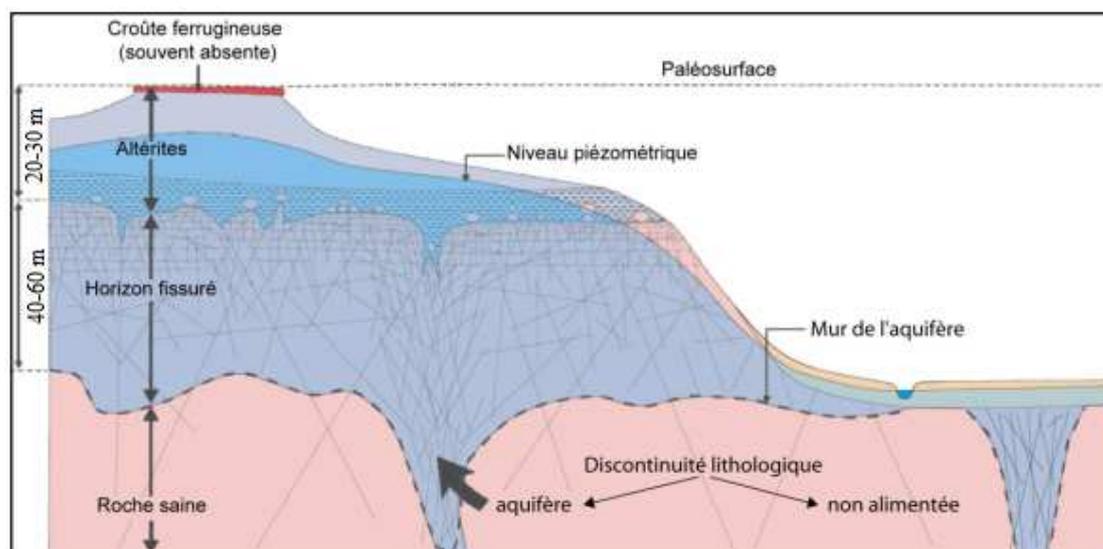


Figure 5: *Modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle d'après Dewandel (2006)*

I.2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES ÉTUDES ANTERIEURES DU SITE EXPERIMENTAL DE SANON

Le site expérimental de Sanon a fait l'objet de plusieurs études à savoir le BRGM-AQUATER en 1991 ; Compaoré en 1997 ; Vouillamoz en 2003 ; Toé en 2004 ; Outoumbe en 2014 ; Soro *et al* en 2015 et Yonli en 2016. Toutes ces études n'avaient pas le même objectif, mais elles ont permis de mettre en évidence plusieurs aspects du fonctionnement hydrogéologique du site expérimental.

Les premières études sur le site de Sanon ont été menées entre 1988 et 1991 par le groupe BRGM-AQUATER. Leur mission principale était de rechercher des zones favorables pour la réalisation de forages à débit élevé.

A cela s'ajoute les travaux de Compaoré en 1997, ayant pour objectif l'étude de la fonction capacitive des altérites.

Par la suite l'évaluation de l'apport de techniques géophysiques récentes à l'étude des aquifères de socle à l'aide de panneaux électriques à courant continu et de sondages par Résonance Magnétique Protonique (RMP) était au centre des travaux de Vouillamoz en 2003 et Toé en 2004.

En plus de cela, les travaux de Outoumbé en 2014 avaient pour objectif spécifique de faire une caractérisation hydrogéophysique et de déterminer des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du site.

Ensuite l'étude de Soro *et al* en 2015 était axée sur la structure et la géométrie de l'aquifère du site.

Enfin, l'étude de Yonli en 2016, avait pour objectif la caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère de socle fracturé.

Les résultats de ces travaux sont résumés sous forme d'une synthèse divisée en quatre (4) grandes thématiques : la géologie ; les propriétés hydrodynamiques et le fonctionnement de l'aquifère de Sanon.

I.2.1 Géologie

Les coupes lithologiques des forages (**Figure 6**) montrent que le sous-sol est constitué par des formations amphibolites à filonnets ,de quartz ,de gneiss, de magmatites et de granite (BRGM-AQUATER, 1991).La couverture altéritique se compose le plus souvent d'une cuirasse d'une épaisseur variant de 0 à 2 m , surmontant un niveau de silts et d'argiles latéritiques rouges ou jaunes (2 à 6 m) et des niveaux d'argile kaoliniques plus épais (15 à 20 m) ; à la base apparaissent ensuite des arènes argilo-sableuses terminées par des arènes grenues (30 à 50 m) ;cette cuirasse est absente au centre du bassin (Compaoré *et al.* 1997). De fines épaisseurs de sable latéritique recouvrent le profil altéritique, absentes quand on se trouve au niveau des crêtes (Soro *et al.* 2015). Le substratum est composé de granites, migmatites et gneiss antébirrimiens, au sein desquels s'intercalent des amphibolites. Cependant le manteau d'altération n'a pas la même épaisseur sur tout le bassin versant, au niveau de la vallée centrale, cette épaisseur varie entre 25 et 50 m, et passe à environ 25 m dans la partie Ouest. Au niveau des crêtes le profil d'altération est marqué par un épaissement de l'horizon fissuré et une légère remontée du socle (**Figure 7**), plus accentuée au niveau de la crête sud.

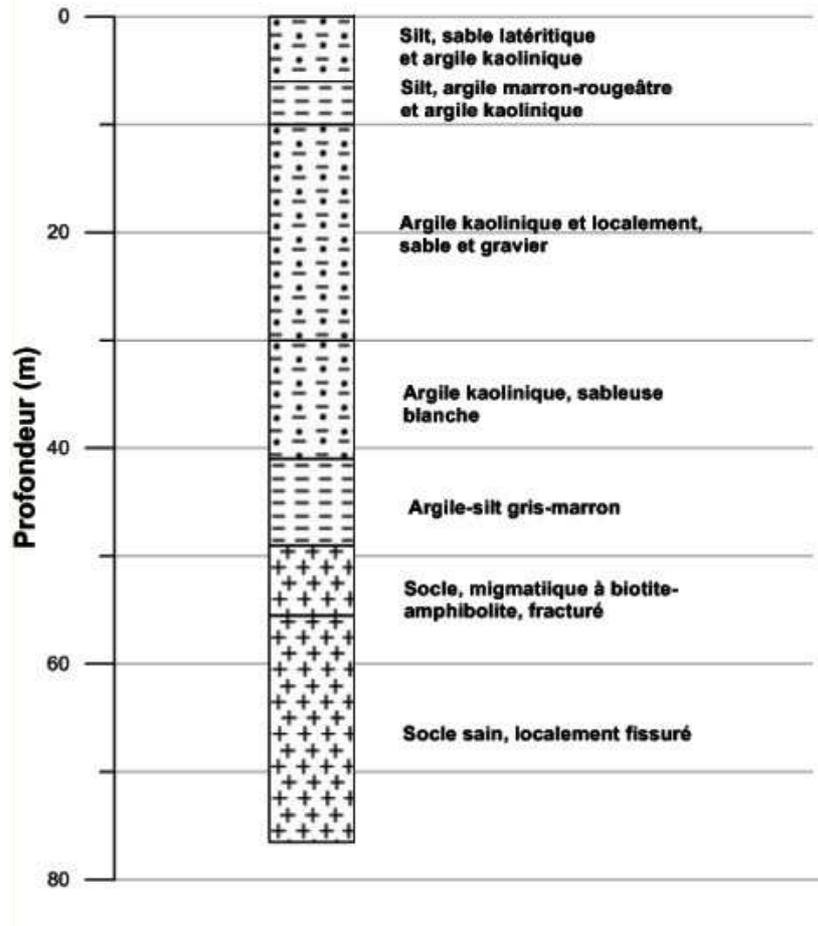


Figure 6: Coupe lithologique d'un forage du site expérimental de Sanon (modifié d'après BRGM, 1991)

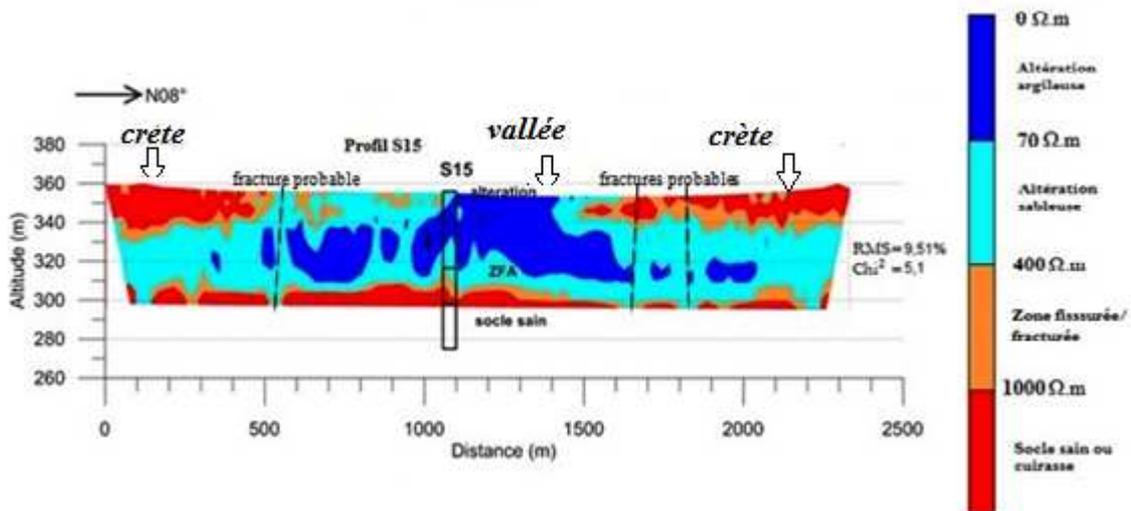


Figure 7: Profil de crête en crête passant par le forage S15 modifié d'après Soro et al. (2015)

I.2.2 Discontinuités

L'analyse des coupes géologiques des forages réalisés dans le cadre du projet « milieu fissuré II » et dans le cadre des travaux de Compaoré en 1997 indique la présence de nombreuses fractures au niveau du socle. Une analyse des images satellitaires SPOT (du 17/02/1987) et des photo-interprétations suggère que ces discontinuités sont principalement orientées N55 à N75°E, N115 à N125°E et N145 à N165°E (BRGM-AQUATER, 1991). Par contre la cartographie des fractures majeures à Sanon (**Figure 8**) montre que les fractures majeures du bassin sont plutôt orientées N100-N120°E et N170°E (Soro *et al.* 2015).

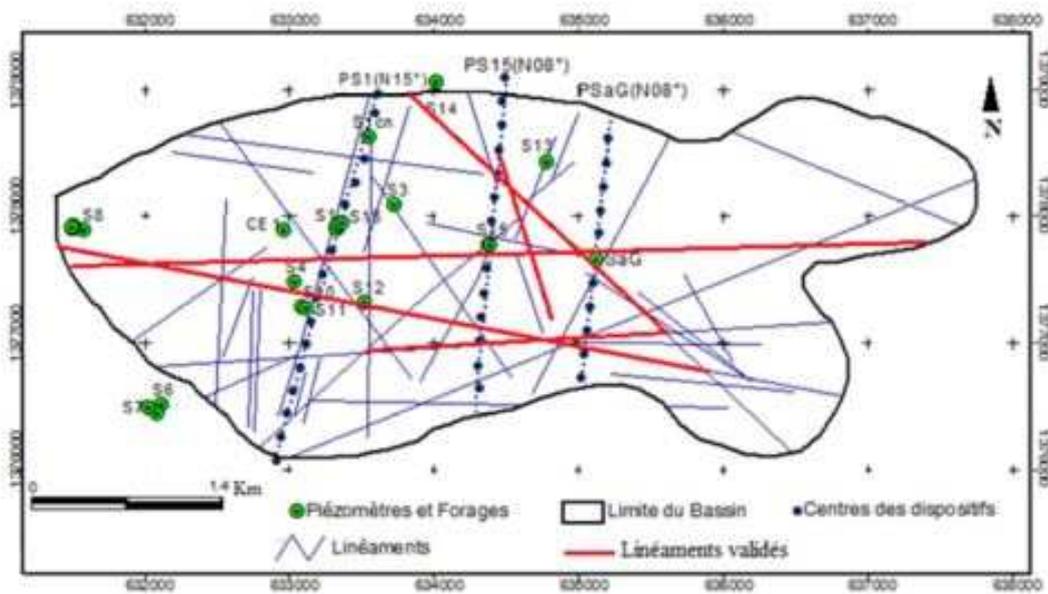


Figure 8: Carte de fractures majeures (en rouge) validées par l'ERT (Soro *et al.*, (2015))

I.2.3 Paramètres hydrodynamiques

Les essais par pompages réalisés à Sanon donnent des valeurs de transmissivité comprises entre $4,2 \cdot 10^{-5}$ et $8,2 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ et des coefficients d'emmagasinement sont de l'ordre de 10^{-2} . Ces essais ont été faits sur des forages captant uniquement l'altérite et ceux captant le socle fracturé (Compaoré, 1997) ceci dans le but d'évaluer la fonction capacitive des altérites. Le tableau ci-dessous indique des valeurs de transmissivité en fonction de la position et des compartiments captés.

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement obtenues par Compaoré (1997) et Vouillamoz (2003) par rapport au dôme piézométrique

Tableau 1: Paramètres hydrodynamiques par rapport au dôme piézométrique (Toé 2004)

forages	compartiment testé	Transmissivité (10^{-4} m ² /s)		coefficient d'emmagasinement (10^{-2})	
		Compaoré (1997)	Vouillamoz (2003)	Compaoré (1997)	Vouillamoz (2003)
dôme S1-S2	Altérite (30m)	02 et 3	2,5	variable 0,2 et 2,8	2
	Altérite+socle fissuré (60m)	3 et 4,5	3,5	0,3 et 1,4	0,4
Hors dôme S8-S9	Altérite (20m)	0,01 et 0,05	0,05	1,3 et 2,6	1,5
	Altérite+socle fissuré (50m)	0,2 et 0,8	0,4	0,7 et 8	1

Les formules de transfert proposé par Yonli (2016) à partir des paramètres RMP et de propriétés hydrodynamiques issues des essais de pompage, ont permis ainsi de déterminer les paramètres hydrodynamiques là où il n'y a pas eu d'essai de pompage sur le bassin versant de Sanon (**Figure 9**).

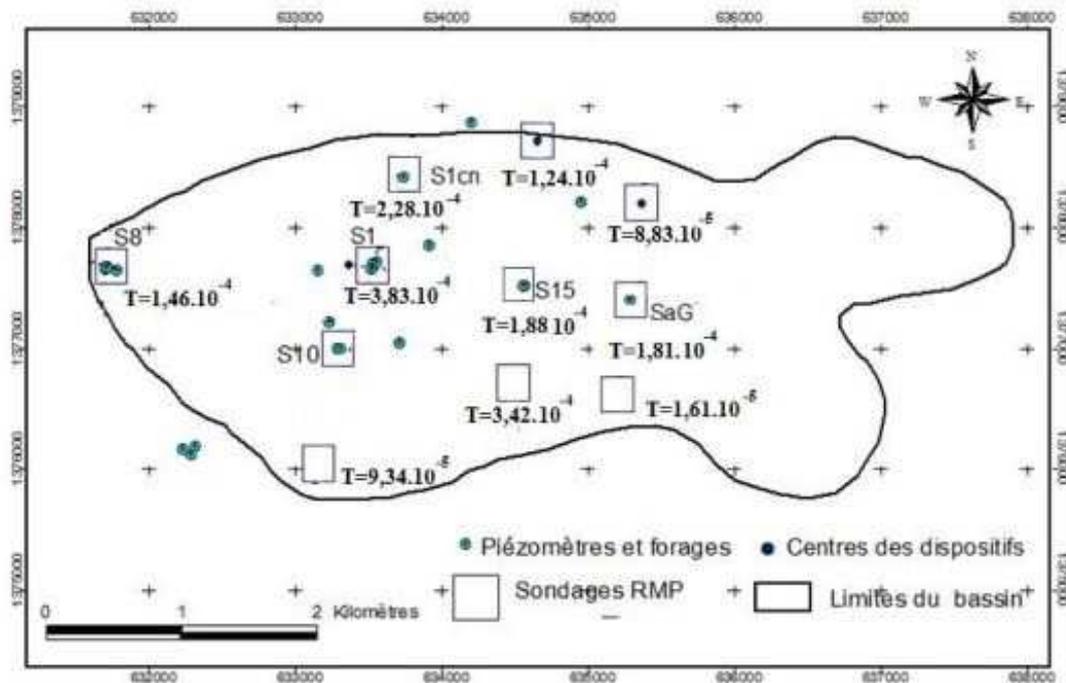


Figure 9 : Carte de transmissivité du site expérimental de Sanon proposé par Yonli (2016)

I.2.4 Piézométrie

Les nombreux piézomètres présents sur le site de Sanon constituent un véritable réseau de suivi-observation des eaux souterraines. Ce réseau a permis d'établir au cours du projet « milieux fissurés II » (1988-1991) que l'aquifère de Sanon présente une forme de dôme au niveau de la vallée centrale (**Figure 10**). Les cartes piézométriques établies par Compaoré (1997) correspondant aux périodes de basses eaux et hautes eaux des années 1993, 1994 et 1995 ont confirmées ce constat. Le niveau piézométrique est peu profond au niveau du dôme et est influencé par les variations climatiques, il est plus profond en dehors du dôme piézométrique. A Sanon les côtes de basses eaux sont observées en juillet et les hautes eaux en Septembre. Les fluctuations piézométriques ont une amplitude de 2 à 6 m au centre du bassin et s'atténuent vers la périphérie où elles n'excèdent pas 2 à 3 m.

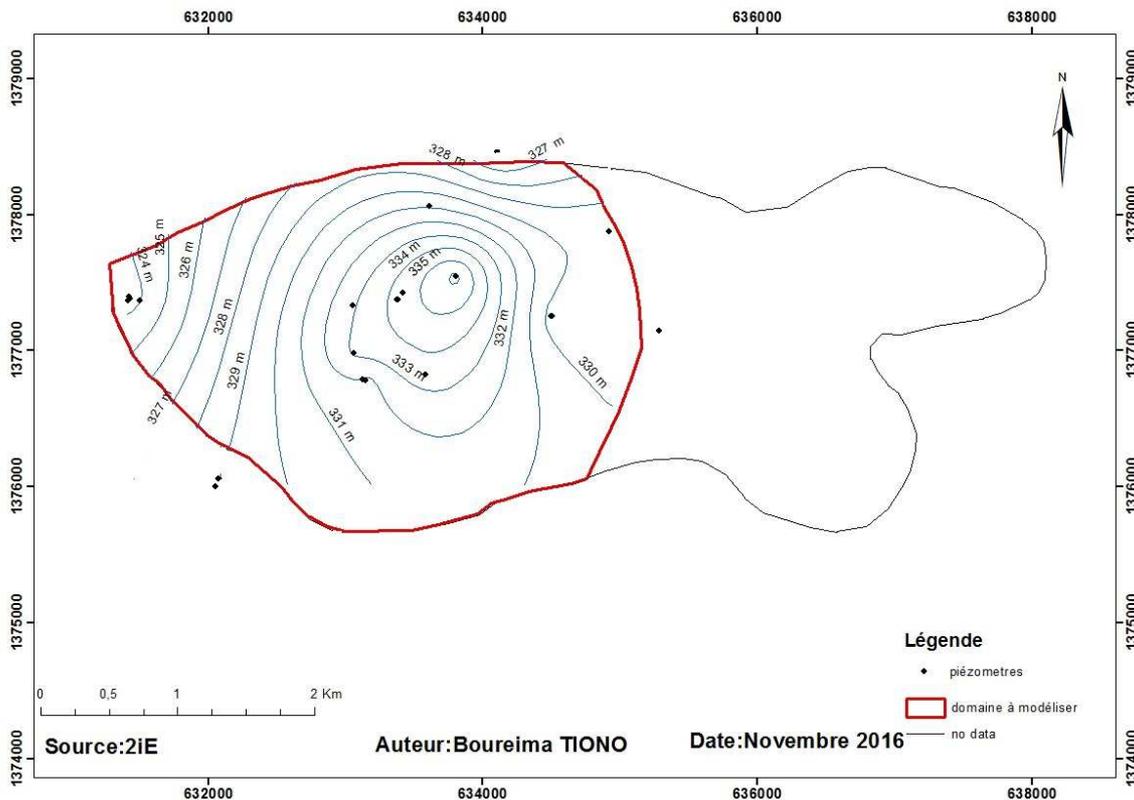


Figure 10: Carte piézométrique en basses eaux du site de Sanon, de l'année 1989

I.2.5 Recharge

La présence du dôme piézométrique dans la vallée centrale indique que la recharge s'effectue bien à ce niveau (Compaoré, 1997), elle serait verticale au niveau du dôme (zone

préférentielle de la recharge) et par transfert horizontal dans les zones périphériques (BRGM-AQUATER, 1991).

La détermination de la recharge par la modélisation hydrodynamique a donné des valeurs très hétérogènes dans l'espace (5 à 50% de la pluie), cette recharge varie de 27 à 305 mm sur le site (BRGM-AQUATER, 1991). Aussi, elle est évaluée au maximum à 10% de la pluie par la méthode du bilan hydrique (BRGM-AQUATER, 1991 ; CEFIGRE-Université d'Avignon, 1990), ainsi pour l'année 1993 on obtient une recharge de 50 mm pour une pluviométrie de 516 mm et une fluctuation piézométrique de 2 m au niveau du dôme. Quant à Compaoré (1997), il a estimé la recharge à 200 mm dans les altérites et à 70 mm dans le complexe altérite-zone fissurée et à 50 mm dans la zone fissurée par la méthode du bilan des chlorures.

I.3 ETAT DE L'ART SUR LES MODELES UTILISES POUR LA GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

I.3.1 Modèles conceptuels hydrogéologiques

Un modèle est une « simplification de la réalité », devant être « la plus conforme possible du point de vue des mécanismes et processus simulés » (Dassargues, 1990). Selon Bonnet (1982) un modèle est un « système » constitué soit par un ensemble abstrait (équations, relations, opérations), soit par un ensemble concret (modèle réduit, modèle analogique) représentant tout ou partie du comportement d'un système réel.

La modélisation des aquifères en milieux discontinus se base sur des modèles conceptuels et mathématiques très différents en fonction de quatre facteurs principaux : la géologie de la roche fracturée et les propriétés du réseau de discontinuité; l'échelle spatiale du problème; l'objectif dans lequel le modèle est développé (NRC, 1996) et surtout les informations disponibles sur les différents paramètres mis en jeu (Jaunat, 2012). Les trois principaux concepts utilisés pour décrire les hétérogénéités des milieux discontinus sont les suivants :

a. Approche dite « milieu poreux équivalent » (Davison, 1985)

Les fractures ne sont pas explicitement intégrées dans ce type de modèle mais l'hétérogénéité du système fracturé peut-être représentée par des secteurs des propriétés différentes. Les porosités primaires (de matrice) et secondaires (de fissures) et les distributions de perméabilités sont remplacées par un milieu poreux continu avec des propriétés hydrauliques

équivalentes. Dans ce cas, les équations habituellement usitées (équation de continuité notamment) pour simuler les écoulements en milieu poreux peuvent être utilisés.

b. Modèles doubles porosités (Pruess et Narasimhan, 1988)

Ce type de modèle prend en compte les écoulements à la fois dans les fractures et dans la matrice rocheuse. Ils peuvent être appliqués dans le cas de matrices poreuses par l'évaluation des flux de la matrice vers le réseau de discontinuités. La géométrie du réseau de fractures est idéalisée et le système aquifère est représenté par le biais de deux milieux poreux superposés. Les propriétés hydrauliques sont définies par la perméabilité, la porosité et le coefficient d'emmagasinement du réseau de fractures d'une part et de la matrice rocheuse d'autre part. L'équation exprimant l'écoulement de fluide à travers le réseau de fractures contient des termes sources pour tenir compte des flux de la matrice vers les fractures. Une seconde série d'équations décrit l'écoulement dans les blocs de la matrice. Le principal avantage du modèle double porosité est qu'il permet de tenir compte du facteur de retard induit par les faibles perméabilités de la matrice.

c. Approche « réseau de fractures discrètes » (Dershowitz *et al.* 1991)

Cette approche s'appuie sur une caractérisation précise et explicite des propriétés du réseau de discontinuités (ouverture, orientation, longueur, connectivité...). Les écoulements sont simulés individuellement au sein de chaque fracture, comme des flux entre deux plaques uniformes séparées par un espace équivalent à l'ouverture de la discontinuité. Les écoulements au sein de la matrice peuvent être simulés conjointement. Dans le cas contraire, la porosité de la matrice de l'aquifère est considérée nulle. Cette approche est généralement limitée par la disponibilité de données sur les discontinuités. De plus, suivant la complexité du réseau de fractures, la puissance de calcul nécessaire à ce type de simulations peut être rédhibitoire. Pour ces raisons, cette approche est à ce jour majoritairement utilisée pour des études à petites échelles (du laboratoire à la parcelle kilométrique) et les paramètres déterminés sont souvent utilisés dans un deuxième temps, à plus grande échelle, pour des applications de type poreux équivalent (Cook, 2003).

I.3.2 Modèles numériques de gestion

Les objectifs assignés à un modèle numérique ; évoluent en fonction d'un processus itératif demandant des données disponibles et de la demande (Feuillette, 2001). Malgré cette

souplesse d'évolution. Le choix de la modélisation dépend de l'instrument de gestion étudié, du contexte de l'étude, des données disponibles et de l'objectif du modélisateur (Anne, 2002) et il doit être en outre guidé par le cahier des charges initial que nous nous fixons (Feuillette, 2001). En effet, comme le souligne Costanza et Patten (1995), un modèle peut difficilement satisfaire simultanément les objectifs de réalisme (représenter les comportements du système fidèlement sur le plan qualitatif), de précision (sur le plan quantitatif), et de généralité (représenter des processus généraux, aux dépens de la précision et du réalisme par rapport au cas étudié).

Il convient donc de préciser la marge de manœuvre que nous jugeons pertinente avant de parcourir les différents types de modèles pouvant répondre à nos attentes:

- le modèle doit permettre de représenter au mieux la géographie extrêmement limitée du système,
- il doit pouvoir reconstituer et guider la recherche des principaux facteurs influençant la demande en eau,
- il doit permettre d'intégrer une population extrêmement élevée en constante croissance,
- il doit permettre de simuler des interventions sur ces différents facteurs afin de comparer différentes alternatives, le but n'étant pas de fournir un modèle "clé en main" au gestionnaire mais plutôt différents scénarios de gestion,
- il doit être de type exploratoire, fournissant alors une analyse de sensibilité à différents paramètres, et si possible prospectif, permettant alors une comparaison qualitative de plusieurs scénarios de projection.

Il existe plusieurs types de modèles susceptibles d'être utilisés pour l'étude d'un système nappe/usages. Les modèles sont classés selon trois catégories (Feuillette, 2001): modèles réductionnistes, modèles intégrés et enfin modèles multi-agents.

I.3.2.1 Modèles réductionnistes

Les modèles hydrogéologiques, centrés sur l'offre, s'inscrivent dans cette catégorie. La démarche consiste à étudier précisément la structure et le fonctionnement d'une nappe grâce à un modèle numérique, dans le but de connaître l'offre disponible dans le présent et le futur, afin de contraindre la demande à l'offre (Akhy *et al.* 1997 ; Besbes, 1975). La demande est alors modélisée sous forme d'un facteur exogène auquel on peut attribuer différentes valeurs (augmentation linéaire, stabilité, augmentation probable etc.).

A cela, s'ajoute les modèles agronomiques, économiques et d'actions. Il s'agit de modèles focalisés sur la représentation fonctionnelle de la demande, la question étant de savoir comment diminuer la demande pour atteindre un niveau d'offre donné.

Pour les modèles agronomiques, les déterminants de la demande sont réduits aux caractéristiques des plantes, au climat, à l'assolement, à l'efficacité de la distribution...mais le comportement des acteurs est ignoré.

Les modèles économiques permettent de traiter la question de l'exploitation des nappes et de l'impact de divers outils de gestion de la demande mais généralement le fonctionnement de la demande n'est décrit que par des équations mathématiques fondées sur des hypothèses économiques et la nappe n'est pas représentée explicitement. Ces modèles ne tiennent pas compte des interactions directes entre acteurs, hormis celles liées au marché.

I.3.2.2 Modèles mixtes ou intégrés

Ces types de modèles permettent de porter la modélisation à la fois sur les fonctionnements de la nappe et sur les usages de manière interactive. Ils représentent simultanément l'offre et la demande et détaillent avec plus ou moins de précision les entités et les flux du système. Le choix de ce type de modèle implique nécessairement une approche de type systémique, contrairement aux modèles réductionnistes. L'approche systémique s'intéresse à l'étude des entités formées par "un ensemble d'éléments en interaction dynamique en fonction d'un but" (Rosnay, 1975), le tout constituant un système.

I.3.2.3 Modèles SMA (système multi-agents)

Les définitions de SMA sont nombreuses et varient suivant les champs d'application (Anne, 2002). Afin d'introduire les SMA dans un cadre relativement général, Bousquet *et al* (1995) donne la description suivante : « Pour modéliser des phénomènes complexes, les systèmes multi-agents représentent les agents du monde observé et leurs comportements. Elaborer un système multi-agents revient à reproduire un monde artificiel ressemblant au monde observé en ce sens qu'il est composé de différents agents, de façon à y mener diverses expériences. Chaque agent est représenté comme une entité informatique dotée d'une autonomie, capable d'agir localement en réponse à des stimulations ou à des communications avec d'autres agents et de se représenter son environnement »

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES

II.1 Matériel et données

Divers types de données nécessaires à la modélisation hydrogéologique ont été collectées. Il s'agit:

- des données sur la géométrie de la zone à modéliser, d'un point de vue géologique et hydrologique ;
- des valeurs des caractéristiques du système influençant les processus simulés (conductivités hydrauliques, coefficients d'emménagement spécifiques, porosité effective,...) ;
- des données sur les volumes d'eau prélevés à partir de forages pour l'irrigation et les besoins en eau de la population de Sanon sur la période de 1989 à 1991 et 2014
- des données sur les relevés piézométriques journaliers de 1989 à 1991, et de 2014 à 2015

Les données requises ont été obtenues à partir des travaux antérieurs synthétisés dans la première partie de ce rapport à l'exception des données topographiques générées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) satellitaire correspondant au site. Il s'agit de données du satellite Américain Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). La résolution en X et Y est de 90m avec une résolution variable en Z selon la régularité de la surface topographique, l'occupation du sol (Habitation, végétation...).

Le traitement de ces données a nécessité l'utilisation de divers outils entre autre :

- le logiciel Global Mapper 16 pour la génération de la topographie ;
- le logiciel Arc Gis et Surfer 9 pour l'élaboration des cartes piézométriques ;
- le logiciel Groundwater Modeling Système (GMS-6.0) pour la simulation numérique.

II.2 Méthodologie

La modélisation hydrogéologique permet de faire une évaluation du potentiel hydrogéologique des réservoirs dans une perspective d'optimisation de la gestion des ressources en eau, ainsi que leur protection contre les sources de pollution. Pour ces raisons, il est indispensable de bien connaître les caractéristiques générales d'écoulement à l'échelle de l'aquifère. La démarche ci-après a été adoptée :

II.2.1 Estimation de la recharge

La connaissance de la recharge est un pré-requis pour une gestion efficace des ressources en eau souterraines. La recharge ou l'alimentation d'une nappe peut être définie comme étant le

flux d'eau descendant atteignant le niveau piézométrique, formant une addition au réservoir souterrain (De Vries et Simmers, 2002) ou tout simplement l'apport d'eau externe, de toutes origines, à un aquifère (Ndiaye, 2008).

Pour l'année 2014, la période de validation du modèle, la recharge a été estimée par la méthode de Bilan de THORNTHWAITE et la méthode de la fluctuation piézométrique. Compte tenu du manque de données sur la température de la période 1989-1991, la recharge a été estimée avec la méthode de la fluctuation piézométrique.

a. Bilan de THORNTHWAITE

Une méthode élaborée par THORNTHWAITE en 1954 permet d'évaluer la proportion d'eau météorique évaporée et infiltrée (et/ou ruisselée) par le biais d'un « bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant » (Jaunat, 2012). Elle est fondée sur l'hypothèse selon laquelle pendant un intervalle de temps donné, le total des apports d'eau dans un bassin versant est égal au total des sorties d'eau à l'intérieur de ce bassin versant sommé à la variation positive ou négative du volume d'eau stocké dans le bassin. Ce bilan peut s'écrire sous la forme d'une équation faisant intervenir divers paramètres :

$$P = E + I + R + \Delta S \quad (1)$$

Avec

ΔS : valeur de la variation de stock d'eau dans le sol

P : valeur des hauteurs des précipitations en mm

E : valeur de l'évapotranspiration potentielle en mm

I : valeur de la hauteur d'eau infiltrée qui recharge la nappe en mm

R : valeur de la hauteur d'eau ruisselée en mm

On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement ou l'infiltration. C'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait écoulement, il faut avoir satisfait la condition $ETP = ETR$. Par ailleurs, la satisfaction de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement. Ainsi, à partir de la pluie mensuelle P, de l'ETP et de la RFU (Laborde, 2000).

Si $P > ETP$, alors :

- $ETR = ETP$
- s'il reste un excédent ($P - ETP$), il est affecté à la RFU si nécessaire, et à l'écoulement (et/ou l'infiltration) quand la RFU est complète.

Si $P < ETP$, alors :

- toute la pluie est évaporée et la RFU est diminuée, jusqu'à la vider si besoin, de l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETP. Dans ce cas l'écoulement (et/ou l'infiltration) est nul.

ETP: L'évapotranspiration,

RFU: Réserve facilement utilisable

R: Le ruissellement.

Le calcul de l'ETP est donné par la formule suivante :

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * \bar{T}(m)}{I} \right]^a * F(m, \varphi) \quad (2)$$

ETP(m): évapotranspiration moyenne du mois m (m=1 à 12)

T: moyenne interannuelle des températures du mois °C ; a= 0,016*I+0,5 ; I: indice interannuel:

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m); i(m) = \left[\frac{\bar{T}(m)}{5} \right]^{1,514} \quad (3)$$

F (m,φ): facteur correctif dépendant de la latitude, les valeurs de F(m,φ) sont représentées en **ANNEXE I**

L'équation (1) peut se réécrire en d'autres termes faisant intervenir la réserve facilement utilisable du sol RFU

$$RFU_{i-1} + P_i - ETP_i - RFU_i = I_i + R_i \quad (4)$$

Avec

RFU_{i-1}: Valeur de la Réserve Facilement Utilisable du mois précédent en mm

P_i: Valeur de la somme des précipitations du mois de calcul considéré en mm

ETP_i: Valeur de l'Evapo Transpiration Potentielle du mois de calcul considéré en mm

RFU_i: Valeur de la Réserve Facilement Utilisable du mois de calcul considéré en mm

I_i: Valeur de la hauteur d'eau infiltrée (rechargée) du mois de calcul considéré en mm

R_i: Valeur de la hauteur d'eau ruisselée du mois de calcul considéré en mm

Le ruissèlement est estimé à 8% de la pluie (Compaoré, 1997), la RFU est prise généralement comme étant égale à 100mm (Jaunat 2012). Le mois de début des calculs est celui où la RFU du sol est maximale. Ce mois de début des calculs, correspondant au mois d'Aout.

En somme, l'équation (4) permet de trouver la valeur annuelle de la hauteur de pluie efficace de laquelle la part de ruissellement doit être déduite pour trouver la valeur réelle de la hauteur d'eau infiltrée dans l'aquifère suivant la formule :

$$\text{Recharge (I)} = (I + R) - R \quad (5)$$

Avec :

I: Valeur de la hauteur d'eau infiltrée (rechargée) annuellement en mm

R: Valeur de la hauteur d'eau ruisselée annuellement en mm

b. Méthode du Water table fluctuation (WTF) ou la méthode de la fluctuation piézométrique.

La méthode des fluctuations piézométriques utilisée pour l'estimation de la recharge dans les aquifère de socle est la moyenne interannuelle des sommes des variations mensuelles positives des niveaux statiques des piézomètres.

Elle est basée sur la théorie affirmant que toute élévation du niveau d'eau d'un aquifère est due exclusivement à la recharge qui arrive dans cet aquifère et tous les autres composants sont nulles pendant la recharge (Scanlon *et al.*, 2002; Healy and Cook, 2002 in Obuobie *et al.* 2012).

En effet, pour une différence mensuelle ΔH des niveaux piézométriques en mètres entre une valeur de niveau statique H_1 relevée au mois i et une valeur de niveau statique H_2 relevée au mois $i+1$ et pour une porosité de drainage S_y de l'aquifère considéré :

- Si $H_2 > H_1$, $\Delta H > 0$ il y a augmentation de la charge piézométrique ;

Alors $R = \Delta H * S_y$ Avec : R: la recharge (m) ; ΔH : la fluctuation piézométrique (m):

- Si $H_2 \leq H_1$, $\Delta H \leq 0$ il y a vidange ou constance de la charge piézométrique et la recharge est nulle

L'utilisation de cette méthode nécessite la connaissance de la porosité de drainage S_y . Dans le cas de cette étude, nous n'avons pas réalisé d'essais permettant d'estimer ce paramètre. Nous l'avons estimé à partir des valeurs de teneur en eau RMP obtenues sur le site de Sanon (Yonli, 2016) en utilisant la loi de transfert établie par Vouillamoz *et al.* (2014) entre la porosité de drainage et la teneur en eau RMP en milieu socle (Equation 6).

$$S_y = 0,53\theta_{RMP} + 0,007 \quad (6)$$

Avec : S_y , la porosité de drainage et θ_{RMP} , la teneur en eau RMP

II.2.2 Elaboration du modèle conceptuel hydrogéologique

II.2.2.1 Choix du modèle conceptuel géologique

Dans le cas de cette étude, nous avons opté pour un modèle monocouche en raison de la non disponibilité de données (géométrie, localisation, propriétés hydrauliques etc.) sur la fracturation de l'horizon fissuré et du socle. En plus de cela, notre choix est soutenu par les comportements piézométriques observés sur le site. En effet, les forages captant uniquement le socle et ceux captant les altérites enregistrent les mêmes chroniques piézométriques, la communication entre les différentes couches de l'aquifère pourrait ne pas être rompu puisque certains forages situés côte à côte et captant des aquifères différents, enregistrent les mêmes hauteurs piézométriques. On pourrait donc dire que l'aquifère est dans un état d'équilibre hydro statique. Compte-tenu de l'objectif recherché, et des données disponibles, c'est l'approche milieu poreux équivalent que nous avons choisies pour réaliser la modélisation hydrodynamique de l'aquifère de Sanon. Cette approche semble être la plus appropriée pour la simulation numérique des écoulements dans une optique de gestion de la ressource en eau, et qui ne s'intéresse pas au transport de solutés, est celle du milieu poreux équivalent (Jaunat, 2012).

II.2.2.2 Géométrie du modèle

La conception d'un modèle numérique hydrogéologique nécessite la connaissance de la géométrie de l'aquifère à modéliser.

a. Extension du domaine à modéliser

A Sanon, les piézomètres d'observations et les puits de pompage ne couvrent pas tout le site. Alors pour avoir une bonne appréciation des conditions aux frontières, nous avons donc choisi de restreindre le site à ce qu'il puisse définir aisément les conditions aux limites. Ainsi le site (14Km²) a été réduit à 9 km². (**Figure (11)**).

Au centre de la vallée, draine une rivière temporaire coulant d'Est en Ouest et traversant des zones inondables. Celle-ci ne coule que pendant la saison hivernale.

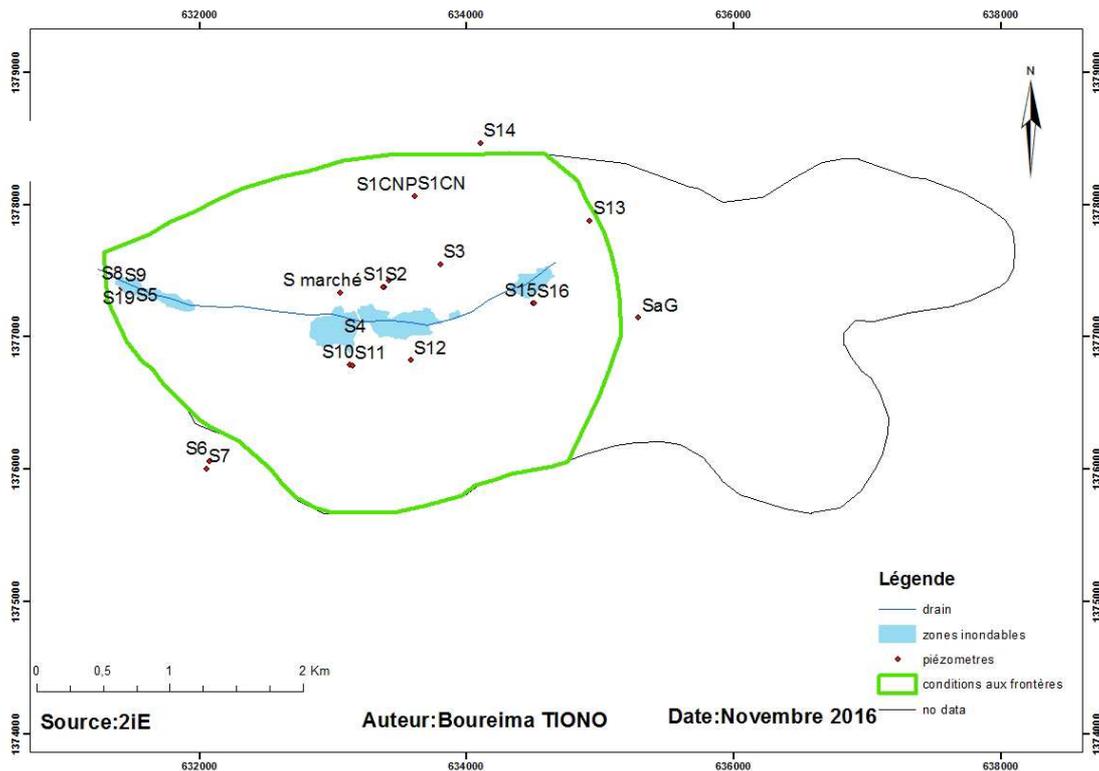


Figure 11: Limite du domaine considéré pour la modélisation

b. Limite supérieure du domaine à modéliser

La surface topographique a été reconstituée grâce au logiciel Global mapper ; la **Figure 12** montre la surface topographique en 3D du site de Sanon. La carte topographique obtenue par interpolation des valeurs données par le modèle numérique de terrain, sera utilisée pour l'élaboration du modèle, elle constituera donc le toit de l'aquifère.

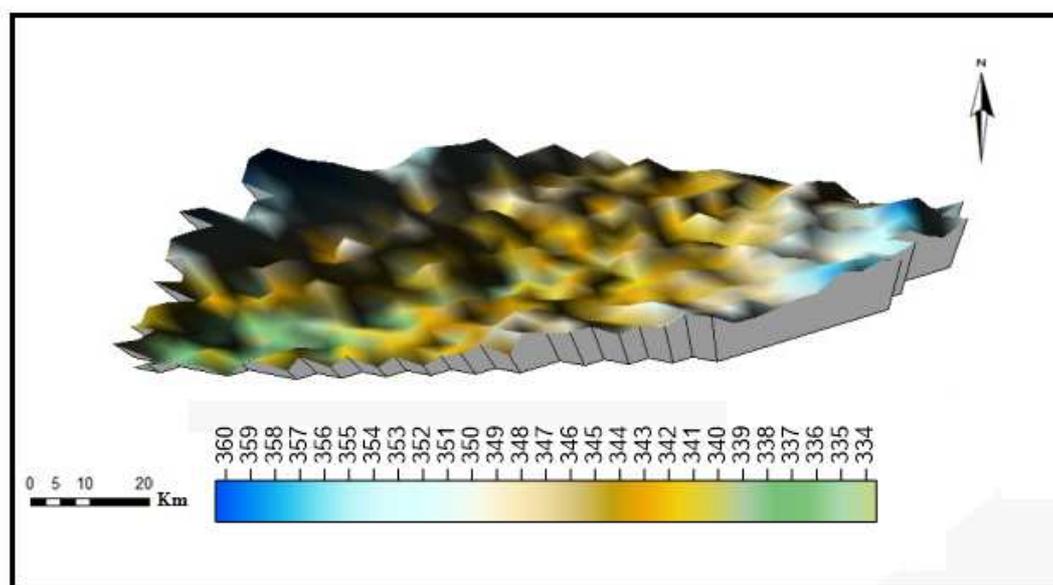


Figure 12: Carte topographique du domaine à modéliser

c. Limite inférieure du domaine à modéliser

Le mur de l'aquifère de Sanon (**Figure 13**) a été obtenu grâce aux coupes lithologiques des forages et aux résultats d'interprétation des profils ERT de Outoumbé (2014) et Soro *et al.* (2015). Ensuite la carte du substratum a été élaborée sur Surfer 13. Cette carte sera introduite dans le modèle comme limite inférieure.

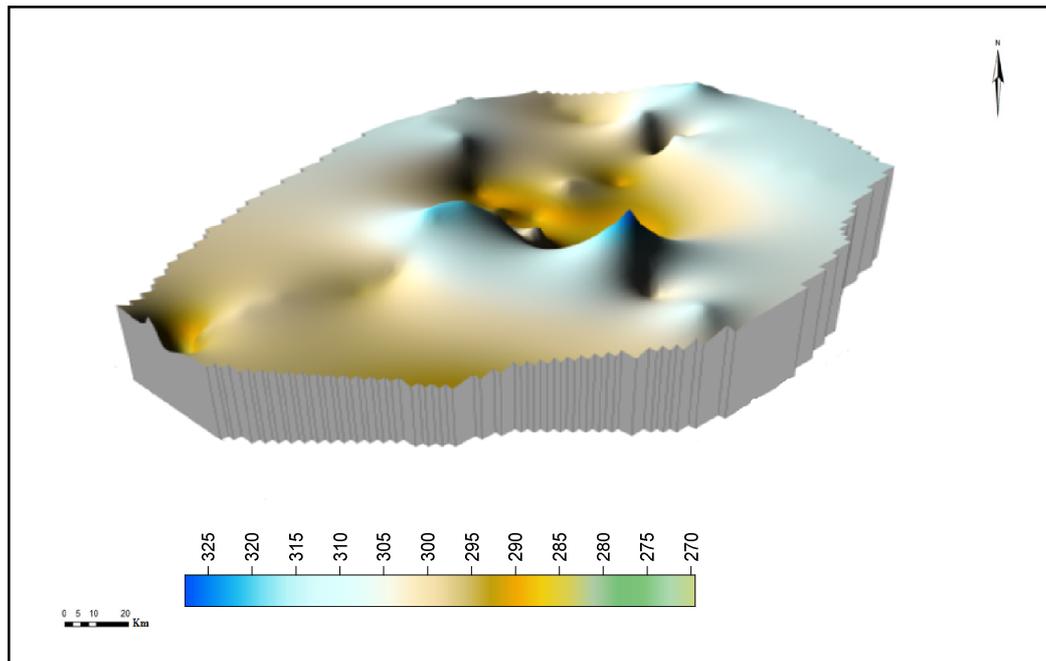


Figure 13: Morphologie du substratum du site

II.2.2.3 Modèle conceptuel hydrogéologique

Le modèle conceptuel hydrogéologique a pour but de réunir l'ensemble des informations connues sur le système et traduit une représentation simplifiée d'un hydro système complexe. Il permet de connaître les formations géologiques du milieu et de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du système. L'élaboration du modèle conceptuel sera faite en se basant sur les travaux antérieurs.

a. Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère

La détermination des propriétés hydrodynamique K et S de l'aquifère est basée sur la détermination des valeurs équivalentes de ces paramètres (modèle monocouche) à partir des valeurs obtenues lors des essais pratiqués sur chaque compartiment de l'aquifère multicouche. En d'autres termes, pour une localité donnée où des valeurs de K existent pour chacun des

compartiments altérés et fissurés, une valeur unique est affectée à l'aquifère monocouche de la localité suivant le principe ci-dessous :

Une estimation de la conductivité hydraulique de chaque couche aquifère est faite sur base de la formule $T = K * b$ avec T la transmissivité ; K la conductivité hydraulique et b l'épaisseur de l'aquifère considéré.

Un calcul de la conductivité hydraulique équivalente ($K_{\text{éq}}$) est fait sur base des conductivités hydrauliques moyennes et des épaisseurs réelles de chaque couche aquifère en appliquant la formule ci-après :

$$K_{\text{éq}} = \frac{\sum_{i=0}^n K_i \cdot b_i}{b} \quad (7)$$

Avec K_i : conductivité hydraulique pour chaque couche aquifère (m/s)

b_i : épaisseur réelle pour chaque couche aquifère (m)

b : épaisseur totale de l'aquifère (m)

Hypothèses de calcul

- a. La pente des couches aquifères est négligeable. Les couches peuvent être considérées comme tabulaires. L'écoulement de la nappe est horizontal (parallèle à la stratigraphie) ;
- b. Le débit total de la nappe Q_i est égal à la somme des débits Q_i à travers les couches ;
- c. Les pertes de charges hydrauliques par unité de longueur à travers l'aquifère multicouche sont égales dans chaque horizon ;

Pour ce qui concerne l'estimation des valeurs équivalentes de S, nous avons utilisé la même approche que précédemment.

Dans les endroits du domaine à modéliser où il n'existe pas d'ouvrages hydrauliques permettant d'estimer le paramètre (transmissivité), nous nous sommes basés sur les résultats des lois de transfert paramètres géophysiques RMP / propriétés hydrodynamiques proposées par Yonli (2016).

Ces formules de transfert, en considérant un aquifère monocouche, ont permis de déterminer des valeurs de transmissivité là où il n'y a jamais eu d'essais de pompages sur le bassin versant de Sanon. Les paramètres hydrodynamiques issus des essais de pompage et des formules de transfert ont permis d'avoir une répartition spatiale de valeurs de transmissivité du site (ANNEXE II).

Les valeurs de conductivités hydrauliques ont pu être calculées grâce à ces valeurs de transmissivité et de Δz (épaisseur RMP) obtenues par Yonli (2016). Mais rigoureusement, Δz

ne représente pas réellement l'épaisseur saturée de l'aquifère, puisque la RMP détecte aussi l'eau située dans la zone non saturée (la frange capillaire). L'incertitude sur les ordres de grandeurs ne doit pas être très importante. De toutes les façons les valeurs de conductivités hydrauliques K_i obtenues sont susceptibles d'être modifiées au moment de la phase de calibration du modèle.

A l'échelle du domaine à modéliser, nous avons identifié plusieurs zones de conductivité sur la base des ordres de grandeur.

b. Les propriétés hydrauliques du lit du cours d'eau principal

La zone d'étude est traversée par un cours d'eau temporaire orienté Est-Ouest vers l'exutoire, qui ne coule uniquement que pendant la saison hivernale, il est représenté par une condition de type drain. Les seuls échanges possibles se font du drain vers la nappe, la quantité de flux par unité de surface échangée est régulée par la valeur de la conductance C (m^2/s) du lit du cours d'eau.

- La valeur de la conductance en 1D est approchée de la façon suivante :

$$C = \frac{K_z}{b} \quad (8)$$

- Avec : K_z : conductivité verticale (m/s) ; b : épaisseur mouillée séparant le lit du cours de la nappe (m).

c. Les sollicitations de l'aquifère :

La recharge de l'aquifère se fait essentiellement par les infiltrations des pluies au niveau du centre du bassin versant et constitue le paramètre d'entrée le plus important. Les seuls pertes de l'aquifère se font par le biais des prélèvements des puits de pompage et les PMH.

• La recharge

En fonction de la hauteur de recharge, le site a été divisé en trois zones de recharge de même ordre de grandeur. Chaque zone de recharge correspond à la moyenne géométrique des hauteurs de recharge de la zone de recharge concernée.

Pour la simulation du régime permanent, les zones de recharge établies et leurs valeurs de recharge sont directement introduites dans le modèle en s'assurant de la bonne répartition des zones de recharge. Cependant, en régime transitoire, les valeurs de recharge sont définies selon la discrétisation du temps choisie (pas de temps mensuel) (**ANNEXE IV**)

• Les prélèvements

Le réseau de prélèvement d'eau dans la nappe est assuré par plusieurs ouvrages de captage (**Figure 14**). Ce sont les puits, les PMH et les forages équipés des pompes immergées. Il s'agit des prélèvements effectués pour l'irrigation et pour les besoins en eau des populations. Les volumes d'eau prélevés par les PMH sont estimés à 5 m³/jour. Quant aux données des prélèvements des puits de pompages, elles sont issues de la base de données du projet « milieu fissuré II ».

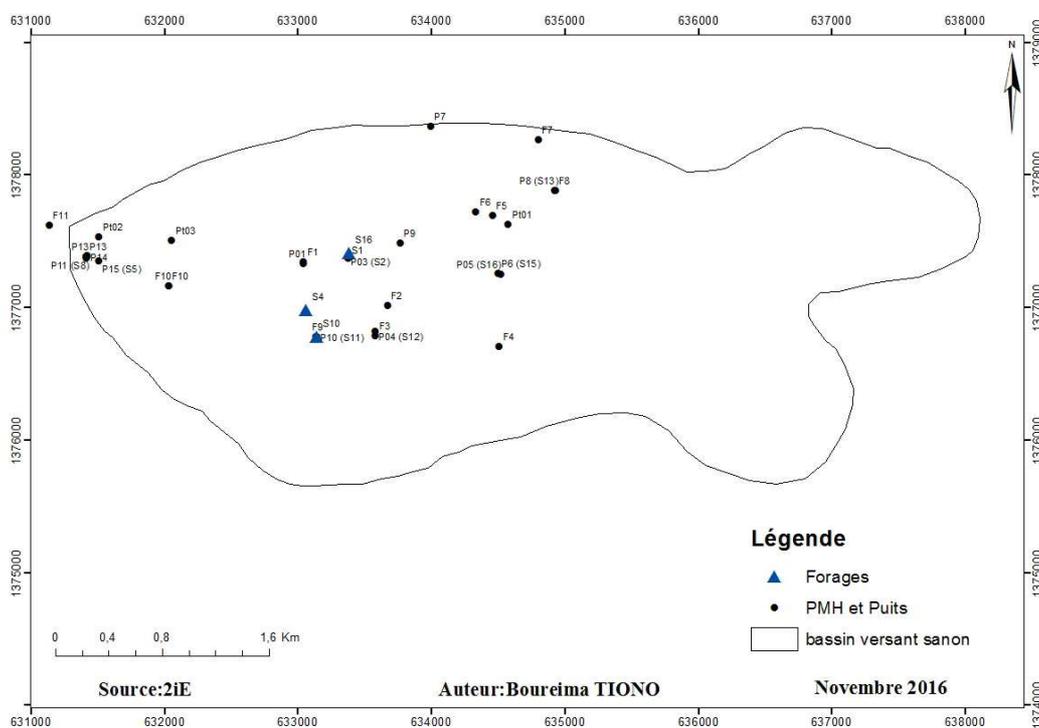


Figure 14: Localisation des ouvrages de captages

II.2.3 Elaboration du modèle numérique

La modélisation numérique de l'écoulement dans le cas de la présente étude est basée sur la résolution en 3D de l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux isotrope et homogène, en régime permanent ou transitoire selon l'équation ci-dessous:

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (9)$$

Avec :

K : conductivité hydraulique (m/s)

h : la hauteur piézométrique (m)

S_s : le coefficient d'emmagasinement spécifique

q : le terme source ou perte par unité de volume l/s

t : le temps (s)

Si nous considérons qu'il n'y a pas de variation de vitesse dans les trois directions, alors il n'y a pas de variation de masse de fluide par unité de volume (il n'y a donc pas de d'apport ou de retrait, q=0). De même si la hauteur piézométrique h ne varie pas en fonction du temps ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$) alors l'équation en régime permanent est donnée comme suit :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Si nous considérons l'hypothèse contraire, l'équation en régime transitoire s'écrit sous la forme :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (11)$$

En considérant l'épaisseur de l'aquifère infiniment petite par rapport à ses dimensions horizontales, on se ramène à un écoulement plan. L'équation (2) devient :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (12)$$

L'équation de diffusivité pour un écoulement plan en régime transitoire s'exprime de la manière suivante :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (13)$$

Une solution analytique h(x,y,t) satisfaisant l'équation de diffusivité, les conditions aux limites et les conditions initiales n'est pas aisée compte tenu de la complexité des hydro

systemes (De Marsily 1994). Les méthodes numériques sont alors utilisées pour obtenir une solution numérique approximée. Le code Modflow utilisé dans le cas de cette présente étude résout l'équation de diffusivité en utilisant l'approximation des différences finies.

II.2.3.1 Discrétisation spatiale

La discrétisation (**Figure 15**) consiste à approcher les termes de dérivation par des quotients différentiels. En se basant sur la définition de la dérivée, nous pouvons écrire que pour un pas h infiniment petit, la dérivée centrée s'exprime de la manière suivante:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (14)$$

Les termes d'ordre 2 sont approchés par :

$$\frac{d^2f(x)}{dx^2} \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (15)$$

La solution de l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies nécessite le maillage du domaine.

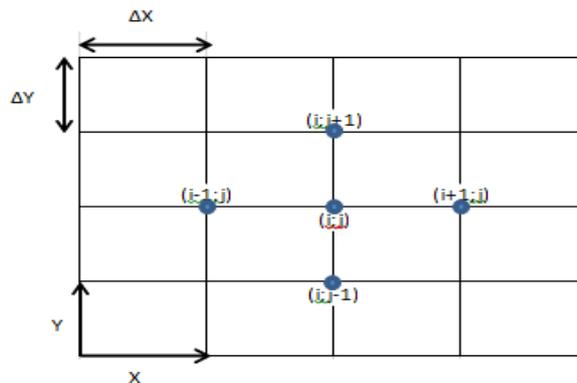


Figure 15: Principe de la méthode des différences finies

On définit h_{ij} la charge hydraulique au point d'abscisse $x=x_i$ et l'ordonnée $y=y_i$. Plus le maillage est fin (c'est à dire plus h est petit), meilleure est l'approximation. Une discrétisation par différences finies centrées avec un maillage régulier de points ($\Delta X= \Delta Y= \Delta$) conduit en régime permanent aux solutions présentées ci-dessous :

$$h_{ij} = \frac{h_{i+1,j}+h_{i-1,j}+h_{i,j+1}+h_{i,j-1}}{4} \text{ ou } h_{ij} = h(x, y), (x = x_i; y = y_i) \quad (16)$$

Basée sur le principe de continuité des flux où les flux entrants et sortants de la cellule doivent être égaux à la variation de stockage de la cellule, la solution de l'équation de diffusivité doit satisfaire les conditions aux limites du modèle.

Le domaine à modéliser est discrétisé (**Figure 16**) dans un système cartésien selon un maillage rectangulaire aux nœuds duquel l'équation est résolue et les conditions aux limites doivent être connues. La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques, des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, etc.) et les conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration ; éventuels pompages)

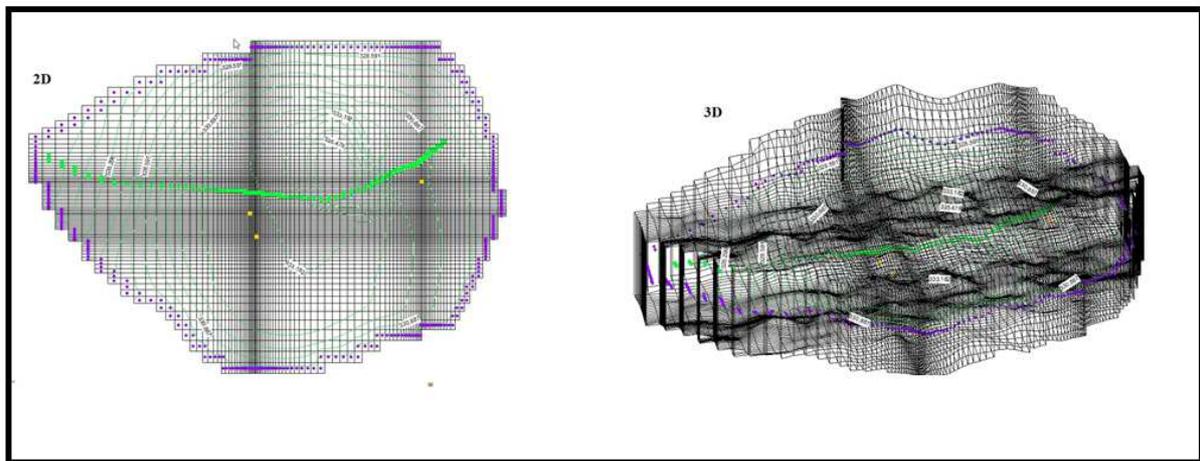


Figure 16: *Domaine discrétisé vue en 2D et 3D*

II.2.3.2 Discrétisation temporelle

La période de simulation dans le cadre de la construction et la validation d'un modèle doit s'appuyer sur une période assez longue pour laquelle les données disponibles sont suffisamment précises et complètes (Jaunat ; 2012). Les données nécessaires à la calibration de notre modèle en régime transitoire consistent principalement en des données de recharge, de prélèvements et de suivis de charges hydrauliques au sein de points d'observation. Sur le site de Sanon l'ensemble de ces données est précisément enregistré depuis 1988 grâce au « projet milieu fissuré II » et les travaux de Compaoré (1997) et le projet GRIBA.

La résolution de l'équation de l'écoulement en régime transitoire nécessite que la période de simulation soit subdivisée en pas de temps, constants ou non, et pour lesquels les conditions sont considérées connues (Jaunat, 2012). La sélection du pas de temps constitue une étape critique puisque les valeurs d'espace et de temps de discrétisation influencent fortement les résultats numériques (Anderson et Woessner, 1992). Nous avons donc choisi de calibrer le

modèle sur une période de trois ans, entre 1989 et 1991. Compte tenu des irrégularités des données ; une discrétisation mensuelle a été choisie, le pas de temps des données de prélèvements, de recharge et de variation piézométrique.

II.2.3.3 Conditions aux limites

Le choix des conditions aux limites est une étape cruciale de la modélisation puisqu'elles influencent considérablement les modalités d'écoulement. Dans notre étude, les conditions aux limites considérées sont de type potentiel imposé et de type « drain ».

Les conditions à potentiel imposé, encore appelées limites de premier ordre ou conditions de DIRICHLET, permettent de maintenir une charge constante au niveau de la limite. Elles correspondent généralement à des zones de rencontre entre un domaine aquifère souterrain et des eaux de surface caractérisées par une charge relativement constante dans le temps. En somme, elles imposent une hauteur piézométrique sur un ou plusieurs nœuds situés sur la frontière.

En régime permanent, les conditions de Dirichlet ont été déterminées par supposition de la carte piézométrique de 19/01/1989 et la limite de la zone à modéliser (**Figure 17**). Les intersections des isopièzes avec la limite, forment des nœuds et à chaque nœud est affectée la charge de l'isopièze correspondant. Au total dix (10) nœuds forment les conditions aux frontières de la zone modélisée. Nous avons adopté cette méthode en raison de la méconnaissance d'informations sur le bassin hydrogéologique de Sanon.

En régime transitoire, les charges au niveau de ces nœuds varient en fonction de la discrétisation du temps choisie. Il faut remarquer que ces nœuds restent fixes et que seule la charge en ces nœuds varie en fonction de la discrétisation temporelle.

La zone d'étude est traversée par un cours d'eau temporaire orienté Est-Ouest vers l'exutoire, qui ne coule uniquement que pendant la saison hivernale, il est représenté par une condition de type drain. Les côtes du lit du drain sont extraites du modèle numérique de terrain STRM décrit précédemment.

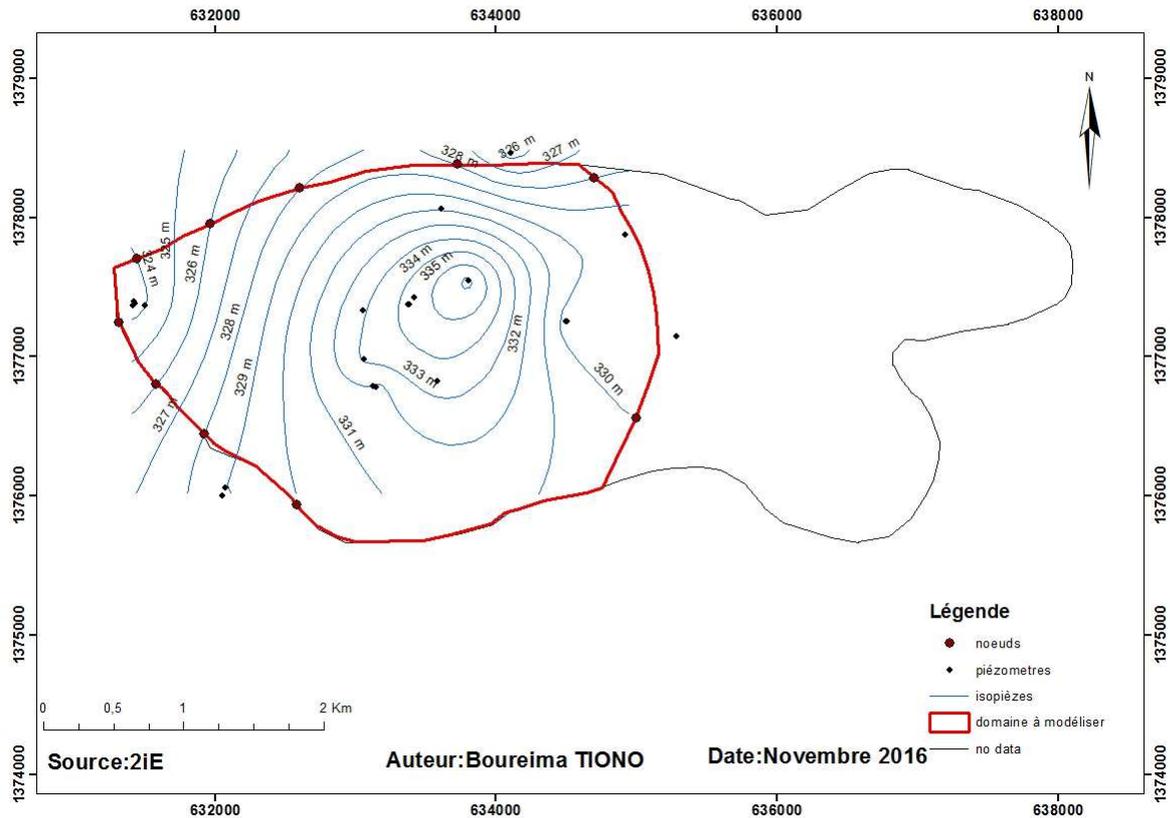


Figure 17: Méthode de détermination des conditions aux frontières

II.2.3.4 Piézométrie de référence et conditions d'écoulement

Les piézomètres de références ici, sont les piézomètres qui serviront à la l'élaboration des cartes piézométriques et à la calibration du modèle. Les données qui ont servi à l'établissement de la piézométrie de référence de 1989-1991 sont issues du projet « milieu fissuré II » ; celles de la période de 2014-2015 sont issues du projet « GRIBA »

Les nombreux piézomètres présents sur le site de Sanon (**Figure18**) constituent un véritable réseau de suivi-observation des eaux souterraines. Ce réseau a permis d'établir la carte piézométrique de Sanon qui, par la suite, a permis de déterminer les conditions d'écoulement. L'allure générale de la piézométrie a été déterminée par interpolation sur Arc Gis et le gradient hydraulique moyen ($i = \frac{\Delta h}{\Delta x}$) a pu être calculé en admettant que le système aquifère de Sanon est constitué par une nappe d'eau souterraine unique hébergés au sein d'un aquifère multicouche.

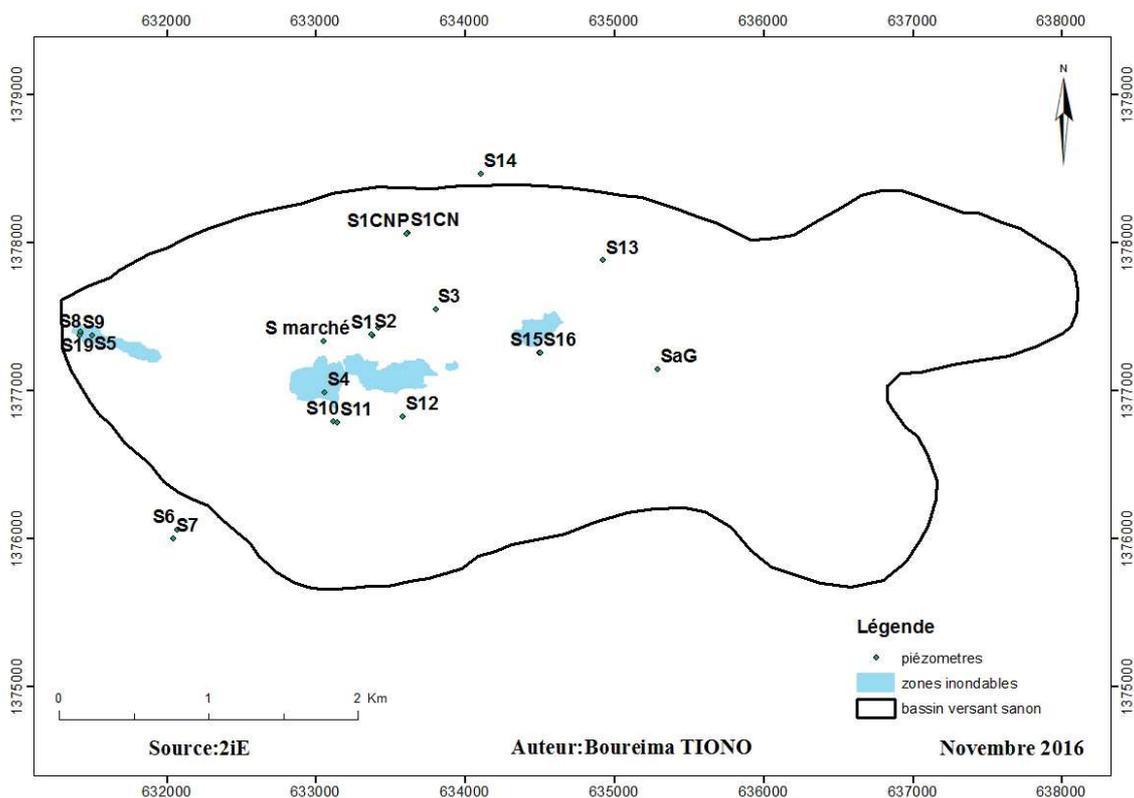


Figure 18: Carte de localisation des piézomètres du site de Sanon

II.2.4 Simulation du modèle numérique

La simulation numérique a été effectuée en deux étapes :

(i) dans un premier temps, un modèle d'écoulement en régime permanent a été établi pour vérifier la pertinence des conditions aux limites du modèle. Les charges hydrauliques obtenues après calage et validation du modèle, servent de charges hydrauliques initiales pour le régime transitoire.

(ii) dans un second temps, un modèle d'écoulement en régime transitoire (1989 à 1991) au pas de temps mensuelle a été mis en œuvre pour élaborer des scénarios de gestion durable.

II.2.4.1 Simulation en régime permanent

La simulation du comportement du réservoir dans des conditions de régime permanent implique l'existence d'un état connu du système dans lequel il y aurait à la fois stabilité des débits entrant et sortant et stabilité des hauteurs piézométriques. Les mesures piézométriques, utilisées pour le calage en régime permanent, ont été réalisées en 1989. Nous avons choisi la carte piézométrique établie le 19 janvier 1989 comme état devant servir de référence au

calage en régime permanent. Cette date correspond est la période où l'aquifère est en dehors de toute stimulation naturelle (influence de la recharge) ou artificielle (influence de pompage).

a. Calage du modèle

Le calage est un processus qui consiste à comparer les valeurs calculées et observées des paramètres tels que la recharge et la conductivité hydraulique. Dans le cas de leur égalité on dira que le modèle est calé et par conséquent potentiellement représentatif de la réalité du milieu naturel investigué (Toto *et al* 2009). Dans ce sens, Modflow est muni d'un module appelé "calibration" qui offre la possibilité de vérifier le calage d'un modèle à travers des cibles (*targets*) (**Figure 19**) et des courbes de corrélation. Ceci est obtenu en faisant varier les valeurs de la conductivité hydraulique tout en essayant de respecter les valeurs expérimentales.

Dans le cas de cette étude, le modèle sera calibré avec une erreur de 2 m et un niveau de confiance de 95%.

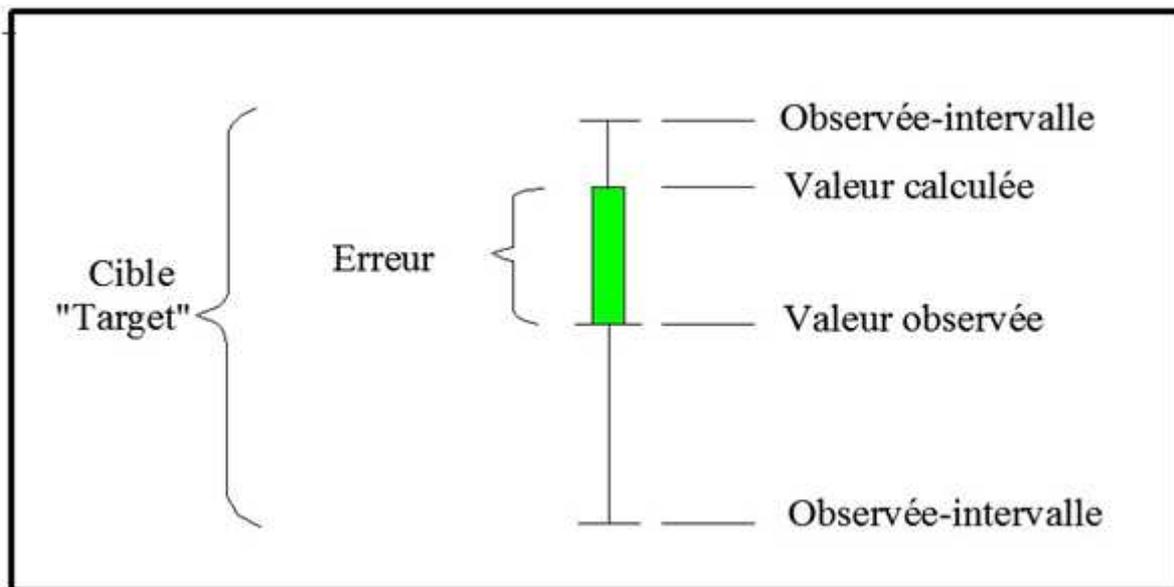


Figure 19: Schéma explicatif de la lecture d'erreur

Après la calibration, La différence entre piézométrie mesurée et piézométrie calculée permet aussi de quantifier les erreurs sur la calibration. Trois paramètres peuvent exprimer cette différence.

- l'erreur moyenne qui est la différence moyenne entre les charges mesurées (h_m) et calculées (h_c)

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)_i \quad (17)$$

- l'erreur moyenne absolue qui est la différence moyenne absolue calculées entre charges mesurées et charges calculées.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_m - h_c|_i \quad (18)$$

- L'erreur quadratique moyenne qui est la moyenne des carrés des différences entre charges mesurées et calculées.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)_i^2} \quad (19)$$

b. Validation du modèle

Une fois le modèle correctement calibré, il doit faire l'objet d'une validation à l'aide de mesures de terrain différentes de celles utilisées pour la calibration. Les données de validation du modèle sont les données de 2014. Les données d'entrées du modèle calibré au 1989 sont remplacées par celles de 2014 sauf les conductivités hydrauliques bien entendu, puisque ce sont-elles qui maintiennent le modèle en équilibre.

c. Analyse de sensibilité du modèle

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur le modèle MODFLOW, de manière à identifier les variables et paramètres qui contrôlent la dynamique des écoulements souterrains sur la zone d'étude. L'effet de variation de la conductivité hydraulique et de la recharge sur les niveaux de la nappe a été étudié.

Les conductivités hydrauliques de chaque zone ont été réduites à 10 % puis augmentées à 10 % de leurs valeurs calées, ce choix par ce que lors de la calibration, le moindre changement de valeur de conductivité, engendre une répercussion sur la piézométrie, contrairement à la recharge. La recharge a été réduite de 30 % puis augmentée de 30 % par rapport à sa valeur initiale pour les trois zones de recharge.

Le coefficient de sensibilité relative S_r (équation 20) est calculé pour comparer l'effet relatif des différents paramètres sur les résultats ciblés par l'analyse. Un S_r positif indique que le résultat augmente avec une augmentation du paramètre (et vice-versa) tandis qu'un S_r négatif

indique que le résultat diminue lorsque la valeur du paramètre augmente. Plus le S_r augmente (en valeur absolue), plus le modèle est sensible au paramètre testé.

$$S_r = \left[\frac{F' - F_{ref}}{F_{ref}} \right] / \left[\frac{X' - X_{ref}}{X_{ref}} \right] \quad (20)$$

Avec :

S_r =coefficient de sensibilité relative ;

F' =résultat du modèle avec un paramètre X' ;

F_{ref} =résultat de référence du modèle X ;

X' =paramètre modifié ;

X_{ref} =paramètre de référence.

II.2.4.2 Simulation en régime transitoire

Cette partie, consacrée au modèle en régime transitoire représente une continuité au calage en régime permanent. L'objectif principal de cette étape de la modélisation hydrodynamique est le calage du coefficient d'emmagasinement et l'homogénéisation des données du système hydraulique en régime transitoire.

Les types de conditions aux limites définis pour le régime permanent sont les mêmes pour le régime transitoire, à savoir les conditions aux limites de type drain et des charges imposées sur toutes les frontières à partir de la piézométrie observée. Des charges imposées à pas de temps mensuelles ont été définies au niveau des frontières, à partir de la piézométrie de référence.

Le calage est basé sur le suivi piézométrique au niveau des 10 points d'observation. Les paramètres ajustés pour le régime permanent, notamment la conductivité hydraulique restent inchangés au cours du calage du régime transitoire. Le calage du régime transitoire est réalisé avec l'ajustement du coefficient d'emmagasinement. La comparaison des chroniques piézométriques calculées et observées permettra de valider le modèle numérique mais également de mettre en avant certaines imprécisions.

II.2.4.3 Simulations prévisionnelles

La démographie croissante, le changement climatique, la réduction des zones préférentielles d'infiltration et l'augmentation des besoins en eau nous amène à réfléchir à des modes de

gestion pour l'aquifère de Sanon pour préparer l'avenir. A cet effet nous optons pour l'élaboration de deux (2) scénarios de gestion à l'horizon 2030, afin d'évaluer leurs impacts sur la ressource en eau souterraine.

▪ **Scénario 1 :**

Nous supposons que les surfaces d'infiltrations diminueront et d'éventuelles années sèches existeront dans le temps, entraînant ainsi une réduction de la recharge, Nous prenons comme hypothèse raisonnable une réduction de 20% de la recharge. Le **scénario 1** consistera à simuler l'impact de la réduction de la recharge sur la ressource. Pendant cette simulation les prélèvements resteront constants.

▪ **Scénario 2**

Le **scénario 2** consiste à simuler l'impact de l'augmentation des prélèvements sur la nappe de Sanon.

❖ **Données implémentées pour les simulations prévisionnelles**

a. Estimation de la recharge prévisionnelle

Nous avons estimé la recharge à l'aide des prévisions pluviométriques des scénarios RCP de la station météorologique de Ouagadougou.

Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) sont quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Ils permettent de modéliser le climat futur.

Nous émettons l'hypothèse que Sanon et Ouagadougou ont le même climat vue que le site de Sanon est à une trentaine de kilomètres de la capitale. La recharge est donc estimée à 10% de la pluie et celle-ci est uniformément répartie dans le modèle.

b. Evaluation des besoins en eau de Sanon à l'horizon 2030

▪ **Evolution de la population**

Le bassin versant de Sanon compte une population de 2 892 habitants avec un taux d'accroissement de 1.8% selon le recensement de la population de 2013, suite à l'enquête socio-économique réalisée sur le site.

En considérant le fait que, l'estimation de la population en Afrique Sub-saharienne suit une progression mathématique, nous évaluerons la population à l'horizon 2030 selon l'équation **21** (Yonaba, 2015).

$$P_n = P_{n_0} * (1 + t_a)^{(n-n_0)} \quad (21)$$

Avec P_n = Population à l'horizon du projet ;

t_a = Taux d'accroissement de la population ;

(n, n_0) = année de fin et année de départ.

N'ayant pas d'information sur la population de Sanon en 1991 (date de début de la prédiction), nous avons considéré le taux d'accroissement de 2013 pour estimer la population P_{n_0} à l'année 1991. Par ailleurs, le taux d'accroissement général du Burkina Faso croit depuis le recensement de 1960. L'utilisation du taux d'accroissement de 1.8% nous permettra d'avoir une marge vu que celle-ci est un peu surestimée.

$$P_{n_0} = \frac{P_n}{(1 + t_a)^{(n-n_0)}} \quad (22)$$

▪ Estimation des besoins en eau

Les paramètres ci-dessous sont pris en compte pour l'estimation des besoins en eau sur la période 1991-2030.

- Consommation journalière : 40l/j/habits
- La commercialisation de la boisson locale qui est une des activités consommatrices d'eau, elle a été estimée à 200 litres par jour par pratiquante d'activité. Le nombre de celles-ci est de 35 soit 7000 litres.
- D'autres utilisations d'eau pourraient naître et la consommation d'eau augmentée à cause de l'accès facile et à des coûts réduits, donc ils sont estimés une perte de 20% des besoins.

En ce qui concerne les prélèvements pour l'irrigation, elles sont maintenues constantes sur toute la durée de la simulation.

**TROISIEME PARTIE : RESULTATS
INTERPRETATION ET DISCUSSION**

III.1. Résultats et Interprétations

III.1.1 Estimation de la recharge

III.1.1.1 Bilan de THORNTHWAITE

La hauteur annuelle de pluie efficace calculée à partir de la méthode de THORNTHWAITE est résumée dans le **Tableau 2**.

Tableau 2: Valeurs de hauteurs de pluie efficace obtenues par la méthode du bilan de THORNTHWAITE pour l'année de 2014

Mois	ETP (mm)	P (mm)	P-ETP (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	I+R (mm)
avr-14	132,19	0	-132,19	-	-	-
mai-14	120,8	46	-74,8	-	-	-
juin-14	89,43	127,2	37,77	-	-	-
juil-14	67,05	216,8	149,75	-	-	-
août-14	59,7	130	70,3	100	59,7	70,3
sept-14	68,34	106,6	38,26	100	68,34	38,26
oct-14	113,91	28	-85,91	14,09		0
nov-14	130,18	0	-130,18	0		0
déc-14	70,7	0	-70,7	0		0
janv-15	53,19	0	-53,19	0		0
févr-15	107,52	0	-107,52	0		0
mars-15	145,33	0	-138,53	0		0
avr-15	132,19	0	-132,19	0		0
Total (mm/an)	-	654,6	-	-	-	108,56

La lame d'eau annuelle ruisselée obtenue à partir de la hauteur annuelle totale d'eau précipitée et du coefficient de ruissellement (8% de la pluie) est égale à **52,368 mm/an**. Cette valeur soustraite de la hauteur annuelle de pluie efficace (I+R) permet de trouver une hauteur annuelle d'eau souterraine rechargée égale à **56,192 mm/an, soit 8.8% de la pluie totale annuelle**

III.1.1.2 La méthode du Water table fluctuation (WTF) ou la méthode de la fluctuation piézométrique.

L'estimation de la recharge par la méthode des fluctuations piézométriques est résumée dans le **Tableau 3** et ceux de la période 1989-1991 sont consignés en (**ANNEXE III**)

Tableau 3: Recharge pour l'année 2014 du site expérimental de Sanon

Piézomètres	Aquifère capté	Fluctuation Δh (m)	Fluctuation Δh (mm)	Teneur en eau RMP Θ_{RMP} (%)	Porosité de drainage S_y	Recharge R (mm)
S1	Milieu fissuré/fracturé	4,51	4510	4,5	2,392	107,879
S2	altération	4,84	4840	4,5	2,392	115,772
S3	altération	4,97	4970	4,5	2,392	118,882
S5	Milieu fissuré/fracturé	1,896	1896	2,1	1,120	21,235
S8	Milieu fissuré/fracturé +altération	4,23	4230	2,1	1,120	47,376
S11	Milieu fissuré/fracturé +altération	0,85	850	2,6	1,385	11,770
S12	Milieu fissuré/fracturé +altération	1,25	1250	2,6	1,385	32,500
S18	altération	5,91	5910	2,1	1,120	66,192
S19	altération	6,7	6700	2,1	1,120	75,040
Sm	Milieu fissuré/fracturé +altération	3,27	3270	4,5	2,392	78,2184

La recharge varie entre 11,77 et 118,882 mm/an sur le site. La recharge est plus élevée dans la vallée et s'atténue plus quand on s'éloigne de la vallée (**Figure 20**).

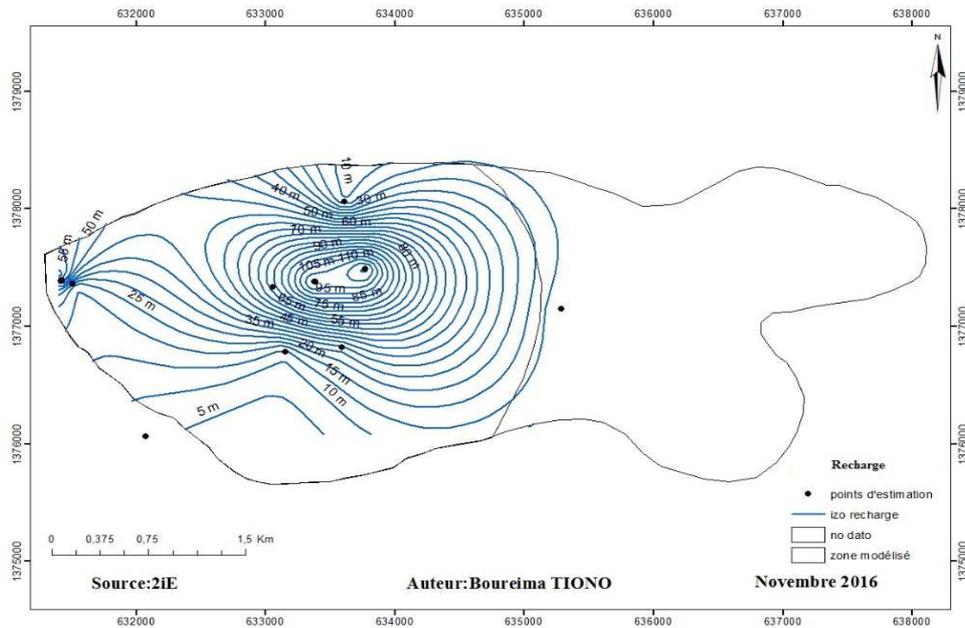


Figure 20: Répartition de la recharge sur le site

La recharge maximale calculée est observée au niveau du dôme avec 118,882 mm et elle décroît plus quand on s'éloigne du dôme (vallée centrale). En effet, la vallée centrale est une zone préférentielle de recharge à cause de sa structure sableuse en surface, favorisant l'infiltration (Soro *et al.* 2015 and Outoumbé 2014). Il en résulte une recharge localisée de la nappe à ce niveau, expliquant ainsi les fortes valeurs de recharge observées. En outre, la recharge à l'échelle du bassin versant, est estimée à 56,192 mm/an, soit 8.8% de la pluie totale annuelle.

Ces résultats rejoignent ceux du BRGM-AQUATER (1991) qui avaient déterminé la recharge grâce la méthode du bilan hydrique. Elle a été évaluée au maximum à 10% de la pluie (BRGM-AQUATER, 1991; CEFIGRE-Université d'Avignon, 1990), ainsi pour l'année 1993 on obtient une recharge de 50 mm pour une pluviométrie de 516 mm et une fluctuation piézométrique de 2m au niveau du dôme. Ainsi sur l'année 2014, on a une pluviométrie totale de 654,6mm ce qui correspondrait à une recharge maximale de 65,46 mm.

Mais cependant ces résultats diffèrent de ceux obtenus par la méthode de la modélisation hydrodynamique, qui avait obtenu une recharge comprise entre 27 et 305mm (BRGM-AQUATER 1991). De même pour la méthode du bilan des chlorures, la recharge est estimée à 200 mm dans l'altérite, à 70 mm dans le complexe altérite-zone fissurée et à 50 mm dans la zone fissurée.

III.1.2 Paramètres d'entrées du modèle

III.1.2.1 Modèle conceptuel hydrogéologique

Le calcul des conductivités hydrauliques a conduit à des valeurs K_i variant entre $4,3 \cdot 10^{-7}$ et $1,38 \cdot 10^{-5}$ m/s sur le site (**Tableau 4**). Les valeurs sont importantes au niveau du dôme piézométrique.

Tableau 4: Récapitulatif de la conductivité hydraulique

Points de mesure	Transmissivité (m^2/s)		Epaisseur mouillée (m)	conductivité estimées	
	essai de pompage	RMP		(m/s)	(m/j)
S1 CN	-	2,3E-04	37,2	6,129E-06	0,53
S1	3,8E-04	-	52,5	7,295E-06	0,63
S1 CS	-	9,3E-05	41,7	2,240E-06	0,19
S8	1,5E-04	-	41,7	3,501E-06	0,30
S10	5,0E-04	-	36,2	1,381E-05	1,19
S15 CN	-	1,2E-04	35,9	3,454E-06	0,30
S15	1,9E-04	-	53,8	3,494E-06	0,30
S15 CS	-	3,4E-04	37,4	9,144E-06	0,79
SaG CN	-	8,8E-05	17,6	5,017E-06	0,43
SaG	1,8E-04	-	39,9	4,536E-06	0,39
SaG CS	-	1,6E-05	37,4	4,305E-07	0,04

Ainsi nous avons pu dresser une carte de conductivités hydrauliques des zones de conductivité en fonction des ordres de grandeur. La figure ci-dessous montre la répartition des zones de conductivité sur le domaine modélisé. Ces zones de conductivité seront introduites directement dans le modèle comme conductivité de départ pour la calibration.

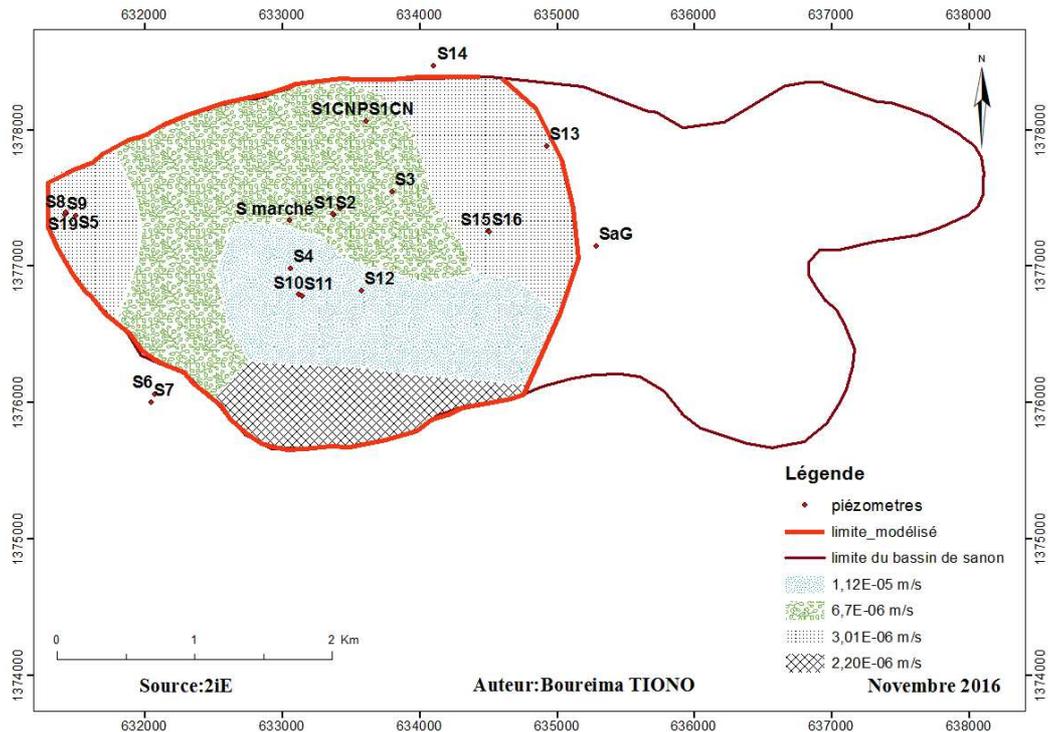


Figure 21: Carte de conductivité hydraulique

III.1.2.2 Conditions aux limites

La figure ci-dessous montre les conditions aux limites de la portion du site modélisée. La présence des zones inondables peut s'expliquer par une faible infiltration en ces zones engendrant ainsi une conductance très faible.

Le drain est orienté Est-Ouest vers l'exutoire et a une longueur de 3605,97 m avec une conductance de $2,10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ soit $175 \text{ m}^2/\text{jour}$. Les parties du drain traversant les zones inondables sont négligeables.

En régime permanent, les potentiels imposés varient de 326 à 328 m sur la frontière nord ; 324 à 330 m à la frontière Sud ; 328 à 230m à l'Est et 324 m sur la frontière Ouest. Et en régime transitoire, ils évoluent avec la discrétisation temporelle.

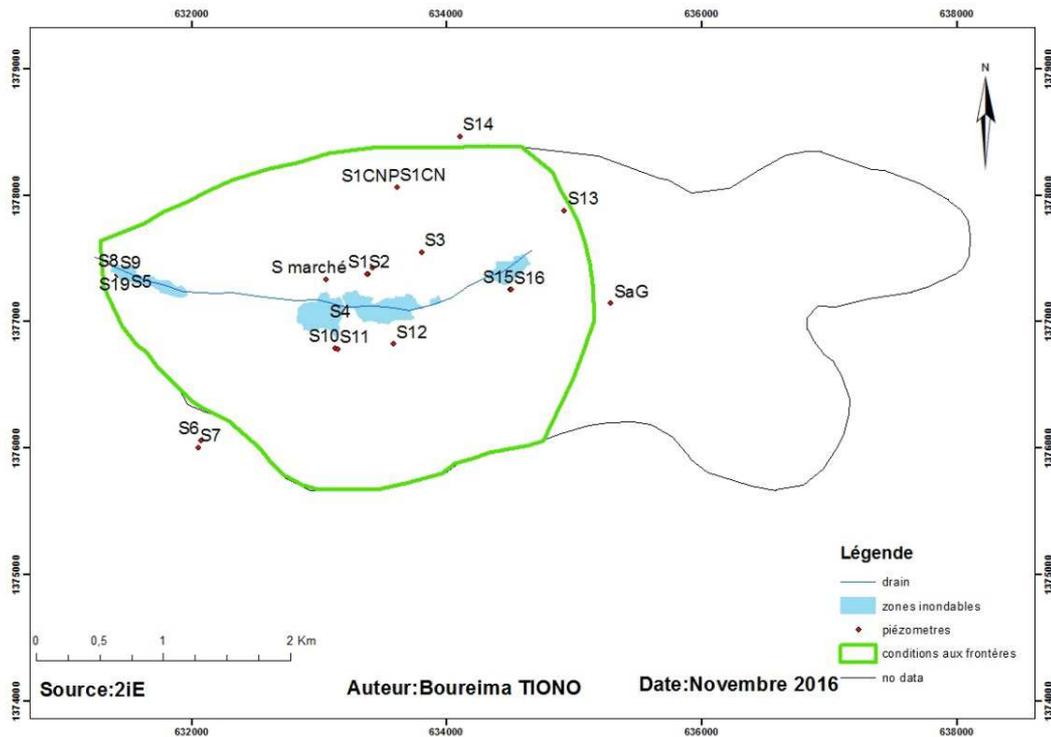


Figure 22: Limites aux frontières de la zone modélisée

III.1.3.3 Sollicitations

a. Recharge

La Figure (23) montre les zones de recharge sur le site à modéliser.

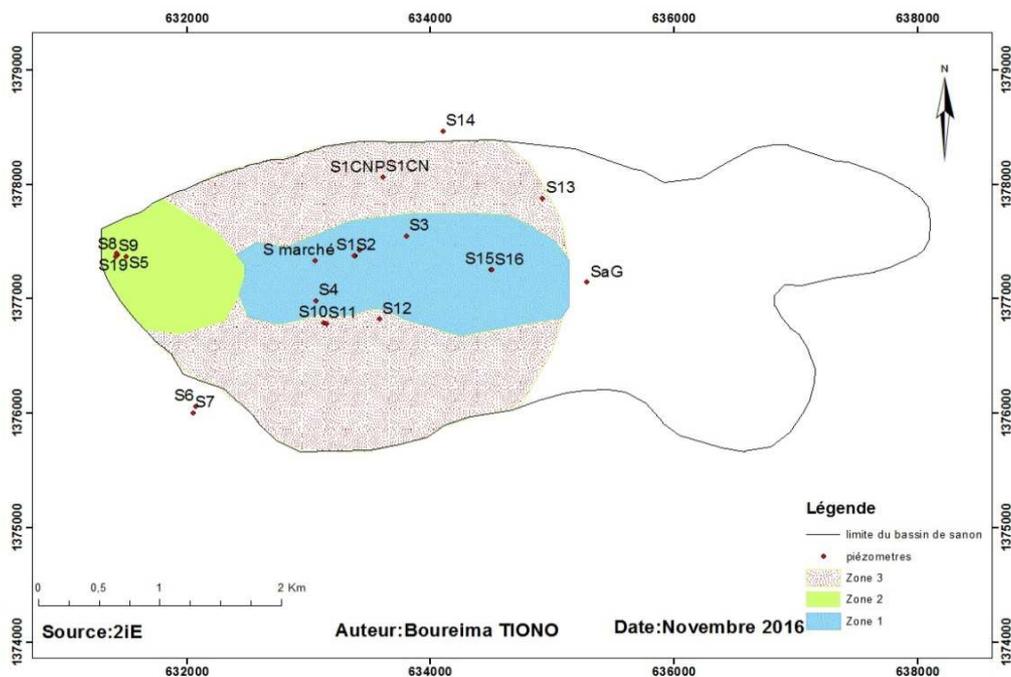


Figure 23: Répartition de la recharge sur le site expérimental

Le **Tableau 5** montre les valeurs de recharge qui ont servies à la simulation du régime permanent.

Tableau 5: Valeurs de recharge du régime permanent (1989)

Zones de recharge	Valeurs de recharge (m/j)
Zone1	0,0002881
Zone2	0,0001313
Zone3	0,0000535

b. Prélèvements

La **Figure 24** montre les prélèvements d'eau dans la nappe de Sanon, le volume minimal prélevé par mois est à peu près 2500 m³ et les maxima 6000 m³. Le mois de Octobre 1989 a été le mois de forte demande de la période (1989-1991). Le tableau en **ANNEXE V** montre les prélèvements mensuels des trois forages.

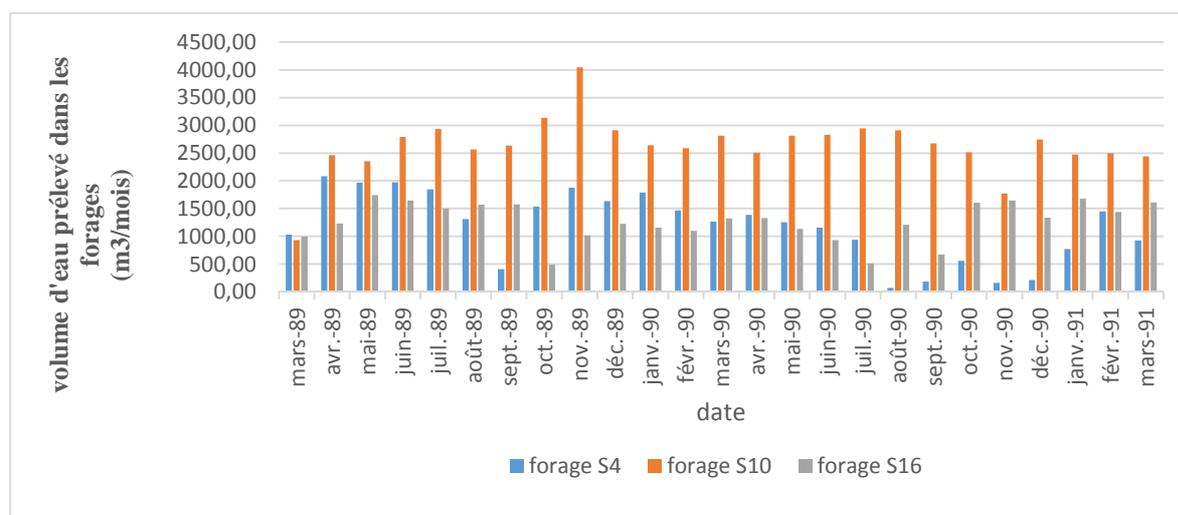


Figure 24: Evolution du volume d'eau prélevé a Sanon (1989-1991)

III.1.3.4 Conditions d'écoulement

Les puits d'observation de Sanon ont permis d'établir une carte piézométrique. Elle laisse apparaitre un dôme piézométrie dans la vallée centrale. Ce résultat rejoint ceux du BRGM-AQUATER (1991) et de Compaoré (1997). L'écoulement se faisant des charges les plus élevées vers les charges les plus faibles, le sens de l'écoulement en souterrain se fait alors de la vallée vers la périphérie. On détermine un gradient hydraulique moyen de 0,43% pour l'écoulement général de la nappe du centre vers les périphéries. L'écoulement de la nappe est

illustré par la **Figure 25**. Ces conditions d'écoulements sont directement admises dans le modèle.

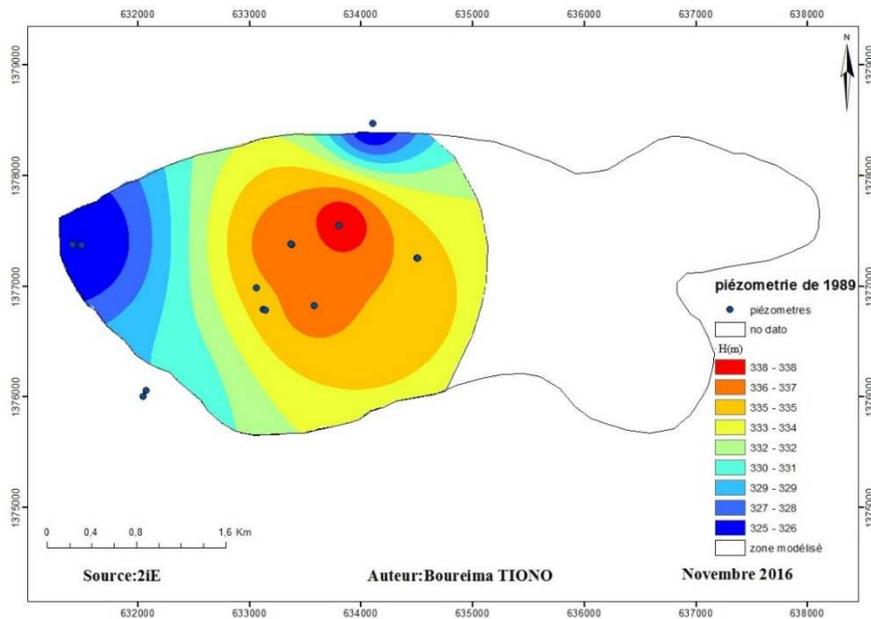


Figure 25: Carte piézométrique de Sanon

III.1.4 Calage du modèle en régime permanent

L'évolution spatiale de la charge hydraulique qui constitue le résultat de la simulation en régime permanent est obtenue sur 9525 cellules actives issues de la discrétisation spatiale du domaine. Le **Figure 26** représente la piézométrie avant calage en régime permanent pour l'année 1989.

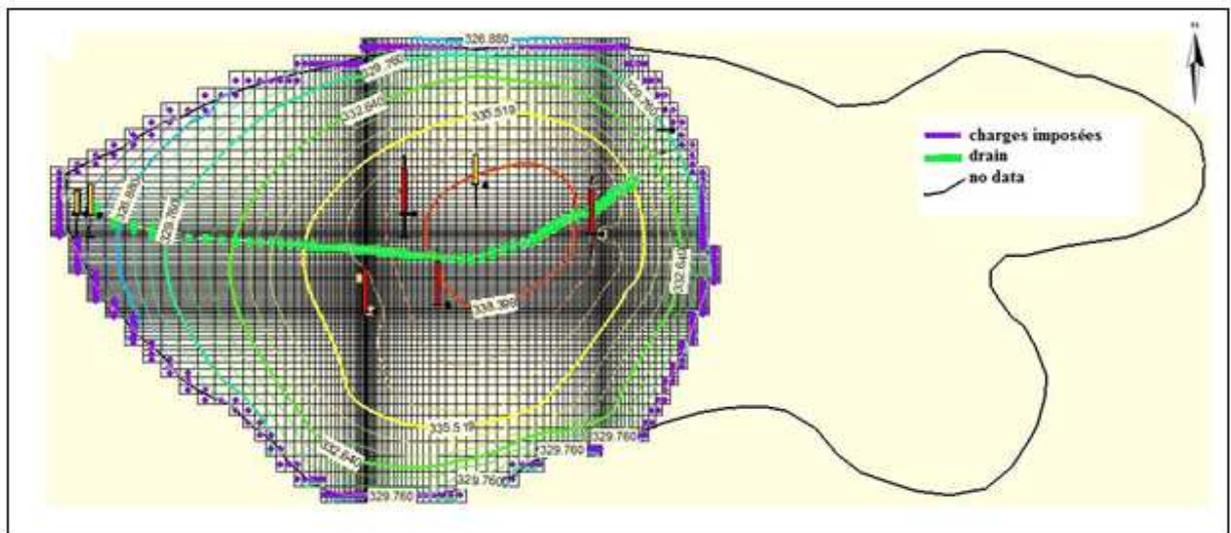


Figure 26: Piézométrie avant calage de 1989

Les charges calculées sont un peu plus élevées que les charges mesurées, ce qui sous-entend que les valeurs de conductivités hydrauliques (**Figure 27**) estimées ne peuvent pas reproduire l'écoulement observé en 1989 car ces conductivités hydrauliques estimées avaient donc été sous-estimées.

Les charges calculées sont trop élevées au niveau du dôme (vallée centrale) où, les charges simulées sont 4 à 6 m plus élevées que les charges observées. Au niveau de l'exutoire elles sont au-dessus (2,5 m) des charges observées.

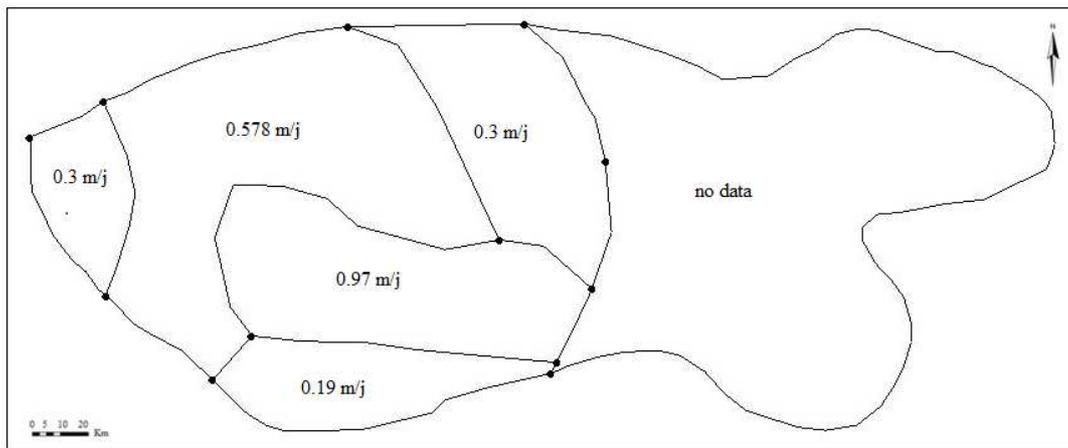


Figure 27: Zones de conductivités hydrauliques avant calage du modèle

Le modèle que nous avons créé est moins conducteur par rapport à la réalité donc nous avons ajusté les valeurs de conductivité jusqu'à ce que les charge simulé soit identique au charge observées. De plus, la zone2 et la zone3 ont été divisées en deux (2) zones différentes chacune en vue d'égaliser au mieux les charges calculées et les charges mesurées. Et les valeurs de conductivité qui nous ont permis de caler le modèle, sont représentées sur la **Figure 28**.

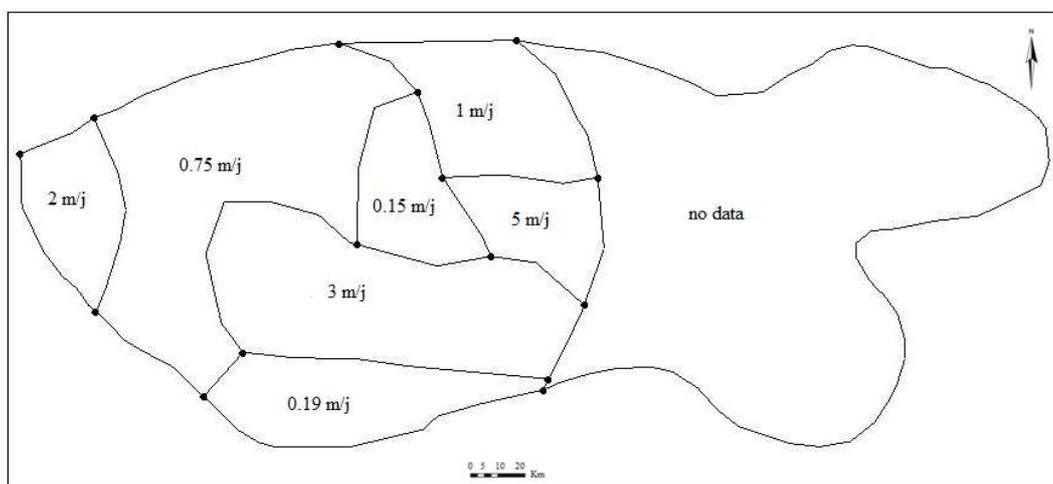


Figure 28: Zones de conductivités hydrauliques après calage du modèle

La **Figure 29** présente la modélisation en régime permanent au meilleur ajustement entre les hauteurs d'eau simulées et mesurées aux points d'observations.

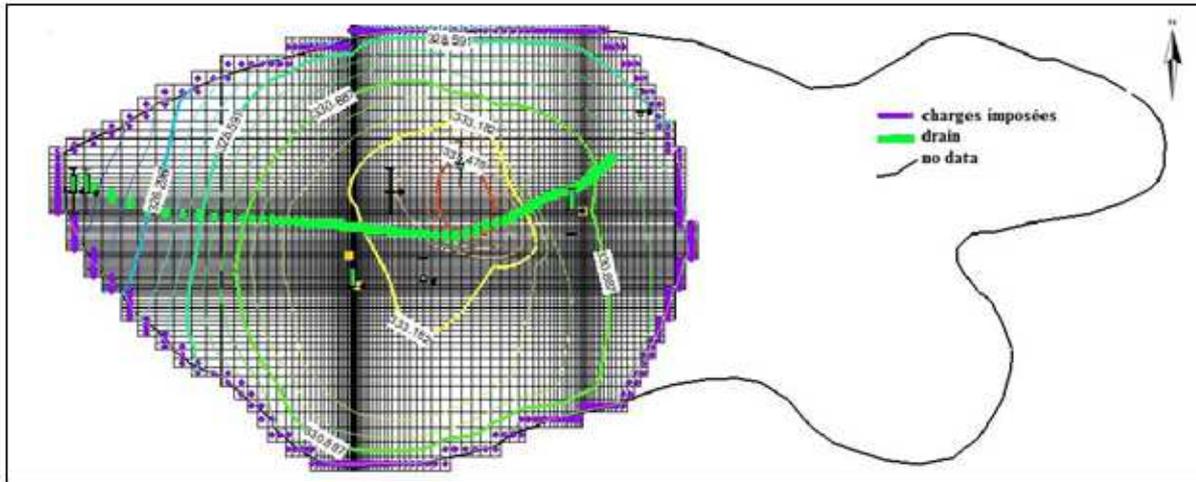


Figure 29: (a) Piézométrie avant calage ; (b) piézométrie après calage

La piézométrie calculée est bien corrélée (**figure 30**) avec la piézométrie mesurée. Le coefficient de corrélation entre piézométrie mesurée et piézométrie simulée est très proche de 1. L'analyse statistique des résultats du calage du modèle dans le **Tableau 6** présente des valeurs cohérentes. Le résidu est compris entre 0,0097 et 1,179 m. La valeur moyenne et la moyenne de la valeur absolue des résidus sont respectivement de -0,793 m et 0,95m pour un niveau piézométrique compris entre 323,579 m et 336,349 m. En plus, l'erreur quadratique moyenne (RMS) est de 1,2 m. A la lumière de ces taux d'erreur relativement faibles, le calage est considéré comme satisfaisant.

Tableau 6: Indicateur statistique des résultats du calage du modèle

désignations	erreur
Résidu min (m)	0,0097
Résidu max (m)	1,179
Erreur moyenne (m)	-0,793
Erreur absolue moyenne (m)	0,95
RMS	1,200
Coefficient de corrélation	0,988

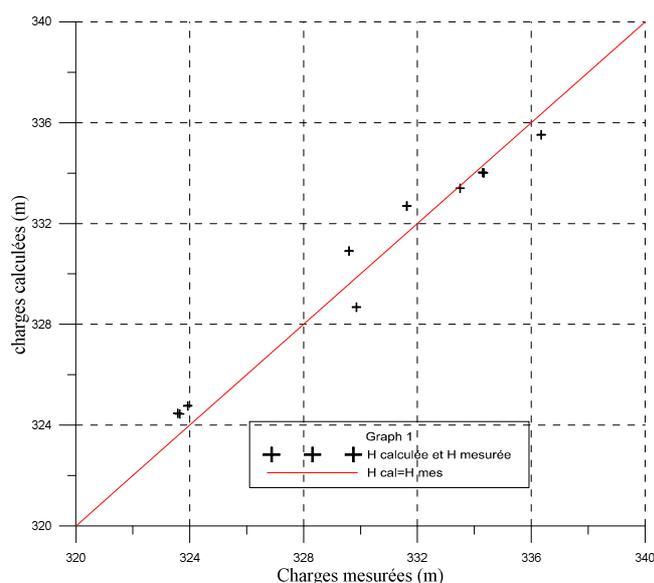


Figure 30: Diagramme de dispersion des hauteurs piézométriques calculées et mesurées (régime permanent 19/01/1989)

Une fois que les charges simulées sont sensiblement égales ou égales aux charges observées; il faut que nous arrivons à vérifier le bilan d'eau du modèle, par ce que lorsque nous sommes en régime permanent la variation de stock est nulle.

▪ Bilan hydrique

Le calage du modèle en régime permanent a permis la reconstitution du bilan hydrique de la nappe par évaluation de ses différentes composantes (calcul du flux entrant et sortant du système étudié). Il a permis de quantifier les flux transitant dans la nappe. Le **Tableau 7** présente le bilan global de la nappe et montre une égalité entre les flux entrant et sortant, ce qui est cohérent avec l'hypothèse de la modélisation en régime permanent. Aussi le pourcentage de différence entre les apports en eau et les pertes est 0,05%, ce qui est inférieur aux 0,1% préconisés par Anderson et Woessner (1992). Ce bilan hydrique est très important dans tous les modèles d'eau souterraine car il définit les ressources disponibles et fournit les facteurs de dilution dans les études de contamination (Brassington et Younger 2010).

Tableau 7: Bilan global de la nappe de Sanon

désignation		
Apport aux limites du système	3,430	1980,881
Drain	0	0
Puits de pompage	0	252
Recharge	2229,498	0

Total	2232,929	2232,980
Total entrées – total sorties =0,00483709		
Pourcentage d'anomalie=0,051662445656		

La piézométrie restituée par le modèle numérique en régime permanent montre logiquement des conditions d'écoulement globalement radiales du centre de la vallée centrale vers les périphéries, ce qui rejoint les conditions d'écoulement considérées dans le paragraphe (III.1.3.3).

En somme, la calibration en régime permanent et le bilan en eau du système en équilibre montre que la principale entrée du système est l'infiltration par les eaux de pluie (2229,49 m³/j) et les principales sorties sont les prélèvements (252 m³/j) et les pertes par les conditions de potentiels imposés (1980,88 m³/j). De ces résultats, on pourrait dire que l'influence des prélèvements sur le fonctionnement global de l'aquifère de Sanon est négligeable.

III.1.4.1 Validation du modèle

Une fois le modèle calibré, nous avons utilisé les mêmes conductivités hydrauliques qui ont servi à la calibration du modèle pour voir comment la piézométrie va se comportée en 2014. Pour ce faire, nous avons comparé les charges observées en 2014 et les charges simulées en 2014 avec les conductivités hydrauliques que nous avons retenu pour calibrer le modèle en régime permanent et on constate que les charges simulées et observées (**Figure 31**) sont sensiblement identiques.

Ces résultats indiquent que les valeurs de conductivités hydrauliques retenues sont des valeurs cohérentes par ce qu'elles arrivent à reproduire également la piézométrie de 2014.

Le **Tableau 8** montre le résultat de simulation du modèle en 2014, il montre une cohérence avec le résultat du modèle calé en 1989.

Tableau 8: Comparaison modèle calé et modèle validé

Désignations	Modèle calibré	Modèle validé
Résidu min (m)	0,0097	0,208
Résidu max (m)	1,179	1,77
Erreur moyenne (m)	-0,793	-0,595
Erreur absolue moyenne (m)	0,95	0,966
RMS	1,200	1,101
Coefficient de corrélation	0,988	0,977

La figure ci-après montre la piézométrie issue de la simulation du régime permanent avec les données de 2014.

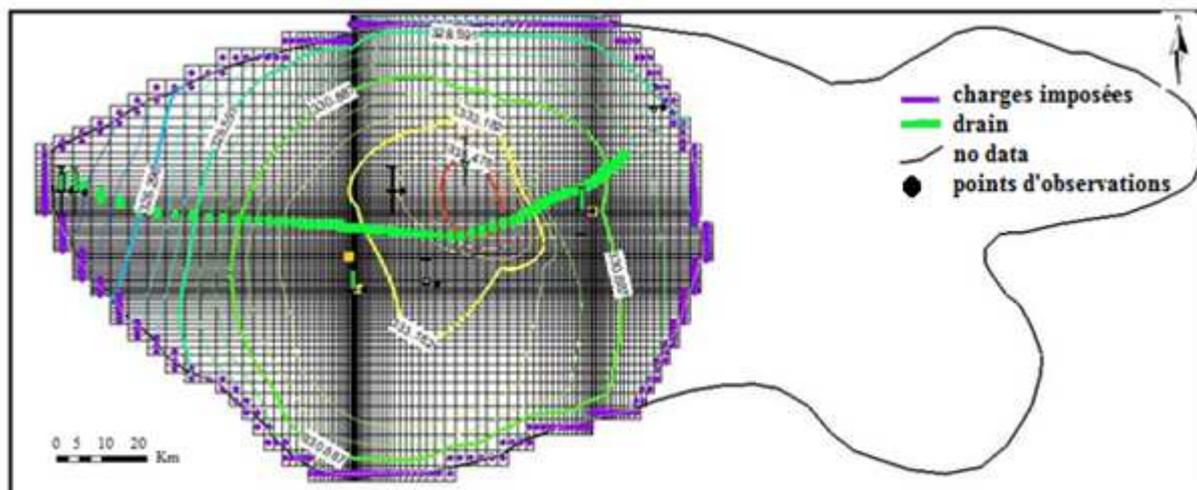


Figure 31: Résultat de la validation du modèle de l'année 2014

Cette étape de la modélisation en régime permanent est très importante car c'est elle qui donne le « ticket » de passage au régime transitoire. C'est elle qui confirme la fiabilité du modèle calé en régime permanent. Au regard de ces résultats, le modèle peut être jugé bon pour passer au régime transitoire.

III.1.4.2 Analyse de sensibilité

a. Sensibilité par rapport à la conductivité hydraulique

Le calcul du coefficient de sensibilité relative S_r donne une valeur négative impliquant que la charge hydraulique calculée diminue lorsque la conductivité hydraulique augmente et vice-versa. En effet, une diminution de 10% de la conductivité hydraulique entraîne une augmentation de (+0,0228 m) sur la précision des niveaux piézométriques calculés. À l'inverse une augmentation de 20 % entraîne une diminution de (0,0336 m) sur la précision des charges calculées. Ceci s'explique par le fait qu'une augmentation de la conductivité hydraulique facilite l'écoulement souterrain tandis qu'une baisse de la conductivité hydraulique limite l'écoulement et favorise des charges plus élevées.

b. Sensibilité par rapport à la recharge

Le calcul du coefficient de sensibilité relative S_r donne une valeur positive, ce qui indique que la charge hydraulique calculée diminue lorsque la recharge diminue et vice-versa. En effet, une diminution de 30% de la recharge entraîne une diminution de (+0,0241 m) sur la précision des niveaux piézométriques calculés et vice versa.

Au regard de ces résultats, on peut conclure que le modèle est plus sensible à la conductivité hydraulique qu'à la recharge.

III.1.5 Résultat et interprétations du calage en régime transitoire

L'adaptation du modèle en régime transitoire sur la période de 1989-1991 montre la fluctuation de la réserve du système aquifère en fonction de l'exploitation et de la recharge. De même, elle a permis de caler les valeurs de coefficient d'emmagasinement de la zone modélisée. Ils sont compris entre 10^{-4} et 10^{-2} .

a. Piézométrie

La comparaison des chroniques piézométriques mesurées et simulées (**Figure 32**) révèle une assez bonne restitution de la piézométrie par le modèle, malgré quelques imprécisions. Le résidu moyen de -1,945 m, le résidu moyen absolu de 2,05 et le RMS de 2,78 m, confirme la représentativité du modèle numérique. La comparaison des variations de charge observées et simulées dans certains forages mérite d'être détaillée. Les piézomètres d'observations S1, S2 et S3 (**Figure 33**) réagissent plus aux variations du coefficient d'emmagasinement et les charges simulées restent toujours inférieures aux charges observées. Par contre, ceux qui sont hors du dôme, gardent une marge relativement bonne.

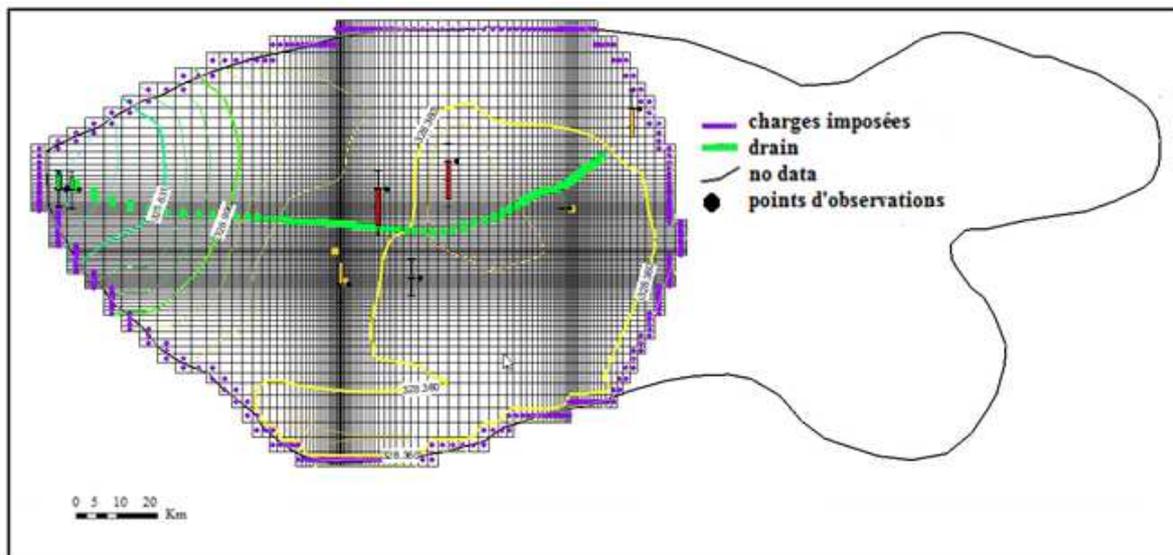


Figure 32: Restitution de la piézométrie de 01/11/1990

En revanche, les comparaisons des chroniques simulées et observées pour les piézomètres d'observations (**Figure 34**) situés au niveau de l'exutoire (S5, S8, S9) montrent une assez

bonne qualité de calage. Les valeurs du résidu moyen (**Tableau 9**) pour ces trois forages, confirment cela.

La simulation en régime transitoire met en évidence la difficulté du modèle à restituer les variations rapides et fortes amplitudes (**Figure 35**) des niveaux piézométriques des piézomètres S11 ; S12 et S15. En effet, même si les augmentations des charges simulées sont synchrones avec les observations, leur amplitude est plus faible.

Le puits d'observations S13 quant à lui, a ses variations de charges globalement synchrones avec les variations mesurées, malgré un niveau moyen simulé plus bas.

Tableau 9: Résultats de calage en régime transitoire

piézomètres	Résidu moyen(m)	Résidu moyen absolu(m)
S1	3,66	3,66
S2	3,7	3,7
S3	3,7	3,7
S5	-1,9	2,06
S8	-2,13	2,25
S9	-1,99	2,12
S11	-2,98	3,49
S12	-0,25	2,35
S13	1,86	1,88
S15	0,205	1,67

Cette analyse des chroniques piézométriques simulées et observées nous montre la nécessité de mesures de charges précises et régulières pour la calibration d'un modèle numérique hydrodynamique. La calibration de ce modèle en régime transitoire nous a permis d'approcher au mieux les conditions d'écoulement réelles. Des imperfections persistent néanmoins, celles-ci pouvant être attribuées en partie à la qualité du calage du régime permanent, mais également à la qualité de la mesure disponible. Nonobstant, la restitution du modèle numérique dans sa globalité est acceptable.

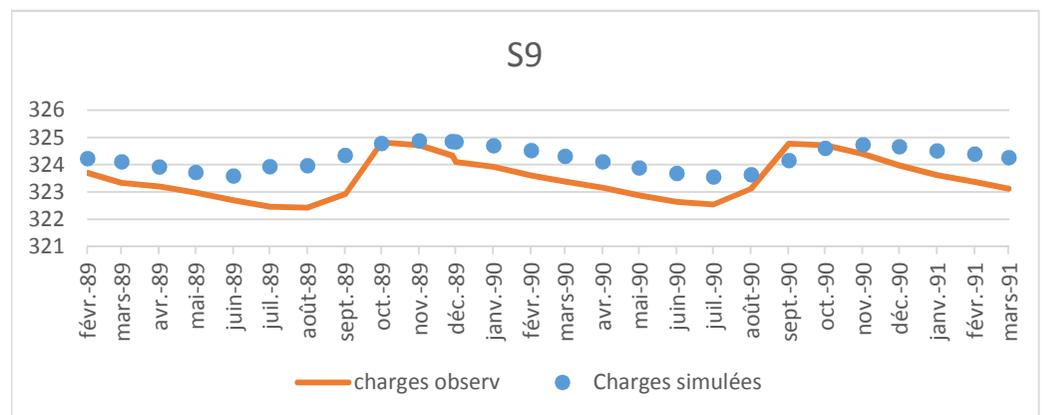
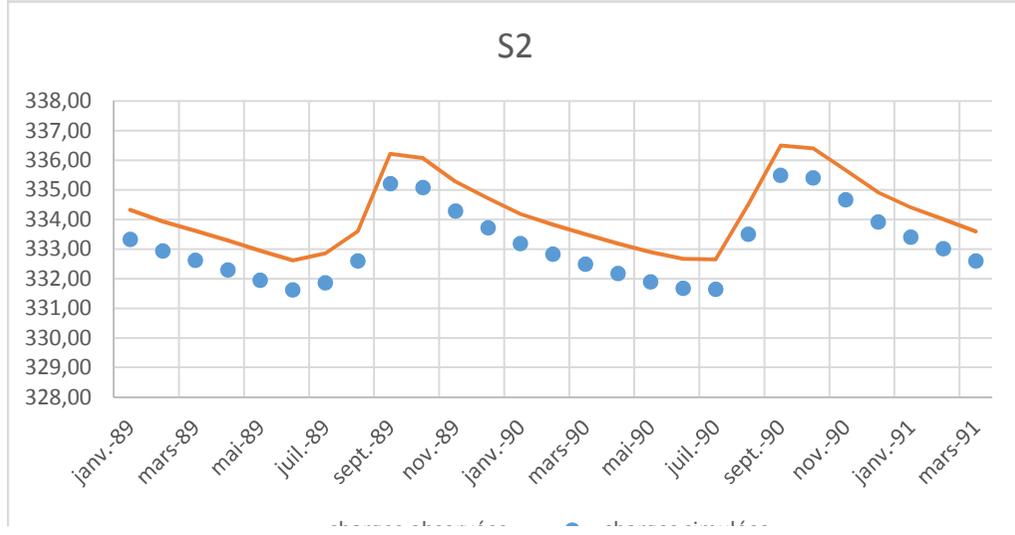
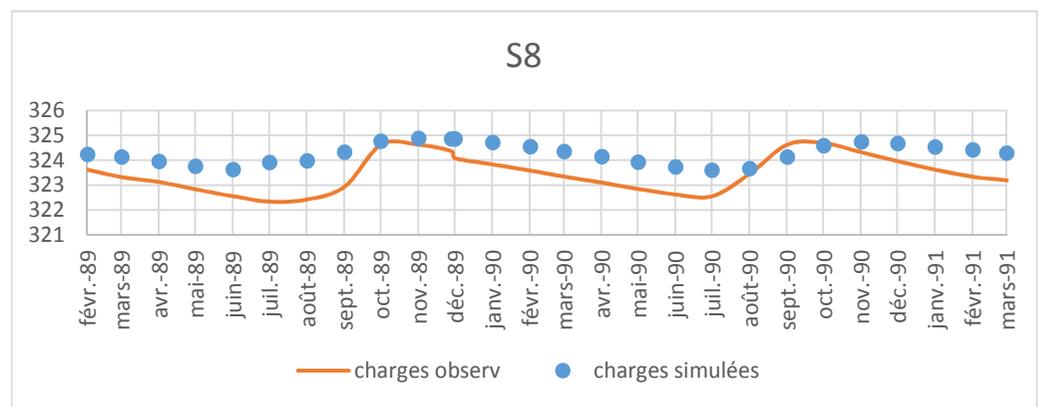
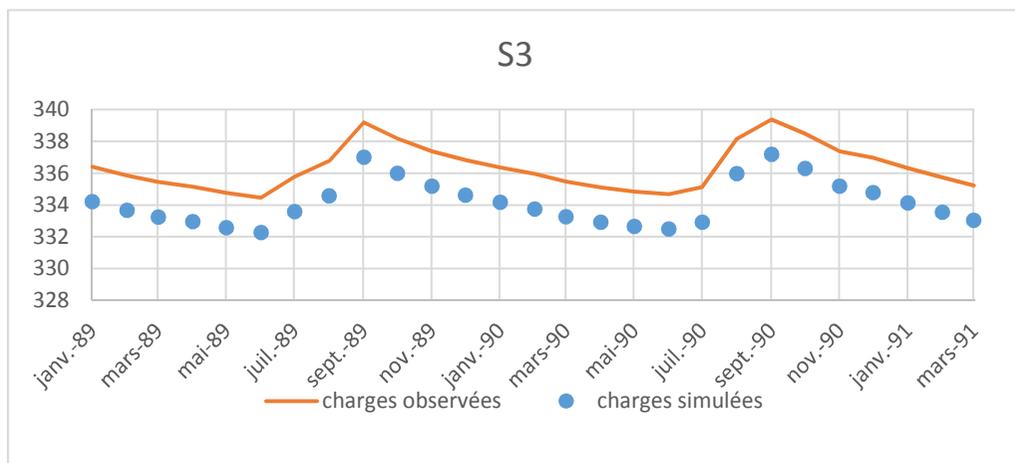
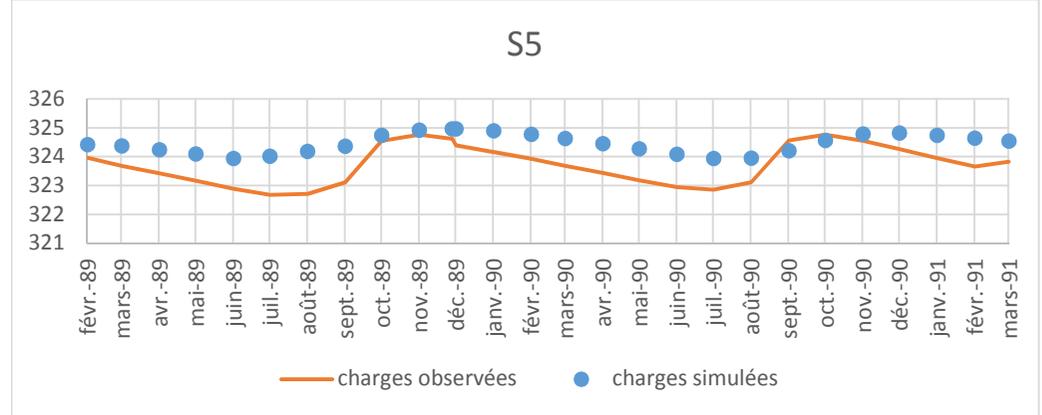
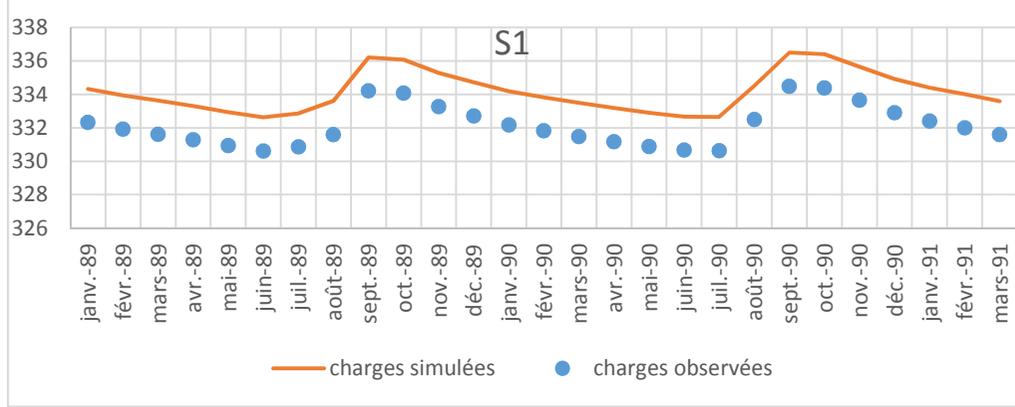


Figure 33: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées dans la zone du dôme piézométrique

Figure 34: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées à l'exutoire

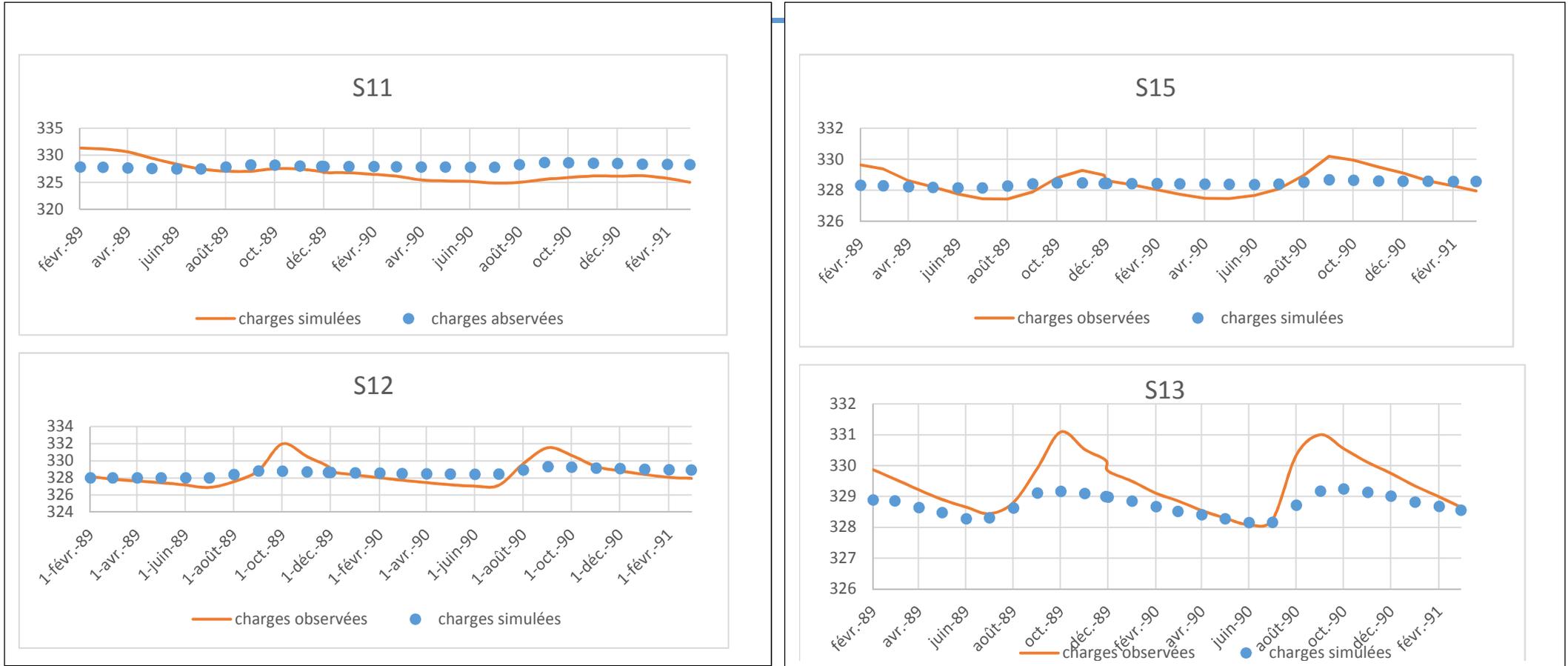


Figure 35: Chroniques de piézomètres observées vs piézomètres simulées dans la zone hors dôme piézométrique

III.1.6 Simulations Prévisionnelles

III.1.6.1 Données implémentées

Le résultat de l'estimation de la recharge est résumé en ANNEXE V, Celle de l'évolution de la population et des besoins en eau sont en ANNEXE VI. La figure ci-après montre l'évolution de la recharge et celle réduite de 20%. L'estimation des besoins en eau montre une croissance (Figure 34b) des besoins en eau sur la période de prédiction.

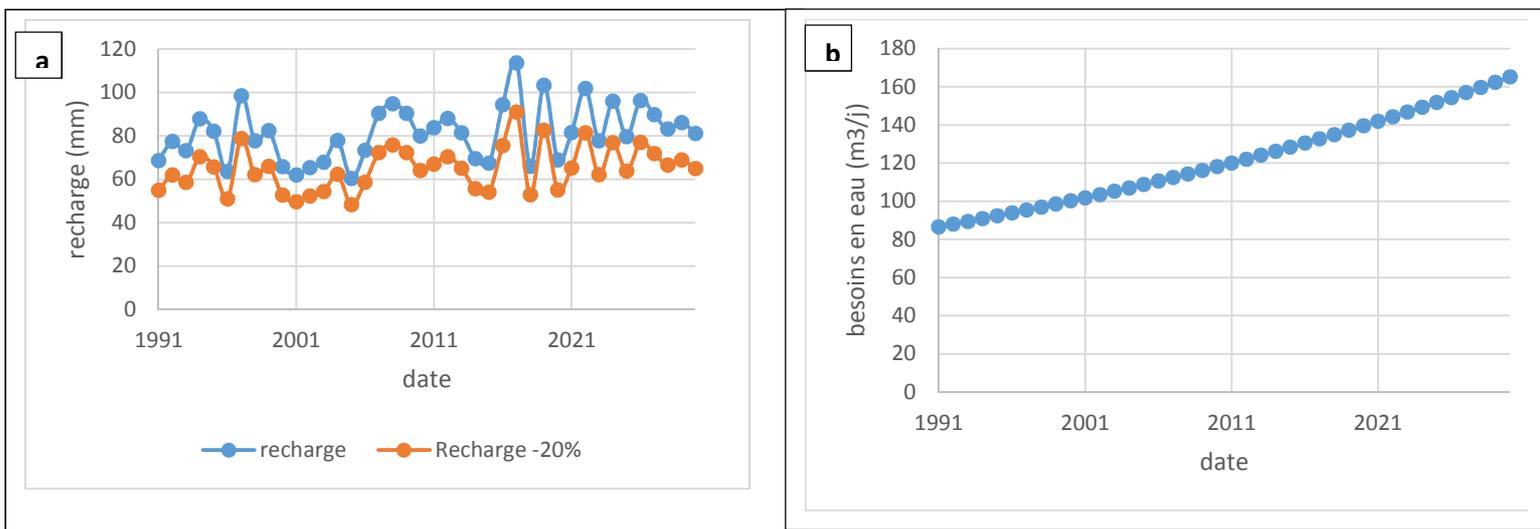


Figure 36: a). Evolution de la recharge sur 1991-2030, (b). Evolution des besoins en eau sur la période 1991-2030

III.1.6.2 Résultats des simulations des scénarios

○ Scénario 1

La Figure en ANNEXE VII montre la piézométrie simulée dans le forage S5 entre 1989 et 2030 en fonction des prévisions climatiques et anthropiques établies à partir du scénario 1. Il en ressort que les variations de charge simulées sont faibles (l'ordre de 2 m).

○ Scénario 2

L'impact de l'augmentation des prélèvements sur la piézométrie est essentiellement marqué au niveau des zones où se trouvent les puits de pompages, comme l'indique la carte de rabattement de la piézométrie simulée en 2030 en Figure 34. La baisse du niveau piézométrique ne dépasse pas 0,434 m. En dehors de ces zones de baisse généralisée, le

niveau piézométrique diminue localement autour des points de prélèvements. Aussi, les zones d'influences de l'augmentation des prélèvements semblent ne pas affecter la piézométrie de l'exutoire. L'effet de l'augmentation des pompages n'est pas significatif.

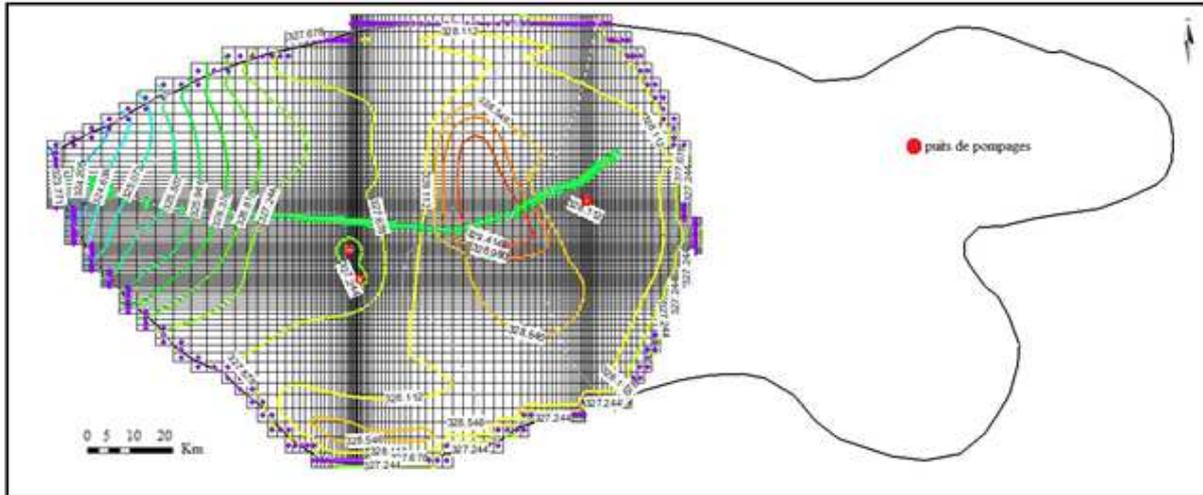


Figure 37: Carte de rabattement de la piézométrie simulée en 2030

III.2 DISCUSSION

Ces deux scénarios projetés prévoient une croissance continue des prélèvements et une baisse du niveau de la nappe de Sanon. Cet état de fait est une conséquence de la croissance démographique, des pratiques culturelles anarchiques et des progrès réalisés en termes d'adduction en eau potable qui se combinent pour créer une demande en eau toujours plus importante d'une part et diminuer les zones de recharge d'autre part.

La poussée démographique croissante des habitants de Sanon exerce une pression sur la ressource en eau. En effet la population de plus en plus nombreuse évolue avec l'état de surface engendrant ainsi une réduction des surfaces d'alimentation de la nappe. Cela est probablement dû aux pratiques anarchiques des terres cultivables perturbant l'état naturel du sol, provoquant une imperméabilisation des zones préférentielles de recharge.

D'autre part l'amélioration des conditions de vie amène la population à une modernisation des systèmes d'approvisionnement en eau potable, occasionnant l'accès facile à l'eau potable à moindre coût et la naissance de nouvelles formes d'utilisation de l'eau.

Pour remédier à la diminution de la recharge, il est important de prendre des mesures de préventions contre ces pratiques anarchiques. En effet, pour une bonne gestion de la ressource, les activités agricoles sur les zones préférentielles de recharge doivent être

règlementées. Ces pratiques ne doivent pas impacter négativement sur la capacité d'infiltration dans ces zones. Aussi, la restauration du couvert végétal de l'aquifère, en particulier au niveau des zones préférentielles de recharge sera un atout de durabilité pour la ressource. D'une manière générale, la protection de l'environnement contribuera à une gestion durable de la ressource en eau souterraine en préservant le couvert végétal qui joue un rôle important dans le ruissellement et l'infiltration des quantités d'eau prélevées.

Le modèle ainsi développé renseignera le gestionnaire du territoire sur les types d'activités à effectuer en vue d'occuper les sols, et ainsi de préserver la ressource en eau souterraine.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les recherches documentaires relatives aux contextes géographique, géologique et hydrogéologique ont permis de compiler les données nécessaires à la présentation du site expérimental de Sanon. Par ailleurs, ces données ont permis de préparer les données nécessaires à l'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique et à conduire à la simulation du modèle numérique hydrogéologique. L'estimation de la recharge (11,77 et 118,882 mm/an) a permise de délimiter le site en trois zones de recharge. Celle de la conductivité hydraulique a été résumée en quatre zones de conductivité et les valeurs de coefficient d'emménagement quant à eux, trois zones ont été réparties pour ces valeurs.

Le calage et la validation du modèle en régime permanent pour la période de 1989, montre que les apports sont uniquement assurés par l'infiltration des eaux de pluie, aussi les prélèvements sont insignifiants vis à vis de la recharge. On pourra donc retenir que le modèle est plus sensible à la conductivité hydraulique qu'à la recharge.

Le modèle en régime transitoire a permis d'affiner la distribution spatiale du coefficient d'emménagement de l'aquifère de Sanon. La comparaison des chroniques piézométriques mesurées et simulées a révélé une bonne restitution de la piézométrie par le modèle sauf au niveau des piézomètres S11 ; S12 et S15. Le bilan hydrique issu du calage du régime transitoire a mis en évidence les entrées et les sorties d'eau du modèle. Enfin ces deux scénarios projetés prévoient une croissance continue des prélèvements et une baisse du niveau de la nappe de Sanon. Cet état de fait est une conséquence de la croissance démographique, des pratiques culturales et des progrès réalisés en termes d'adduction en eau potable qui se combinent pour créer une demande en eau toujours plus importante d'une part et diminuer les zones de recharge d'autre part.

En définitive, nous pouvons formuler quelques recommandations en vue d'améliorer le modèle numérique conçu:

- Faire un levé topographique sur tout le bassin versant, cela permettra de reconstituer la surface topographique du site, afin d'avoir un bon nivellement relatif à l'échelle du site.

- Faire de nouveaux forages à l'échelle du bassin afin de disposer d'un réseau de suivi permanent de la nappe d'établir une carte piézométrique plus correct et de reconstituer le bassin hydrogéologique de Sanon.

- Sensibiliser et inciter les cultivateurs à effectuer des pratiques culturales qui ne favorisent pas le ruissellement sur les zones de recharge. Ces pratiques devront permettre de toujours assurer l'alimentation de la nappe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akhy, R. B., Dhia, H. B., Gamaoun, A., Et Amri, R. (1997).** Modélisation de l'impact activités anthropiques sur les nappes phréatiques côtières. Cas de Chott Maria (Sahel tunisien). *La Houille Blanche* 2: 58-65.
- Anderson, M.P., and Woessner, W.W., 1992.** Applied groundwater modelling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press, 381p.
- Bonnet, M., (1982).** Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Documents BRGM, no 34.
- Bousquet, F. (1994).** Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi agents Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger, Université Claude Bernard
- Brassington, F.C. & Younger, P. L. (2010)** A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water and Environment Journal* 24 261–273pp.
- BRGM-AQUATER (1991).** Exploitation des eaux souterraines en socle cristallin et valorisation agricole : pilote expérimental en milieu rural pour des zones soudano-sahéliennes et sahélo-sahariennes. Rapport BRGM- AQUATER R 33576 Octobre 1991. BRGM, Orléans, 4 vol.
- Cabaret, O.,(2012).** Les principes de la modélisation. Document du BRGM Aquitaine, pp 6-8
- CEFIGRE – Université d'Avignon (1990).** L'Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest : Synthèse des connaissances du socle cristallin et cristallophyllien et sédimentaire ancien. 2ème édition, 1992 collections Maîtrise de l'eau. Ministère de la coopération et du développement.
- Compaoré, G. (1997).** Évaluation de la fonction capacitive des altérites, site expérimental de Sanon : socle granito-gneissique sous climat de type soudano-sahélien. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse.
- Compaoré, G., Lachassagne P., Pointet T., Travi Y. (1997).** Evaluation du stock d'eau des altérites: expérimentation sur le site granitique de Sanon (Burkina Faso). *IAHS* (24), pp 37-46.
- Cook, P. (2003).** A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. CSIRO Australia, 115 p
- Costanza, R, et Bernard C P. (1995).** Defining and predicting sustainability. *Ecological economics* 15 (3): 193-196.

- Courtois, N., Lachassagne P., Wyns R., Blanchin R., Bougaire F.D., Some, S., Tapsoba A. (2010).** Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Ground Water* 48, pp. 269 – 283.
- Dassargues, A. (1990).** Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation. *Annales de la Société géologique de Belgique*. pp 60-63
- Davison, C. C., (1985).** URL Drawdown Experiment and comparison with models, TR 375, Atomic Energy of Canada Ltd., Pinawa, Manitoba.
- De Vries, J.J. and Simmers, I. (2002)** Groundwater Recharge: An Overview of Processes and Challenges. *Hydrogeology Journal*, 10, 5-17.
- Dershowitz, W., Wallmann, P. et Kindred, S., (1991).** Discrete fracture modelling for the Stripa site characterization and validation drift inflow predictions, Swedish Nuclear Power and Waste Management Co., Stockholm, SKB Report 91-16.
- Dewande, B., Lachassagne P., Maréchal J.C., Wyns R., Krishnamurthy N.S. (2006).** A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifer controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, pp. 260-284.
- Feuillette, S. (2001).** Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. Thèse de de doctorat, France: université Montpellier II.
- Jaunat, J. (2012).** Caractérisation des écoulements souterrains en milieu fissure par approche couplée hydrologie-géochimique-hydrodynamique. Thèse de doctorat, France: université Michel de Montaigne - bordeaux 3.
- Lyon I, Lyon. Brassington, Fc, et Younger Pl. (2010).** A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water and Environment Journal* 24 (4): 261-273.
- Maréchal, J.C., Dewandel B., Subrahmanyam, K. (2004).** Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40 (11), pp. 1-17.
- Ndiaye, D. (2008).** Description et évaluation de la réalimentation des aquifères de la région de Bobo Dioulasso. Mémoire de fin d'étude master 2iE

- NRC. (1996).** National Research Council (NRC), Rock Fractures and Fluid Flow : Contemporary Understanding and Applications, National. National Academy Press, Washington DC. 551
- Obuobie, E., Diekkruger, B., Agyekum, W. (2012).** Groundwater level monitoring and recharge estimation in the White Volta River basin of Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 71–72, pp. 80–86.
- Office De L'eau De La Réunion. (2012).** Modélisation hydrogéologique des systèmes aquifères du nord de la réunion. Rapport final d'exécution des travaux
- Outoumbé, E. (2014).** Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Mémoire de fin d'études Master, 2iE.
- Pruess, K. et Narasimhan, T. N., (1988).** Numerical modeling of multiphase and nonisothermal flows in fractured media, in Proceedings of the Symposium Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks, Georgia State University
- Sauret, E.S G. (2008).** Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de fin d'étude, Ouagadougou
- Simo, J. (2010).** Élaboration d'un outil cartographique d'aide à la mobilisation des eaux souterraines de la région d'aide à la décision mobilisation des eaux souterraines de la région du sud-ouest du Burkina-Faso. Mémoire pour l'obtention du diplôme de master spécialisée en gestion intégrée des ressources en eau, Ouagadougou (2iE).
- Soro, D., Koita M., Biaou A., Outoumbé E., Koussoube Y., Alle C., Yacouba H., Guerin R., Vouillamoz J. M. (2015).** Structure et géométrie aquifère de socle sous climat sahélien : cas du site expérimental de Sanon (Centre Nord du Burkina Faso). Colloque Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles. Du 11 au 13 Juin 2015 - La Roche-sur-Yon.
- Taylor, R. G, Kouassi A.D et Callint T. (2009).** Groundwater and climate in Africa a review *hydrological sciences journal* 54(4); 655-64
- Toé, G. (2004).** Apports de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance des aquifères de socle, Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, Résonance Magnétique Protonique: application au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université Paris 6.

- Toto, E. A, Lahcen .Z, ET. Abdellatif J. (2009).** Modélisation directe et inverse de l'écoulement souterrain dans les milieux poreux, *Hydrological Sciences Journal*, 54:2, pp 327-337
- Traore, S L. (2013).** Point focal ASAO : Nous avons construit plus de 1100 classes pour le gouvernement du Burkina Faso, article de journal de presse du faso.net du jeudi 14 février 2013
- Vouillamoz, J.M. (2003).** La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive: les sondages par Résonance Magnétique Protonique. Thèse de doctorat, Université Orsay, Paris XI.
- Vouillamoz, J.M., Descloitres M., Toé g. and Legchenko A. (2005).** Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics* 3, pp. 205–213.
- Vouillamoz J.M., Lawson F.M.A., Yalo N., Descloitres M. (2014).** The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. *Journal of Applied Geophysics* 107, pp. 16–24.
- Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legtchenko A., Vairon, J. (2004).** Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175(1), pp. 21-34.
- Yonaba, R.S. (2015).** Cours d'adduction d'eau potable: Calcul des ouvrages constitutifs des réseaux d'AEP. 2iE pp34
- Yonli, H. F. (2016).** Caractérisation des propriétés hydrodynamiques d'un aquifère de socle fracturé: Couplage essais de pompage-Résonance Magnétique des Protons (RMP). Mémoire de fin d'étude, Ouagadougou: (2iE).

SOURCE INTERNET

<http://cip.csag.uct.ac.za/webclient2/datasets/africa-merged-cmip5/www.csag.uct.ac.za>

ANNEXES

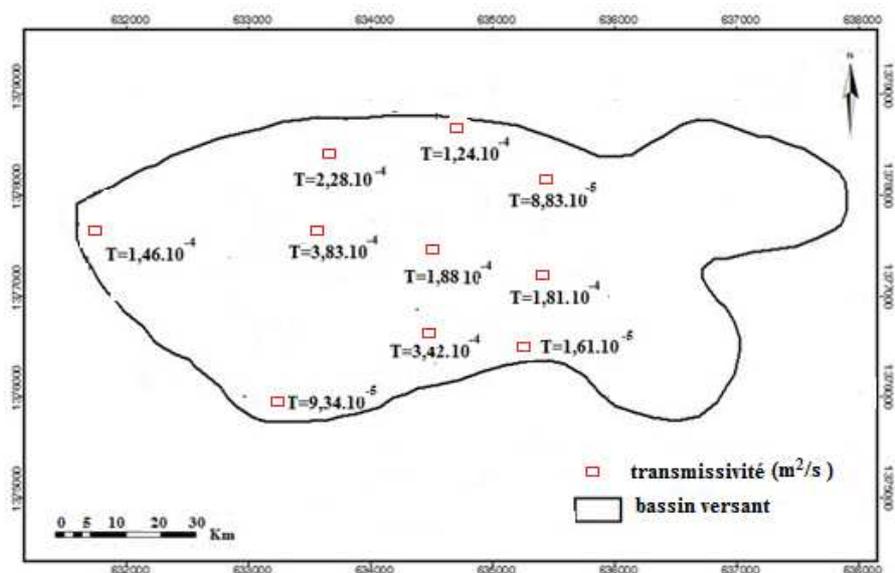
LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1: Table des valeurs du facteur $F(m,\varphi)$	c
ANNEXE 2: Carte de transmissivité	d
ANNEXE 3: Valeurs de recharge mensuelle.....	d
ANNEXE 4: Volume d'eau mensuel pompé pour les 3 forages d'exploitations en m^3 /mois (1989-1991)	e
ANNEXE 5: Conditions aux frontières (1989-1991)	f
ANNEXE 6: Recharge prédictif	g
ANNEXE 7: Piézometrie simulée (scénario 1).....	i

ANNEXE 1:Table des valeurs du facteur F(m,φ)

Lat. N.	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
Lat. S.												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	1.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

ANNEXE 2: Carte de transmissivité



ANNEXE 3: Valeurs de recharge mensuelle

date	zone1 (mm)	zone2 (mm)	zone3 (mm)
févr.-89	0	0	0
mars-89	0	0	0
avr.-89	0	0	0
mai-89	0	0	0
juin-89	0	0	0
juil.-89	0	0	0
août-89	4,030	0,728	0
sept.-89	70,252	15,372	8,02
oct.-89	16,236	9,06	1,189
nov.-89	0	0	0,2
déc.-89	0	0	0
janv.-90	0	0	0
févr.-90	0	0	0
mars-90	0	0	0
avr.-90	0	0	0
mai-90	0	0	0
juin-90	0	0	0
juil.-90	0	0	0
août-90	8,863	1,646	0
sept.-90	88,261	16,403	7,472
oct.-90	10,487	5,873	1,052
nov.-90	0	0	0,03
déc.-90	0	0	0
janv.-91	0	0	0
févr.-91	0	0	0
mars-91	0	0	0

ANNEXE 4: Volume d'eau mensuel pompé pour les 3 forages d'exploitations en m³/mois (1989-1991)

date	forage S4	forage S10	forage S16
mars-89	1033,38	935,75	996,16
avr.-89	2085,40	2461,53	1233,15
mai-89	1971,18	2353,39	1742,80
juin-89	1973,90	2789,52	1647,74
juil.-89	1848,16	2932,25	1502,50
août-89	1313,12	2566,79	1571,98
sept.-89	412,01	2636,42	1575,07
oct.-89	1538,84	3132,87	492,00
nov.-89	1875,17	4044,51	1021,24
déc.-89	1634,46	2913,80	1223,96
janv.-90	1791,26	2639,91	1160,15
févr.-90	1470,71	2590,28	1099,21
mars-90	1268,74	2812,31	1326,77
avr.-90	1390,47	2507,35	1327,59
mai-90	1254,54	2811,22	1133,67
juin-90	1155,20	2829,09	932,45
juil.-90	936,74	2945,96	511,55
août-90	69,47	2912,64	1207,25
sept.-90	183,38	2676,16	673,10
oct.-90	558,43	2517,33	1604,58
nov.-90	161,71	1771,75	1648,07
déc.-90	214,89	2745,39	1337,03
janv.-91	773,77	2475,94	1682,41
févr.-91	1453,12	2498,55	1439,47
mars-91	926,70	2438,47	1610,78

ANNEXE 5: Conditions aux frontières (1989-1991)

Date	charges imposées (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
janv-89	324,13	326,16	328,36	328,2	328,07	328,8	329,32	328,02	326,01	324
févr-89	323,84	325,9	328,09	328,1	327,9	328,6	329,14	327,77	325,7	324
mars-89	323,6	325,7	327,9	327,9	327,67	329	328,8	327,5	325,5	323,5
avr-89	323,4	325,4	327,6	327,8	327,5	327,6	328,35	327,2	325,3	323,29
mai-89	323,01	325,11	327,33	327,7	327,39	327,2	327,9	326,9	324,9	323
juin-89	323,12	325,11	327,35	327,8	327	327,2	327,9	326,95	324,98	323,06
juil-89	322,97	324,94	327,3	327,92	327,4	327,02	327,46	326,67	324,7	324,8
août-89	323,42	325,3	327,55	328,14	328,11	327,83	327,72	326,89	325,03	323,284
sept-89	324,98	326,7	328,97	328,9	328,8	329,13	328,5	327,85	326,32	324,97
oct-89	325,05	326,7	328,97	328,66	328,43	329,02	328,5	328,03	326,56	325
nov-89	324,81	326,54	328,6	328,54	328,25	328,55	328,35	327,96	326,33	324,76
déc-89	324,55	326,25	328,3	328,3	328,06	328,17	328,3	327,8	326,14	324,6
janv-90	324,3	326	328,1	328,28	327,88	327,9	328,14	327,7	326	324,23
févr-90	324	325,8	329,9	328,1	327,6	327,55	328	327,5	325,8	324
mars-90	323,8	325,6	327,7	328	327,36	327,4	327,4	327,25	325,45	323,6
avr-90	323,6	325,3	327,5	328	327,4	327	327,4	327,12	325,35	323,5
mai-90	323,4	323,12	327,27	327,82	327,19	326,9	327,17	326,9	325,1	323
juin-90	323,14	324,9	327,1	327,8	327	326,9	326,9	327	324,8	323
juil-90	323,07	324,8	327	327,8	327,11	327,22	326,9	326,5	324,7	322,9
août-90	323,6	325,18	327,4	328,28	328,35	328,6	327,2	326,6	324,7	323,22
sept-90	324	326,5	328,8	329	328,7	329,8	327,7	327,36	326,1	324,85
oct-90	325,1	326,7	329	328,9	328,5	329,4	328,1	327,85	326,4	324,9
nov-90	324,7	326,5	328,7	328,6	328,2	328,8	328,1	327,9	326,3	324,6
déc-90	324,4	326,2	328,3	328,4	328	328,47	328,06	327,7	326,05	324,26
janv-91	324,12	325,9	328	328,2	327,7	328	328	327,6	325,8	324
févr-91	323,82	325,6	327,7	328	327,6	327,7	327,7	327,45	325,6	324
mars-91	323,86	325,6	327,7	328	327,52	327,27	327,7	327,4	325,6	323,7

ANNEXE 6: Recharge prédictif

années	Recharge (mm)	recharge-20% (mm)
1991	68,60318182	54,88254545
1992	77,43618182	61,94894545
1993	73,15454545	58,52363636
1994	87,86309091	70,29047273
1995	82,05554545	65,64443636
1996	63,64618182	50,91694545
1997	98,39936364	78,71949091
1998	77,65227273	62,12181818
1999	82,393	65,9144
2000	65,79290909	52,63432727
2001	61,99127273	49,59301818
2002	65,41036364	52,32829091
2003	67,87718182	54,30174545
2004	77,77054545	62,21643636
2005	60,38036364	48,30429091
2006	73,288	58,6304
2007	90,31481818	72,25185455
2008	94,71	75,768
2009	90,37936364	72,30349091
2010	79,96645455	63,97316364
2011	83,77363636	67,01890909
2012	87,991	70,3928
2013	81,36354545	65,09083636
2014	69,507	55,6056
2015	67,45590909	53,96472727
2016	94,33009091	75,46407273
2017	113,6147273	90,89178182
2018	65,99545455	52,79636364
2019	103,2596364	82,60770909
2020	68,87372727	55,09898182
2021	81,57709091	65,26167273
2022	101,7396364	81,39170909
2023	77,72136364	62,17709091
2024	95,92690909	76,74152727
2025	79,67736364	63,74189091
2026	96,25563636	77,00450909
2027	89,71472727	71,77178182
2028	83,07363636	66,45890909
2029	86,091	68,8728

2030	81,06354545	64,85083636
------	-------------	-------------

ANNEXE 7: Piézométrie simulée (scénario 1)

