

ETUDE DES NAPPES AQUIFÈRES DU BASSIN DU NIGER AU BURKINA FASO

Auteur : Ouedraogo, Tégawendé Esther

Promoteur(s) : Orban, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5593>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

ETUDE DES NAPPES AQUIFERES DU BASSIN DU NIGER AU BURKINA FASO

OUEDRAOGO Tégewendé Esther

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : Pr Philippe ORBAN

©Copyright : « Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de **l'Université de Liège** et de **l'Université Catholique de Louvain**. * L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULg et/ou de l'UC L ».

"Le présent document n'engage que son auteur"

Auteur du présent document : **OUEDRAOGO Tégawendé Esther**
Contact de l'auteur : **otessthy@gmail.com**



ULg - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCL - Faculté des bioingénieurs

ETUDE DES NAPPES AQUIFERES DU BASSIN DU NIGER AU BURKINA FASO

OUEDRAOGO Tégewendé Esther

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE
L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : Dr Philippe ORBAN

DEDICACE

A mes courageux enfants :

Osvald

Ange

Angéla

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont :

- A l'**ARES** pour avoir m'accordé la bourse d'études,
- Aux Professeurs **Bernard TYCHON** à l'Université de Liège (ULiège) coordonnateur et **Charles BIELDERS** Co-coordonateur à l'Université Catholique de Louvain (UCL) du Master de spécialisation des Sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement, qui n'ont ménagé aucun effort pour la qualité de l'encadrement ;
- Au Professeur **Philippe ORBAN** qui a accepté cette tâche de promoteur de mon travail de fin d'études ;
- Au Docteur **Antoine DENIS**, pour ses réponses et déblocage à mes multiples préoccupations ;
- A nos **professeurs** de l'Université de Liège/Campus d'Arlon et de l'Université Catholique de Louvain ;
- A la **Fondation du Roi Baudoin** qui a accepté financé ma collecte de données complémentaire sur le terrain, pour mon travail de fin d'études
- A mes collègues de la **Direction Générale des Ressources en Eau** et tous les lecteurs de piézomètres qui m'ont accompagnée dans les sorties terrain et les analyses au laboratoire ;
- A mes **collègues du ministère de l'eau et de l'assainissement** en particulier **l'Agence de l'Eau du Gourma**, qui m'a accueilli dans sa structure et m'accordé son appui pour mes sorties terrain ;
- A tous mes camarades de classes, particulièrement à **Firmin, Jean Ferdinand, Moumouni, Rita** pour leur sympathie.
- J'adresse un merci « spécial » à **Apolline BAMBARA**, doctorante à l'Université de Liège pour ses nombreux appuis ;
- Enfin, je remercie très chaleureusement toute ma famille pour leur prière et soutien (mon **Père**, mon **époux**, **mes enfants**, mes **petites sœurs**, mes oncles et tantes) et tous ceux qui m'ont accordé leur soutien.

RESUME

Le bassin du Niger au Burkina Faso occupe la partie Nord et Est du pays. Il couvre une superficie de 83 442Km². Il est l'un bassin défavorisé vis-à-vis des conditions climatiques comparativement au reste du pays et les ressources en eau y sont limitées (MEE, 2001). En plus, son contexte géologique difficile est bâti sur un socle granitique conférant aux aquifères une discontinuité hydraulique.

La volonté du gouvernement burkinabè d'assurer une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau notamment les eaux souterraines a conduit à la mise en place d'un réseau piézométrique optimum en 2008, composé de trente-deux (32) piézomètres pour le suivi quantitatif et qualité de ces eaux.

Ce travail dont le thème a porté sur « Etude des nappes aquifères du bassin du Niger au Burkina Faso » avait pour objectif la contribution à l'amélioration de la connaissance des eaux souterraines du bassin du Niger au Burkina Faso pour leur meilleure gestion.

La méthodologie utilisée s'est basée essentiellement sur des calculs statistiques appliqués aux chroniques de données piézométriques, aux paramètres techniques de forages, aux paramètres physico-chimiques des eaux des piézomètres. Elle a permis de caractériser la tendance actuelle des niveaux piézométriques des nappes, de décrire la productivité des aquifères et de mettre en relief la minéralisation des eaux des nappes.

Les résultats obtenus des analyses montrent trois types de tendance de l'évolution des niveaux piézométriques avec le temps. Ainsi sur dix-huit piézomètres analysés, cinq (06) piézomètres présentent une hausse des niveaux des nappes, sept (07) une baisse et cinq (05) n'ont pas de tendance. En plus l'étude a permis de mettre en exergue une hétérogénéité dans la répartition de la transmissivité. Celle-ci varie entre $9,26.10^{-6}$ à $0,961 \text{ m}^2/\text{s}$ dans les différentes formations géologiques. En relation avec la chimie de l'eau, deux hydro-faciès ont été identifiés : les carbonatés calciques ; les carbonatés calciques et magnésiens.

Les mesures de gestion telles que le suivi périodique rapproché des piézomètres, la densification du réseau piézométriques, l'équipement des piézomètres d'enregistreurs automatiques et une étude approfondie de l'impact des conditions climatiques et des prélèvements, sur les eaux souterraines seraient capitaux pour contribuer à garantir la pérennité de ces eaux.

Mots clés : eau souterraine, piézométrie, hydrodynamique, hydrochimie, bassin du Niger au Burkina Faso.

ABSTRACT

The Niger Basin in Burkina Faso is occupied by the northern and eastern part of the country. It covers an area of 83,442Km². It is one of the most disadvantaged countries in terms of climatic conditions and water resources and available resources (MEE, 2001). In addition, its difficult geological context is based on a granitic basement with aquifers a hydraulic discontinuity.

The government's desire to ensure better knowledge and management of water resources, particularly groundwater, led to the establishment of an optimal network in 2008, consisting of thirty-two (32) piezometers for quantitative monitoring and quality of these waters.

This work did not focus on the theme "Study of aquifers in the Niger Basin in Burkina Faso" as part of the contribution to improving the knowledge of groundwater in the Niger Basin in Burkina Faso.

The methodology used is mainly based on statistical calculations applied to technical data chronicles, drilling techniques, physico-chemical parameters of piezometer water. It makes it possible to characterize the current trend in groundwater levels, to describe the productivity of aquifers and to implement the mineralization of groundwater.

The results obtained from analyzes of three types of trend of the evolution of piezometric levels over time. Thus on eighteen piezometers analyzed, five (06) piezometers with an increase in the levels of the layers, seven (07) a drop and five (05) have no tendency. In addition to the study allows to highlight a heterogeneity in the distribution of transmissivity. This varies between 9.26.10⁻⁶ to 0.961 m² / s in the different geological formations. In relation to water chemistry, two hydro-facies have been identified: calcium carbons; calcium and magnesium carbonates.

Management measures such as the periodic monitoring of piezometer analyzes, the densification of the piezometric network, the equipment of automatic recorders and an in-depth study of the impact of climate conditions and abstractions, on groundwater and capital to contribute to guarantee the sustainability of the waters.

Key words: groundwater, piezometry, hydrodynamics, hydrochemistry, Niger Basin in Burkina Faso.

Table des matières

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	3
1.1. Situation géographique et administrative	3
1.1.1. Localisation du bassin hydrographique du Niger au Burkina Faso.....	3
1.1.2. Situation administrative	3
1.2. Contexte climatique	4
1.2.1. Pluviométrie	4
1.2.2. Zones climatiques	4
1.3. Relief et réseau hydrographique	6
1.3.1. Relief.....	6
1.3.2. Réseau hydrographique.....	6
1.4. Contexte socio-économique.....	7
1.5. Contexte géologique.....	8
1.6. Hydrogéologie	9
1.6.1. Grands ensembles hydrogéologiques du bassin du Niger au Burkina Faso .	9
1.6.2. Systèmes aquifères du bassin du Niger au Burkina Faso	10
1.7. Gestion intégrée des ressources en eau au Burkina Faso.....	11
1.8. Présentation du réseau piézométrique dans le bassin du Niger au Burkina Faso	11
1.8.1. Composition du réseau piézométrique du bassin du Niger au Burkina Faso	11
et objectif de suivi.....	11
1.8.2. Historique du suivi piézométrique au Burkina Faso	12
CHAPITRE 2 :- PIEZOMETRIE.....	13
2.1. Méthode et matériel.....	13
2.1.1. Données piézométriques	13
2.1.2. Données pluviométriques.....	13
2.1.3. Méthode d'analyse.....	14
2.2. Caractéristiques des piézomètres du bassin du Niger	18
2.3. Analyse de l'évolution temporelle des séries piézométriques	18
2.3.1. Régression linéaire et corrélation	19
2.3.2. Analyse des piézomètres des amphiboles	20
2.3.3. Piézomètres du granite.....	25

2.3.4.	Piézomètres des granodiorites	35
2.3.5.	Piézomètres des migmatites	35
2.3.6.	Piézomètres des schistes	37
2.3.7.	Analyse de tendance avec le test de détection de tendance de Mann (1945)-Kendall (1975)	38
CHAPITRE 3 : HYDRODYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN		39
3.1.	Matériels et méthodes	39
3.1.1.	Données sur les paramètres hydrodynamiques	39
3.1.2.	Méthode d'analyse	39
3.2.	Analyse des paramètres hydrodynamiques	40
3.2.1.	Analyse des paramètres hydrodynamiques : transmissivité	40
3.2.2.	Analyse des caractéristiques de forages	42
3.3.	Productivité des aquifères	43
3.3.1.	Relation débits-profondeurs :	43
3.3.2.	Relation débits-épaisseurs d'altération	43
3.3.3.	Relation entre les débits et les niveaux statiques de fin de foration	44
CHAPITRE 4 APERÇU DE LA QUALITE DE L'EAU DES PIEZOMETRES		46
4.1.	Matériels et méthodes	46
4.1.1.	Données	46
4.1.2.	Echantillonnage	46
4.1.3.	Méthode d'analyse	47
4.2.	Caractéristiques des paramètres physico-chimiques	47
4.2.1.	Paramètres physiques :	47
4.2.2.	Evolution des paramètres in situ	47
4.2.3.	Analyse comparative de la situation de 2008 et 2018 des paramètres physiques	49
4.3.	Ions majeurs	51
4.4.	Faciès hydrochimiques	52
4.4.1.	Diagramme de Piper	52
4.4.2.	Diagramme de Schöeller Berkaloff	54
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		55
BIBLIOGRAPHIE		57
ANNEXES		A
RESUME		1

Liste des figures

Figure 1: Position du Bassin du Niger (ABN, 2017)	3
Figure 2: Evolution des isohyètes de 1981-2000 (DGM Burkina, 2001)	5
Figure 3: Position des piézomètres du Bassin du Niger au Burkina Faso en rapport avec les zones pluviométriques (DGM Burkina, 1998, adapté).....	5
Figure 4: Réseau hydrographique du bassin du Niger au Burkina Faso	7
Figure 5: Géologie du bassin du Niger au Burkina Faso	8
Figure 6: Localisation des feuilles de Dori et de Fada (MEE, 1993).....	9
Figure 7: Répartition des piézomètres dans le bassin du Niger	12
Figure 8: Méthode de mesure et calcul de H.....	15
Figure 9: Evolution des niveaux piézométriques à Arbinda (1988-2017)	20
Figure 10: Evolution du piézomètre de Arbinda 1988-2017.....	21
Figure 11: Evolution piézométrique à Tafogo SE6 de 2010-2015.....	22
Figure 12: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE15 de 2009-2017	23
Figure 13: Evolution de la profondeur piézométrique à Gayéri SE5 de 2009-2017.....	23
Figure 14: Evolution du niveau piézométrique à Tin-Arkachen SE4 (2012-2014)	24
Figure 15: Evolution piézométrique à Diapaga F1 (1993-2017)	25
Figure 16: Evolution du niveau piézométrique à Diapaga F2.....	26
Figure 17: Evolution du niveau piézométrique à Gayeri SE5 2008-2017)	26
Figure 18: Evolution du niveau piézométrique à Gayeri SE6 (2009-2017).....	27
Figure 19: Evolution du niveau piézométrique à Kantchari SE3 (2008-2018).....	28
Figure 20: Evolution de la profondeur piézométrique à Kantchari SE1 de 2009-2017.....	29
Figure 21: Evolution piézométrique à Katchari de 2008 à 2017.....	30
Figure 22: Evolution de la profondeur piézométrique à Koadifagou de 2008-2011.....	31
Figure 24: Evolution du niveau piézométrique à Nagaré SE5 de 2009-2016.....	31
Figure 25: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE11 de 2009-2017	32
Figure 26: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE15 de 2008-2017	33
Figure 27: Evolution du niveau piézométrique à Sampelga SE9 de 2009-2017.....	33
Figure 28: Evolution du niveau piézométrique à Sebba SE6 de 2009-2017.....	34
Figure 29: Evolution du niveau piézométrique à Sebba SE2 de 2010-2017.....	35
Figure 30: Evolution du niveau piézométrique à Kondibito F1 de 2007-2017.....	36
Figure 31: Evolution du niveau piézométrique à Sampelga SE4 de 2009-2017.....	37
Figure 32: Représentation des faciès hydrochimiques des eaux des piézomètres	53
Figure 33: Diagramme de Schöeller des eaux des piézomètres	54

Lises des tableaux

Tableau 1: Transmissivité en fonction de la géologie **Erreur ! Signet non défini.**

Annexe :

Annexe 1: Caractéristiques des piézomètres	A
Annexe 2: Récapitulatif des différents coefficients	C
Annexe 3: Répartition des piézomètres en fonction des sites et de la géologie.....	C
Annexe 4: Transmissivité en fonction de la géologie	D
Annexe 5: Caractéristiques des forages	D
Annexe 6: Transmissivité des forages.....	D
Annexe 7: Analyse chimique réalisée en 2018	E
Annexe 8: Analyses chimiques in situ et au laboratoire	E
Annexe 9: Paramètres physiques des piézomètres en 2008	F
Annexe 10: Paramètres physiques des eaux des piézomètres en 2018	F
Annexe 11: Ions majeurs.....	F

Sigle et abréviation

ABN	Autorité du bassin du Niger
BNBF	Bassin du Niger au Burkina Faso
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
MEE	Ministère de l'environnement et de l'eau
RPN	Réseau piézométrique national
UCL	Université Catholique de Louvain
ULG	Université de Liège
TFE	Travail de fin d'études
ARES	Académie de recherche et d'enseignement supérieur
PNGIRE	Plan National pour la gestion intégrée des ressources en eau
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
MEAHA	Ministère de l'eau des aménagements hydrauliques et de l'assainissement
INSD	Institut national de la statistique et de la démographie
PANA	Programme d'action nationale et d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières

INTRODUCTION GENERALE

Pays semi-aride, le Burkina Faso possède des ressources en eau limitées. Deux principales causes expliqueraient cette situation. Il s'agit, premièrement de la pluviosité faible et aléatoire et deuxièmement le contexte géologique difficile (MEE, 2001).

En effet la pluviométrie varie entre 900-1200 mm/an dans la zone climatique sud-soudanienne, entre 600-900mm/an en zone nord-soudanienne et entre 400-600mm/an en zone sahélienne (PANA, 2007) sur une période de deux (02) à cinq (05) mois au cours de l'année et sa répartition est inégale dans le temps et dans l'espace. Quant à la géologie, elle est constituée principalement 80% de formations granitiques (MEE, 2001) qui sont souvent moins favorables à l'infiltration en fonction de l'épaisseur d'altération.

Depuis un certain nombre d'années, les ressources en eau souterraines connaissent un état de dégradation en quantité et en qualité (MEE, 2001 ; Ouandaogo, 2008 ; Tirogo, 2016). Cette situation peut avoir comme risque l'avènement des pénuries d'eau. Les principales raisons de cette dégradation sont liées aux pressions sur les ressources en eau, telles que leur amenuisement dû à la réduction des débits des forages, à la surexploitation et éventuellement les activités anthropiques comme source de pollution.

Par ailleurs le taux d'accroissement de la population va grandissante et est passé de 1,8 en 1960 à 3,42 en 2006 (INSD, 2016). Les conséquences engendrées sont évidemment, l'augmentation des besoins liés aux ressources en eau pour la consommation et le développement des activités socio-économiques ce qui contribuerait à limiter davantage la disponibilité de ces ressources.

Face à ces contraintes majeures qui touchent la disponibilité de la ressource en eau, une bonne connaissance et une bonne gestion de la ressource en eau s'imposent. Pour les eaux souterraines, la bonne connaissance repose sur les études géologiques, hydrologiques, de télédétection, hydrogéologiques, notamment la piézométrie. En réponse des dispositions d'une Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), quatre bassins hydrographiques ont été définis. Il s'agit des bassins de Comoé, du Mouhoun, du Nakanbé et du Niger.

Dans le bassin du Niger au Burkina Faso, les conditions climatiques sont moins favorables au développement des activités socio-économiques (MEE, 2001). Selon la même source, ce bassin est caractérisé par un relief plat avec des zones endoréiques et son climat est marqué par des épisodes pluvieux rares mais, pouvant favoriser l'infiltration. Cependant les aquifères caractéristiques du bassin forment des nappes définies par un caractère discontinu et une frange altérée exposée aux phénomènes de l'évapotranspiration et la sécheresse (MEE, 1993). Sachant que ces phénomènes sont très instables et variables et au regard des différentes pressions

décrites sur les ressources en eau, un suivi des eaux souterraines est capital. La concrétisation de la mise en œuvre de la GIRE a conduit à la mise en place d'un réseau constitué de trente-deux (32) piézomètres repartis en dix-sept (17) sites pour le suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines du bassin du Niger. Par contre, les données issues du suivi sont moins valorisées pour tirer les informations nécessaires aux prises de décisions afin de répondre aux objectifs de gestion du PNGIRE (2016-2030) qui sont entre autres : « contribuer durablement à la satisfaction des besoins en eau douce des usagers et des écosystèmes aquatiques », MEA (2016).

C'est dans cette dynamique que cette étude se réalise afin de dresser l'état sur le comportement des aquifères, sur l'évolution des niveaux des nappes et d'esquisser le caractère hydrochimique des eaux représentées par les piézomètres et forages étudiés dans le bassin du Niger au Burkina Faso.

L'objectif global de ce travail de fin d'étude est donc de contribuer à une meilleure connaissance sur les ressources en eau souterraine du bassin du Niger au Burkina-Faso.

De manière spécifique il s'agit de :

- étudier l'évolution annuelle, interannuelle et la tendance générale des nappes ;
- caractériser l'hydrodynamisme des aquifères ;
- caractériser l'hydrochimie des eaux des piézomètres.

Le présent document est structuré quatre chapitres à savoir :

- chapitre 1 : Présentation de la zone d'étude
- chapitre 2 : Piézométrie
- chapitre 3 : Hydrodynamique des eaux souterraines du bassin du Niger au Burkina Faso,
- chapitre 4 : Aperçu de la qualité de l'eau du bassin du Niger au Burkina Faso

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. Situation géographique et administrative

1.1.1. Localisation du bassin hydrographique du Niger au Burkina Faso

Le bassin du Niger est situé entre les méridiens 11°30' Ouest et 15° Est et entre les 22° et 5° parallèle Nord. Ce bassin draine les eaux de neuf (09) pays que sont le Bénin, le Burkina Faso, le Cameroun, la Cote d'Ivoire, le Mali le Niger, le Nigéria et le Tchad. Au Burkina Faso le bassin du Niger fait partie de quatre bassins hydrographiques (Comoé, Mouhoun, Nakambé et Niger) burkinabés (MEE, 2001). Il couvre une superficie de 83 442 Km², soit 30% du territoire national et 4% du bassin global. Il couvre la partie Est du pays avec une petite portion à l'Ouest. Il est subdivisé en neuf sous-bassins.

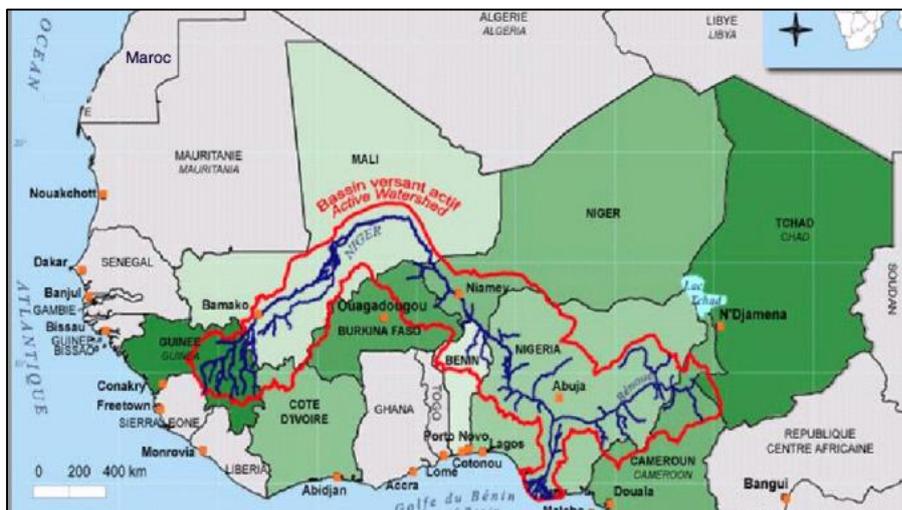


Figure 1: Position du Bassin du Niger (ABN, 2017)

1.1.2. Situation administrative

Le bassin du Niger au Burkina-Faso est couvert par l'espace de compétence de trois agences de l'eau : l'Agence de l'Eau du Gourma, l'Agence de l'Eau du Liptako et l'Agence de l'Eau du Mouhoun (MEAHA, 2013). Les régions couvertes par le bassin sont : totalement la région du Sahel et partiellement les régions du Centre-Est, du Centre-Nord, de l'Est, des Hauts-Bassins et du plateau-Central.

L'Autorité du bassin du Niger dont le siège est à Niamey est la structure qui s'occupe de la gestion transfrontalière des ressources en eau du bassin.

1.2. Contexte climatique

1.2.1. Pluviométrie

Le Burkina Faso est un pays qui est reconnu par son caractère continental et sa position à la lisière du Sahara, qui lui confère une prédisposition à une forte variabilité climatique diurne et annuelle (Sawadogo, 2001). Le climat rencontré dans le bassin du Niger au Burkina Faso est situé dans la zone soudano-sahélien, de type tropical sec à l'instar du climat burkinabé. Il est caractérisé par deux saisons : une saison de pluie qui dure deux (02) à quatre (04) mois (juin-septembre) et une saison sèche, la plus longue, de huit (08) à neuf (09) mois (Octobre-mai). La pluviométrie est disparate et varie entre 350 mm/an au Nord et 1000 mm/an vers le Sud-Ouest.

1.2.2. Zones climatiques

Le climat du bassin du Niger au Burkina Faso connaît les trois zones climatiques selon la classification de la Direction de la Météorologie en 1998. Ces zones climatiques sont : la zone sud-soudanienne (600-1200mm/an), nord-soudanienne, (600-900mm/an) et la zone sahélienne (300-600mm/an) avec dominance nette de la zone sahélienne. Ce type de climat est soumis à des déficits pluvio-hydrométriques qui sont à l'origine d'énormes conséquences sur les productions agricole, pastorale et l'exode rural (Albergel, 1985). Il est sujet à des contraintes naturelles telles que la sécheresse depuis les années 1970 (Albergel, 1985 ; Sawadogo, 2001). On observe aussi un déplacement latitudinal des isohyètes vers le Sud (Albergel, 1985). Ce déplacement se traduit par un glissement des différents isohyètes de 100 à 150 km vers le Sud, causant ainsi la disparition des isohyètes 1300-1400mm/an du sud du pays puis l'apparition des isohyètes 400mm/an dans le nord du pays des années 1961 à 1990. Cette situation a eu pour corollaire le tarissement de certains cours d'eau, la baisse des débits des rivières et des nappes (Sawadogo, 2001). Cependant à partir de 1991 à 2000, une remontée des isohyètes qui pourrait traduire une reprise de la pluviométrie (Ouandaogo, 2008).

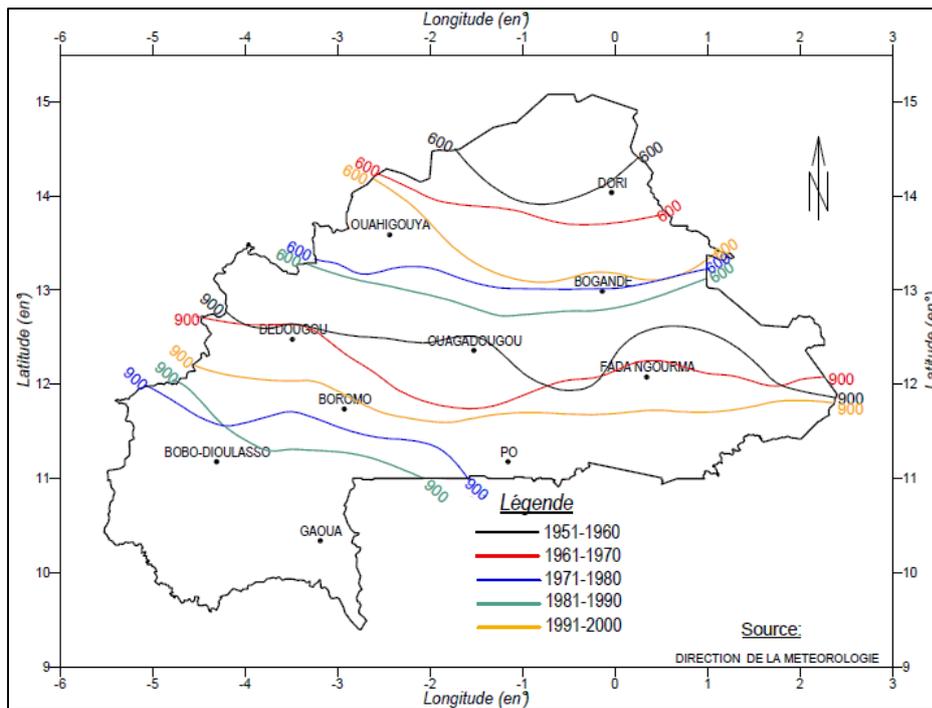


Figure 2: Evolution des isohyètes de 1981-2000 (DGM Burkina, 2001)

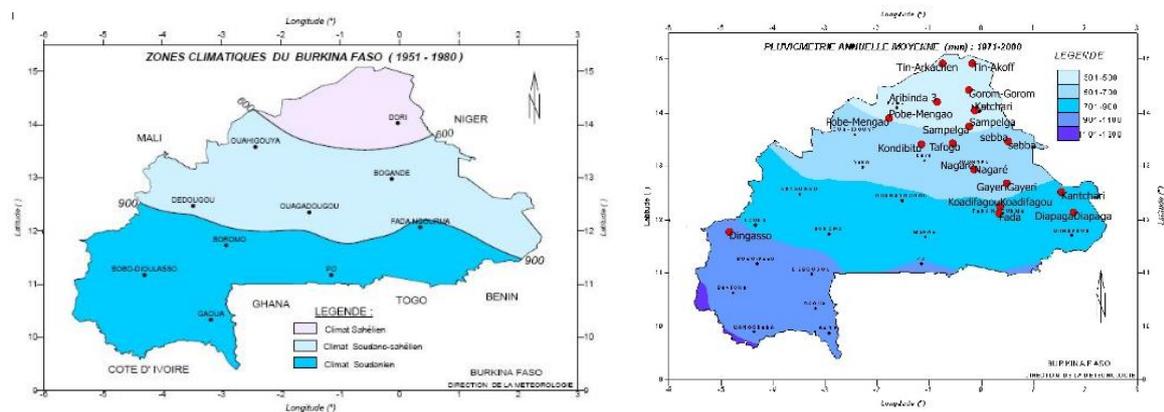


Figure 3: Position des piézomètres du Bassin du Niger au Burkina Faso en rapport avec les zones pluviométriques (DGM Burkina, 1998, adapté)

1.3. Relief et réseau hydrographique

1.3.1. Relief

Le Burkina Faso, est un pays avec un relief relativement plat. Les altitudes moyennes se situent autour de 300m tandis que le point le plus haut, le mont Ténakourou dans le Sud-ouest du pays est de 720 m. La région de l'Est située dans le bassin du Niger au Burkina Faso est marquée par la présence d'un massif gréseux qui constitue la chaîne montagneuse du Gognangou (Oumarou et Marco, 2011). La même source précise que cette chaîne montagneuse d'origine Précambrienne et dont le point culminant est à 365m d'altitude, représente l'un des reliefs rocheux les plus remarquables du pays après le mont Ténékourou.

1.3.2. Réseau hydrographique

La pluviométrie recueillie sur le bassin du Niger au Burkina Faso est drainée par deux types de réseaux hydrographiques (MEE, 2001) : le bassin versant du Banifing d'une superficie de 5 441 km² situé dans la partie Ouest du pays avec pour affluent majeur le Bani et le bassin versant des affluents de la rive droite du fleuve Niger au Nord du pays avec une superficie de 78 001 km². Les cours d'eau qui constituent le bassin du Niger au Burkina Faso, sont temporaires. Les principaux cours d'eau sont : la Sirba, la Tapoa, le Gorouol, la faga. Le débit moyen interannuel est de 24,7 m³/s, pour un apport à la sortie du pays d'une valeur de 865 millions de mètres cubes (MEE, 2001).

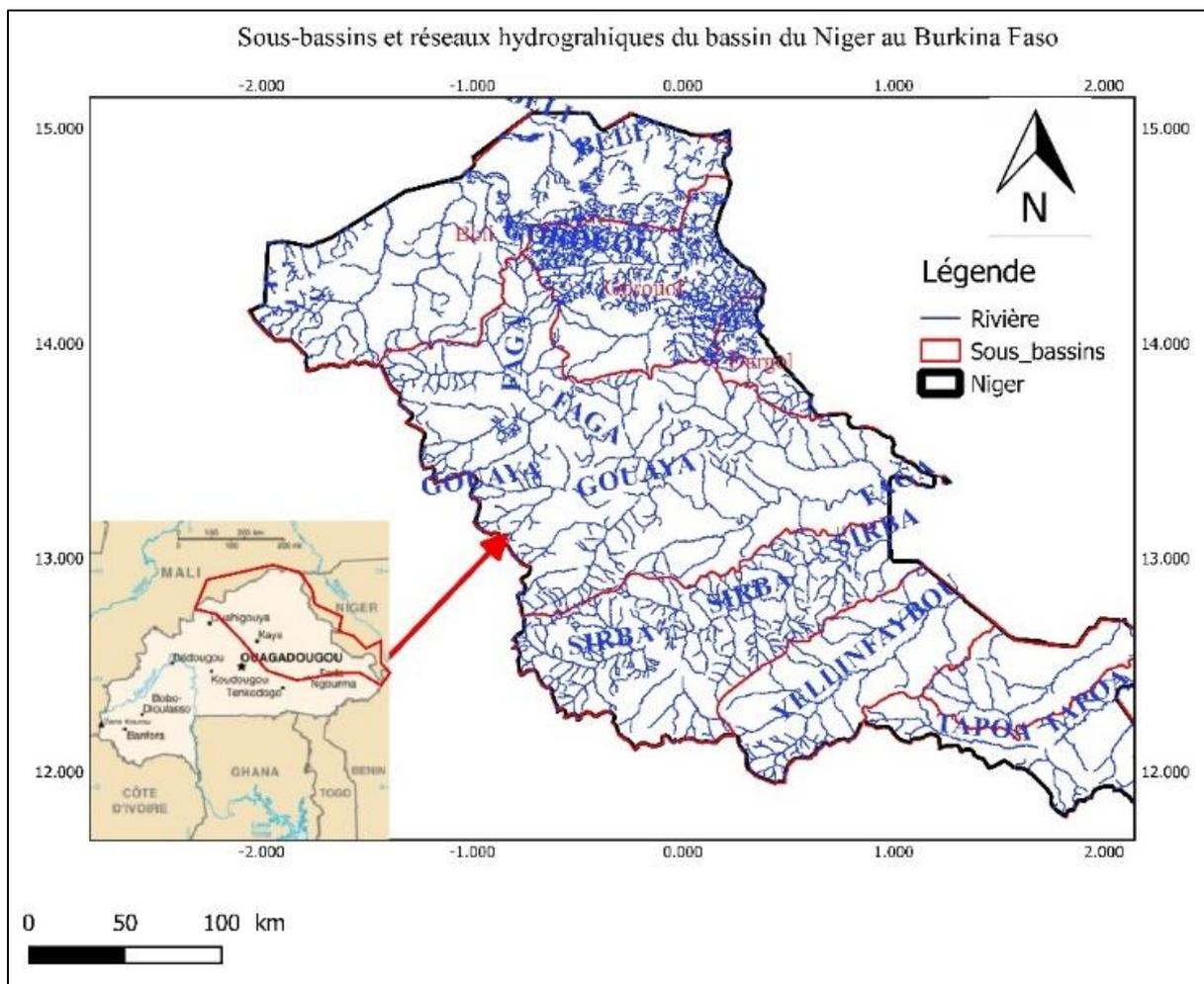


Figure 4: Réseau hydrographique du bassin du Niger au Burkina Faso

1.4. Contexte socio-économique

Le bassin du Niger au Burkina-Faso demeure le bassin le moins nantis des bassins hydrographiques burkinabés (MEE, 2001). La population est majoritairement rurale, jeune et en pleine croissance. L'économie de cette portion du pays repose sur l'agriculture et l'élevage, tandis les ouvrages et les aménagements hydroagricoles sont insuffisants. L'activité d'orpaillage est en pleine expansion et pousse les jeunes à abandonner les activités agricoles pour rejoindre les sites d'orpaillage. On note aussi la présence de mines d'or, une importante mine de manganèse et une ancienne usine d'extraction de phosphate (MEE, 2001) qui contribuent à l'économie du pays. Cette situation demande plus de suivi et de mesure de protection des ressources en eau quand on sait que les activités minières sont souvent source de pollution des eaux vu qu'un cas de pollution a été signalé dans un puits en 2012.

1.5. Contexte géologique

Le Burkina Faso repose majoritairement sur un socle granitique. Nonobstant deux grands ensembles géologiques peuvent être distingués : les formations d'origine sédimentaires et les formations du socle cristallin. Selon le MEE, (1993), la géologie du bassin du Niger au Burkina Faso est constituée par des formations cristallines anciennes Anté-Birimiennes et Birimiennes surmontées en discordance de matériaux sédimentaires, décrite comme suit :

L'Antébirimien ou Précambrien D : formé d'un ensemble très varié du point de vue géologique à base de granitoïdes et des formations métamorphiques. La composition de l'Anté-birimien va des formations de gneiss en passant par des schistes, des méta-grabbo, des migmatites et enfin des granites. Par exemple les schistes affleurent beaucoup plus entre Fada N'Gourma et Diapaga, au Sud-Ouest et Nord-Est du Sahel (Savadogo, 1975).

Le Birrimien ou Précambrien C : formé de formations de types volcaniques, volcano-sédimentaires et des roches plutoniques. Il est composé de volcanites basiques, de tufs, de méta sédiments, de granites et de gabbro.

Le Cambro-Ordovicien ou Précambrien A : forme l'enveloppe sédimentaire du socle et est constitué des formations gréseuses, argilo-gréseuses et calcaro-dolomitiques. Les affleurements des sédiments gréseux se localisent entre Pama et Diapaga (Savadogo, 1975).

Le Tertiaire et le Quaternaire : constitués principalement par les Formations du Continental Terminal (grès blancs, cuirasses latéritiques, une partie de la Formation de Gondo, argilo-sableux) et des alluvions (sables argileux, argiles sableuses, sables grossiers, graviers).

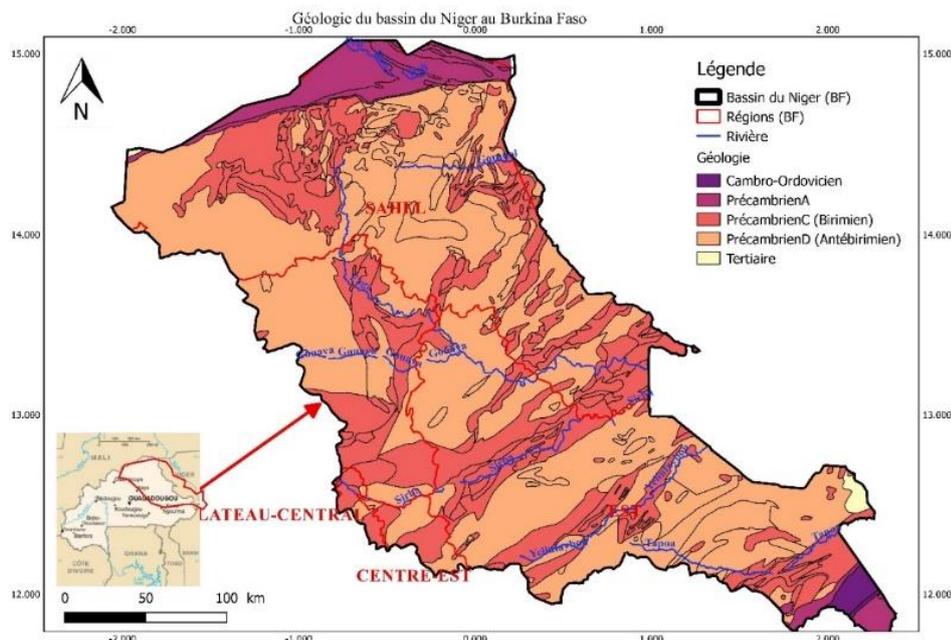


Figure 5: Géologie du bassin du Niger au Burkina Faso

1.6. Hydrogéologie

Le contexte géologique détermine la base de définitions du domaine hydrogéologique. Sur le territoire national suivant les formations géologiques, les deux ensembles hydrogéologiques, formant ainsi les types d'aquifères (MEE, 1998) ont été définis : l'aquifère du sédimentaire et celui du socle cristallin.

Pour réaliser des études hydrogéologiques, les travaux du bilan d'eau 1993 ont découpé le territoire Burkinabé en six (Dori, Fada, Gaoua, Ouagadougou, Ouahigouya et Tenkodogo) feuilles. Dans le cadre de notre travail, nous avons supposé que les feuilles de Dori et de Fada représentent mieux le bassin du Niger au Burkina Faso pour décrire le contexte hydrogéologique.

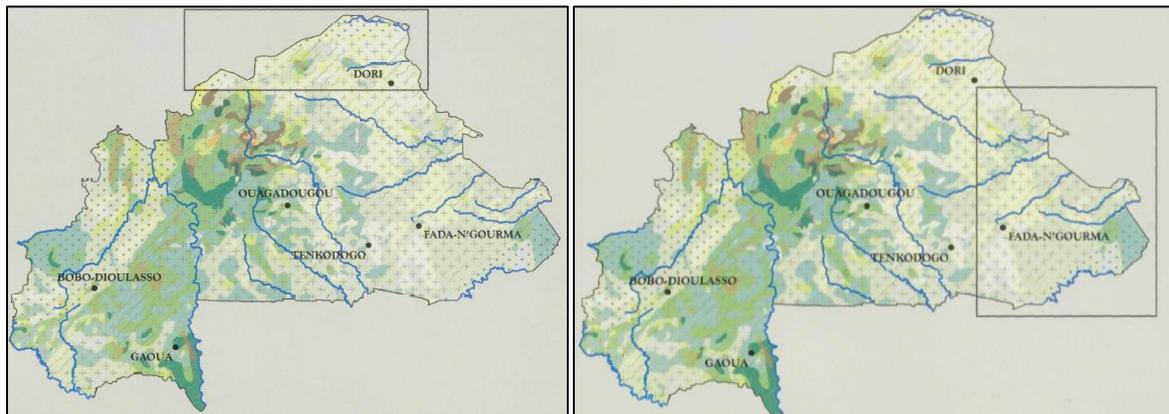


Figure 6: Localisation des feuilles de Dori et de Fada (MEE, 1993)

1.6.1. Grands ensembles hydrogéologiques du bassin du Niger au Burkina Faso

Selon le rapport du bilan eau de 1993, les «Note explicative de la carte hydrogéologique de la feuille de Dori » et «Note explicative de la carte hydrogéologique de la feuille de Fada » décrivent à peu près les mêmes caractéristiques générales des aquifères présentes dans le bassin du Niger au Burkina Faso. Ainsi, cette même source décrit les trois (03) grands ensembles hydrogéologiques, suivant les trois principales unités géologiques (Antébirrimien, Birrimien et sédimentaires) comme suit :

- Un ensemble granito-gneissique ou migmatite (Antébirrimien), plus dominant que les deux autres et caractérisé par une altération dont l'épaisseur ne dépasse pas 20m. On note également la présence d'intercalations d'orthose seule ou associée à du quartz, avec pour avantage l'augmentation de chance d'obtenir des forages positifs.
- Un ensemble schisto-gréseux (Birrimien) : caractérisé par des unités pouvant constituer de grands réservoirs tenant compte de la porosité de fracture du milieu. Cependant la faible perméabilité des matériaux constitutifs de la zone, y limite les ressources en eau souterraine. Néanmoins, on a pu noter la présence d'intercalations détritiques ou de

filons de quartz agissant comme des drains et pouvant offrir l'avantage de contribuer à l'amélioration de la qualité des réservoirs dans les horizons altérés qu'en profondeur.

- Un ensemble sédimentaire. : caractérisé de bas en haut par : des grès et des conglomérats de base, au contact du socle, suivis d'une épaisse série schisteuse à intercalations gréseuses ou calcaireuse. Au niveau de la série gréseuse, des formations carbonatées d'origine récifale se développent de l'Est vers l'Ouest. Ces formations carbonatées sont d'une grande importance hydrogéologique, car si elles sont karstifiées, elles offrent l'avantage d'avoir de réservoirs de qualité et par conséquent la possibilité d'obtenir de forages avec des débits excellents (Piézomètre de Tin-Arkachen SE5 avec un débit de 41 m³/h en fin de foration, forage Christine avec un débit en fin de foration > 100 m³/h). Au-dessus de la série schisteuse se localisent les formations dites de Gondo constituées de grès ferrugineux, de schistes argileux et de d'argiles sableuses. Ces formations sont du Continental Terminal et peuvent s'observer au Sud-est de Pama, Diapaga et de Arli et à l'extrême Nord à la frontière avec le Niger et le Mali.

1.6.2. Systèmes aquifères du bassin du Niger au Burkina Faso

Les feuilles de Dori et de Fada indiquent deux types d'aquifères formés chacun de trois (03) systèmes aquifères :

- L'aquifère du socle : sont distingués de bas en haut, les aquifères du milieu fissuré, les aquifères de la frange altérée et les aquifères des altérites.

Les aquifères des altérites sont généralement en contact hydraulique avec le milieu des roches fracturées sous-jacentes. Ils constituent un système bicouche avec les aquifères de la frange altérée (captive) et le milieu fissuré (conducteur). Les aquifères de la frange altérée ont été décrits comme un milieu à porosité d'interstice. Quant aux aquifères du milieu fissuré, ils sont qualifiés de milieux hétérogènes où les caractéristiques hydrauliques sont déterminées par la géométrie et la densité des fissures qui se ferment progressivement en profondeur. La continuité hydraulique n'a pas été bien déterminée. Néanmoins, on peut retenir que la zone altérée à porosité d'interstice peut assurer une continuité hydraulique, tandis qu'en milieu fissuré, la continuité dépend du degré de connexion entre les fissures. Les aquifères du bassin du Niger au Burkina Faso peuvent être en général qualifiés de type discontinu, caractérisé par le tarissement de la frange altérée.

- Les aquifères du sédimentaire : se comportent à peu près de la même manière que les aquifères du socle, c'est-à-dire du bas en haut, on y trouve les aquifères du milieu fissuré souvent karstifié, les aquifères de la frange altérée et les aquifères des altérites.

En somme les régions bassin du Niger au Burkina Faso (Sahel, Est) sont par excellence qualifiées de zones à discontinuité hydraulique.

1.7. Gestion intégrée des ressources en eau au Burkina Faso

La Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) occupe une place importante au Burkina Faso. La mise en œuvre concrète de la GIRE a commencé en 2003 avec le Plan d'action pour la gestion intégrée des ressources en eau (PAGIRE) qui a connu sa fin en 2015. Il avait pour objectif global « contribution à la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau du Burkina, adapter au contexte national, conformes aux orientations définies par le gouvernement Burkinabé et respectant les principes reconnus au plan international en matière de gestion durable et écologiquement rationnelle des ressources en eau ». Une nouvelle phase est en cours de mise en œuvre et pour objectif « contribuer durablement à la satisfaction des besoins en eau douce, et des écosystèmes aquatiques ». L'une des actions importantes de la gestion des eaux souterraines est « l'optimisation » du réseau piézométrique.

1.8. Présentation du réseau piézométrique dans le bassin du Niger au Burkina Faso

1.8.1. Composition du réseau piézométrique du bassin du Niger au Burkina Faso et objectif de suivi

Dans le bassin du Niger au Burkina Faso, le réseau piézométrique national est constitué de nos jours de 32 trente-deux (32) piézomètres dont vingt-sept (27) sont fonctionnels. Ces 32 piézomètres sont répartis en dix-sept sites avec un (01) à deux (02) piézomètres et parfois trois (03) par sites. Ces piézomètres ont été mis en place avec pour objectif principal le suivi de l'évolution naturelle de la nappe.

Le paramètre mesuré est la profondeur de l'eau dans la nappe qui correspond au niveau naturellement atteint par l'eau dans le piézomètre. Il est à noter que le site de Dingasso n'est pas représenté ici

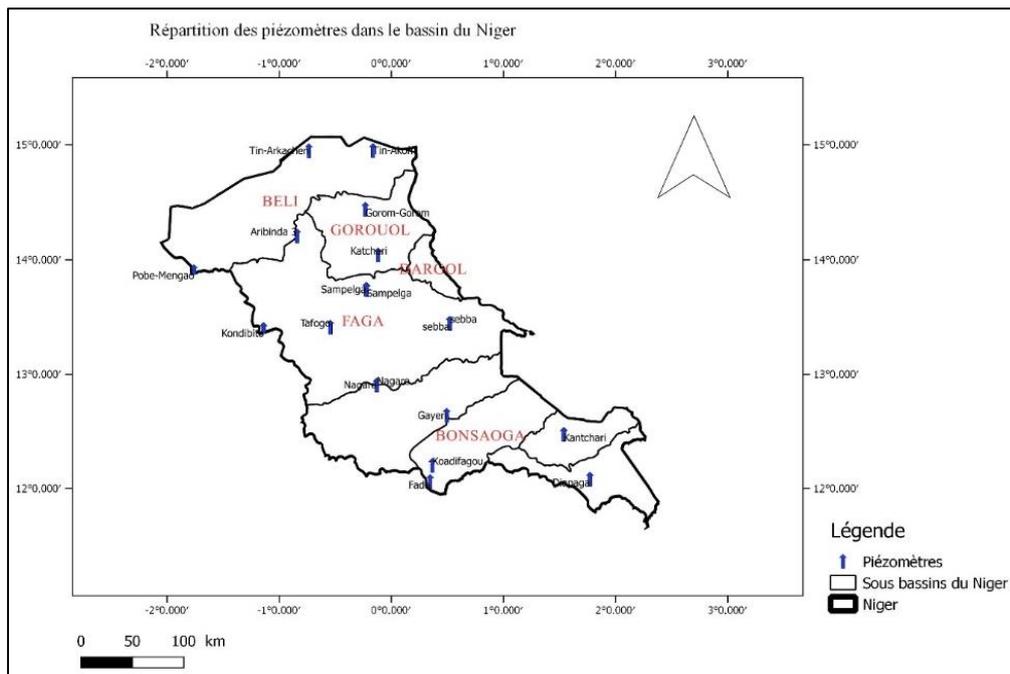


Figure 7: Répartition des piézomètres dans le bassin du Niger

1.8.2. Historique du suivi piézométrique au Burkina Faso

L'importance du suivi des eaux souterraines est née avec la mise œuvre des projets et programmes d'hydraulique. Le tout premier piézomètre du pays fût réalisé en 1978.

En 1992, le projet bilan eau a permis la mise en place du premier Réseau National Primaire (RPN) dont la gestion était assurée par le ministère en charge de l'eau. Trois critères ont guidé la conception de ce réseau : la géologie, la géomorphologie et le climat du milieu. Ainsi septante huit (78) piézomètres ont pu constituer ce réseau.

En 1996, une étude commanditée par le ministère en charge de l'eau a permis l'optimisation du réseau avec l'actualisation des données préexistantes.

En 2004, le processus d'optimisation a conduit l'ajout de onze (11) du réseau secondaire actualisant de nouveau le nombre à septante neuf (79),

En 2008, dans le cadre de la mise œuvre du plan d'Action pour la gestion intégrée des ressources en eau, un plan de renforcement du réseau piézométrique a été élaboré et mis en œuvre. Cette mise en œuvre a permis la réalisation de nouveaux piézomètres portant le RPN à cent vingt-huit (128) piézomètres.

Par suite à de nombreux actes d'incivisme sur les ouvrages et le vieillissement du réseau, des travaux de réhabilitation et de nivellement ont été effectués en 2014. Ce qui a permis de disposer nonante quatre (94) piézomètres répartis en cinquante-deux (52) sites. Parmi ces piézomètres, trente-deux (32) occupent le bassin du Niger et se répartissent en dix-sept (17) sites.

CHAPITRE 2 :- PIEZOMETRIE

2.1. Méthode et matériel

2.1.1. Données piézométriques

Les données utilisées dans le cadre de ce travail ont été obtenues auprès de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso. Elles sont constituées principalement des chroniques piézométriques de trente-deux (32) piézomètres. Ces piézomètres font partie du Réseau Piézométrique National (RPN) de suivi des niveaux de fluctuation naturelle des nappes du pays. Le suivi s'effectue à partir des relevés des niveaux d'eau dans les piézomètres avec une sonde électrique manuelle. Des lecteurs commis à cette tâche devraient faire des relevés de manière continue avec une fréquence d'au moins deux (02) mesures par semaine, conformément aux recommandations de l'étude d'optimisation du réseau piézométrique en 2008. Compte tenu de certaines difficultés (logistiques, personnel, ressources financières, accessibilité des sites), cette fréquence n'est pas respectée. Toute chose qui explique l'absence de certaines données.

Les données de ces chroniques ont été utilisées pour l'évaluation des variations des niveaux piézométriques afin de dégager la tendance actuelle de l'évolution des nappes du bassin du Niger au Burkina Faso.

Les fiches techniques de forages ont été également consultées afin de reconstituer les caractéristiques des piézomètres et de mieux connaître les ouvrages.

2.1.2. Données pluviométriques

N'ayant pas pu obtenir les données climatiques auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso, nous avons téléchargé les données sur les précipitations dans le site <https://fr.tutiempo.net>. Ce site a permis de disposer des données sur les précipitations de 1985 à 2008, sur l'intervalle de temps correspondant à la période des chroniques piézométriques du bassin du Niger au Burkina Faso. La pluie étant un principal élément du cycle de l'eau qui permet l'alimentation des nappes, ces données ont été alors utiles pour mettre en exergue l'influence de la pluviométrie sur la variation des niveaux piézométriques.

2.1.3. Méthode d'analyse

Pour l'analyse des variations des niveaux piézométriques, il est nécessaire de disposer des données piézométriques (niveaux piézométriques) (BRGM, 2009) et climatiques (pluie) sur une période assez longue. Ainsi les données piézométriques ont une durée qui varie entre vingt (20) et trente (30) ans. De même, les données climatiques que nous avons téléchargées couvrent également cette période. A travers les données des chroniques piézométriques, on a pu éditer des graphiques à double entrée avec en ordonnées les pluies mensuelles et les niveaux piézométriques et en abscisses les dates des différentes mesures. Cette méthode a permis de montrer la variation des piézométriques et l'influence de la pluviométrie. Plusieurs étapes ont été nécessaires pour l'analyse de la piézométrie.

2.1.3.1. Sélection des piézomètres

Le site Dingansso constitué de deux piézomètres a d'abord été écarté en raison de son éloignement avec les autres sites. Cet éloignement pouvant rendre difficile la corrélation spatiale entre les données des piézomètres, nous avons trouvé nécessaire d'écarter ce site.

Sur les trente-deux (32) piézomètres, sept (07) ne possèdent pas d'altitude de la tête de piézomètre. Ils sont concernés par les piézomètres plus anciens. Vu l'importance de la longueur des chroniques piézométriques, nous avons opté de maintenir ces piézomètres tout en basant notre analyse sur les profondeurs de l'eau dans les piézomètres. C'est finalement dix-huit piézomètres qui représentent mieux le bassin qui sera analysés

2.1.3.2. Sélection des stations météorologiques

Le site <https://fr.tutiempo.net> permet d'avoir des données sur un nombre limité de station météorologiques. Pour cela nous avons procédé par chercher les stations météorologiques qui correspondraient au mieux aux sites de nos différents piézomètres. Ainsi nous avons reparti les piézomètres en fonction des différentes zones climatiques. Ensuite nous avons cherché la station météorologique qui couvre mieux chaque zone climatique et nous avons associé les piézomètres de chaque zone climatique aux données climatiques de la station météorologique la mieux adaptée à la zone climatique.

2.1.3.3. Calcul de la hauteur piézométrique :

Les relevés piézométriques issus des chroniques piézométriques concernent la profondeur de l'eau dans les piézomètres. Tous les piézomètres étant nivelés, l'altitude de la tête du piézomètre est connue pour tous les piézomètres. Pour trouver la hauteur piézométrique, nous avons fait la différence entre l'altitude de la tête du piézomètre et la profondeur de l'eau dans le piézomètre. Comme le niveau de l'eau évolue dans le piézomètre avec le temps, la hauteur piézométrique est calculée en fonction du niveau atteint par l'eau dans le piézomètre et en fonction de la date des relevés piézométriques. La formule suivante a été utilisée pour calculer les niveaux piézométriques :

$$H = Z - h_i$$

Avec H : la hauteur piézométrique en mètre

Z : l'altitude de la tête de forage en mètre et h_i : la profondeur de l'eau dans le piézomètre au temps i en mètre. L'illustration est faite dans la figure ci-après

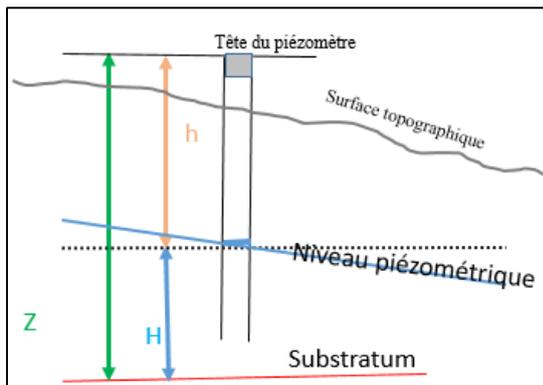


Figure 8: Méthode de mesure et calcul de H

Cependant certains piézomètres ne disposent pas d'altitude et les profondeurs de l'eau dans ces piézomètres ont été considérées

2.1.3.4. Calcul des moyennes des hauteurs piézométriques

Les données piézométriques étant des mesures journalières, les moyennes mensuelles des hauteurs piézométriques ont été calculées pour être en cohérence avec les données climatiques par rapport à la période d'analyse. Aussi, cette étape a permis de réduire la quantité du jet de données. C'est ainsi que nous avons pu suivre l'évolution des niveaux piézométriques et la pluviométrie dans le temps à travers les graphiques élaborés.

2.1.3.5. Calcul des pluies mensuelles

Les données sur les précipitations que nous avons téléchargées sur le site Tutiempo, sont aussi des données journalières. Il convient de noter que ces données n'ont pas été enregistrées à la même date que les données piézométriques : d'où le calcul des différents totaux mensuels afin de respecter le même pas de temps au niveau des données piézométriques et des données pluviométriques.

2.1.3.6. Evaluation de l'évolution piézométrique

Le logiciel Microsoft Excel a été utilisé pour l'élaboration des graphiques. Avec les moyennes mensuelles des niveaux piézométriques et des pluies calculées, les valeurs ont été portées sur un graphique à double entrée : des histogrammes en ordre inverse pour les pluies mensuelles et des courbes avec des marques pour les moyennes mensuelles des hauteurs piézométriques. Aux courbes des moyennes mensuelles des hauteurs piézométriques, des droites de tendance en régression linéaire ou droites des moindres carrés ont été ajoutées, de même que l'équation de droite et le coefficient de détermination R^2 .

Selon les méthodes statistiques, le coefficient de corrélation r et le coefficient de détermination R^2 sont utilisés pour exprimer respectivement la relation entre deux variables indépendantes et la part de variabilité entre ces variables.

r est calculé avec la formule suivante :

$$r = \frac{cov(x, y)}{\sigma(x)\sigma(y)} = \frac{\sum x_i y_i - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2} \sqrt{\sum y_i^2 - n\bar{y}^2}} \text{ ou } R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Avec $cov(x, y)$ la covariance des variables x et y et $\sigma(x)$, $\sigma(y)$ leurs écarts types, où x et y expriment le temps et les hauteurs piézométriques.

r élevé au carré donne le coefficient de détermination R^2 qui doit être compris entre 0 et 1. La classification des gammes de corrélation de Carr (1995) a été utilisée par Aguilar et al (2006) pour l'interprétation des valeurs de r comme suit :

Si r est compris entre -0,1 et 0,1, la relation peut être considérée comme nulle ;

Si r est compris entre 0,1 et 0,5, la relation est médiocre

Si r est compris entre 0,5 et 0,8 la relation est modérée

Si r est 0,8 et 1 la relation est bonne

$r = 1$ la relation est parfaite
 r peut être positif ou négatif

2.1.3.7. Evaluation des tendances avec le test de Mann Kendall (test-MK)

L'analyse des tendances avec une régression linéaire simple doit suivre une distribution normale (Anguilar et al., 2006) et doit être complétée par un test statistique. Le Test de Mann (1945) et Kendall (1975) est un test non paramétrique robuste qui permet la détection de la présence de tendances monotones (Anguilar et al., 2006 ; Tiroga et al., 2016). Ces auteurs ont utilisé ce test pour analyser les tendances avec des séries chronologiques hydrologiques et hydrogéologiques. Ils ont également montré l'importance du test de Mann-Kendall qui ne pose pas la condition nécessaire de la normalité de la distribution.

Pour ce test, deux hypothèses de base sont considérées : l'hypothèse H_0 qui traduit une absence de tendance dans la série de données temporelles, et l'hypothèse alternative H_A qui indique l'existence d'une tendance. Avec H_A , trois (03) cas peuvent se présenter : H_A nulle, positive ou négative.

Les séries de données piézométriques étant saisonnières, le test saisonnier de Kendall a été utilisé. Le module XLSTAT d' Excel a permis d'effectuer les différents calculs : les calculs sont basés sur les considérations suivantes : pour une série de données à n éléments où x_i et x_j sont deux valeurs qui se suivent, on obtient le test statistique S par :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_j - x_i)$$

$$\text{Où } \text{signe}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

Quant à la variance σ^2 de S , elle est donnée par l'équation :

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Avec t_p le nombre de liens pour la $p^{\text{ième}}$ valeur et q le nombre de valeurs liées.

Le calcul en statistique normalisée donne :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\rho} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\rho} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Le principe est basé sur le fait que la statistique S est très liée au coefficient de corrélation τ , à travers la formule suivante :

$$\tau = \frac{S}{\frac{n(n-1)}{2}}$$

T permet de mesurer la corrélation entre le temps et la variable mesurée.

Les valeurs négatives de Z indiquent une tendance à la baisse et les valeurs positives, une tendance à la hausse.

H_0 est rejeté, et une tendance sera détectée si $|Z| > 1,96$ (loi normale réduite pour les p-value de 0,05 et considérée comme le seuil de significativité du test).

Les valeurs proches de 1, du coefficient de corrélation τ donnent une bonne corrélation entre le temps et la variable étudiée.

2.2. Caractéristiques des piézomètres du bassin du Niger

Les caractéristiques des forages ont été décrites sur la base des fiches techniques des dossiers de forages obtenues auprès de la Direction des études et de l'information sur l'eau.

L'ensemble des piézomètres captent sept (07) différentes formations géologiques des amphibolites, des roches calcaires, du granite, des granodiorites, des grès et des migmatites. Le plus grand nombre de piézomètres est observé dans les formations granitiques.

Les données synthétiques des caractéristiques ainsi que leur répartition par formation géologique et sont consignées dans l'annexe 2

Il est à noter que la géologie d'un piézomètre à Kondibito n'a pu être déterminée

2.3. Analyse de l'évolution temporelle des séries piézométriques

Pour une meilleure connaissance de la ressource en eau souterraine, un suivi régulier des niveaux piézométriques est nécessaire. Le suivi régulier présente l'avantage de disposer des données sur de longues périodes sur les niveaux piézométriques. Mais encore il faudrait que les données issues du suivi aient leur véritable valorisation. Valoriser les données revient à les exploiter convenablement pour tirer les informations qu'elles contiennent. C'est de cette manière qu'il a été possible d'évaluer l'évolution de ces potentiels dans le temps. Pour réaliser

cela, les données des chroniques piézométriques ont été utilisées pour mettre en relation la variation des niveaux piézométriques avec le temps. Le réseau piézométrique national au Bassin du Niger au Burkina Faso (BNBF) actuel étant composé de piézomètres d'âge différents et captant dans différentes formations géologiques, l'évolution des niveaux piézométriques des nappes a été analysée selon chaque site.

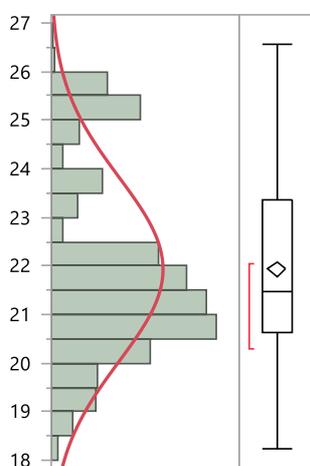
2.3.1. Régression linéaire et corrélation

La régression linéaire est un modèle mathématique qui est généralement utilisée pour la résolution des préoccupations statistiques. Elle peut être facilement appliquée sur Excel où elle permet d'indiquer la relation entre deux variables avec les coefficients de corrélation r et le degré de signification de la relation avec le coefficient de détermination R^2 entre ces deux variables. Le coefficient de corrélation r (donne le degré de relation entre deux variables) et le coefficient de détermination R^2 (qui donne la probabilité des variables qui expliqueraient cette relation) peuvent être obtenus sur la courbe de régression linéaire. L'application de la régression linéaire pour la détermination de r et R^2 demande de remplir une condition préalable qui est la normalité de la distribution de la série de données. Dans ce cas présent, sur les 18 piézomètres dont l'analyse sur l'évolution des niveaux piézométriques a été faite, les données d'aucun piézomètre ne suivent une loi normale.

Ainsi, les courbes de tendance jointes aux courbes de variation des niveaux piézométriques ainsi que les coefficients ne pourront être considérés pour l'explication de l'évolution des niveaux piézométriques qu'après un test statistique. Dans le présent cas, nous appliquerons le test de Mann-Kendall que nous verrons plus tard dans un autre paragraphe.

Exemple du test de normalité réalisé à avec le piézomètre de Diapaga

Mesure(m)



Estimations des coefficients				
Type	Coefficient	Estimation	Inférieur à 95 %	Supérieur à 95 %
Position	μ	21,92986	21,774406	22,085314
Dispersion	σ	1,8929126	1,7892114	2,0094707

-2 log(vraisemblance) = 2352,27117326453

Test du bon ajustement
 Test W de Shapiro-Wilk

W	Prob.<W
0,927325	<,0001*

Remarque : H_0 = les données proviennent de la distribution Normale. Les petites p-values rejettent H_0 .

Avec le test de Shapiro Wilk on obtient un p-value $< 0,05$ dont on rejette l'hypothèse pour laquelle la distribution est normale.

Le test de Shapiro Wilk donne la même valeur de p-valeur ($< 0,0001$) pour tous les piézomètres analysés. Sur base de ce test et sur les données analysées, l'évolution des niveaux piézométriques dans le temps peut donc être qualifiée de non linéaire.

2.3.2. Analyse des piézomètres des amphiboles

- Le piézomètre de Arbinda :

Le piézomètre de Arbinda présente des lacunes dans les données des années 1988 à 2007. Cette situation fait que la courbe de variation des niveaux piézométriques ne présente pas une allure bien interprétable. C'est à partir de 2007 que la forme sinusoidale de la courbe est bien visible. Néanmoins une variation saisonnière des niveaux piézométriques est visible dans le graphique ci-dessous :

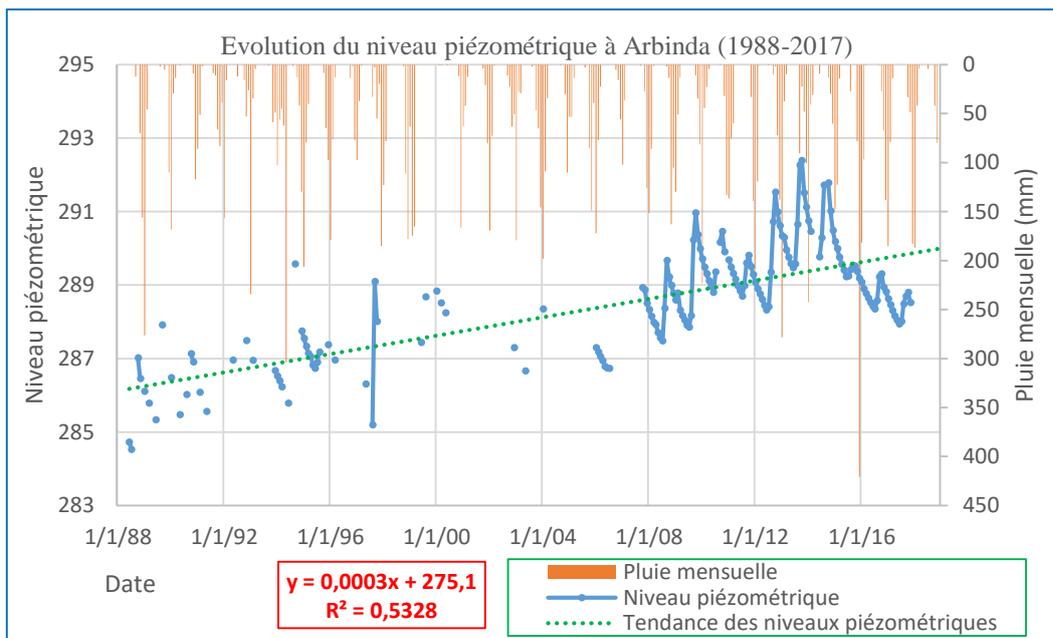


Figure 9: Evolution des niveaux piézométriques à Arbinda (1988-2017)

L'allure de la figure 9 laisse voir des points moins denses et relativement dispersés pour la période de 1988-2007 témoignant une insuffisance dans le suivi au cours de cette période.

Si nous reprenons le graphique à partir de la période de 2008 on obtient le graphique suivant :

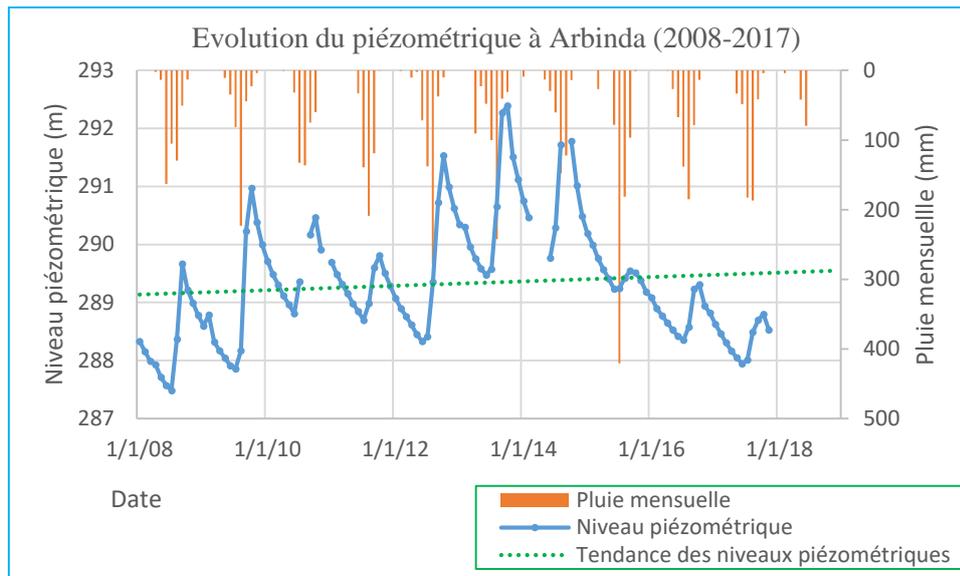


Figure 10: Evolution du piézomètre de Arbinda 1988-2017

La courbe d'évolution des niveaux piézométriques présente une forme sinusoïdale montrant des pics saisonniers et des variations de 2008-2017. L'observation des Figure 9 et Figure 10, montre que c'est dans les périodes des pluies que les niveaux piézométriques remontent. Il apparait une nette relation entre la pluviométrie et les variations des niveaux piézométriques. Si les pluies baissent les niveaux piézométriques baissent également. Le niveau piézométrique le plus faible a été observé en juillet 1988 (période d'installation de la saison pluvieuse) avec une cote de 284,53 m, tandis la plus grande cote se montre en Septembre 2013 (correspondant à la période de fin de saison pluvieuse) correspondant à un niveau de 292,86m. La courbe de régression linéaire (ou droite des moindres carrés) montre une tendance générale à la hausse des niveaux piézométriques. Les coefficients de détermination R^2 égal à 0,53 et r égal 0,7 indiquent qu'il existe une relation modérée de la variabilité des niveaux piézométriques dans le temps et 53% des niveaux piézométriques mesurés expliqueraient cette variabilité sur la période de 1988 à 2017.

- Le piézomètre de Taffogo

Le piézomètre SE6 à Taffogo créé en 2008 dispose des données de la période de 2010 à 2015. C'est un piézomètre bien fonctionnel mais pour des raisons de mise à jour, les données s'arrêtent en 2015. Les variations temporelles des niveaux piézométriques sont représentées par le graphique ci-dessous :

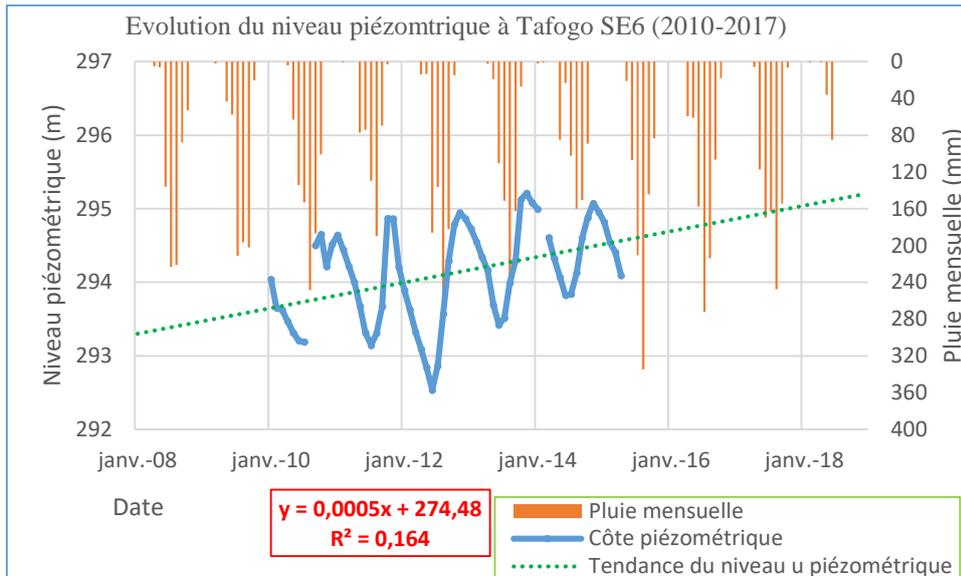


Figure 11: Evolution piézométrique à Tafogo SE6 de 2010-2015

A Taffogo la forme sinusoïdale de la courbe de variation des niveaux piézométrique se dessine bien, et présente une variation saisonnière des niveaux piézométriques sous l'influence de la pluviométrie comme illustrée dans la Figure 11. Le plus faible niveau de la nappe est à une côte de 291,97 m en juillet 2012 tandis que le plus haut niveau est à 295,34 en novembre 2013. L'écart entre ces deux valeurs extrêmes est de 3,37 m et la tendance générale est à la hausse. Cependant le coefficient r égale 0,4 traduit une relation médiocre de la variabilité des niveaux piézométriques dans le temps. R^2 est égal 0,16 et qui montre que 16% des niveaux piézométriques mesurés sont concernés par cette variabilité.

- Le piézomètre de Pobé-Mengao SE15

Le suivi de ce piézomètre a un début récent, mais a été moins régulier sur toute la période, traduisant des données entre coupées à certaines périodes. N'ayant pas pu disposer de l'altitude de ce piézomètre, ce sont les profondeurs de l'eau dans le piézomètre qui ont été plutôt analysées. L'évolution des niveaux de la nappe à ce piézomètre présente l'allure illustrée dans la figure ci-dessous.

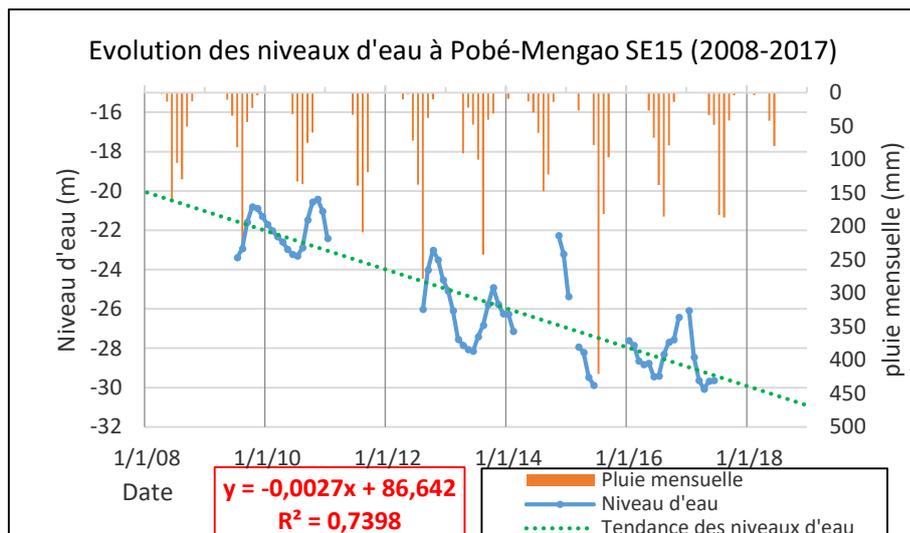


Figure 12: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE15 de 2009-2017

La Figure 12 présente une variation interannuelle, marquée par une forme sinusoïdale mais entrecoupée par le manque de données à certaines périodes. La variation saisonnière s'opère de juillet à août et est sans doute liée à la rupture de pluie Ouandaogo, (2008). Cette variation se caractérise par l'allure descendante de la courbe traduisant une baisse de la nappe et une allure croissante indiquant la remontée du niveau de l'eau dans le piézométrique. Ainsi la plus grande profondeur de l'eau a été enregistrée en 2017 à une valeur de 30 m et la plus faible profondeur à 20,11 m en septembre 2010. La tendance est à la baisse. Les coefficients r et R^2 sont respectivement 0,86 et 0,74. Il y a donc une bonne relation entre la variabilité des niveaux piézométriques et le temps et 74% des niveaux piézométriques mesurés traduisent cette variabilité.

- Le piézomètre de Gayeri SE5

Gayeri fait partie des piézomètres où le suivi connaît des lacunes. Ainsi le tracé de l'évolution de la profondeur piézométrique ne donne pas une allure interprétable.

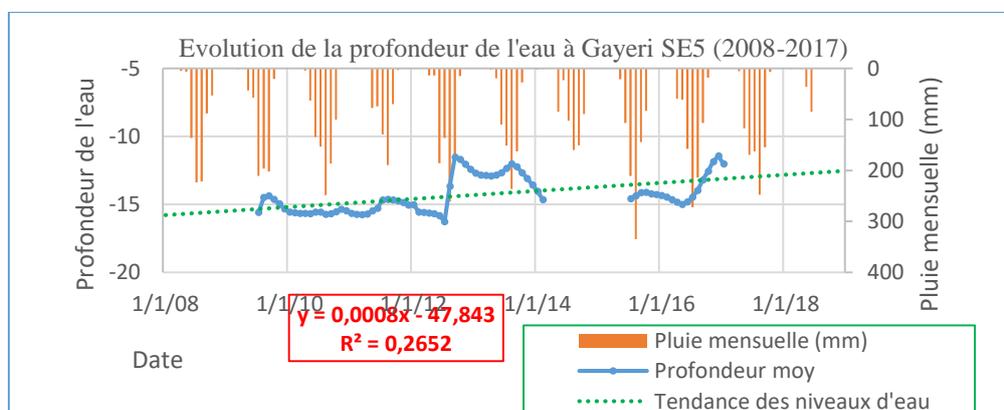


Figure 13: Evolution de la profondeur piézométrique à Gayéri SE5 de 2009-2017

Sur la Figure 13 on observe néanmoins que la courbe de variation des profondeurs de l'eau sur la période de 2009 -2017 indique des allures croissante et décroissante. Ce qui pourrait expliquer une variation saisonnière et une recharge par infiltration grâce à aux précipitations (Babaye, 2012). Le coefficient r égale 0,51 pourrait renseigner une relation modérée entre les variations des profondeurs de l'eau dans le piézomètre et le temps, mais ne sont concernés que 26% des profondeurs observées.

1.1.1. Les piézomètres du calcaire

Les calcaires sont représentés par les deux piézomètres de Tin-arkachen.

- Le piézomètre de Tin-Arkachen SE 4

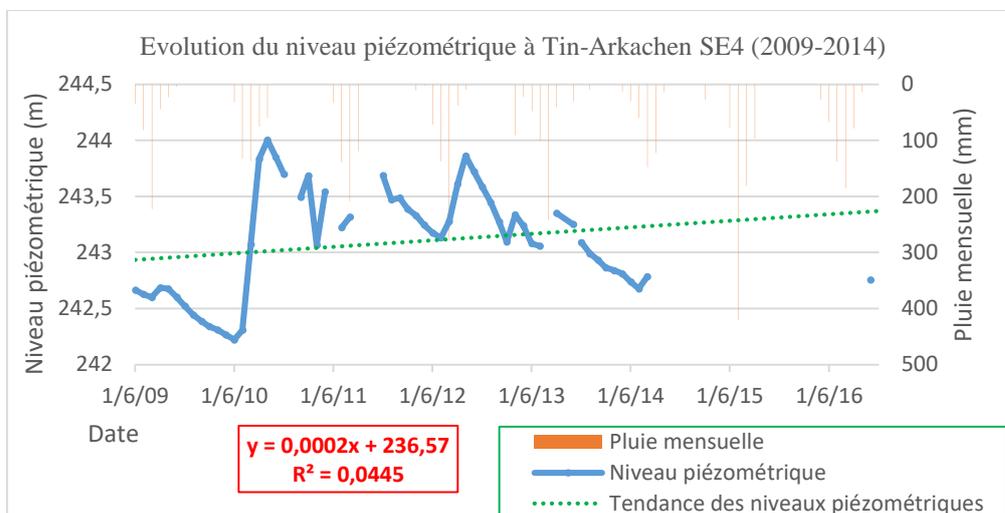


Figure 14: Evolution du niveau piézométrique à Tin-Arkachen SE4 (2012-2014)

Au niveau de ce piézomètre du sédimentaire, avant la difficulté de bouchage intervenu en 2015, le suivi connaissait une insuffisance du aux problèmes d'accessibilité au site et à l'insuffisance d'outils de mesure (sondes manuelles). L'insuffisance de données sur la courte période de 2012-2015 fait que la courbe de variation des niveaux piézométriques n'offre pas une bonne interprétation. L'ajout d'une courbe de régression linéaire à la courbe de variation piézométrique indique une tendance globale à la baisse sur la période tandis que les faibles valeurs des coefficients ($r = 0,21$ et $R^2=0,044$) marquerait la relation médiocre de la variation des niveaux piézométriques dans le temps.

- Le piézomètre de Tin-Arkachen SE3

Ce piézomètre présente la même situation que SE4. Les hauts niveaux sont à près 249,5m et les plus bas 243 m. Compte tenu de l'insuffisance de données, il parait difficile de faire une interprétation fiable.

2.3.3. Piézomètres du granite

La formation granitique représente la majeure partie des piézomètres.

- Les piézomètres de Diapaga :

Tous les deux piézomètres du site de Diapaga captent dans les granites

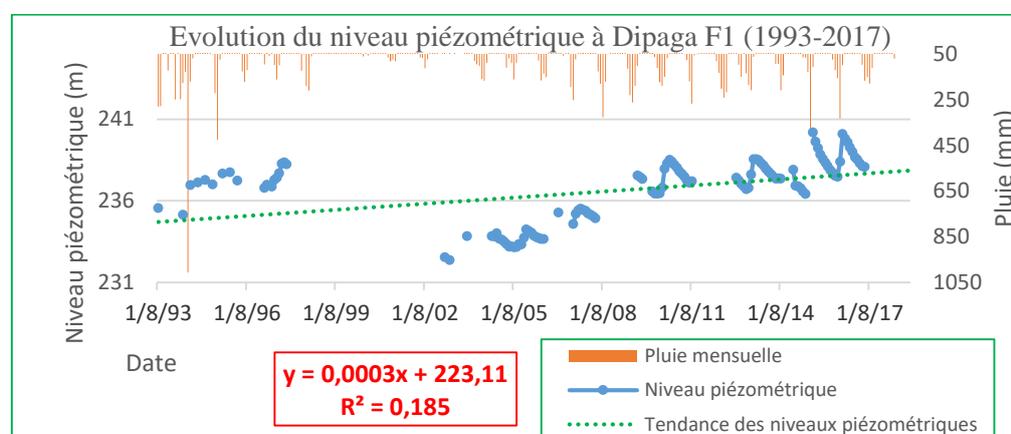


Figure 15: Evolution piézométrique à Diapaga F1 (1993-2017)

Les données disponibles pour ce piézomètre datent de 1993 à 2017. Nous observons qu'entre la période de 1993 à 2003 beaucoup de données n'ont pas été enregistrées. Cela est dû aux difficultés de suivi à l'époque (faibles ressources humaines, logistiques, matériels de mesure et la centralisation des données). Dans l'ensemble, l'évolution du niveau piézométrique montre une tendance à la hausse avec la plus faible cote observée en juin 2003 (début des hautes eaux) pour une valeur de 233,33 m et la plus forte cote de 240 m atteinte en août 2016. L'allure de la courbe très interrompue parait difficile à analyser, même si la droite de régression linéaire présente une tendance visible à la hausse.

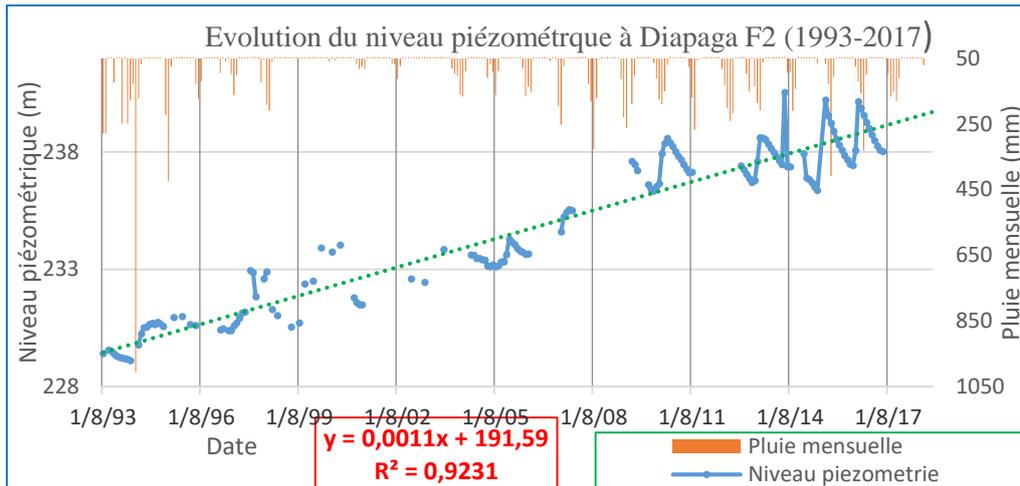


Figure 16: Evolution du niveau piézométrique à Diapaga F2

Au niveau de ce piézomètre, les données ont été plus régulières qu’au niveau de F1 alors qu’il s’agit des piézomètres du même site. On pourrait penser qu’il y a eu une perte des données du piézomètre de Diapaga F1. La tendance de l’évolution des niveaux piézométriques est considérablement en hausse avec une cote minimale de 229 m en juin 1994 (début de saison pluvieuse) et d’une cote maximale atteinte à 240,48 m en septembre 2015 (haute eau). La variation des niveaux piézométriques est conforme à la pluviométrie qui s’installe généralement entre mai-juin. Les coefficients r et R^2 (respectivement 0,96 et 0,92) pourraient renseigner une bonne relation de la variabilité des niveaux piézométriques dans le temps et 92% des niveaux piézométriques relevés expliqueraient cette variabilité.

- Le piézomètre de Gayeri SE5 :

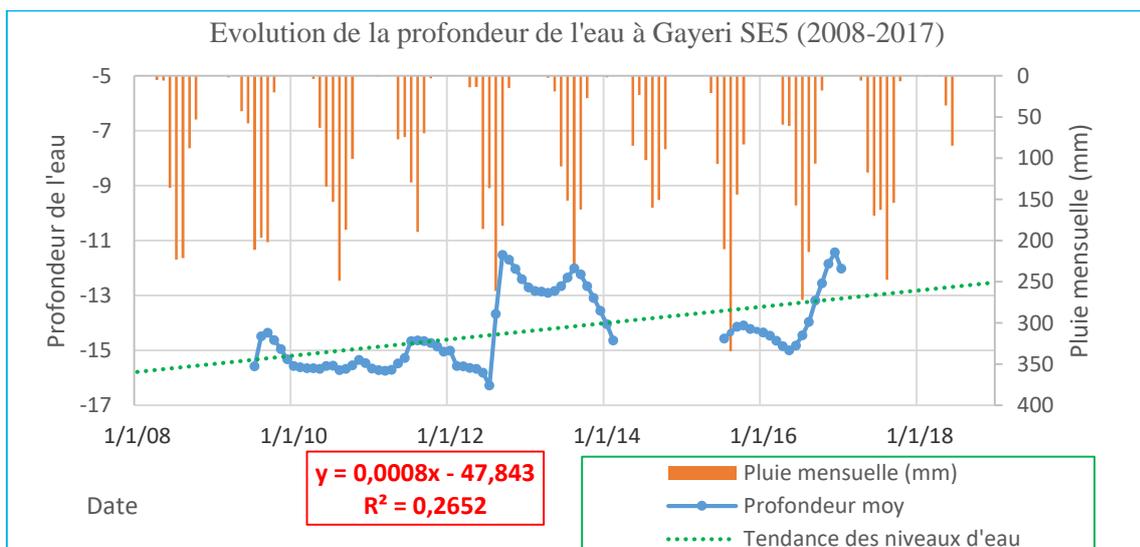


Figure 17: Evolution du niveau piézométrique à Gayeri SE5 2008-2017)

Le piézomètre SE5 de Gayeri possède également des lacunes dans les données. Ce qui donne une allure de la courbe d'évolution des niveaux piézométriques entre entrecoupée entre 2012 et 2013 et entre la deuxième moitié de 2014 à la première moitié de 2016. Le pic maximal atteint est de 256,63 m en décembre 2012 tandis que le plus bas niveau se situe à 251,99m en juin 2012. Une irrégularité caractérise l'allure générale de la courbe des niveaux piézométriques et n'offre pas la possibilité de faire une bonne interprétation. Néanmoins il est possible de détecter sur la courbe que l'augmentation de pluie s'accompagne de la remontée des niveaux piézométriques. On note une tendance à la hausse avec des amplitudes variables mais la valeur faible du coefficient informerait une relation modérée de la variabilité des niveaux piézométriques au cours de la période de 2008 à 2017.

- Le piézomètre Gayeri SE6

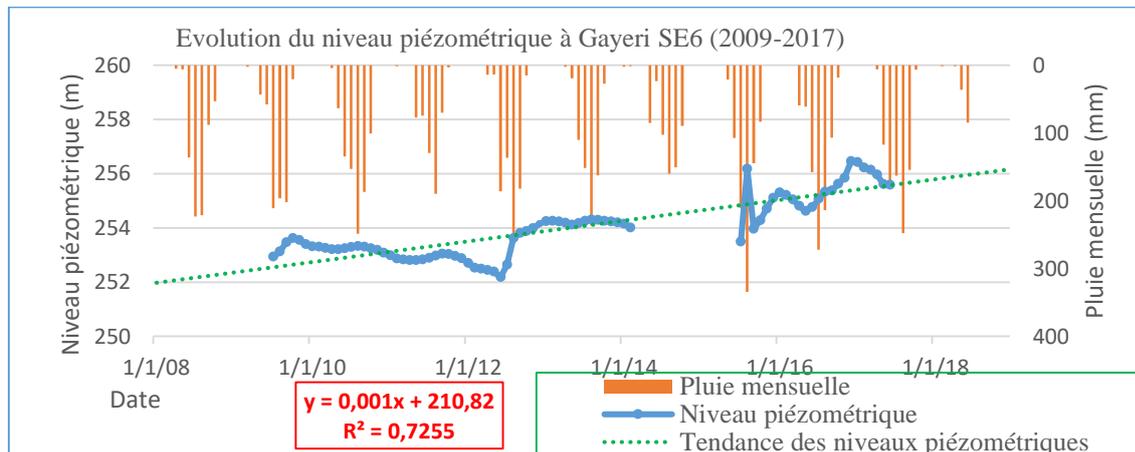


Figure 18: Evolution du niveau piézométrique à Gayeri SE6 (2009-2017)

Le piézomètre Gayeri SE5 présente à peu près les mêmes lacunes dans les données que celui de SE4. Les parties visibles de la courbe montrent que les remontées des niveaux piézométriques se font en présence de pluie. Visiblement les données ne sont pas très étalées sur toute la période de 2008 à 2017. Cependant la tendance est à la hausse avec un coefficient r de 0,85 marquerait une bonne relation de la variabilité des niveaux piézométriques et du temps et une probabilité 77% des valeurs mesurées.

Les deux piézomètres de Gayeri montrent leurs piézométriques à la hausse au fil du temps. Le retour des conditions climatiques favorables en Afrique de l'Ouest pourrait favorable à la remontée des nappes mais une analyse approfondie n'a pas été faite.

- Le site de Kantchari

Le piézomètre SE3 possède une altitude tandis que SE1 n'en possède pas. Néanmoins SE3 a été analysé en considérant les hauteurs piézométriques et SE1, la profondeur de l'eau dans le piézomètre. Ce site fait partie des meilleurs sites suivis et le constat s'est fait pendant nos sorties terrain.

- Le piézomètre Kantchari SE3

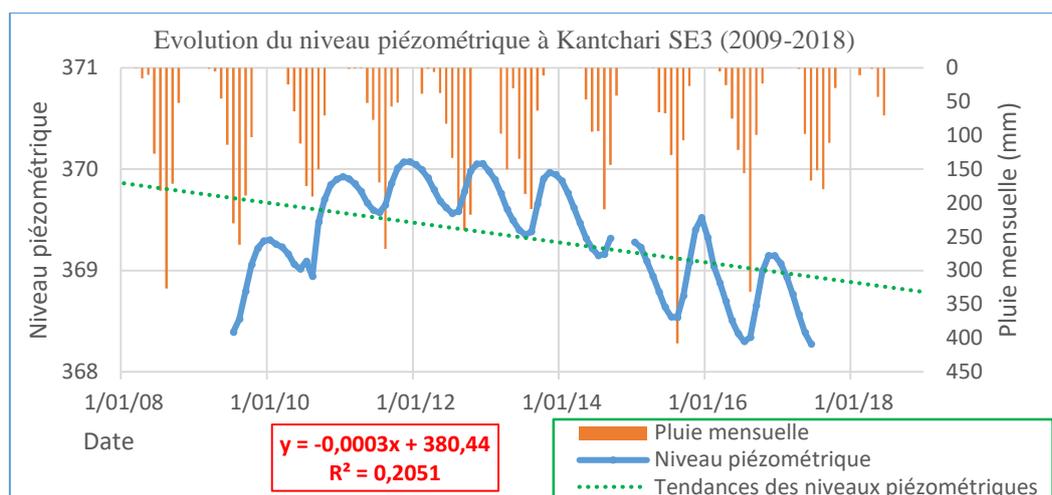


Figure 19: Evolution du niveau piézométrique à Kantchari SE3 (2008-2018)

La variation des niveaux piézométriques est sinusoïdale et se synchronise avec la variation saisonnière des pluies. Les remontées des niveaux piézométriques apparaissent et augmentent, lorsqu'il pleut et que les cumuls mensuels des pluies augmentent. On observe une baisse générale des niveaux piézométriques. La plus faible côte a été observée en août 2016 à 368,24 m tandis que la côte la plus élevée est à 370,08 m en décembre 2011. La période paraît assez courte et il s'avère nécessaire de poursuivre le suivi régulier afin de faire une meilleure évaluation.

- Le piézomètre SE1

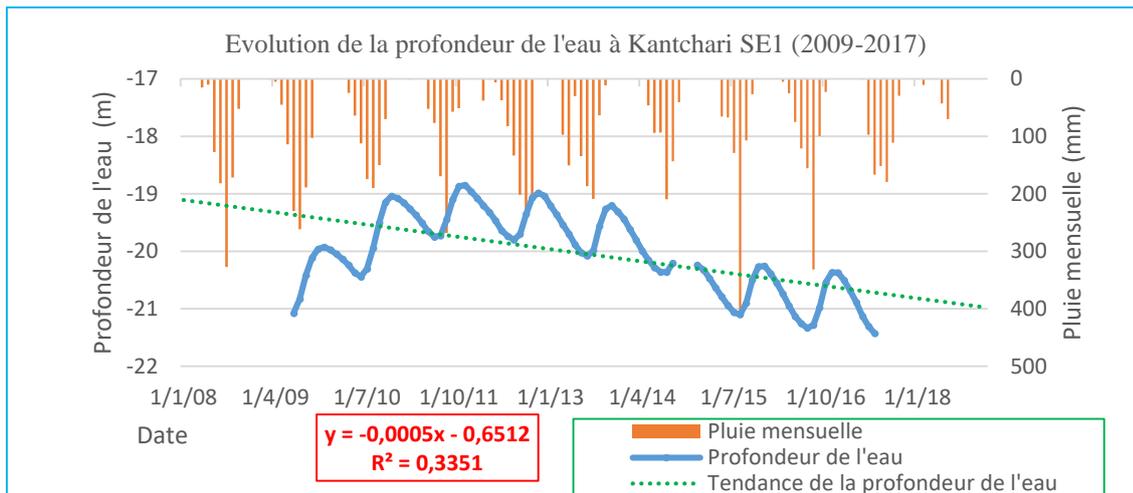


Figure 20: Evolution de la profondeur piézométrique à Kantchari SE1 de 2009-2017

L'évolution du niveau piézométrique établie sur cette période indique une allure sinusoïdale traduisant la variation saisonnière des niveaux piézométriques sous l'influence de la variation synchrone avec les pluies. La variation paraît assez régulière et l'amplitude est aussi légèrement variable et à la baisse. En 2011, elle est de 0,98 m tandis qu'en 2016 elle est de 0,8 m. La plus grande profondeur piézométrique est observée récemment en juin 2017 à 21,47 m et la plus faible profondeur est de 18,82 m en Octobre 2011.

On pourrait faire le constat que SE1 et SE5 présentent sensiblement la même allure relativement parfaite mais nous y trouvons des faibles coefficients ($r = 0,45$ et $R^2 = 0,2$ pour SE2 et $r = 0,58$ et $R^2 = 0,33$ pour SE1) qui marqueraient une relation médiocre de la variabilité dans le temps des niveaux piézométriques.

Les piézomètres de Kantchari présentent une hausse des niveaux piézométriques dans le temps, tandis que l'effet contraire est observé à Diapaga. Pourtant les deux sites sont situés à peu près dans la même zone climatique. Le retour des pluies et le taux d'accroissement de la population pourraient les principaux facteurs mais une étude ultérieure approfondie pourra donner de précision.

- Le site de Katchari

Le site de Katchari est constitué d'un piézomètre.

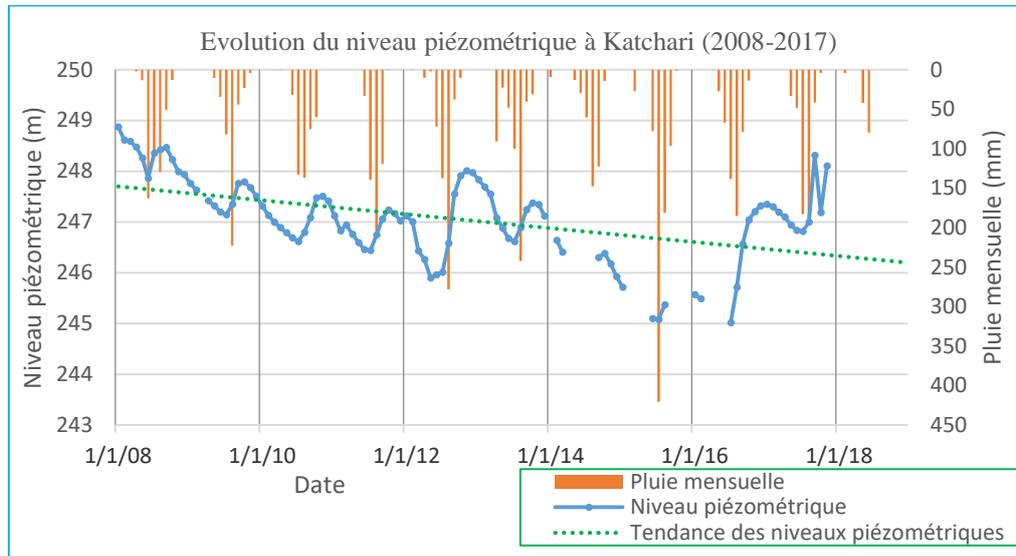


Figure 21: Evolution piézométrique à Katchari de 2008 à 2017

Un manque de données couvrant la période de 1999 à 2007 s'observe. L'illustration est faite avec la Figure 21. L'évolution des niveaux piézométriques de la période de 1986 à 2017 s'est traduite par une tendance générale à la baisse marquée par une variation interannuelle. Cette variation interannuelle s'accompagne de l'influence de la pluie qui ne dure pas plus de 3-4 mois. La cote piézométrique minimale a été enregistrée en juillet 2016 à 244,94 m et la plus haute en 1988 à 258,98 m. L'allure de la courbe reprise à partir de 2008 à 2018 se dessine bien mais ne permet pas une bonne détermination des amplitudes. Une bonne relation de variabilité des niveaux piézométriques dans le temps est donnée par le coefficient de corrélation r qui est égal à 0,94 et R^2 donne une probabilité de 89% des valeurs expliquées par la variabilité.

- Le site de Koadifagou :

Tous les deux piézomètres n'ont d'altitude, notre analyse a porté sur les profondeurs de l'eau dans ces piézomètres.

Le piézomètre F1

Les données à analyser portent pour la période de 1993 à 2014 avec des lacunes à certaines périodes.

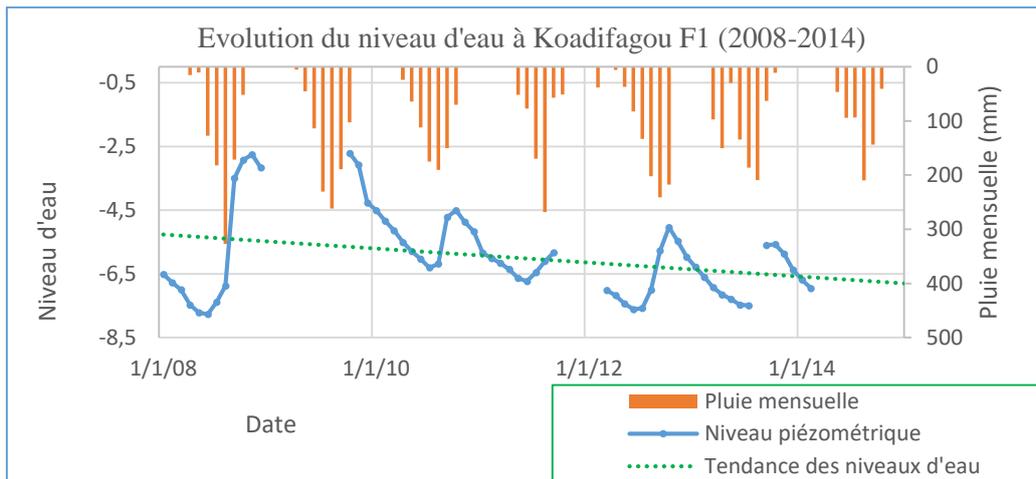


Figure 22: Evolution de la profondeur piézométrique à Koadifagou de 2008-2011

Le piézomètre Koadifagou F1 a tari en 2014, mais a été retenu pour la longueur de sa chronique. Cependant les lacunes dans les données ne permettent pas une bonne interprétation. Un zoom sur la période de 2008-2014 présente une tendance de l'évolution des profondeurs de l'eau à la baisse avec un plus faible niveau enregistré en Novembre 2008 à -2,59 m (haute eau) et le plus profond à -14,88 m en Mai 1994 (basse eau). La période parait courte pour donner un conclusion.

- Le site de Nagaré
- Le piézomètre Nagaré SE5

L'évolution piézométrique opérée au niveau de ce piézomètre est représentée par la figure ci-après.

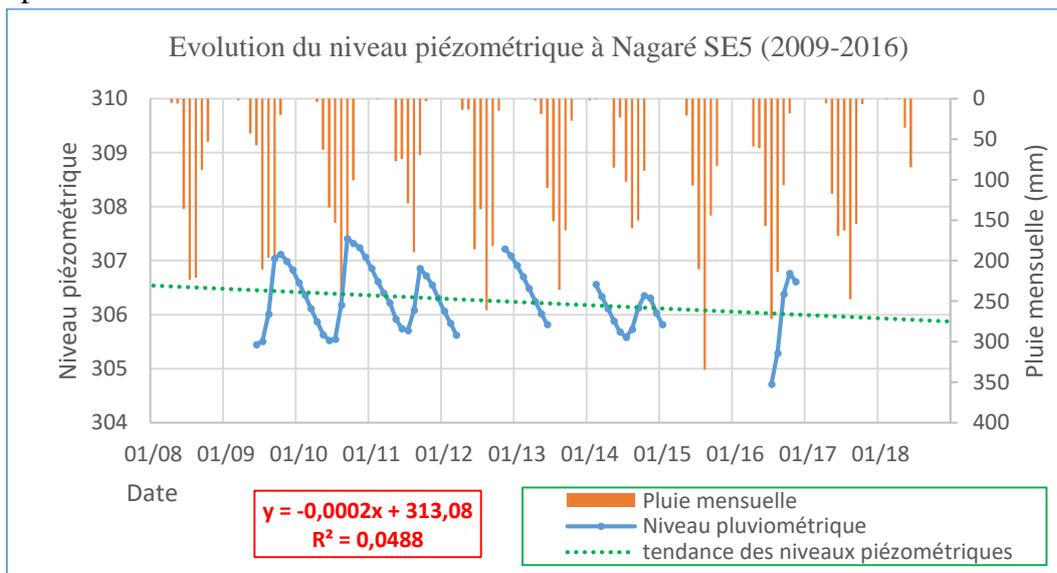


Figure 23: Evolution du niveau piézométrique à Nagaré SE5 de 2009-2016

Au cours de la période d'analyse (2009-2016) on constate une variation interannuelle des niveaux piézométriques au cours du temps. Les remontées des niveaux piézométriques vont de pair avec l'apparition et l'augmentation des cumuls mensuels des pluies. Cette variation présente une allure sinusoïdale avec des pics relativement bien visibles. La plus faible cote s'observe à 304,43 m en juillet 2013 (basse eau) et la cote la plus élevée a été enregistrée à 307,59 m en septembre 2010. La tendance est en légère baisse avec des amplitudes et varie de 1m en 2009, de 0,91 m en 2010 et de 0,28 m en 2014.

- Le piézomètre SE11 à Pobé Mengao

L'analyse de l'évolution des niveaux piézométriques grâce à la figure qui suit :

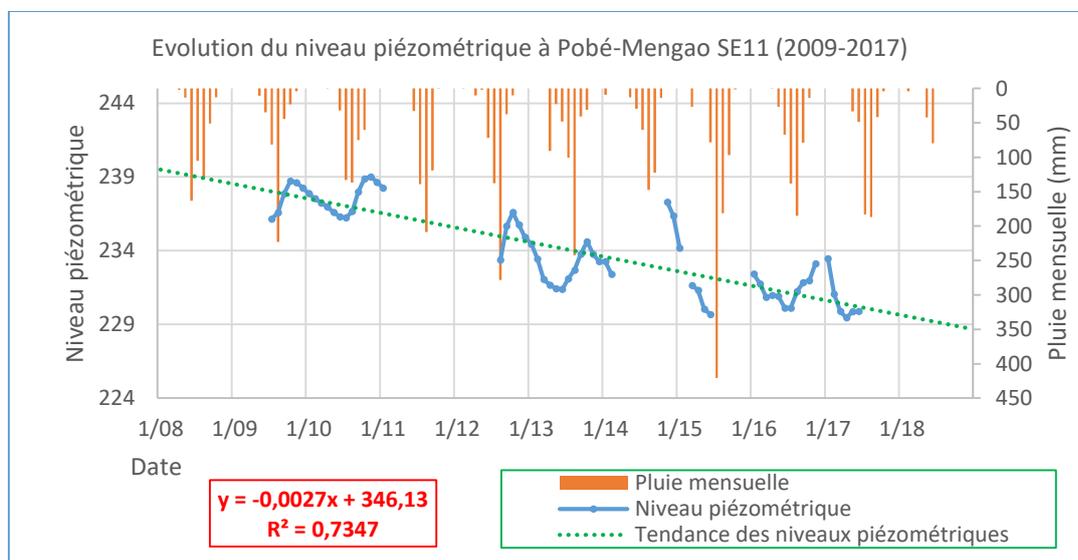


Figure 24: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE11 de 2009-2017

Le suivi de ce piézomètre présente des irrégularités laissant des lacunes au niveau des données qui montrent des ruptures sur la figure par endroits. On note une tendance à une baisse considérable avec des variations interannuelles suivant les fluctuations de la pluviométrie. La cote maximale déjà atteinte au cours de la période est de 239,19 m en octobre 2010 (haute eau) et de 229,09 m en mai 2017 (basse eau) pour la cote minimale. Le coefficient de corrélation donne une bonne relation de la variabilité des niveaux piézométriques pour 73% des valeurs mesurées. S'il ne se produit pas de retour de recharge les années à venir, ce piézomètre pourrait tarir comme à Gorom-Gorom et à Koadifagou. Comme les travaux de Ouandaogo, (2008) et Tirogo, (2016) ont montré le retour des conditions climatiques depuis les années 1970, il se pourrait qu'avec le retour de la pluviométrie, le tarissement n'est pas lieu. A moins que d'autres causes soient à l'origine de la baisse considérable de la nappe comme par exemple le contexte géologique.

Aussi le test de pente de la droite de régression linéaire avec la méthode de Mann (1945) et Kendall (1975) sera réaliser dans les prochains paragraphes, afin de vérifier, de confirmer l'existence de tendance. La faible longueur de la série des données piézométriques pourrait cacher aussi des disparités.

- Le piézomètre de Pobé-Mengao SE15

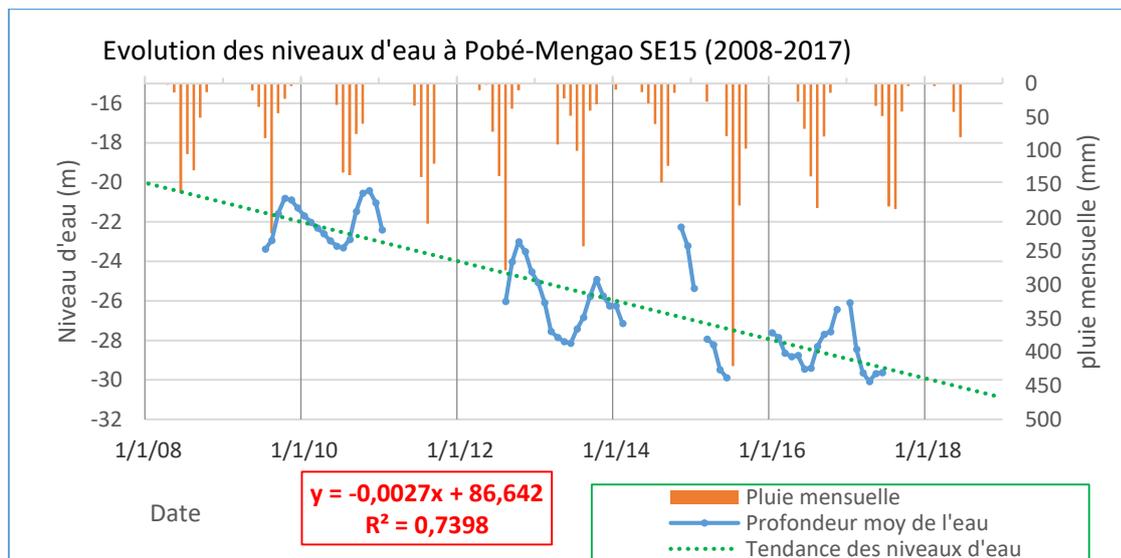


Figure 25: Evolution du niveau piézométrique à Pobé-Mengao SE15 de 2008-2017

- Le piézomètre de Sampelga SE9

L'analyse de l'évolution des niveaux piézométriques présente les résultats suivants :

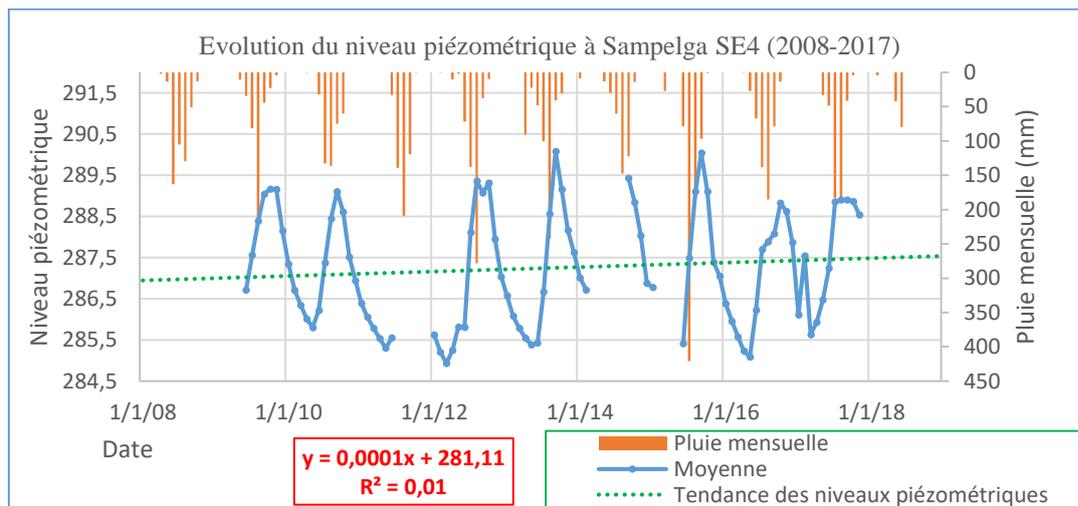


Figure 26: Evolution du niveau piézométrique à Sampelga SE9 de 2009-2017

L'évolution des niveaux piézométriques varie suivant une allure sinusoïdale en concordance avec l'installation et la fin des pluies annuelles. Les remontées piézométriques se font pendant

la période des pluies tandis que les baisses s'observent pendant le retrait des pluies. La tendance observée est en légère hausse avec une cote minimale de 282,82 m enregistrée en février 2011 et la cote maximale est de 288,03 m enregistrée en septembre 2013. Les très faibles valeurs de r et R^2 indiquent une absence de relation dans la variabilité des niveaux piézométriques avec le temps et signifieraient que l'évolution des niveaux piézométriques dans le temps n'est qu'un effet du hasard. Cette situation sera vérifiée dans les prochains paragraphes avec le test de Mann-Kendall.

- Le piézomètre de Sebba SE6

Sur la période de 2008-2018, l'analyse de l'évolution du niveau piézométrique a montré une diminution de la nappe dans le temps.

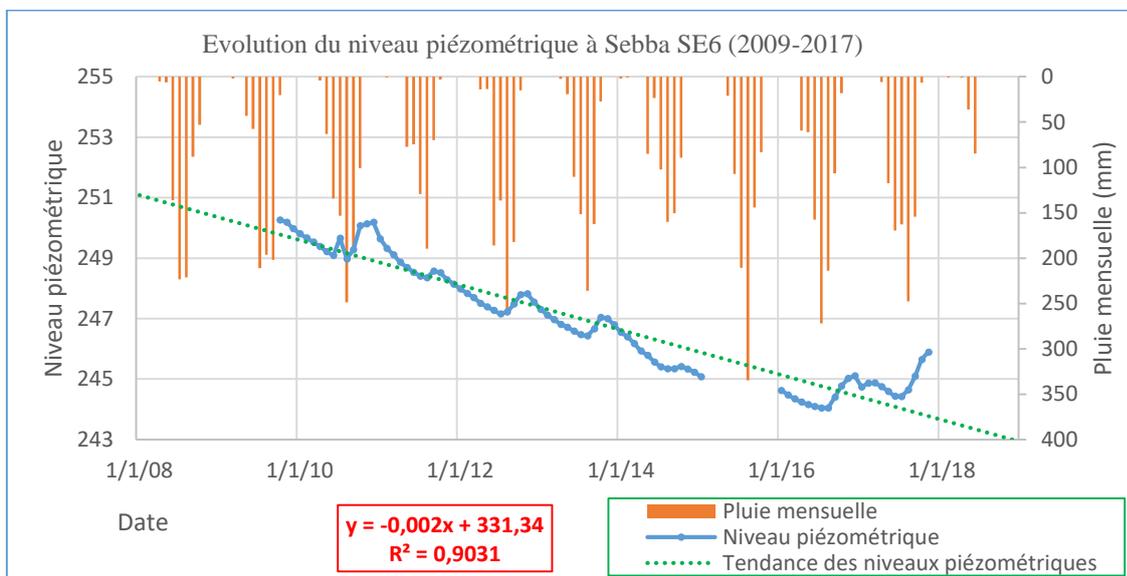


Figure 27: Evolution du niveau piézométrique à Sebba SE6 de 2009-2017

La Figure 27 présente une allure de régression constante et de façon régulière. Avec une amplitude de 1,3 m en 2010, elle tend à se stabiliser en 2011, 2012 et 2013 à proximité de la droite de régression linéaire. Pendant toute l'année 2015, il y eu une rupture de données pour des raisons de panne de sonde et la reprise des mesures s'est opérée en début de 2016. La courbe suit une forme sinusoïdale traduisant la variation interannuelle et saisonnière avec les pluies. La plus faible cote enregistrée est observée en Août 2016 à 244,02 m (basse eau) et la cote la plus élevée se situe 250,27 m en Octobre 2009 (haute eau). Le coefficient de corrélation de 0,95 pourrait être le signe d'une bonne corrélation de la variabilité des niveaux piézométriques dans le temps.

2.3.4. Piézomètres des granodiorites

- Le piézomètre de Sebba SE2

L'analyse l'évolution des niveaux piézométriques dans le temps sur la base du graphique ci-après.

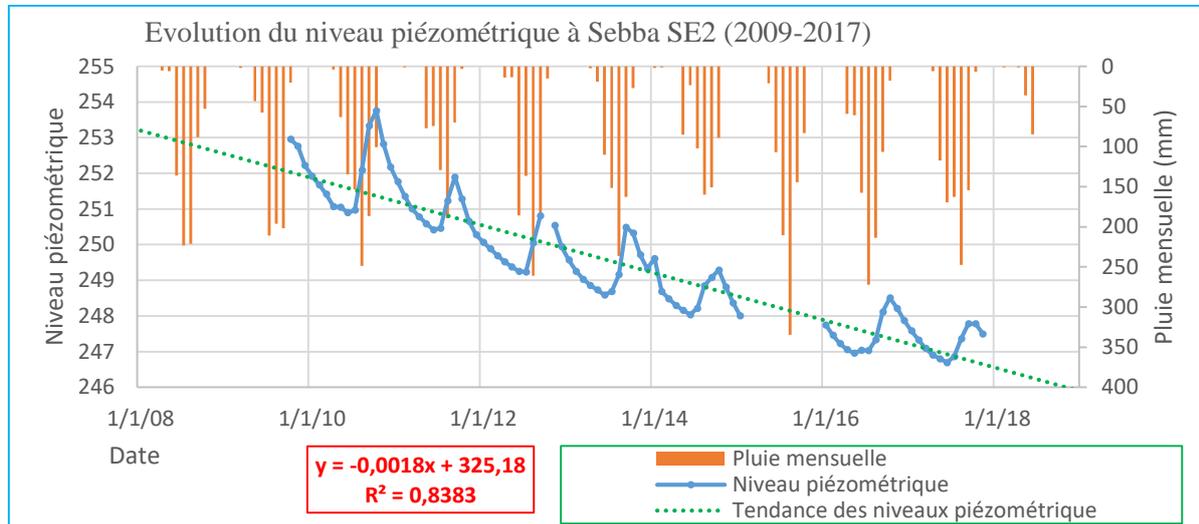


Figure 28: Evolution du niveau piézométrique à Sebba SE2 de 2010-2017

Les données de la chronique de 2010-2015 présentent une insuffisance. Les données disponibles montrent une évolution des niveaux piézométriques suivant une allure pratiquement stable au fil du temps après l'année 2012. L'influence de la pluie est aussi remarquable pendant les saisons des pluies, alternées des saisons sèches. La tendance générale est à la baisse avec sa plus faible cote à 267,23 m en mai 2012 et la plus forte à 275,11 m en Août 2014. Le coefficient r de 0,91 marquerait une bonne corrélation de la baisse des niveaux piézométriques dans le temps.

2.3.5. Piézomètres des migmatites

- Le piézomètre de Kondibito F1

Le piézomètre Kondibito F1 est le seul piézomètre capte dans les migmatites. L'évolution des niveaux piézométriques dans le temps se présente dans la figure suivante :

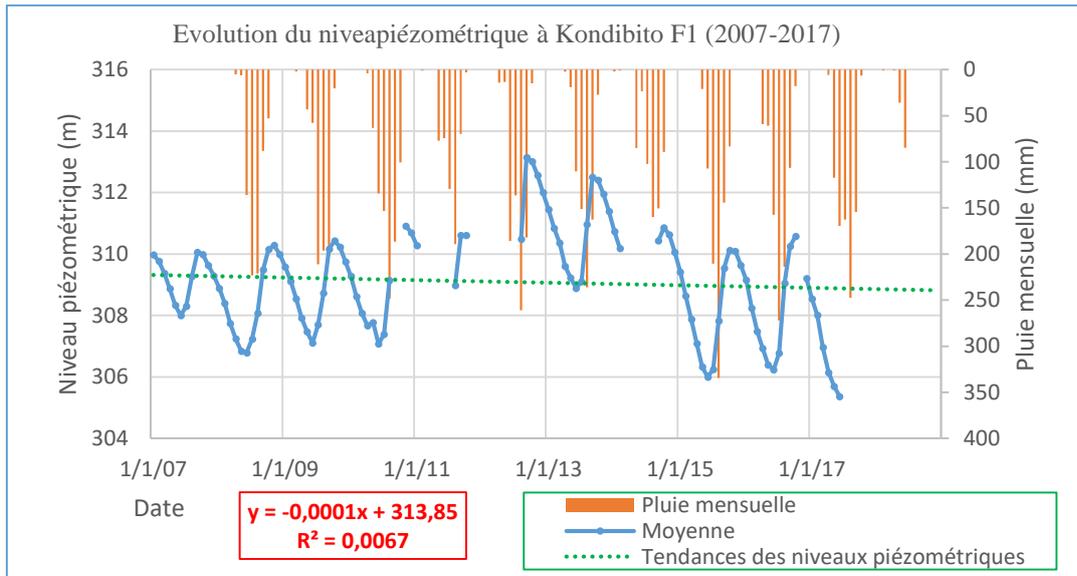


Figure 29: Evolution du niveau piézométrique à Kondibito F1 de 2007-2017

L'évolution du niveau piézométrique de 2007 à 2017 présente une oscillation sinusoïdale indiquant une variation dans les années et les saisons. Les pics des courbes de variations des niveaux piézométriques coïncident exactement avec les plus grands cumuls mensuels des pluies. On pourrait penser à une réponse immédiatement de la nappe après les pluies. Mais la série de données piézométriques se limitant sur 10 ans peut cacher des disparités. Dans l'ensemble, la tendance est à la baisse légère. La variation semble se stabilisée au cours de la période allant de 2007 à 2010 avec une plus grande amplitude de 1,1 m. Ensuite une légère augmentation du niveau commence à la fin de 2010 avant de regagner en altitude en septembre 2012 avec un pic de 313,28 m. A la fin 2014 le niveau chute à nouveau et reste en diminution saisonnière pour atteindre un niveau inférieur de 305,16m en juin 2017. Cependant r et R^2 , sont très faibles et indiqueraient une absence de corrélation de la baisse des niveaux piézométriques dans le temps.

2.3.6. Piézomètres des schistes

- Piézomètre de Sampelga SE4

L'évolution des niveaux piézométriques au niveau de ce piézomètre est représentée par la Figure 30

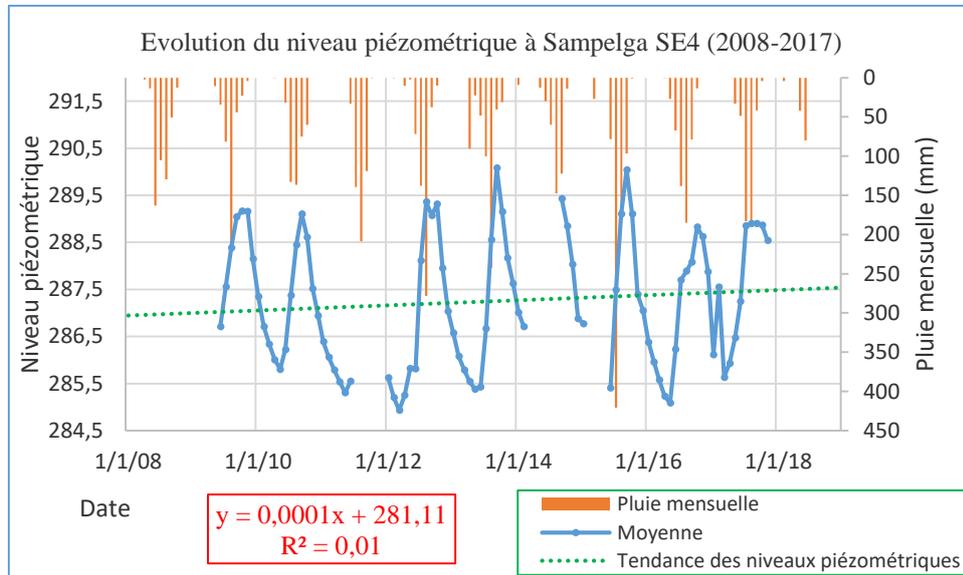


Figure 30: Evolution du niveau piézométrique à Sampelga SE4 de 2009-2017

La courbe de tendance linéaire renseigne sur une légère hausse du niveau piézométrique de 2009 à 2017. Au cours de cette période le niveau minimum déjà atteint est de 284,83 m en mars 2012 tandis sa côte la plus grande fût enregistrée en septembre 2013 à 290,29 m. L'amplitude est légèrement variable au cours du temps, 2 m en 2009 ; 2 m en 2010 et 2 m en 2012. Avec les faibles valeurs de r et R^2 , le test de Mann-Kendall sera attendu pour confirmer la détection de tendance.

En somme sur dix-huit (18) analysés, six (06) piézomètres présentent une bonne corrélation de la baisse du niveau piézométrique dans le temps ; deux (02) sont en corrélation positive modérée, sept (07) (dont 4 négatives et 3 positives) sont en corrélation médiocre et trois (03) n'ont pas de relation avec leur évolution des niveaux piézométriques dans le temps.

Ces résultats seront vérifiés avec le test de pente de Mann-Kandell, qui va nous aider à comprendre si les pentes qui expriment la liaison de l'évolution des niveaux piézométriques, sont significatives pour expliquer cette liaison.

Les tableaux récapitulatifs, faisant la synthèse des résultats obtenus sur l'analyse des tendances des niveaux piézométriques sont joints en annexes 2 et 3

2.3.7. Analyse de tendance avec le test de détection de tendance de Mann (1945)-Kendall (1975)

Lors de l'analyse de l'évolution des niveaux piézométriques avec la régression linéaire, nous avons juste observé que les droites des moindres carrées sont en hausse ou en baisse sans faire le test de pente afin de vérifier le degré de significativité des résultats. Normalement nous devrions tester la normalité de la distribution des données, qui est une des conditions nécessaire pour le test de pente en régression linéaire. Avec le test de Mann-Kendall qui est un test non paramétrique, cette condition de normalité n'est pas nécessaire. Ce test offre la possibilité de vérifier si une tendance est détectée au sein d'une série chronologie. Ce test a été réalisé sur dix-huit piézomètres et les résultats sont consignés dans l'annexe 2.

Les séries chronologiques de données des piézomètres respectent un cycle saisonnier et il a été appliqué le test saisonnier de Kendall. Les résultats de l'analyse du test montrent que sur les dix-huit (18) piézomètres analysés cinq (05) présentent une tendance positive, huit (08) une tendance négative et les cinq (05) autres n'ont pas de tendance.

Les tau de Kendall comparés aux coefficients de corrélation de la régression linéaire sur dix-huit (18) piézomètres analysés, montrent à peu près les résultats, sauf à Sampelga SE4 où r indiquait une absence de relation en entre l'évolution des niveaux et le temps et le tau de Kendall indique plutôt une tendance à la baisse. Aussi à Tin Akoff SE4, r marquait une relation médiocre tandis que le tau de Kendall montre une absence de relation. Avec la confirmation du test de Kendall, les résultats obtenus sur la régression linéaires peuvent être considérés satisfaisants. Au vu de ce qui précède les conclusions suivantes sont retenues : sur les 18 piézomètres analysés, sept (Sebba SE6, Sebba SE2, Pobe Mengao SE15, Pobe Mengao SE11, Kantchari SE1, Kantchari SE3, Samplega SE4) présentent une tendance en baisse des niveaux piézométriques, les niveaux piézométriques de six (Diapaga F1, Gayeri SE5, Arbinda, Koadifagou F1, Gayeri SE6, Diapaga F2) sont en hausse et cinq (Nagaré SE3, Nagaré SE8, Kondibito F1, Koadifagou F2, Tin Akoff SE4) n'ont pas de tendance. Les résultats sont joints en annexe 2

Une étude ultérieure plus approfondie sera nécessaire pour définir les facteurs qui expliqueraient la hausse des niveaux piézométriques.

CHAPITRE 3 : HYDRODYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN

3.1. Matériels et méthodes

3.1.1. Données sur les paramètres hydrodynamiques

Les données utilisées pour cette partie concernent les données de 835 forages. Nous avons obtenu ces données auprès de la Direction générale des ressources en eau (DGRE) du Burkina Faso. Ces données portent sur les débits de fin de foration, les épaisseurs d'altération, les profondeurs des forages, les niveaux statiques après foration, la transmissivité...

Compte tenu de l'insuffisance dans les données seules, la transmissivité, et les données caractéristiques des forages telles que le débit, les niveaux statiques, les profondeurs, les épaisseurs d'altération seront considérés. Ce sont des éléments importants pour déterminer la productivité des aquifères. Il faut noter aussi que ces 835 forages pour des raisons indépendantes de notre volonté se retrouvent uniquement dans la région du Sahel. Néanmoins avons opté d'esquisser l'hydrodynamique de la nappe sur la base des informations disponibles dans cette partie même si elles ne reflètent pas la totalité du bassin.

3.1.2. Méthode d'analyse

L'analyse de la partie hydrodynamie s'est basée premièrement sur l'analyse de la transmissivité des piézomètres et des forages. Pour cela des calculs statistiques ont été faits afin de déterminer la répartition des différentes valeurs de transmissivité. Deuxièmement l'analyse sur la productivité des aquifères a été faite en cherchant la relation possible qui existerait entre les caractéristiques des forages telles que le débit, l'altération, la profondeur et qui expliquerait la productivité des aquifères. Les différentes analyses ont été faites séparément sur les données des piézomètres et les données des forages car ceux-ci n'ont pas été réalisés à la même période. Les données des ouvrages qui ont été réalisées approximativement à la même période ont été analysées ensemble.

3.2. Analyse des paramètres hydrodynamiques

Les aquifères ont des propriétés hydrodynamiques qui sont indispensables pour la compréhension et la quantification des flux d'eau du sous-sol (Soro, 2017). Ces propriétés hydrodynamiques sont importantes pour l'élaboration et la mise en œuvre des programmes durables d'approvisionnement en eau ainsi que pour une gestion durable des ressources en eau. Sont appelés paramètres hydrodynamiques les données caractéristiques du réservoir qui abrite les eaux dans le sol. Ils sont obtenus soit sur le terrain à l'issue des travaux de pompages d'essai ou de l'étude de la fluctuation des surfaces piézométrique, soit au laboratoire (Castany, 1998). Ils renseignent sur le comportement de l'aquifère c'est-à-dire son capacité à stocker, conduire ou libérer l'eau à travers les pores. Ces paramètres sont : la transmissivité, le coefficient d'emménagement, la conductivité hydraulique et la porosité efficace.

Appelé aussi conduction par Margat, (1972), la transmissivité évalue la fonction conduite de l'aquifère (Castany, 1998). C'est une grandeur du débit par unité de longueur de l'aquifère et par unité de gradient hydraulique. Il s'obtient par calcul en faisant le produit entre le coefficient de perméabilité en m/s (mesure la perméabilité d'une roche) et l'épaisseur de l'aquifère en m. Obtenu par mesure sur terrain lors des pompages d'essai, la transmissivité est une grandeur qui caractérise les zones de productivité des aquifères.

3.2.1. Analyse des paramètres hydrodynamiques : transmissivité

Pour cette analyse nous avons retenus seuls les piézomètres qui disposent des données sur la transmissivité et le débit spécifique. Elle concerne douze piézomètres. Sur une superficie de 83442 km pour douze piézomètres soit un taux de couverture de l'ordre d'un piézomètre pour 27811km² s'avère non représentatif mais nous tenterons aussi d'investiguer du côté des forages. Pour cette option, l'analyse se focalisera sur la région du Sahel pour laquelle nous avons les données sur la transmissivité et le débit spécifique.

Les résultats suivants ont été obtenus :

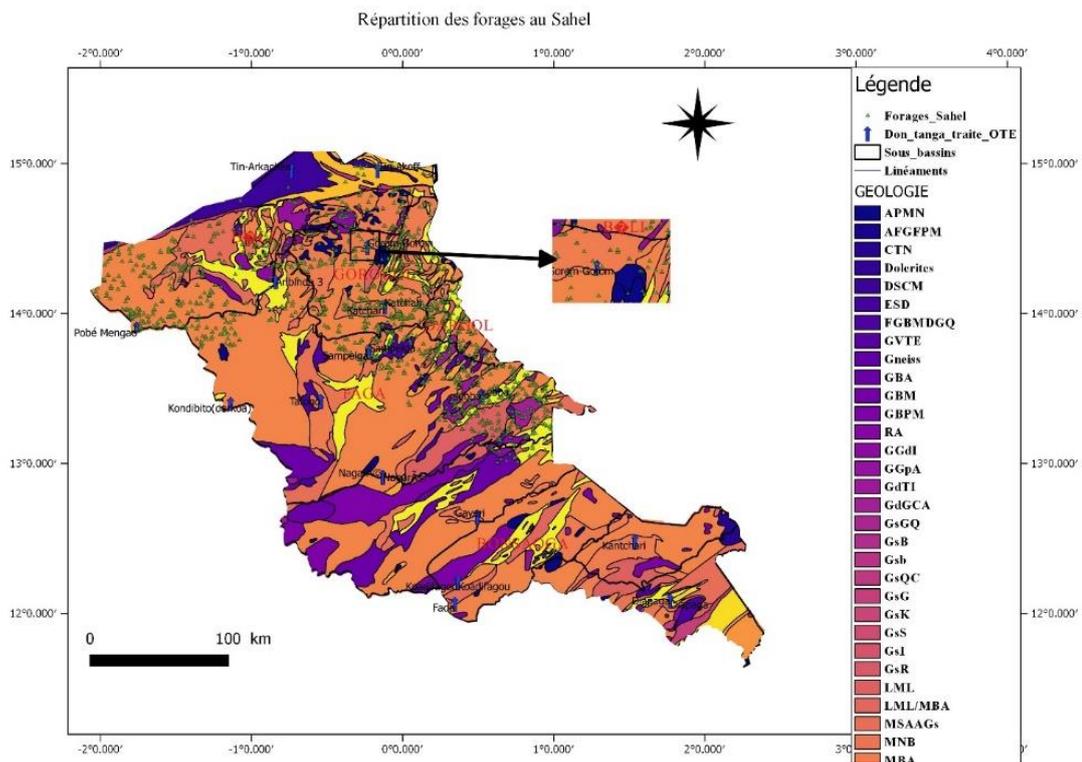
3.2.1.1. Analyse de la transmissivité des piézomètres

Les données considérées concernent les piézomètres qui ont été réalisés entre 2008 et 2009. La répartition (annexe de la transmissivité dans les formations géologiques, varie entre $1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,12 \text{ m}^2/\text{s}$. La distribution de la transmissivité dans les formations géologiques indique que la plus faible valeur de transmissivité s'observe dans les granitoïdes et les valeurs élevées dans les schistes.

3.2.1.2. Analyse de transmissivité au niveau des forages

Les données disponibles pour cette partie concernent la région du Sahel. Elles regroupent les forages qui ont été réalisés entre 2010 et 2012. Ce sont les forages réalisés par des projets et programme d'approvisionnement en potable de la région.

Notre analyse porte seulement sur les forages qui ont été déclarés positifs lors des travaux de foration. La Carte 1 suivante montre la localisation des forages dans la zone.



Carte 1: Carte de location des forages

La majorité des forages sont réalisés dans les formations granitiques. Ceci est en concordance avec la géologie de la zone.

La transmissivité

Elle se base sur sa répartition des forages dans les formations géologiques en recherchant, les variations des valeurs suivant cette géologie.

Les valeurs élevées de transmissivité dans les schistes atteignant $0,961\text{m}^2/\text{s}$, tandis que la moyenne se situe à $2.10^{-2}\text{m}^2/\text{s}$ toujours dans les schistes. Les faibles transmissivité se retrouvent dans presque toutes les formations géologiques. Dans l'ensemble, la transmissivité est très variable et va de $9,26.10^{-6}$ à $0,961\text{m}^2/\text{s}$ dans les différentes formations géologiques. Cette situation montre une hétérogénéité spatiale de la transmissivité dans la zone.

3.2.2. Analyse des caractéristiques de forages

Les caractéristiques de forages telles que le débit, le niveau statique, la profondeur, l'épaisseur d'altération ont été analysées en complément à l'analyse de la transmissivité car elles peuvent avoir l'intérêt d'être des facteurs de productivité des aquifères (Ouandaogo, 1998)

3.2.2.1. Les piézomètres :

En se basant sur les piézomètres, les résultats de l'analyse sont consignés dans l'annexe 4. Les valeurs minimales des niveaux statiques à la fin de la foration s'observent dans les granites à une épaisseur de 5,8 m tandis que les valeurs maximales sont à 38,55 m dans les calcaires. Les valeurs de débits quant à eux varient de 0,5 (dans les granites) à 45 m³/h dans les grès. Les profondeurs vont jusqu'à 151 m dans les formations calcaire mais les plus faibles se rencontrent dans les amphiboles, les granites et dans les schistes pour des grandeurs de l'ordre de 43m.

On constate en général que les piézomètres ont été construits sur de faibles profondeurs. Hormis les piézomètres de Tin-Arckaken, qui ont des profondeurs de 122,5 et 151,15m, les autres piézomètres sont relativement peu profonds.

Pour un réseau national destiné au suivi pour la connaissance et la surveillance de la ressource en eau souterraine, il serait plus judicieux pour le pays, de préconiser la réalisation d'ouvrages plus profonds dans les formations sédimentaire (qui sont souvent en continuité hydraulique) afin de maximiser sur toutes les potentialités des nappes. Le débit atteint par exemple à Tin-arkaken avec le forage Christine (plus de 20 m³/h) peut être un bon indice.

3.2.2.2. Les forages :

Au niveau des forages, la plus faible profondeur se rencontre dans les granites à 39,05 m et les forages plus profonds sont à 102,47 m dans les schistes.

Pour les niveaux statiques après foration les plus faibles (3 m) et grands niveaux statique (70 m) s'observent dans les schistes ;

Les valeurs des débits varient de 0,3 à 36 m³/s. Les plus grandes et faibles valeurs de débits se trouvent dans les granites ;

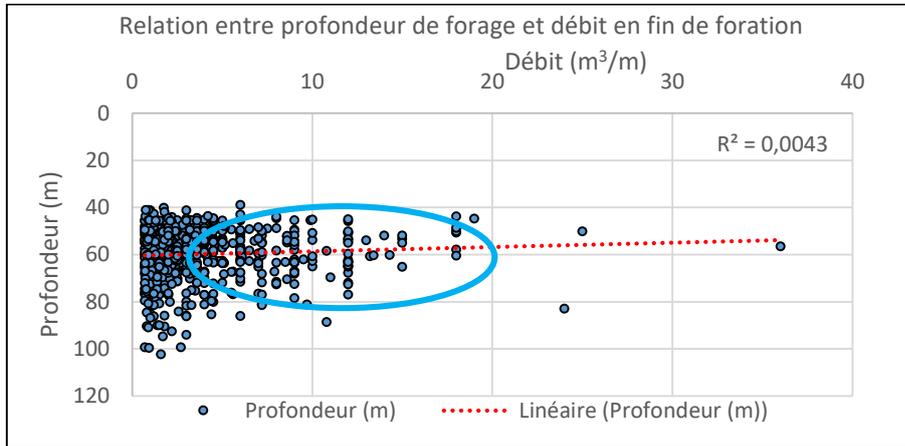
Les faibles épaisseurs d'altération se rencontrent dans les horizons de 1m dans les schistes mais l'altération peut atteindre les valeurs maximales (48 m) dans les mêmes formations.

La situation détaillée est jointe en annexe 1

3.3. Productivité des aquifères

3.3.1. Relation débits-profondeurs :

En rappel les débits des forages se situent de 0,3 à 36 m³/s. A ce niveau, l'analyse se focalisera sur l'évolution des débits avec les profondeurs. Il s'agira de voir s'il y a une relation entre les débits et les profondeurs.



Graphique 1: Relation entre le débit et profondeur des forages

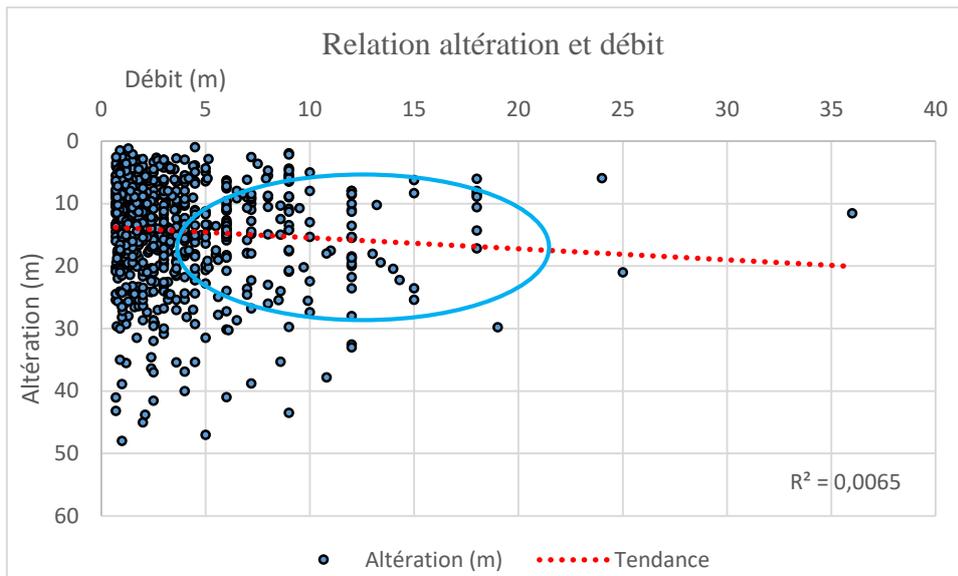
Le Graphique 1 montre une condensation des profondeurs de 40-80 m autour des débits de supérieurs ou égale à 0,5 m³/h. et cela représente 94% (789/835) des forages. C'est également dans fourchette que s'obtiennent les meilleurs débits. La droite de régression linéaire indique une tendance à la baisse c'est -à-dire que lorsque la profondeur augmente, le débit diminue. Mais l'ajustement de la régression donne un coefficient R² ajusté de 0,004 paraît très faible pour conclure une bonne relation linéaire des profondeurs avec les débits.

Les travaux faits par Ouandaogo (2008) au Burkina Faso et par Babaye (2012) au Niger sur le socle cristallin montrent qu'effectivement qu'il n'y a pas de corrélation linéaire entre les débits et les profondeurs et que les meilleurs débits se situent au niveau de la zone du socle entre les profondeurs de 46-66 m (Ouandaogo, 2008).

Les profondeurs productives dans le cas présent, sont alors comprises entre 40-80m

3.3.2. Relation débits-épaisseurs d'altération

En rappel les épaisseurs d'altération ont un ordre de grandeur de 1-48 m. La question qui est posée à ce niveau est de savoir si les débits varient avec l'altération.



Graphique 2 Relation entre les débits et les épaisseurs d'altération

Le Graphique 2 laisse apparaître un regroupement des valeurs des épaisseurs d'altération autour des faibles valeurs du débit compris entre 0,5-5 m³/h pour des épaisseurs comprises entre 1-30m soit 84% (703/835) des forages. Cependant les valeurs de débits supérieures à 10m³/h s'observent dans les altérations comprises entre 15-30m. Au-delà de cette tranche d'altération, les débits baissent et tendent à se rapprocher de 0,7m³/h au-delà de 40m.

La droite de régression indique une tendance à la hausse mais le coefficient d'ajustement très faible ($R^2 = 0,013$) montre qu'il n'existe pas de relation significative entre les débits et l'altération. Les travaux de Babaye (2012) dans le même contexte ont conclu les mêmes résultats.

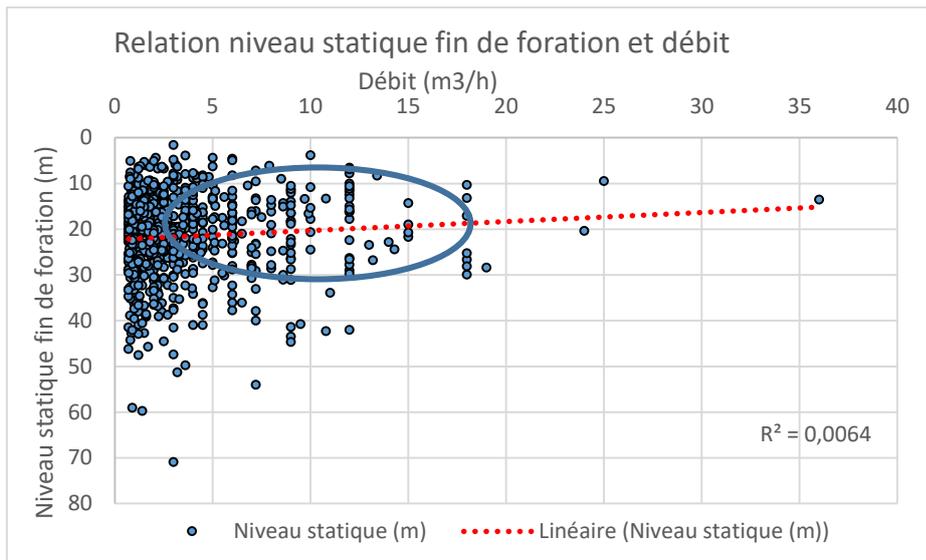
Alors il se pourrait qu'il n'y ait donc pas de la relation entre les débits et l'altération.

Selon Ouandaogo (2008), les altérations dont l'épaisseur dépasse dix (10) m peuvent constituer des ressources aquifères et pour les tranches d'altération comprises entre quinze (15) et quarante(40) fournissent de meilleurs débits alors qu'au-delà de quarante-cinq (45) m les débits sont presque nuls.

Les épaisseurs d'altération productives peuvent donc être classées dans la gamme de 15 à 30m dans le présent cas.

3.3.3. Relation entre les débits et les niveaux statiques de fin de foration

Le Graphique 3 montre une concentration des niveaux statiques de fin de foration au niveau des faibles débits inférieurs compris entre 0-5 m³/h. La relation entre les débits et les niveaux statiques pourrait donc ne pas être linéaire puisque le R^2 est très faible.



Graphique 3: Estimation relation entre les débits et les épaisseurs d'altération

Les résultats de l'analyse montrent que les niveaux statiques pour lesquels les forages possèdent de meilleurs débits (compris entre 5-15m³/h) sont situés entre 10-30m. Au-delà de 40m, les débits chutent.

CHAPITRE 4 APERÇU DE LA QUALITE DE L'EAU DES PIEZOMETRES

4.1. Matériels et méthodes

La disponibilité de la ressource en eau tient compte de sa quantité que de sa qualité. Sa qualité est déterminée par sa composition chimique. L'eau dans son parcours dans la nature subit plusieurs processus qui affectent sa composition chimique donc sa qualité (Tremblay et al., 2014). Une eau impropre à la consommation humaine peut causer des maladies communément appelées maladies d'origine hydrique. C'est la raison pour laquelle, en plus du suivi quantitatif, les piézomètres sont suivis du point de vue de la qualité, même si le suivi n'est pas régulier dans le temps.

En plus de l'analyse sur la dynamique de l'évolution des niveaux piézométriques, un bref aperçu sur l'hydrochimie de l'eau a été fait. Pour se faire les paramètres chimiques de l'eau des piézomètres au moment de notre passage ont été analysés ; ensuite les diagrammes de Piper et de Scöeller ont été élaborés afin de mettre en exergue la minéralisation et les différents faciès hydrochimiques de l'eau des piézomètres. Cela a pour objectif de mettre en relief la qualité des eaux.

4.1.1. Données

Deux types de données ont été utilisés. Il s'agit des données de terrains (effectué au mois d'avril 2018) et des données collectées auprès de la DGRE.

Le temps consacré aux travaux de terrain n'ayant pas permis de faire des prélèvements d'eau de forages, nous nous sommes limités au prélèvement et à l'analyse des eaux de piézomètre. Pour cela, l'analyse a concerné les paramètres physico-chimiques (pH, température, turbidité, conductivité, le titre alcalimétrique total) et les ions majeurs tels que les calciums, magnésium, sodium, chlorure, les carbonates, les sulfates, les nitrates.

4.1.2. Echantillonnage

Les eaux ont été prélevées dans sur 11 forages avec une sonde manuelle ou une sonde électrique et conditionnées dans des bouteilles en plastique. Compte tenu de l'insécurité de la zone du Sahel du Burkina Faso au moment des sorties, l'échantillonnage a concerné les piézomètres qui étaient accessibles.

Les mesures in situ et au laboratoire ont été faits par la méthode électrochimique pour les paramètres physiques avec du WTW pH 3210 SET 1&3, du turbidimètre 355IR.

Pour les ions majeurs, la méthode spectrophotométrie a été appliquée avec du DR 3900 (pour les nitrates, sulfates), par photométrie pour le sodium et le potassium à l'aide du spectrophotomètre à flamme AFP 100. Le calcium, le magnésium, et les chlorures ont été dosés par titration complexométrique avec du NF T90-016 ; NF T90-003, NF T90-017.

4.1.3. Méthode d'analyse

La méthode utilisée s'est basée d'abord sur une analyse comparative de paramètres physiques des eaux des piézomètres à leur date de réalisation et en 2018.

Ensuite les diagrammes de Piper et de Schöeller, ont été dressés pour la mise en exergue de la minéralisation de l'eau et des différents faciès y relatifs afin de mieux connaître la qualité de l'eau. Le logiciel DIAGRAMMES a été utilisé pour la réalisation des diagrammes. La balance ionique a préalablement été calculée pour vérifier la fiabilité des analyses. La limite de fiabilité des analyses considérée s'est appuyée sur les travaux de Ouandaogo, (2008) qui a utilisé BI = 10% dans le cas où l'eau présentait une charge ionique élevée. Dans le cas présent, une conductivité électrique de 672 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a été observée dans un piézomètre à Gayéri. Ce qui montre une forte minéralisation des eaux à cet endroit. D'où la considération de la limite de fiabilité à 10%.

Ainsi la balance ionique est calculée avec la relation suivante :

$$BI (\%) = \left| \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anion}} \right| \text{ où les concentrations sont exprimées en meq/l}$$

4.2. Caractéristiques des paramètres physico-chimiques

4.2.1. Paramètres physiques :

Les paramètres physiques analysés sont le pH, la température la turbidité, la dureté totale, la conductivité. Ces paramètres concernant onze (11) piézomètres ont été mesurés in situ sur le terrain et les valeurs sont consignées en annexe 6 et 7

4.2.2. Evolution des paramètres in situ

Tous les paramètres mesurés in situ ont baissé après les mesures au laboratoire. Le pH et la turbidité sont restés sensiblement constants (légèrement en baisse). La diminution de la conductivité électrique indique qu'il y a eu une précipitation dans les échantillons. Les résultats sont consignés en annexes 6 et 7

4.2.2.1. pH

Le pH est une grandeur chimique qui enseigne sur l'alcalinité ou l'acidité d'une eau. Une eau est acide lorsque son pH est inférieur à 7 et alcaline si le pH est supérieur à 7. Quand le pH est égale zéro l'eau est dite neutre. Parmi les piézomètres dont les eaux ont été analysées, le pH varie de 6,23 à 7,34 avec une moyenne de 6,68. Les eaux des piézomètres peuvent donc être qualifiées d'une eau à tendance acide. On remarque que hormis deux piézomètres (Kondibito F1 et Tafogo SE6) dont la géologie est composée de migmatites et d'amphibolites, les autres piézomètres captent dans les granites. Les eaux légèrement acides peuvent être à l'origine de la nature silicatée des roches qui les abritent (Ouandaogo, 2008)

4.2.2.2. Température

La température est une caractéristique physique de l'eau qui peut indiquer son origine. En principe, la température diminue avec l'altitude. Des valeurs élevées de températures devraient correspondre à des eaux profondes (Ouandaogo 2008). La température de l'eau des piézomètres varie entre 31,3°C à 36,4°C (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Or ces piézomètres sont relativement peu profonds avec des profondeurs comprises entre 43-63 m. Ces températures s'avoisinent plutôt à la température ambiante de l'atmosphère de la période et de la zone et peuvent être attribués au réchauffement du sol (Babaye, 2012 ; Ouandaogo, 2008 ; Dakouré, 2003) puisque l'échantillonnage a été fait au mois d'avril qui fait partie des mois les plus chauds de la zone.

4.2.2.3. Conductivité

La conductivité est d'une importance capitale car elle permet de déterminer la présence des ions dans l'eau. Elle informe sur la minéralisation de l'eau. Le tableau 11 présente des valeurs de conductivité qui varient entre 117,3-672 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 346,85 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La plus grande et faible valeurs de conductivité ont été rencontrées dans les granites tandis que dans la roche migmatique, elle est de 272 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et de 290 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les amphibolites. Selon la classification de Kagamaté, (2006) les eaux de huit piézomètres dont la conductivité varie de 117,3-388 $\mu\text{S}/\text{cm}$ peuvent être qualifiées de faible minéralisation et trois ont une minéralisation supérieure à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (soit 666, 672, 502 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

4.2.2.4. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le TAC donne une indication sur la concentration des ions CO_3^{2-} et HCO_3^- . C'est une grandeur chimique qui permet de mesurer le caractère corrosif de l'eau. Les analyses chimiques que nous avons effectuées révèlent que le TAC varie entre 1,16 et 7,10 (tableau 11).

4.2.2.5. Dureté de l'eau :

Elle représente une grandeur chimique qui mesure la teneur en sel calcique et magnésique qui confère à l'eau son caractère dure ou douce. Elle varie de 0,5 à 3,36 mmol/l, avec une moyenne de 1,49 mmol/l (tableau 11).

4.2.2.6. Turbidité

Ce paramètre permet d'indiquer la présence d'éléments en suspension dans l'eau. Dans le cas présent, la turbidité la plus faible mesurée est de 1,53 et la valeur extrême de 1100 (tableau 11). Ces valeurs extrêmes sont observées dans les 2 piézomètres au niveau du site de Kondibito. Nous avons constaté également sur le terrain que ces deux piézomètres sont en voie de tarissement. N'ayant pas pu faire le prélèvement d'eau pour l'échantillonnage avec à un moteur électrique, la pompe manuelle a été utilisée. En fait la pompe touchait le fond des piézomètres et ramenait avec elle à la sortie du piézomètre de la boue et cela serait probablement à l'origine ces valeurs.

4.2.3. Analyse comparative de la situation de 2008 et 2018 des paramètres physiques

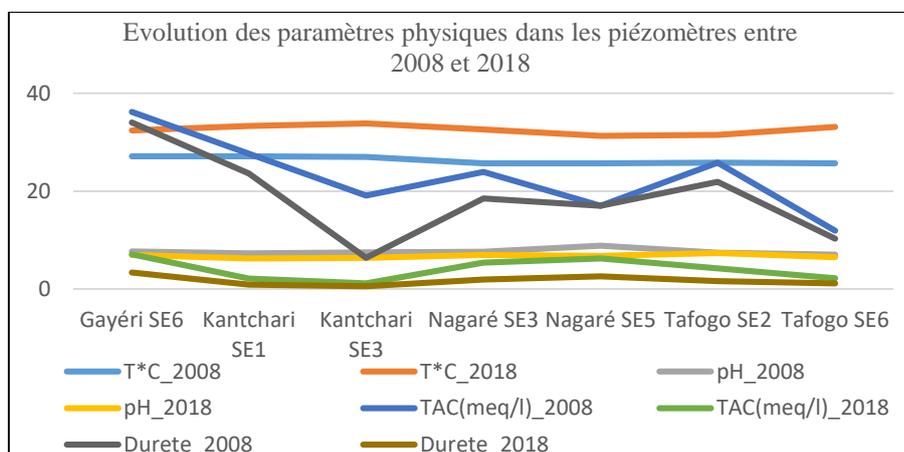
L'analyse porte sur sept piézomètres dont nous avons pu obtenir les résultats d'analyse chimiques au moment de la réalisation de ces piézomètres. Les extrema des températures se situent entre 25,7°C et 27,1°C ; des pH entre 7,04-8,84 ; de la conductivité entre 229-608 $\mu\text{s}/\text{cm}$; du TAC entre 11,9-36,2 meq/l ; de la turbidité entre 0,34 – 1,42 et de la dureté entre 10,3 – 34 TH. Les résultats d'analyse sont en Annexe 9, Annexe 10

Après dix ans de fonctionnement des piézomètres nous faisons les constats suivants :

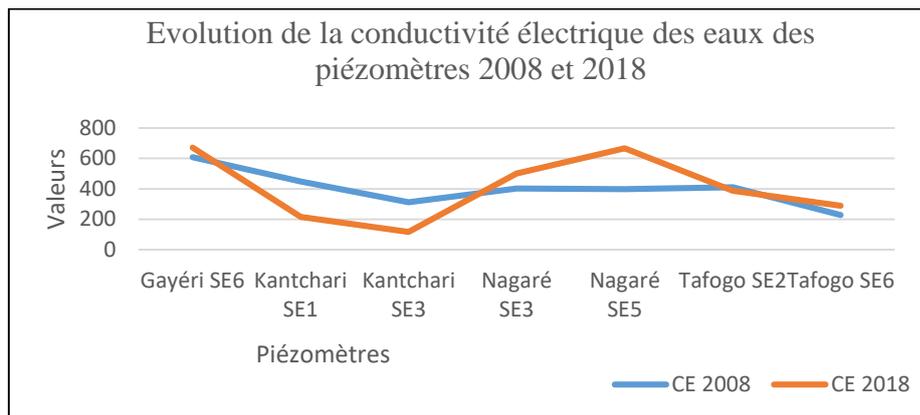
- Le pH des piézomètres était supérieur 7 mais n'atteignait pas 8, sauf à Nagaré SE5 où le pH vaut 8,84. A notre passage en avril 2018, tous les pH étaient en dessous de 7 sauf à Tafogo SE2 où il n'a sensiblement pas évolué (7,42 en 2008 et 7,34 en 2018).
- Toutes les températures ont évolués en avril 2018 par rapport à 2008 où elles n'atteignaient pas 30°C. On remarquera dans les fichiers techniques des piézomètres, que les ouvrages ont été réalisés pour la plupart dans la période allant d'Octobre à Janvier, période la plus froide du pays.

Si on retient le fait que la température ambiante influence la température des eaux, ces températures se voient justifier par la température de la période qui correspond à la période la plus froide de la zone.

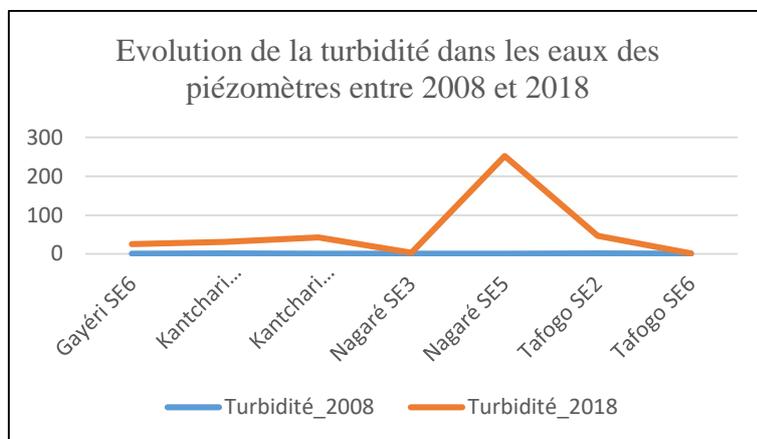
- La conductivité électrique a augmenté dans les piézomètres sauf à Kantchari SE3 où elle a diminué de plus de la moitié. Elle est passée de 312 μ s/cm en 2008 à 117,3 μ s/cm en 2018.
- La turbidité a beaucoup augmenté. Dans certains piézomètres elle a été multipliée par près 100. C'est le cas du piézomètre Gayeri SE6 qui est passé de 0,35 NTU à 25,28 NTU. Dans d'autres cas, elle a été multipliée par près de 10, et s'observe avec le piézomètre Nagaré SE3 qui passe de 0,23 à 3,34 NTU. L'extrême se rencontre à Nagaré SE5 qui est passé de 0,41 NTU à 252,1 NTU. Cette situation pourrait être le signe de l'arrivée de nouveaux éléments dans les piézomètres. A Nagaré ayant constaté une difficulté de pompage de l'eau afin de faire l'échantillonnage, la pompe manuelle a été une fois de plus utilisée. Au sortir de la pompe du piézomètre, elle a emporté avec elle, des tiges de sorgho et beaucoup d'herbe en voie de décomposition. Ce piézomètre comme bon nombre d'entre eux subissent très souvent des actes de vandalisme ou de l'ignorance des enfants bergers qui tentent de découvrir le mystère caché par un « forage qui ne pompe pas ». c'est probablement ces objets jetés à l'intérieur des piézomètres qui sont ouverts de force par les enfants malgré le fait d'être cadenassé qui expliquerait l'augmentation considérable de la turbidité dans certains cas. C'est une situation qui interpelle à doubler les efforts pour la protection des piézomètres et la sensibilisation de la population.
- Dureté : contrairement à la turbidité, la dureté a diminué. A Kantchari SE1 elle est passée de 23,6 en 2008 à 0,91 en 2018 et de 18,5 en 2008 à 1,9 en 2018 à Nagaré SE3. Les résultats sont synthétisés dans le Graphique 4 :



Graphique 4: Evolution des paramètres physiques dans les eaux des piézomètres entre 2008 et 2018



Graphique 5: Evolution de la conductivité électrique dans les eaux des piézomètres entre 2008 et 2018



Graphique 6: Evolution de la turbidité dans les eaux des piézomètres entre 2008 et 2018

En résumé cette partie fait l'état d'une situation à deux époques différentes et ne constitue donc pas une analyse approfondie car nous n'avons pas pu disposer de chroniques de données sur la qualité des eaux souterraines. Sur cette base les changements majeurs constatés sont : la turbidité et la conductivité ont augmenté tandis que la dureté a diminué.

4.3. Ions majeurs

Les ions majeurs regroupent les anions qui sont chargés négativement et les cations chargés positivement. Ce sont les ions majeurs qui contribuent à la minéralisation des eaux (Kagamaté, 2006).

- Les cations : constitués des ions de charge positive sont représentés par les ions Na, Mg, K ; Fe. Parmi les cations les plus abondants sont les ions Ca. Les eaux de tous les piézomètres ont leur Ca supérieur aux autres cations. Le second élément est Mg qui est souvent dépassé par Na. L'élément le moins abondant est K. Ce qui donne l'ordre d'abondance : $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ ou $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$.

- Les anions : constitués d'ions de charges négatives sont représentés par les ions tels que HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . Les HCO_3^- sont largement dominants et permet d'établir l'ordre : $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ ou $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$

Les résultats sont consignés à l'Annexe 11.

Les analyses chimiques que nous avons effectuées se révèlent fiables car la balance ionique (BI) calculée est comprise entre $-5\% < \text{BI} < +5\%$, sauf à Kondibito F2 où elle est de -6% .

4.4. Faciès hydrochimiques

Les diagrammes de Piper et de Schöeller ont été élaborés pour caractériser les faciès hydrochimiques des eaux des piézomètres. Le logiciel DIAGRAMMES a été utilisé.

4.4.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est composé de deux triangles et d'un losange. Chaque triangle constitue un faciès cationique ou anionique. Le losange synthétise le faciès global de l'eau analysée.

A l'issue de notre analyse, deux familles de faciès se dégagent. Il s'agit de la famille des bicarbonatés calciques et magnésiennes et la famille des bicarbonatés calciques, comme montrée dans la Figure 3

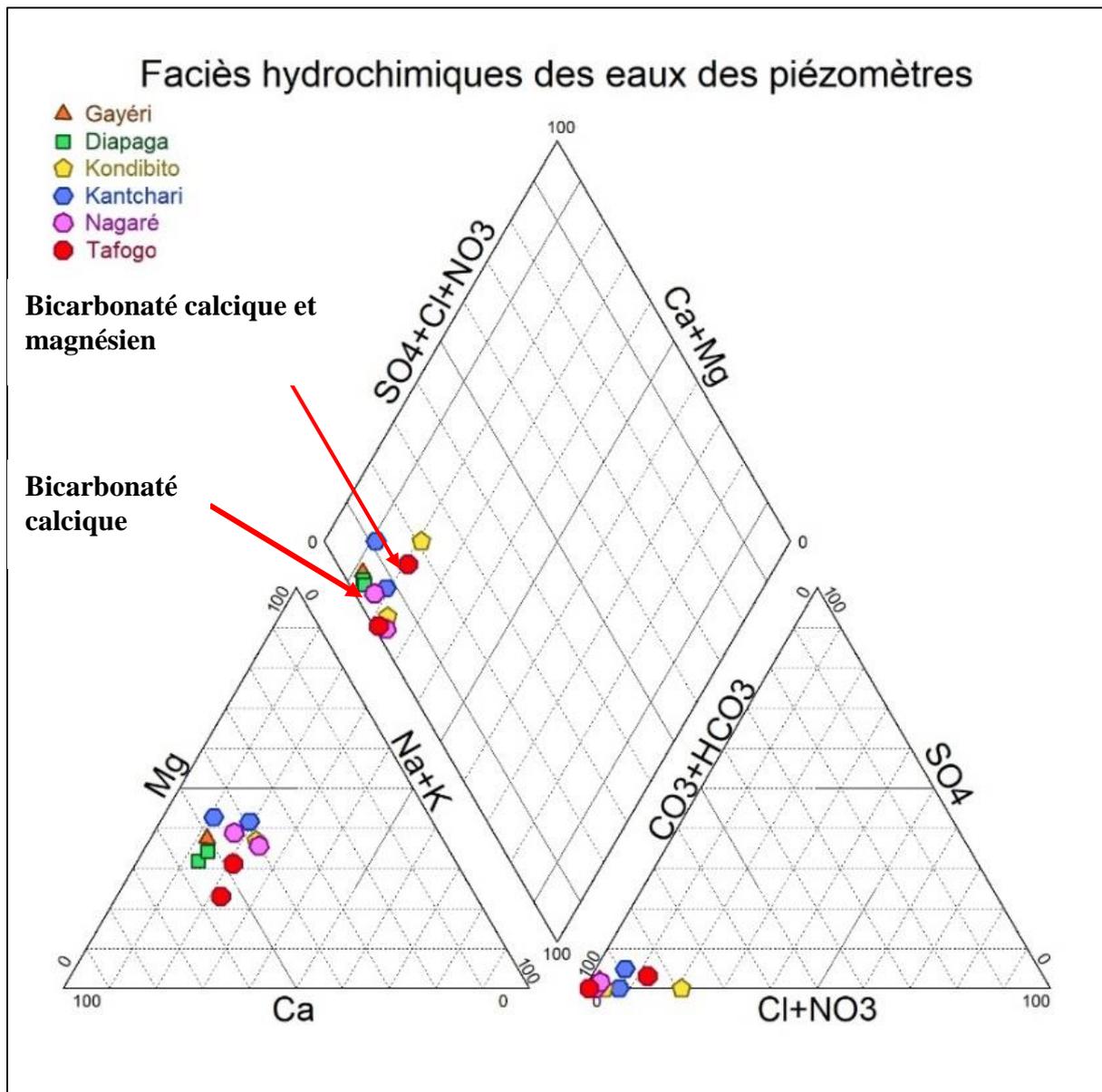


Figure 31: Représentation des faciès hydrochimiques des eaux des piézomètres

Au niveau des anions, les ions sont tous regroupés au pôle bicarbonaté qui, selon Ouandaogo (2008) appartiennent aux eaux des nappes fissurées. Ces ions sont centrés autour des plus faibles valeurs sans migration majeure vers le pôle chloruré. Ce qui signifie qu'à priori il n'y a pas de pollution pressentie au nitrate.

Au niveau des cations, les ions sont regroupés au niveau du centre où il n'y pas de dominance de cations. Ouandaogo (2008) a également trouvé les mêmes résultats dans les forages du socle de Ouagadougou.

La combinaison de ces résultats ont permis d'obtenir les deux hydro-faciès :

- Les bicarbonatés calciques : ce faciès représente la famille la plus dominante. Elle est caractéristique des eaux rencontrées dans le socle de l'Afrique (Babaye 2012).

Cet auteur a également cité quelques auteurs qui ont également trouvé les mêmes résultats. Les piézomètres dont l'eau est concernée par ce faciès sont : Diapaga, Gayeri, Kantchari, Nagaré, Tafogo.

- Les bicarbonatés calciques et magnésiennes : trois piézomètres ont leur eau de type bicarbonaté calcique et magnésien. Il s'agit des piézomètres de Tafogo et de Kantchari et Kondibito. Ce faciès est au voisinage du pôle bicarbonaté calcique et est en cours d'évolution vers le pôle bicarbonaté calcique et magnésien.

4.4.2. Diagramme de Schöeller Berkloff

Le diagramme de Schöeller est une représentation verticale des ions majeurs à échelle logarithmique. Il est constitué d'axes représentant chacun un ion majeur en fonction de sa concentration. Il permet d'obtenir une idée sur la minéralisation.

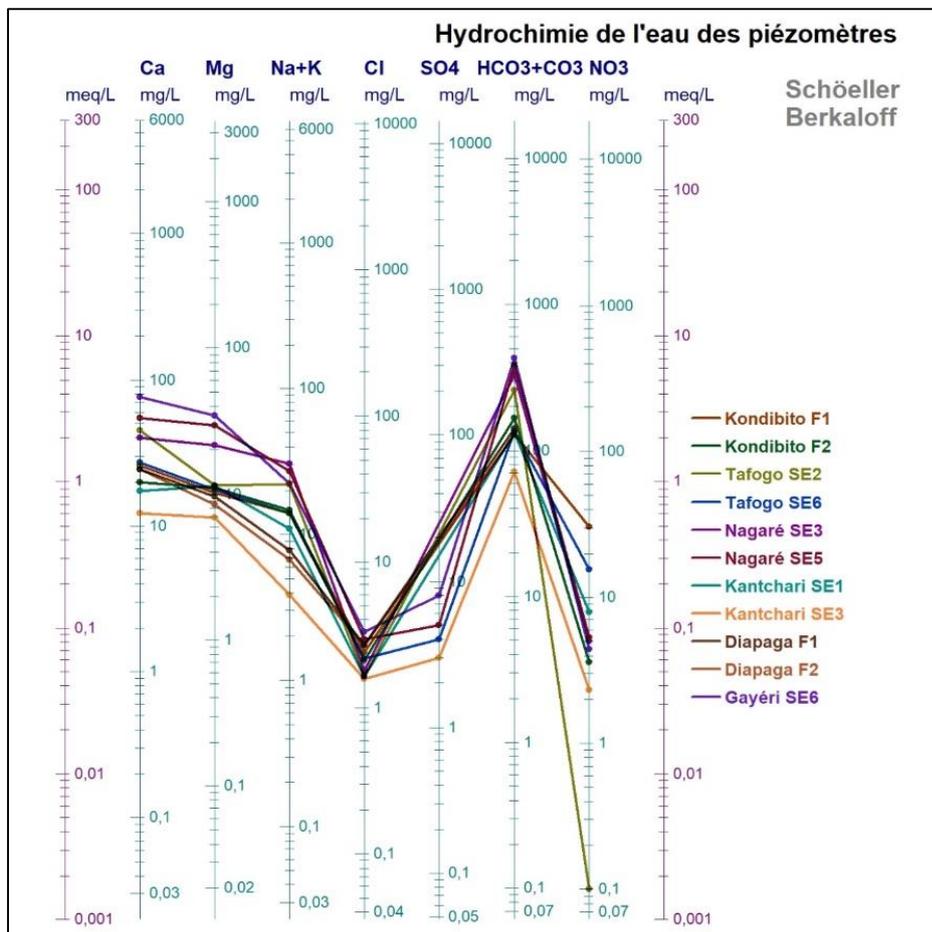


Figure 32: Diagramme de Schöeller des eaux des piézomètres

L'analyse de ce diagramme montre que les cations majeurs sont dominés par les ions calcium et les ions minoritaires sont les ions Na^+K . Quant aux anions ils sont dominés par les ions carbonatés. Ceci est à l'origine de la dominance du faciès bicarbonaté calcique.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce travail qui a porté sur l'étude des nappes du bassin du Niger au Burkina Faso, a permis de mieux connaître premièrement l'évolution des piézomètres depuis leur réalisation jusqu'à nos jours. Ainsi les variations des niveaux piézomètres ne se comportent pas de la même manière d'un piézomètre à un autre. Certains piézomètres présentent une tendance à la baisse tandis que d'autres connaissent une hausse des niveaux piézométriques dans le temps, probablement dû aux conditions climatiques mais une investigation approfondie n'a été faite dans le cas présent. Deuxièmement, l'analyse sur les paramètres hydrodynamique des nappes, a montré la distribution inégale de la transmissivité dans les différentes formations géologiques. Elle est en général faible. Près de la moitié des 428 (sur 835) forages ont une transmissivité inférieure 10^{-5} m²/s, tandis que 13 forages ont une transmissivité supérieure à 10^{-2} m²/s (dans les granites et les schistes). Troisièmement, dans la présente étude, les débits excellents des forages ne dépendent pas a priori des grandes profondeurs, ni des grandes épaisseurs d'altération, au niveau du socle. Ils se situent les profondeurs situées entre 40-80m et des épaisseurs d'altération comprises entre 10-30m.

Enfin l'esquisse sur la qualité de l'eau des eaux des piézomètres indique, que les paramètres physiques tels que la turbidité, a augmenté tandis que la dureté a diminué (situation de 2008 comparée à 2018). Quant à la conductivité électrique, elle a diminué dans certains piézomètres et augmenté dans d'autres. Les raisons de cette évolution n'ont pas pu être mises en exergues pour insuffisance de données. Ces paramètres chimiques pouvant évoluer pour une moindre modification du milieu, une analyse comparative des résultats d'analyses chimiques de 2008 et 2018 a été seulement faite. Par ailleurs, deux hydro-faciès ont pu être mis en évidence : les bicarbonatés calciques et les bicarbonatés calciques et magnésiennes.

En dépit des résultats obtenus, l'insuffisance de données a constitué une limite majeure. Tous les piézomètres n'ont pas de bonne continuité dans les chroniques piézométriques de données et possèdent beaucoup de lacune. Le nombre insuffisant de piézomètres a constitué également une limite pour ce travail. L'un des objectifs initiaux, qui était d'élaborer une carte piézométrique n'a ainsi pas été atteint. Les données de niveau d'eau dans les forages qui pouvaient permettre de compléter les données des piézomètres, ont été également insuffisantes. Aussi l'insuffisance de données sur la chimie a constitué une grande limite.

En guise de recommandations :

Aux structures en charge de la gestion de l'eau :

- La densification du réseau piézométrique : le nombre des piézomètres du bassin du Niger au Burkina Faso paraît insuffisant. Le but principal d'un réseau piézométrique étant de suivre et améliorer les connaissances des eaux souterraines, le réseau piézométrique doit être amélioré par la réalisation de nouveaux piézomètres.
- Améliorer le suivi des piézomètres afin d'augmenter la qualité et la fiabilité des données. Parmi les piézomètres que nous avons utilisés certains présentent une année entière voire plus sans une seule donnée. Il sera aussi important d'équiper les piézomètres d'enregistreurs afin d'automatiser le suivi.
- Accentuer la protection des piézomètres : certains piézomètres subissent des actes de vandalisme. Il serait convenable de réaliser des clôtures en grille pour augmenter la sécurité des piézomètres.

A l'état Burkinabè et ses partenaires techniques et financiers :

- Réaliser une étude approfondie sur l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines du bassin du Niger au Burkina Faso. En effet il a été mis en évidence dans cette étude la hausse des niveaux piézométriques dans certains piézomètres. Il serait important de pousser les investigations afin de trouver les causes réelles et vérifier si le retour des conditions climatiques favorables ne constitue pas le principal facteur.

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilar, J.B., Orban, P., Brouyère, S. (2006).** Identification of groundwater quality trends in a chalk aquifer threatened by intensive agriculture in Belgium. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0204-y>, 13p
- Albergel, J., Carbonnel J. P., et Grouzis, M. (1985).** Péjoration climatique Burkina Faso au Incidences sur les ressources en eau et les productions végétales, (1), 3–19p.
- Babaye, A. M. S. (2012).** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin du Dargol (Liptako-Niger). Faculté Des Sciences Appliquées/Département Architecture, Géologie, Environnement et Construction/Secteur GEO3, Thèse de D, 265P.
- BRGM, (2009).** Les indicateurs piézométriques, un outil dans la gestion des hydro systèmes, Orientations méthodologie ? 165P
- Castany, G. (1998).** Hydrogéologie Principes et méthodes, 233p.
- Castany, G., et Margat, J. (1977).** Dictionnaire Français d'hydrogéologie, 249p.
- Dakouré, D. (2003).** Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso - mali) - essai de modélisation, 255p.
- DEP. (1993).** Carte Hydrogéologique du Burkina Faso, feuille Dori, 40p.
- Institut National des Statistiques Démographiques (INSD). (2016).** Annuaire statistique de l'environnement 2015, récupéré, http://www.insd.bf/n/contenu/pub_periodiques/annuaires_stat/Annuaire_stat_nationaux_BF/Annuaire_stat_2015.pdf.
- Kamagaté, B. (2006).** Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé), 320p.
- Margat, J. (1972).** Propositions pour un dictionnaire, (02), 1968–1971.
- Ministère de l'E et de l'Environnement (MEE). (2001).** État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. 252p.
- Ministère de l'Eau des Aménagements Hydrauliques et l'Assainissement (MEAHA), (2013).** Capitalisation du processus de mise en place. Les Agences de l'eau du Burkina Faso, 38p.
- Ministère de l'Eau et de l'Assainissement, (2016).** Programme national pour la gestion intégrée des ressources en eau PNGIRE (2016-2030), 71p.
- Ministère de l'Eau et l'Environnement (MEE). (1998).** Politique et Stratégies en matière d'eau. Burkina Faso, 119p

Ouandaogo, S. Y. (2008). Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina-Faso : qualité et vulnérabilité. Ecole Doctorale SIBAGHE, Thèse de d, 254p.

Ouédraogo, O., et Schmidt, M., (2011). Zones d'importance écologique Burkina Faso, 6p

Savadogo, N. (1975). Hydrogéologie du bassin versant de la Haute-Sissili (Haute-Volta) To cite this version : HAL Id : tel-00759907, 111p.

Sawadogo, G. (2001). L'eau en Afrique de l'Ouest : une préoccupation majeure face à une mauvaise gouvernance qui aggrave la gestion de l'eau dûe aux difficultés locales spécifiques, 1(178).

Soro, D. D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso), 304p.

Tirogo, J. Y. (2016). Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso To cite this version : HAL Id : tel-01429591 Université Pierre et Marie Curie (UPMC) Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 261p.

Tirogo, Jost, A., Biaou, A., Valdes-Lao, D., Koussoubé, Y., et Ribstein, P. (2016). Climate Variability and Groundwater Response: A Case Study in Burkina Faso (West Africa). *Water*, 8(5), 171. <https://doi.org/10.3390/w8050171>,

Tremblay, Y., Rouleau, A., et Larouche, U. F. (2014). Notions d'hydrogéologie. Les eaux souterraines pour tous.

Yameogo, D. (1988). Hydrogéologie des formations fissurées de la partie sud du plateau Mossi entre le Nazino et le Nakambe (région de Kombissiri-Manga), Burkina-Faso, 166p.

Site web

<https://fr.tutiempo.net>.

ANNEXES

Annexe 1: Caractéristiques des piézomètres

Region	Village	DateCreat	Lat (°dec)	Long (°dec)	Altitude	NivStat de fin foration	Prof	Epaisseur d'altération	Débit de fin de foration	Transmivité (m2/j)	Litho	Geomorphologie	TypeAquifère	Etat
Sahel	Aribinda 3	27/01/198	14,2	-	321,1	35	52	9	1		Amphib	Plateau	Socle	Fonctionn
Est	Diapaga	19/05/199	12,0	1,77	258,8	29	62	39	3		Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Est	Diapaga	18/05/199	12,0	1,77	258,9	23	63	29	0		Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Est	Fada	21/10/198	12,0	0,35		0	62	16	0		Granite	Pente	Socle	Arret
Est	Gayeri	05/12/200	12,6	0,49	0	13,1	48,87	18,68	1,1	1,8	Amphib	Bas-fond	Socle	Sec
Est	Gayeri	04/12/200	12,6	0,49	275,9	22,1	49,09	5,3	4,5	62,2	Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Gorom-Gorom	14/05/198	14,4	-		37	81	8	1		Granite	Bas-fond	Socle	Arret
Est	Kantchari	31/10/200	12,4	1,54	0	20,4	49,14	24,8	12	360,6	Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Est	Kantchari	31/10/200	12,4	1,54	389,3	20,3	49,21	21,77	5,1		Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Katchari	07/05/199	14,0	-	281,3	28	50	13	11		Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Katchari	07/05/199	14,0	-	281,6	28	56	7	14		Granite	Plateau	Socle	Arret
Est	Koadifagou	15/05/199	12,2	0,36		17	55	8	2		Granite	Pente	Socle	Arret
Est	Koadifagou	12/11/198	12,2	0,37		0	44	12	1		Granite	Pente	Socle	Arret
Centre-	Kondibito(darko)		13,3	-	317	0	0	0	0					Fonctionn
Centre-	Kondibito(darko)		13,3	-	319	0	0	0	0		Migmat		Socle	Fonctionn
Est	Nagaré	22/12/200	12,9	-	322,1	15,5	43,2	22,14	12	70,9	Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Est	Nagaré	22/12/200	12,9	-	323,6	16,8	43,13	18,76	18	53,8	Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Pobé Mengao	02/02/200	13,9	-	0	0	61,45	7,13	0,6		Amphib	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Pobé Mengao	31/01/200	13,9	-	258,1	0	55,35	6	2		Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Sahel	Sampelga	24/12/200	13,7	-	302,7	14,6	73,7	6,35	0,5	0,2	Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Sahel	Sampelga	24/12/200	13,7	-	303,2	15,1	43,1	11,02	6	13,7	Schiste	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Sahel	sebba	29/07/200	13,4	0,52	275,7	22,7	79,64	6,48	0,5	0,1	granodiorit	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Sahel	sebba	30/07/200	13,4	0,52	276,4	25,7	55,29	6,53	2,5	15,1	Granite	Plateau	Socle	Fonctionn
Centre-	Tafogo	21/12/200	13,4	-	308,7	5,8	61,5	18	0,65	0,4	Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Centre-	Tafogo	03/11/200	13,4	-	309,9	15,2	43	16,33	6	20,9	Amphib	Plateau	Socle	Fonctionn

Region	Village	DateCreat	Lat (°dec)	Long (°dec)	Altitude	NivStat de fin foration	Prof	Epaisseur d'altération	Débit de fin de foration	Transmissivité (m2/j)	Litho	Geomorphologie	TypeAquifère	Etat
Centre-	Tafogo	21/12/200	13,4	-	315,9	0	61,5	18	0,65		Granite	Bas-fond	Socle	Fonctionn
Sahel	Tin-Akoff	27/01/200	14,9	-	271,6	28,9	66,2	54,98	20	10385	Schiste	Bas-fond	Socle	arret
Sahel	Tin-Akoff	19/01/200	14,9	-	274,1	31,6	66,65	65,8	18		Schiste	Plateau	Socle	arret
Sahel	Tin-Arkachen	07/11/200	14,9	-	274,8	33,3	122,5	11,2	25		Calcaire	Bas-fond	Sédimentair	Fonctionn
Sahel	Tin-Arkachen	21/11/200	14,9	-	279,8	38,5	151,1	10,56	42		Calcaire	Plateau	Sédimentair	Arret

Annexe 2: Récapitulatif des différents coefficients

N°	Série	R ²	r	Tau de Kendall	p-value	Pente de Sen	Tendance
1	Sebba SE6	0,91	-0,95	-0,99	< 0,0001	-0,86	-1,00
2	Sebba SE2	0,87	-0,93	-0,97	< 0,0001	-0,70	-1,00
3	Pobe Mengao SE15	0,77	-0,88	-0,75	< 0,0001	-0,91	-1,00
4	Pobe Mengao SE11	0,76	-0,87	-0,74	< 0,0001	-0,94	-1,00
5	Kantchari SE1	0,25	-0,50	-0,65	< 0,0001	-0,29	-1,00
6	Kantchari SE3	0,20	-0,45	-0,38	< 0,0001	-0,12	-1,00
7	Nagaré SE3	0,07	-0,27	-0,15	0,22	-0,05	-
8	Nagaré SE8	0,07	-0,26	-0,09	0,43	0,05	-
9	Kondibito F1	0,01	-0,12	-0,04	0,65	-0,04	-
10	Koadifagou F2	0,00	-0,06	-0,01	0,90	-0,04	-
11	Samplega SE4	0,00	0,01	-0,17	0,08	-0,05	-1,00
12	Tin Akoff SE4	0,05	0,22	0,02	0,88	0,03	-
13	Diapaga F1	0,18	0,42	0,55	< 0,0001	0,27	1,00
14	Gayeri SE5	0,23	0,48	0,50	< 0,0001	0,26	1,00
15	Arbinda	0,52	0,72	0,65	< 0,0001	0,15	1,00
16	Koadifagou F1	0,59	0,77	0,60	< 0,0001	0,81	1,00
17	Gayeri SE6	0,70	0,84	0,57	< 0,0001	0,31	1,00
18	Diapaga F2	0,92	0,96	0,84	< 0,0001	0,42	1,00

Annexe 3: Répartition des piézomètres en fonction des sites et de la géologie

Village	Amphibolit	Calcair	Granit	granodiorit	Grè	Migmatit	Schist	Tota
Aribinda 3	1							1
Diapaga			2					2
Fada			1					1
Gayeri	1		1					2
Gorom-Gorom			1					1
Kantchari			2					2
Katchari			2					2
Koadifagou			2					2
Kondibito(darko						1		1
Nagaré			2					2
Pobé Mengao	1		1					2
Sampelga			1				1	2
sebba			1	1				2
Tafogo	1		2					3
Tin-Akoff							2	2
Tin-Arkachen		2						2
Total	4	2	18	1		1	3	29

Annexe 4: Transmissivité en fonction de la géologie

Litho	Transmissivité (m ² /s)	
	Min	Max
Amphib	2,08E-05	0,000242
Granite	2,31E-06	0,004174
granodiorite	1,16E-06	1,16E-06
Schiste	0,000159	0,120197

Annexe 5: Caractéristiques des forages

GÉOL	Profondeur (M)			Epaisseur d'altération (m)			Débit (m ³ /s) fin de foration			Niveau statique fin de foration (mss)		
	Mo	Mi	Ma	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Amphibol	63,	52,	75,3	8,83	2,65	15,0	4,53	0,45	8,60	22,67	14,31	31,03
Andésite	62,	50,	80,8	11,5	5,00	18,0	6,62	0,56	18,0	17,47	6,12	30,68
Basalte	53,	53,	53,4	16,2	16,2	16,2	4,50	4,50	4,50	20,70	20,70	20,70
Gabbro	68,	50,	84,6	15,3	14,4	16,3	1,23	0,56	2,50	18,08	13,75	26,21
Gneiss	59,	54,	65,2	15,0	4,75	25,4	2,40	1,20	3,60	23,37	19,83	26,91
Granite	58,	39,	94,7	13,4	1,20	43,8	2,92	0,31	36,0	21,64	1,56	51,28
Granite	66,	64,	67,3	14,4	13,7	15,1	2,80	2,00	3,60	12,91	11,49	14,33
Granite	56,	47,	79,7	11,1	4,00	19,9	1,86	0,80	4,40	20,46	10,29	28,78
Granodio	69,	58,	84,6	12,3	2,75	18,1	3,48	0,80	5,50	21,57	19,16	23,17
Grès	60,	50,	72,6	10,0	1,95	19,9	5,00	0,60	12,0	34,48	16,49	46,22
Micaschis	70,	70,	70,2	24,1	24,1	24,1	0,90	0,90	0,90	12,40	12,40	12,40
Migmatit	59,	45,	71,6	15,0	5,05	25,3	2,15	0,75	6,00	17,19	9,60	34,24
Pegmatite	57,	44,	82,9	15,1	5,75	32,0	4,42	1,10	24,0	20,00	8,54	38,72
Roche	54,	50,	63,6	15,0	5,30	27,0	6,34	2,00	9,00	15,17	11,55	17,25
Roche	55,	44,	78,0	13,8	5,00	23,3	3,00	0,65	6,80	22,01	8,24	34,69
Schiste	65,	45,	102,	15,5	1,00	48,0	4,29	0,45	25,0	23,45	3,81	70,92

Annexe 6: Transmissivité des forages

GÉOL	Transmissivité (m ² /s)						Nombre
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum	Variance	Médiane	
Granite rose	8e-5	6,0947e-5	1,27e-5	1,85e-4	3,7145e-9	5e-5	9
Amphibolite	2e-4	0,0002841	1,16e-6	4,03e-4	8,0738e-8	2e-4	2
Andésite	1e-3	0,0016377	9,26e-6	4,86e-3	2,6822e-6	4e-4	8
Basalte	1e-4	.	1,08e-4	1,08e-4	.	1e-4	1

GÉOL	Transmissivité (m2/s)						Nombre
	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum	Variance	Médiane	
Gabbro	1e-4	0,0001849	2,31e-6	3,4e-4	3,4199e-8	4e-5	3
Gneiss	7e-5	8,6529e-5	4,63e-6	1,27e-4	7,4872e-9	7e-5	2
Granite	4e-3	0,0384437	1,16e-6	5,87e-1	0,0014779	8e-5	570
Granite gris	5e-5	5,4829e-5	9,26e-6	8,68e-5	3,0062e-9	5e-5	2
Granodiorite	8e-4	0,0013692	1,62e-5	2,43e-3	1,8748e-6	1e-4	4
Grès	4e-4	0,0007354	1,62e-5	1,9e-3	5,4087e-7	1e-4	6
Micaschiste	9e-6	.	9,26e-6	9,26e-6	.	9e-6	1
Migmatite	1e-4	0,0001216	2,31e-6	3,89e-4	1,4781e-8	1e-4	9
Pegmatite	3e-4	0,0004569	4,63e-6	1,44e-3	2,0877e-7	5e-5	10
Roche verte	7e-4	0,0008837	1,97e-5	3,91e-3	7,8094e-7	4e-4	26
Schistes	2e-2	0,1100509	1,16e-6	9,61e-1	0,0121112	2e-4	182
Tout	6e-3	0,0605043	1,16e-6	9,61e-1	0,0036608	9e-5	835

Annexe 7: Analyse chimique réalisée en 2018

Nom	Année	Géologie	T°C	pH	CE	TAC (Meq/l)	Turbidité	Dureté
Kondibito F1	2018	Migmatite	34,1	6,7	272	2,116	1100	1,078
Kondibito F2	2018	-	36,4	6,89	274	2,708	1071	0,96
Tafogo SE2	2018	Granite	31,5	7,34	388	4,232	46,45	1,61
Tafogo SE6	2018	Amphibolite	33,1	6,49	290	2,212	1,53	1,118
Nagaré SE3	2018	Granite	32,6	6,95	502	5,4	3,34	1,916
Nagaré SE5	2018	Granite	31,3	6,78	666	6,24	252,1	2,58
Kantchari SE1	2018	Granite	33,3	6,23	216	2,154	30,9	0,91
Kantchari SE3	2018	Granite	33,8	6,36	117,3	1,158	42,33	0,592
Diapaga F1	2018	Granite	31,7	6,3	213	2,316	8,06	1,012
Diapaga F2	2018	Granite	32,3	6,46	205	2,106	7,7	0,958
Gayéri SE6	2018	Granite	32,4	6,95	672	7,104	25,28	3,36

Annexe 8: Analyses chimiques in situ et au laboratoire

Echantillon	Code	T°	T° (labo)	pH	pH (labo)	Con d	Cond (labo)	Turb	Turb (labo)
Kondibito Mossi	F1	34,1	29	6,7	6,72	272	269	1100	1100
Kondibito Mossi	F2	36,4	29	6,89	6,91	274	232	1071	1070
Tafogo	SE2	31,5	29,1	7,34	7,28	388	326	46,45	46,49
Tafogo	SE6	33,1	29,1	6,49	6,51	290	285	1,53	1,5
Nagaré	SE3	32,6	29	6,95	6,98	502	495	3,34	3,35
Nagaré	SE5	31,3	29,1	6,78	6,76	666	625	252,1	253
Kantchari	SE1	33,3	29,1	6,23	6,27	216	195,3	30,9	32
Kantchari	SE3	33,8	29	6,36	6,4	117,3	115,6	42,33	43,01
Diapaga	F1	31,7	29,1	6,3	6,26	213	211	8,06	7,98
Diapaga	F2	32,3	29	6,46	6,51	205	198,7	7,7	7,73
Gayéri	SE6	32,4	29,1	6,95	6,99	672	575	25,28	26,03

Annexe 9: Paramètres physiques des piézomètres en 2008

Nom	Année	Géologie	T*°C	pH	CE	TAC (meq/l)	Turbidité	TH
Gayéri SE6	2008	Granite	27,1	7,68	608	36,2	0,34	34
Kantchari SE1	2008	Granite	27,1	7,27	449	27,6	1,15	23,6
Kantchari SE3	2008	Granite	27	7,5	312	19,1	0,23	6,4
Nagaré SE3	2008	Granite	25,7	7,58	403	23,9	0,23	18,5
Nagaré SE5	2008	Granite	25,7	8,84	399	17	0,41	17
Tafogo SE2	2008	Granite	25,8	7,42	411	25,8	1,42	21,9
Tafogo SE6	2008	Amphibolite	25,7	7,04	229	11,9	0,59	10,3

Annexe 10: Paramètres physiques des eaux des piézomètres en 2018

Nom	Année	Géologie	T*°C	pH	CE	TAC (meq/l)	Turbidité	TH
Gayéri SE6	2018	Granite	32,4	6,95	672	7,104	25,28	33,6
Kantchari SE1	2018	Granite	33,3	6,23	216	2,154	30,9	9,1
Kantchari SE3	2018	Granite	33,8	6,36	117,3	1,158	42,33	5,92
Nagaré SE3	2018	Granite	32,6	6,95	502	5,4	3,34	19,16
Nagaré SE5	2018	Granite	31,3	6,78	666	6,24	252,1	25,8
Tafogo SE2	2018	Granite	31,5	7,34	388	4,232	46,45	16,1
Tafogo SE6	2018	Amphibolite	33,1	6,49	290	2,212	1,53	11,18

Annexe 11: Ions majeurs

Nom	Année	Géologie	Ca	Mg	Na	K	Fe	HCO ₃	CaCO	NO	NO ₂	SO	Cl
			Mg/l										
Gayéri SE6	2018	Granite	76,8	34,5	18,	3,	0	433,3	336	4,4	0,00	8	3,3
Kantchari	2018	Granite	17,5	11,3	8,1	2,	0,9	131,3	91	7,9	0,01	0	1,6
Kantchari	2018	Granite	12,2	6,86	2,5	1,	1	70,63	59,2	2,3	0	3	1,5
Nagaré SE3	2018	Granite	40,3	21,7	24,	6	0,0	329,4	191,6	5	0	0	1,7
Nagaré SE5	2018	Granite	54,4	29,2	20,	6,	1,2	380,6	258	5,3	0,11	5	2,9
Tafogo SE2	2018	Granite	45,1	11,5	19,	2,	0,3	258,1	161	0,1	0,01	0	1,6
Tafogo SE6	2018	Amphibolit	26,9	10,6	12,	1,	0	134,9	111,8	15,6	0	4	2,1

RESUME

Le bassin du Niger au Burkina Faso occupe la partie Nord et Est du pays. Il couvre une superficie de 83 442Km². Il est l'un bassin défavorisé vis-à-vis des conditions climatiques comparativement au reste du pays et les ressources en eau y sont limitées (MEE, 2001). En plus, son contexte géologique difficile est bâti sur un socle granitique conférant aux aquifères une discontinuité hydraulique.

La volonté du gouvernement burkinabè d'assurer une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau notamment les eaux souterraines a conduit à la mise en place d'un réseau piézométrique optimum en 2008, composé de trente-deux (32) piézomètres pour le suivi quantitatif et qualité de ces eaux.

Ce travail dont le thème a porté sur « Etude des nappes aquifères du bassin du Niger au Burkina Faso » avait pour objectif la contribution à l'amélioration de la connaissance des eaux souterraines du bassin du Niger au Burkina Faso pour leur meilleure gestion.

La méthodologie utilisée s'est basée essentiellement sur des calculs statistiques appliqués aux chroniques de données piézométriques, aux paramètres techniques de forages, aux paramètres physico-chimiques des eaux des piézomètres. Elle a permis de caractériser la tendance actuelle des niveaux piézométriques des nappes, de décrire la productivité des aquifères et de mettre en relief la minéralisation des eaux des nappes.

Les résultats obtenus des analyses montrent trois types de tendance de l'évolution des niveaux piézométriques avec le temps. Ainsi sur dix-huit piézomètres analysés, cinq (06) piézomètres présentent une hausse des niveaux des nappes, sept (07) une baisse et cinq (05) n'ont pas de tendance. En plus l'étude a permis de mettre en exergue une hétérogénéité dans la répartition de la transmissivité. Celle-ci varie entre $9,26.10^{-6}$ à $0,961 \text{ m}^2/\text{s}$ dans les différentes formations géologiques. En relation avec la chimie de l'eau, deux hydro-faciès ont été identifiés : les carbonatés calciques ; les carbonatés calciques et magnésiens.

Les mesures de gestion telles que le suivi périodique rapproché des piézomètres, la densification du réseau piézométriques, l'équipement des piézomètres d'enregistreurs automatiques et une étude approfondie de l'impact des conditions climatiques et des prélèvements, sur les eaux souterraines seraient capitaux pour contribuer à garantir la pérennité de ces eaux.

Mots clés : eau souterraine, piézométrie, hydrodynamique, hydrochimie, bassin du Niger au Burkina Faso.