



TÉLÉDÉTECTION HAUTE RÉOLUTION ET HYDROGÉOLOGIE EN PAYS DOGON

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER INFRASTRUCTURES ET RÉSEAUX HYDRAULIQUES
OPTION : EAU SOUTERRAINE

Présenté et soutenu publiquement le 24 juin 2014 par

Aline HUBERT

Travaux dirigés par : Dr Youssouf KOUSSOUBÉ

Enseignant Chercheur en hydrogéologie à l'Université
de Ouagadougou
Unité de formation et de Recherche en Science de la
Vie et de la Terre

Dr Guillaume FAVREAU

Chargé de Recherche à l'IRD
UMR HydroSciences Montpellier

Jury d'évaluation du stage :

Président : Angelbert BIAOU

Membres et correcteurs : Mahamdou KOITA
Sewa DA SILVEIRA
Youssouf KOUSSOUBE

Promotion [2013/2014]

DEDICACES

Je dédie ce travail de recherche à ma famille qui a vécu tant de chamboulements cette année et que je n'ai pas pu soutenir autant que je l'aurais souhaité.

En particulier à ma sœur jumelle, Orianne, et à ma nièce, Alya, que je n'ai pas encore eu la chance de tenir dans mes bras et qui grandit déjà trop vite, si loin de moi.

Enfin à ma grand-mère, Mijacque, à qui je n'ai pas pu dire au revoir.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble de mon équipe encadrante pour sa présence tout au long de ces 5 mois de stage, pour son attention quotidienne, pour ses remarques et conseils avisés, et pour son énergie et son dynamisme.

Je parle en particulier de mes deux encadrants, Youssouf Koussoubé et Guillaume Favreau, qui, grâce à leur solide expérience dans le domaine de la recherche et de l'hydrogéologie, m'ont permis de découvrir cet univers si particulier et si passionnant.

Je parle également du professeur Pierre Ribstein, grâce à qui j'ai pu intégrer le 2iE et qui a su me faire confiance en me proposant ce stage.

Je parle enfin de l'équipe de Via Sahel Hydrogéologie, et notamment de Joel Picaut, Jean Pierre Marc et Brigitte Fébrier, sans qui le projet n'aurait jamais vu le jour, et qui ont consacré une grande partie de leur temps à m'appuyer ; je pense aussi, bien sûr, à Alain Vallet et toute l'équipe Via Sahel à Sangha, qui se sont fortement mobilisés pour réaliser des compléments de mesures piézométriques nécessaires à mon travail.

Ce travail de recherche est le fruit de notre collaboration enthousiaste.

Je remercie aussi les enseignants et les élèves du 2iE, pour leur disponibilité, leur collaboration et la qualité de la formation dispensée.

Je veux remercier également toutes les structures qui ont permis l'aboutissement de ce travail : l'IRD et le LMI Picass'eau, le laboratoire d'hydrogéologie de Ouagadougou, l'Université de Paris VI, le 2iE, la Direction Nationale de l'Hydraulique de Mopti, la Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso et le bureau d'étude Gauff Ingénieur. Je remercie aussi SPOT-Image pour la mise à disposition du MNE Référence 3D, ainsi que la Fondation Planet Action, pour celle des données satellitaires exceptionnelles qui font toute l'originalité de cette étude.

Je n'oublie pas non plus les personnes qui, durant ce stage et sur des points précis, m'ont apporté leur aide et leurs conseils. Je pense à Jean-Michel Vouillamoz, à Emmanuel Paturel, à Justine Tirogo, à Nucia Taïbi, à Denis Dakouré, à Elie Sauret et à Anne Jost.

Enfin, j'adresse un profond remerciement à mes amis du Burkina, pour leur soutien et leurs encouragements sans cesse renouvelés.

RESUME

Les hydrosystèmes de la zone d'étude, située dans la plaine du Gondo (Mali-Burkina Faso), sont constitués de deux aquifères principaux en continuité hydraulique: les dépôts argilo-sableux du Continental Terminal et les calcaires dolomitiques de l'Infracambrien sous-jacent. Leur nappe constitue la ressource en eau principale des habitants de la région mais la cartographie de ces aquifères et leur fonctionnement hydrodynamique sont mal connus et certains villages souffrent toujours d'un problème d'accès à l'eau.

C'est dans l'optique de comprendre l'hydrogéologie de la zone que ce travail de recherche a été proposé. Plusieurs méthodes ont ainsi été mises en œuvre : la télédétection s'appuyant sur plusieurs cartes de résolution spatiale optimisée (notamment SPOT5 et Pléiades), le traitement et la synthèse de base de données sur les puits à différentes périodes, et la modélisation hydrogéologique.

Ces méthodes ont permis l'élaboration de plusieurs cartes, notamment les cartes piézométriques des années 1950, 1970 et 2010, dont la comparaison a mis en lumière des variations piézométriques pluridécennales de faible amplitude, avec une tendance à la baisse de l'ordre de $\sim 0,9\text{m}$ entre les années 1950 et les années 1970, et une tendance à la hausse de l'ordre de $\sim 0,7\text{m}$ depuis. Nous avons également pu calculer le volume du Continental Terminal saturé, 29km^3 sur 2400km^2 , qui témoigne de l'abondance d'eau souterraine dans la plaine. Enfin le modèle bicouche des écoulements souterrains, réalisé en régime permanent, suggère que 34% du total des pluies du plateau participeraient, après ruissellement et infiltration rapide, à la recharge de la nappe du Continental Terminal.

Mots Clés : Télédétection haute résolution, Plaine du Gondo, Dépression piézométrique, Modélisation hydrogéologique, Continental Terminal

ABSTRACT

The hydrosystems of the area of interest are located in the Gondo plain (Mali-Burkina Faso). The area is composed of two main aquifers in hydraulic continuity: the sandy-clay deposits of the Continental Terminal and the dolomitic limestone of the Infracambrien below. The ground water is the main water resource for the inhabitants of the region but the mapping of these aquifers and their hydrodynamic mechanisms are unclear and some villages are still suffering from a lack of access to water.

This research study has been proposed in order to understand the hydrogeology of the area. Several methods have been implemented: teledetection based on several high resolution maps (especially SPOT5 and Pleiades), processing and summarizing data bases on wells at different periods, and hydrogeological modeling.

These methods generated several maps, especially the potentiometric map of the 1950s, 1970s and 2010s. The comparison of these maps highlighted multidecadal piezometric variations in small range, with a downward trend of $\sim 0.9\text{m}$ between 1950s and 1970s and an upward trend of $\sim 0.7\text{m}$ since then. Moreover, we calculated the volume of the saturated Continental Terminal aquifer, about 29km^3 on $2\,400\text{km}^2$, which reflects the high quantity of ground water in the plain. At the end of the day, the two-layer groundwater modeling, built in steady state, implies that 34% of the total rainfall on the plateau contributes to recharge the Continental Terminal water table after runoff and fast infiltration.

Key words : High resolution remote sensing data, Gondo Plain, Piezometric depression, Hydrogeological modeling, Continental Terminal

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|-------|---|
| ETP | Evapo-Transpiration Potentielle |
| GPS | Global Positioning System |
| MNE | Modèle Numérique d'Élévation |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain |
| Ma | Millions d'années |
| ONG | Organisation Non Gouvernementale |
| OSS | Observatoire du Sahara et du Sahel |
| PNUD | Programme des Nations Unies pour le Développement |
| RMP | Résonance Magnétique des Protons |
| SPOT5 | Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre, 5 ^{ème} mission |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| ZCIT | Zone de Convergence Inter Tropicale |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|------------------------------------|
| Tableau 1 Inventaire des produits satellitaires utilisés..... | 26 |
| Tableau 2 Inventaire des bases de données utilisées..... | 27 |
| Tableau 3 Inventaire des logiciels utilisés..... | 28 |
| Tableau 4 Sensibilité du niveau du toit calcaire..... | 72 |
| Tableau 5 Sensibilité de la conductivité hydraulique de la première couche | Erreur ! Signet non défini. |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 Situation géographique du site d'étude | 6 |
| Figure 2 Variations des pluies mensuelles interannuelles à Djibo, Baraboulé et Sangha entre 2001 et 2013 | 7 |
| Figure 3 Variations de l'indice pluviométrique à Djibo (entre 1951 et 2013) et à Baraboulé et Sangha (entre 2001 et 2013)..... | 8 |
| Figure 4 Carte géologique des affleurements de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975).. | 13 |
| Figure 5 Coupe géologique de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975) | 13 |
| Figure 6 a) MNT SRTM sur la plaine du Gondo, d'une résolution spatiale de 90m, acquis par interférométrie radar ; b) MNE Référence 3D sur la zone d'étude, d'une résolution spatiale de 30m, acquis par stéréoscopie le satellite SPOT5..... | 16 |
| Figure 7 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone (d'après PNUD, 1975) | 19 |
| Figure 8 Carte piézométrique de la fin des années 2000 (d'après Koussoubé, 2010) | 20 |
| Figure 9 Histogramme des distances entre les positionnements GPS et les positionnements à l'aide des images Pléiades; 6 mesures n'ont pas été mises sur l'histogramme par souci de visibilité, elles ont pour valeur 230m, 215m, 98m, 80m, 70m et 50m..... | 31 |
| Figure 10 Histogramme des écarts d'altitudes entre le MNT SRTM et le MNE Référence 3D | 33 |
| Figure 11 Traitements de la carte satellite SPOT1 | 41 |
| Figure 12 Carte linéamentaire de la zone d'étude | 42 |
| Figure 13 Diagramme polaire des orientations linéamentaires | 42 |
| Figure 14 Carte des mares en saison sèche (ss) et en saison des pluies (sp)..... | 43 |
| Figure 15 Comparaison saisonnière d'une mare de la paléo-vallée de Diankabou (3°4'1''Ouest et 14°33'14''Nord) d'après les images Pléiades (0,5m de résolution) ; a)septembre-octobre 2013; b) janvier-mars 2013 | 44 |
| Figure 16 Carte du toit du substratum du Continental Terminal obtenue par la méthode d'interpolation par voisins naturels des données du PNUD (1975) et des données Via Sahel | 45 |
| Figure 17 Localisation des coupes parallèles à la falaise | 46 |
| Figure 18 Coupe piézométrique 0 | 47 |
| Figure 19 Coupe piézométrique 1 | 47 |
| Figure 20 Coupe piézométrique 2 | 48 |

| | |
|---|----|
| Figure 21 Localisation des coupes perpendiculaires à la falaise..... | 48 |
| Figure 22 Coupe piézométrique 3 | 49 |
| Figure 23 Coupe piézométrique 4 | 49 |
| Figure 24 Carte piézométrique de la zone Via Sahel, des années 2010..... | 50 |
| Figure 25 Carte des puits dont la piézométrie est discordante para rapport à la carte piézométrique des années 2010..... | 52 |
| Figure 26 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone d'étude (d'après les données de l' ONG Via Sahel des années 2010 et d'après les données du PNUD des années 1970)..... | 53 |
| Figure 27 Cartographie des hauteurs d'eau dans les puits..... | 54 |
| Figure 28 Evolution de la piézométrie de la plaine du Gondo entre les années 1950 et les années 1970 | 58 |
| Figure 29 Comparaison de la piézométrie de la zone Via Sahel, entre les années 1950 (d'après Archambault 1951 et Defossez 1955-1957), les années 1970 (d'après le PNUD 1975) et les années 2010 | 60 |
| Figure 30 Variation des niveaux d'eau dans les puits entre les années 1970 et les années 2010 | 61 |
| Figure 31 Variation des niveaux d'eau dans les puits entre les années 1970 et les années 2010 | 61 |
| Figure 32 Ecart piézométriques classés (années 2010 - années 1970) sur la zone Via Sahel | 61 |
| Figure 33 Modèle géologique | 64 |
| Figure 34 Conditions aux limites du modèle sur fond de carte piézométrique des années 2010 | 65 |
| Figure 35 Calage du modèle en fonction des conductivités hydrauliques de la couche 2 | 68 |
| Figure 36 Corrélation entre les piézométries simulée et observée..... | 69 |
| Figure 37 Piézométrie simulée | 69 |
| Figure 38 Sensibilité de la piézométrie par rapport au niveau du toit calcaire | 71 |
| Figure 39 Corrélations entre les piézométries simulée et observée (haut : toit calcaire +5m; bas : toit calcaire -5m)..... | 73 |
| Figure 40 Piézométrie simulée avec recharge au niveau des paléo-vallées | 74 |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Dédicaces..... | i |
| Remerciements | ii |
| Résumé..... | iii |
| Abstract..... | iv |
| Liste des abréviations | v |
| Liste des tableaux..... | vi |
| Liste des figures..... | vii |
| Sommaire | ix |
| I. Introduction et problématique | 1 |
| II. Contexte de la zone d'étude..... | 5 |
| II.1. Généralités..... | 5 |
| II.1.1. Géographie..... | 5 |
| II.1.2. Climat | 6 |
| II.1.3. Hydrographie | 8 |
| II.1.4. Végétation..... | 10 |
| II.2. Contexte géologique..... | 11 |
| II.2.1. Géologie..... | 11 |
| II.2.2. Géomorphologie | 15 |
| II.3. Contexte hydrogéologique..... | 17 |
| II.3.1. Hydrosystèmes en présence | 17 |
| II.3.2. Piézométrie de la plaine du Gondo | 19 |
| II.3.3. Modélisation | 21 |
| II.3.4. Potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara | 24 |
| III. Matériels, méthodes et limites | 25 |
| III.1. Matériels..... | 25 |
| III.2. Méthodes | 28 |
| III.2.1. Réalisation d'une carte linéamentaire..... | 28 |
| III.2.2. Cartographie des mares en saison sèche et saison des pluies..... | 30 |
| III.2.3. Traitement des données | 30 |
| III.2.4. Réalisation d'une carte du substratum du Continental Terminal | 34 |

| | |
|---|-----------|
| III.2.5. Réalisation de la carte des hauteurs d'eau de chaque puits..... | 34 |
| III.2.6. Calcul du volume d'aquifère saturé du Continental Terminal | 35 |
| III.2.7. Réalisation de coupes et de cartes piézométriques | 35 |
| III.2.8. Réalisation d'une carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone d'étude | 36 |
| III.2.9. Calcul du potentiel de recharge de la nappe par ruissellement de l'eau de pluie tombée du plateau..... | 36 |
| III.2.10. Comparaison diachronique des cartes piézométriques | 36 |
| III.2.11. Modélisation hydrogéologique | 37 |
| III.3. Difficultés rencontrées et limites de la méthodologie | 38 |
| III.3.1. Au niveau des bases de données | 38 |
| III.3.2. Au niveau des cartes piézométriques | 39 |
| III.3.3. Au niveau de l'utilisation des images Pléiades..... | 39 |
| III.3.4. Au niveau de la modélisation | 39 |
| IV. Résultats et discussions | 40 |
| IV.1. Carte linéamentaire | 40 |
| IV.1.1. Les différents traitements | 40 |
| IV.1.2. La carte linéamentaire | 41 |
| IV.1.3. Directions préférentielles | 42 |
| IV.2. Carte des mares en saison sèche et saison des pluies | 43 |
| IV.3. Substratum du Continental Terminal | 44 |
| IV.4. Piézométrie des années 2010 | 46 |
| IV.4.1. Coupes piézométriques..... | 46 |
| IV.4.2. Carte piézométrique des années 2010 | 50 |
| IV.4.3. Carte des aquifères captés | 52 |
| IV.4.4. Hauteur d'eau au fond des puits | 53 |
| IV.4.5. Volume de l'aquifère saturé du Continental Terminal | 55 |
| IV.4.6. Potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara... .. | 56 |
| IV.5. Evolution de la piézométrie des années 1950 aux années 2010..... | 56 |
| IV.5.1. A l'échelle de la plaine du Gondo | 56 |
| IV.5.2. A l'échelle de la zone d'étude | 59 |
| IV.5.3. Discussions..... | 62 |
| IV.6. Modélisation des écoulements souterrains | 62 |
| IV.6.1. Objectifs | 62 |
| IV.6.2. Modèle conceptuel | 63 |
| IV.6.3. Modèle numérique..... | 66 |
| IV.6.4. Calage..... | 67 |
| IV.6.5. Calcul du taux d'évaporation..... | 70 |

| | |
|--|-----------|
| IV.6.6. Tests de sensibilités | 70 |
| V. Conclusions et perspectives | 78 |
| V.I Conclusions | 78 |
| V.2. Perspectives..... | 79 |
| VI. Références bibliographiques | 81 |
| VII. Annexes..... | 83 |

I. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Le pays Dogon se situe au Mali, à cheval sur la plaine du Gondo et le célèbre plateau de Bandiagara. Pour les habitants de cette région sahélienne, la seule source d'eau pérenne est l'eau souterraine qui se trouve, la plupart du temps, à plusieurs dizaines de mètres de profondeur dans le sous-sol. Or, toutes les activités socio-économiques de la zone dépendent de cette ressource précaire. L'accès à l'eau est donc un enjeu vital, que les changements climatiques et l'accroissement démographique rendent un peu plus crucial chaque jour.

D'après l'Institut National de la Statistique du Mali, dans les dix communes englobant la zone d'étude (voir annexe 1), soit sur environ 4000km², on dénombrait en 2003 près de 173 820 habitants appartenant à différentes ethnies, essentiellement des Peulhs et des Dogons, ce qui représentait une densité d'environ 43 hab/km². Avec un taux de croissance démographique annuelle moyen sur l'ensemble de ces 10 communes, d'environ 3,2%, le nombre d'habitants doit être, en 2014, de 245 797, ce qui correspond à une densité d'environ 61 hab/km². Sur cette zone, la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali relevait, en 2003, 800 ouvrages hydrauliques : forages, puits modernes, puits citernes et puits pastoraux; mais tous n'étaient plus nécessairement fonctionnels. Après avoir complété ce chiffre avec les données des ONGs Via Sahel et Fraternité Dogon, qui ont, depuis, construit des puits dans la zone, nous obtenons un total a minima de 948 ouvrages. Le nombre réel d'ouvrages est, certes, sans doute plus élevé encore car d'autres organismes publics ou privés ont certainement dû construire également de nouveaux puits depuis 2003. Toutefois, il y a certainement eu aussi des ouvrages qui sont devenus non fonctionnels en plus de ceux déjà existants. Nous admettons donc que ces chiffres sont représentatifs de l'état actuel de la zone. Ainsi nous obtenons une pression d'environ 259 habitants par ouvrage sur une zone pour laquelle on trouve, en moyenne, un ouvrage tous les 4,2km². Pour comparaison, pour une densité de population d'environ 30hab/km², on trouve en moyenne un ouvrage tous les 10km² au Sud-Ouest du Niger (Favreau, 2000). Evidemment ces chiffres, témoignent mal des disparités spatiales de la zone. En effet, la densité de population et la densité d'ouvrages hydrauliques sont des données très variables, les plus importantes se rencontrant au pied de la falaise, là où l'eau souterraine est le plus facilement accessible.

D'après les objectifs du millénaire pour le développement, décidés en 2000 (Nations Unies, 2000), il fallait réduire de moitié, d'ici à 2015, le pourcentage de la population n'ayant pas accès, de façon durable, à un approvisionnement en eau de boisson salubre. Quelle a été l'évolution de l'accès à l'eau sur la zone d'étude ? Il est difficile de répondre à cette question précisément mais un calcul approximatif pourra nous fournir un ordre d'idée. Nous nous appuyerons sur les hypothèses ci-dessous, que nous avons choisies de manière arbitraire :

- Les répartitions spatiales de la population et des ouvrages sont homogènes
- Le débit moyen de pompage est de 0,6m³/h
- La durée de pompage journalière est de 8h
- Le besoin en eau journalier humain est de 20l
- Le besoin en eau journalier par unité bétail : 40l
- Le nombre d'unités bétail par humain est de 0,5

On constate alors que la couverture des besoins en eau en 2003 était de 55% et qu'elle est passée en 2014 à 46%. Nous ne pouvons assurer que ces chiffres reflètent la réalité car l'estimation du nombre d'ouvrages en 2014 a été faite a minima mais toutefois, on devine qu'en dépit des objectifs du millénaire pour le développement, il n'y a pas eu de réelle amélioration des conditions d'accès à l'eau dans la zone d'étude.

C'est dans ce contexte de pénurie chronique, que l'ONG Via Sahel¹ a financé, depuis 1997, 175 puits modernes. Au fil des ans, l'ONG a rencontré des difficultés liées à la nature du sol qui semble présenter, à certains endroits, une roche dure, empêchant ou entravant de manière conséquente la réalisation de puits et alourdissant fortement le coût de ces derniers. Ainsi, bien que le pourcentage de puits en roche, ne représente que 6% des puits réalisés, ils mobilisent à eux seuls près de 20% du coût total de creusement des puits (3000€ en moyenne par puits en 2012-2013). C'est cette constatation qui a motivé un projet de recherche scientifique dénommé Via Sahel Hydrogéologie, appuyé par la fondation Planet Action de SPOT-Image, afin de mieux comprendre l'hydrogéologie de la zone et d'ainsi optimiser le positionnement des futurs puits de l'ONG.

¹ www.viasahel.fr

L'objectif global de la présente étude est d'étudier le fonctionnement hydrogéologique de la région dans laquelle l'ONG Via Sahel soutient la construction de puits, afin de cibler, si possible, les endroits qui fourniront les meilleurs débits d'eau.

Les objectifs spécifiques définis par le projet Via Sahel Hydrogéologie et acceptés par la fondation Planet Action en décembre 2011, sont les suivants :

1. Déterminer la meilleure représentation possible de la surface piézométrique de la nappe phréatique.
2. Assurer le suivi de ses fluctuations aux échelles saisonnières, interannuelles et décennales
3. Rechercher les zones de déformations géologiques majeures (fractures, failles, zones de contact, ...) potentiellement intéressantes en termes de débit d'eau
4. Etudier les caractéristiques de l'aquifère en terme de porosité et de perméabilité
5. Appréhender le processus de recharge de la nappe phréatique et en particulier leurs évolutions liée à la dégradation des sols depuis les années 1950
6. Déterminer s'il y a des pollutions anthropiques de la nappe phréatique
7. Estimer la profondeur du toit du soubassement de calcaire
8. Estimer le stock d'eau disponible et ses fluctuations à long terme
9. Etudier l'hydrodynamisme de la nappe phréatique à l'aide d'un modèle numérique

En raison de l'impossibilité administrative au moment du stage, pour raison sécuritaire, de se rendre sur la zone d'étude, plusieurs objectifs n'ont pas pu être envisagés. Par ailleurs, certains autres objectifs nécessitaient des données que nous ne possédions pas. C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur les objectifs 1, 7 et 9.

En fonction des caractéristiques étudiées, nous serons amenés à changer d'échelle : nous nous intéresserons soit à la plaine du Gondo, qui représente une entité hydrogéologique cohérente d'environ 30 000km², soit à la zone d'étude de 2 790km², qui n'est en réalité qu'une partie de cette vaste plaine.

Dans un premier temps, nous exposerons ici le contexte de la zone d'étude, ou plus largement de la plaine du Gondo. Dans un deuxième temps, nous verrons les données qui ont servi à notre étude, ainsi que la méthodologie suivie pour parvenir aux objectifs fixés. Puis, nous nous intéresserons aux cartes piézométriques réalisées et à leur analyse. Enfin, nous

modéliserons les flux souterrains sur notre zone d'étude pour décrire et comprendre le comportement du système hydrogéologique.

II. CONTEXTE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. GENERALITES

Nous allons tout d'abord présenter la géographie de la zone afin que le lecteur puisse se situer. Puis, nous allons détailler le climat de la zone qui a évidemment de fortes conséquences sur la ressource en eau et sa disponibilité. Nous essaierons également de comprendre l'évolution historique du réseau hydrographique, qui n'est pas sans intérêt pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique souterrain. Enfin la végétation de la zone sera abordée succinctement.

II.1.1. Géographie

La plaine du Gondo

La plaine du Gondo, d'une superficie d'environ 30 000km², est située entre le Burkina et le Mali (voir Fig. 1), entre les latitudes nord 12°20' et 15°00' et les longitudes ouest 1°10' et 4°10'. Cette plaine en arc de cercle de 400km de long sur 60 à 100km de large, et au relief très plat, est limitée à l'Ouest et au Nord-Ouest par la falaise gréseuse Bandiagara et au Sud-Est par des témoins de cuirasses latéritiques du socle cristallin.

La zone d'étude

La zone d'étude, de forme trapézoïdale, se trouve entre les latitudes nord 14°07' et 14°37', et les longitudes ouest 2°48' et 3°40' (voir Fig. 1), ce qui représente environ 2 790 km². Elle est bordée par la falaise de Bandiagara, dont le plateau culmine à environ 200m au-dessus de la plaine du Gondo mais l'étude hydrogéologique ne concernera que la plaine, dans laquelle se concentre la presque totalité des puits de l'ONG Via Sahel.

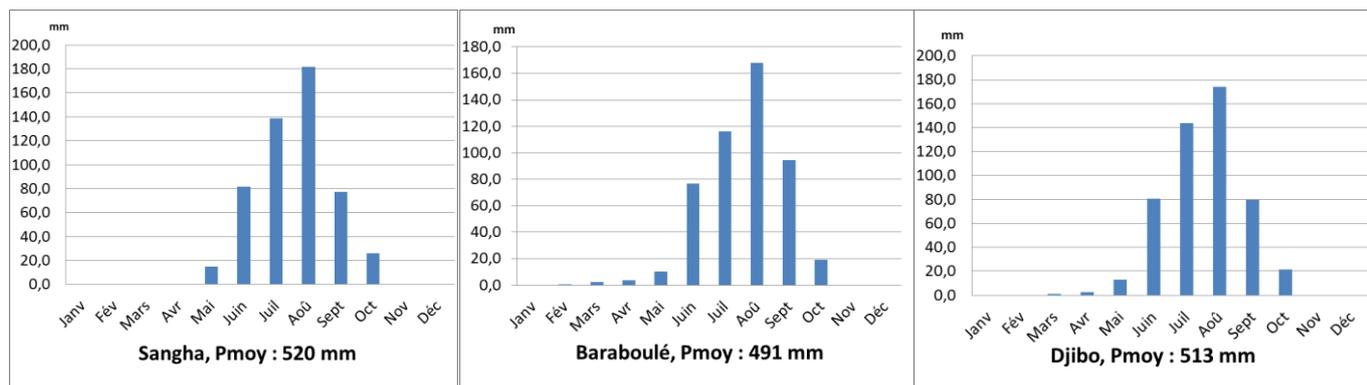


Figure 2 Variations des pluies mensuelles interannuelles à Djibo, Baraboulé et Sangha entre 2001 et 2013

La zone d'étude n'étant pas trop étendue, nous considérerons que les caractéristiques climatiques y sont homogènes mais précisément, il existe, dans la zone sahélienne, un gradient positif nord-sud des isohyètes annuels, dont la valeur moyenne est de 1mm/km (Taupin et al, 1998).

Les stations pluviométriques les plus proches de la zone, bien qu'en dehors, sont celles de Djibo (14°06'N ; 1°37'W) et de Baraboulé (14°12'N ; 1°51'W). Pour ces stations, les pluviométries moyennes annuelles étaient respectivement de 597 mm et de 552 mm dans les années 1950-1960 (la pluviométrie moyenne annuelle de Baraboulé n'ayant été calculée que sur les années 1965 à 1969) mais sont tombées à 355 mm et à 397 mm pour les années 1970-1980. Dans les années 1990, les pluviométries moyennes annuelles de Djibo et Baraboulé sont remontées respectivement à 447 mm et 492 mm et depuis 2001, elles sont de 513 mm et de 491 mm (voir Fig. 2). Ces deux dernières valeurs peuvent être comparées à la pluviométrie moyenne annuelle de Sangha (14°28' N; 3°19'W) entre 2001 et 2013, qui est de 520 mm. Cette relative hausse peut s'expliquer par le relief car Sangha se situe sur le plateau Dogon, où il pleut probablement plus que dans la plaine.

Ces variations, illustrées également par les variations de l'indice pluviométrique (voir Fig. 3) mettent en exergue la sécheresse sévère qu'a connue l'Afrique de l'Ouest entre 1970 et 1990. Cette dernière est due avant tout à la baisse du nombre d'évènements pluvieux tandis que la pluie moyenne par évènement pluvieux et la durée de la saison des pluies sont restées à peu près constantes (Le Barbé et Lebel, 1997).

Si depuis les années 1990, la pluviométrie est remontée, elle n'a toutefois pas retrouvé son niveau précédant la sécheresse.

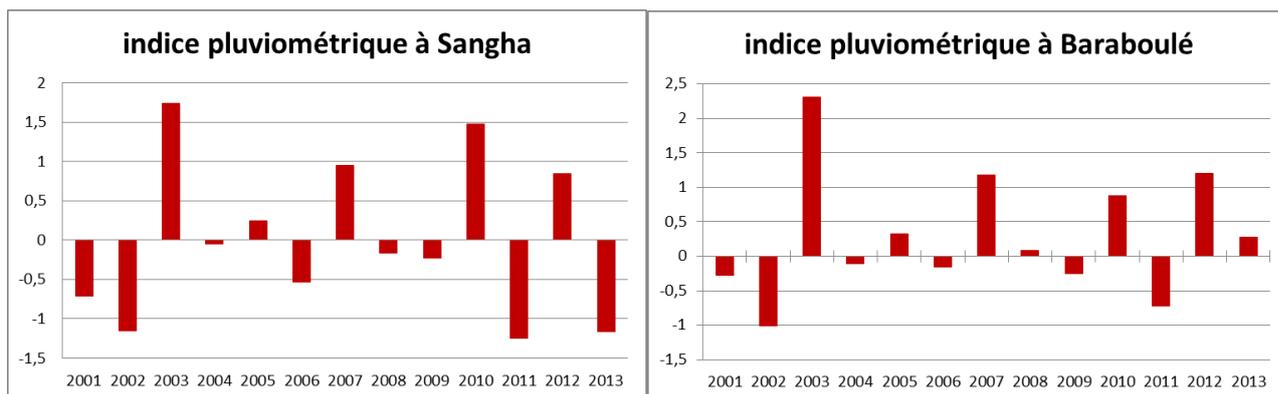
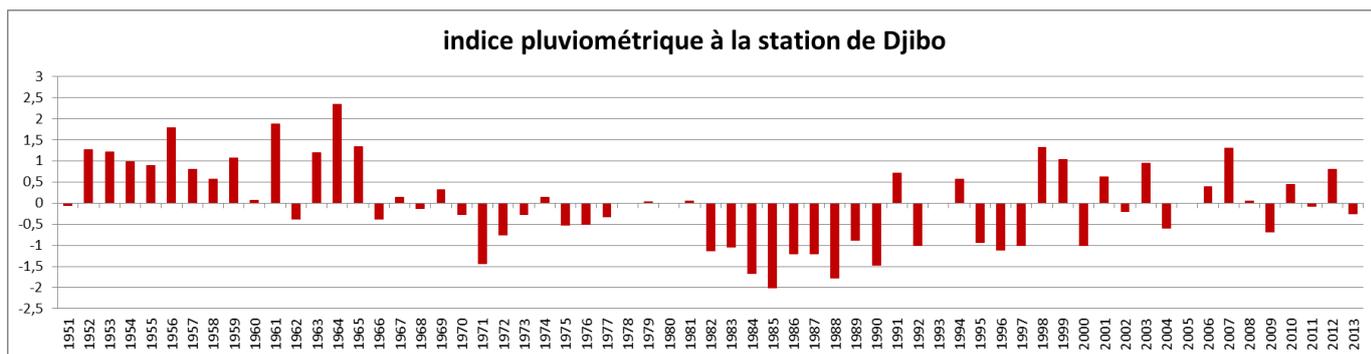


Figure 3 Variations de l'indice pluviométrique à Djibo (entre 1951 et 2013) et à Baraboulé et Sangha (entre 2001 et 2013)

La température de l'air, dans la plaine du Gondo, varie entre la saison sèche et la saison des pluies. Elle est maximale en avril, avec une température mensuelle moyenne de 34°C, et minimale en janvier-février avec une température mensuelle moyenne de 24°C (Koussoubé, 2010).

L'humidité relative est marquée par une variation unimodale avec un maximum moyen inter-annuel de 70% en août et un minimum moyen inter-annuel de 17% en février (Koussoubé, 1996).

L'évapotranspiration potentielle, calculée par la méthode Penman, à la station de Bidi (13°55'N ; 2°29'W) montre des valeurs fortes de mars à juin (6,5 à 8mm/j) mais des valeurs plus faibles de novembre à janvier (environ 5mm/j). L'ETP annuelle s'élève à 2 200mm (Koussoubé, 1996).

II.1.3. Hydrographie

La Plaine du Gondo est en majeure partie incluse dans le vaste bassin du Sourou dont la superficie fait environ 31 000km² (voir annexe 3) et qui couvre, outre l'ensemble sédimentaire

de la plaine du Gondo, une partie du socle cristallin au Nord-Est du Burkina Faso (Koussoubé, 2010). Ce bassin tire son nom de la seule source pérenne d'eau de surface qui le caractérise : le fleuve Sourou, qui draine la partie sud de la plaine du Gondo mais ne traverse pas notre zone d'étude.

De manière générale, la structure d'un réseau hydrographique dépend du régime des pluies mais aussi de l'ensablement, de la pente et de l'extension et la nature du bassin versant. Or, la plaine du Gondo est une zone à faible pente et fortement ensablé (45% de la plaine est recouverte de sable d'après PNUD, 1975). De ce fait, le système hydrographique de la plaine du Gondo est très peu développé : il est lâche et endoréique avec une densité de drainage de $0,12\text{m}/\text{km}^2$ (Koussoubé, 2010).

Sur la zone d'étude, seul un chapelet de mares, semi continues et qui pour la plupart s'assèchent en saison sèche (voir IV.2. Carte des mares en saison sèche et saison des pluies) caractérise le réseau hydrographique. Ces mares proviennent des écoulements saisonniers issus du plateau de Bandiagara, qui se retrouvent dans une série de « gouttières » assimilables à des paléo-vallées entre le pied de la falaise et des dunes parallèles d'une quarantaine de mètres de haut (Taibi, 2011). Les images satellitaires haute résolution à notre disposition, couplées au MNE Reference3D utilisé, ont permis de distinguer 4 paléo-vallées, marquées par des cours d'eau et mares souvent à sec, par un environnement boisé et par un creux topographique de 40 à 60 m (voir Fig. 6.b)). Ces paléo-vallées, d'une largeur de l'ordre du kilomètre, pénètrent dans la plaine sur une distance de 10 à 20 km. On les a dénommées par le nom de leur principale commune : Diankabou au Nord-Est de notre zone d'étude, Bombou au pied de Sangha, Sadia à l'extrême Sud-Ouest, et entre les deux se trouve la paléo-vallée de Konsogoulé,

Il faut noter que l'hydrographie de la plaine du Gondo, caractérisée principalement par le Sourou, a beaucoup évolué à travers l'histoire. Or, son évolution atypique n'est probablement pas sans conséquence sur le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la plaine du Gondo. Il est en effet possible que l'écoulement de la nappe d'eau souterraine de la plaine du Gondo ait « gardé en mémoire » le comportement hydrographique du passé. C'est pourquoi nous ne pouvons manquer de la présenter. Celle-ci peut être découpée en 4 phases :

- A l'ère Tertiaire, aurait existé un fleuve qui prenait sa source au Sud-Ouest de Bobo-Dioulasso et empruntait le lit de l'actuel Mouhoun jusqu'à Kouri, puis celui de l'actuel Sourou. Ce fleuve devait traverser la plaine du Gondo pour finir par se jeter dans le fleuve Béli, affluent du Niger (Palausi, 1959)
- Des bouleversements survinrent au Quaternaire, entraînant, un apport important de sables éoliens qui s'accumulèrent dans le lit du Sourou dont la pente était déjà très faible, et finirent par bloquer l'écoulement du Sourou vers le Nord. Le fleuve devint alors un lac (Defossez, 1955-1957)
- Plus tard, le niveau du lac du Sourou ayant probablement monté, il y a eu formation d'un nouveau déversoir et le fleuve Mouhoun est devenu un affluent du Nakambé (ancienne Volta Blanche), en empruntant le lit qu'on lui connaît actuellement. A cette période et jusqu'aux premiers aménagements hydrauliques le Sourou a joué le rôle tantôt d'affluent – quand le Mouhoun était en crue – et tantôt de défluent – quand la crue était terminée. (Palausi, 1959)
- Enfin, à partir de 1977, une série d'aménagements, prévus pour réguler la restitution des eaux du Sourou au Mouhoun, a abouti principalement à la construction d'un barrage, le barrage-vannes de Léry, et le Sourou est devenu un réservoir de 634M de m³.

II.1.4. Végétation

La plaine du Gondo est typique de la savane sahélienne avec un tapis d'herbe pauvre parsemée de bosquets d'épineux tels que les *Balanites aegyptiaca* et les *Acacia nilotica* et de quelques ligneux. Les parties vraiment boisées sont concentrées au pied de la falaise et autour des paléo-vallées avec des combinaisons variées des principales espèces : *Faidherbia albida*, *Vitellaria paradoxa*, *Prosopis africana*, *Adansonia digitata*, *Sclerocarya birrea*, *Combretum glutinosum*, *Detarium microcarpum*, *Parkia biglobosa* (Taibi, 2011). Les images satellitaires dévoilent également, à l'Est de la zone d'étude, vers Koro, ce qu'on appelle la « brousse tigrée » en raison de la structure de cette végétation, constituée d'une succession régulière de bandes d'arbustes ou d'herbacées, séparées par des bandes de sol nu ou de faible couverture herbacée. Ce type de végétation est typique des écosystèmes arides à semi arides, sur des terrains à faible pente.

II.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La géologie et le relief conditionnent tous les écoulements souterrains. En effet, c'est à travers les pores et les fissures des différentes roches et en fonction des pentes que l'eau peut circuler plus ou moins facilement. C'est pourquoi l'étude du contexte géologique est indispensable à toute étude hydrogéologique.

Nous allons donc voir ici les particularités géologiques et géomorphologiques de la plaine du Gondo qui nous permettront de mieux appréhender l'hydrodynamisme de la zone.

II.2.1. Géologie

On distingue dans la plaine du Gondo plusieurs formations géologiques, sédimentaires, qui datent de différentes époques et qui ont une grande incidence sur le comportement hydrodynamique du système aquifère de la zone (voir Fig. 4 et 5)

On trouve sur le plateau de Bandiagara, les grès de Bandiagara d'âge Ordovicien. Sur ce plateau et au sommet de la falaise, il s'agit d'un grès sain, compact et très résistant, en dépit des nombreuses fractures et failles visibles. En revanche, sur la falaise, on trouve des grès plus schisteux et friables qui supportent mal l'action érosive de l'eau et du vent. Ce grès se retrouve également dans le sous-sol de la plaine, par blocs, près de la falaise (Koussoubé, 2010).

Quant à la plaine, elle présente plusieurs types de formations (voir Fig. 4). De bas en haut, nous avons :

- les calcaires gréseux dolomitiques et karstiques de l'Infracambrien (Archambault, 1960). Au sein de ces calcaires, s'intercale un niveau appelé « la série de Koro », composé d'argilites calcaires, de marno-calcaires, et de calcaire dolomitiques (PNUD, 1975).
- les schistes du Précambrien Supérieur, appelés Schistes de Toun, présents à la base de la falaise de Bandiagara. Ce sont des schistes gréseux et souvent altérés en argiles ferrugineuses. Ils sont en discontinuité stratigraphique avec les calcaires ainsi qu'avec les dépôts du Continental Terminal. Il existe également à la bordure orientale de la

plaine du Gondo, une formation composée d'argilite, de schistes argileux et de grès, appelée formation du Béli (PNUD, 1975 ; Koussoubé, 2010).

- les couvertures récentes du Continental Terminal datant de l'Eocène Inférieur, composées de sables, sables argileux, de grès mal cimentés, blancs, ocre, brique, lie de vin ou bariolés (Archambault 1951). On distingue aussi les grès très fins argileux, les grès calcaires et la silixite, les pélites, les argiles fines bariolées et enfin une altération ferrugineuse et alumineuse. D'épaisseur réduite ou nulle sur la dorsale de Koro, le Continental Terminal présente deux axes d'épaisseur maximale, parallèle à l'axe d'allongement de la plaine et situé de part et d'autre de la dorsale de Koro (PNUD, 1975).
- des dépôts de couverture, constitués par les sables éoliens dunaires, apportés par l'Harmattan, datant du Quaternaire et, à certains endroits, par une cuirasse latéritique datant de l'Eocène. Cette cuirasse latéritique, bien que sporadique dans le Nord de la plaine, devient progressivement la formation superficielle dominante (Archambault, 1951).

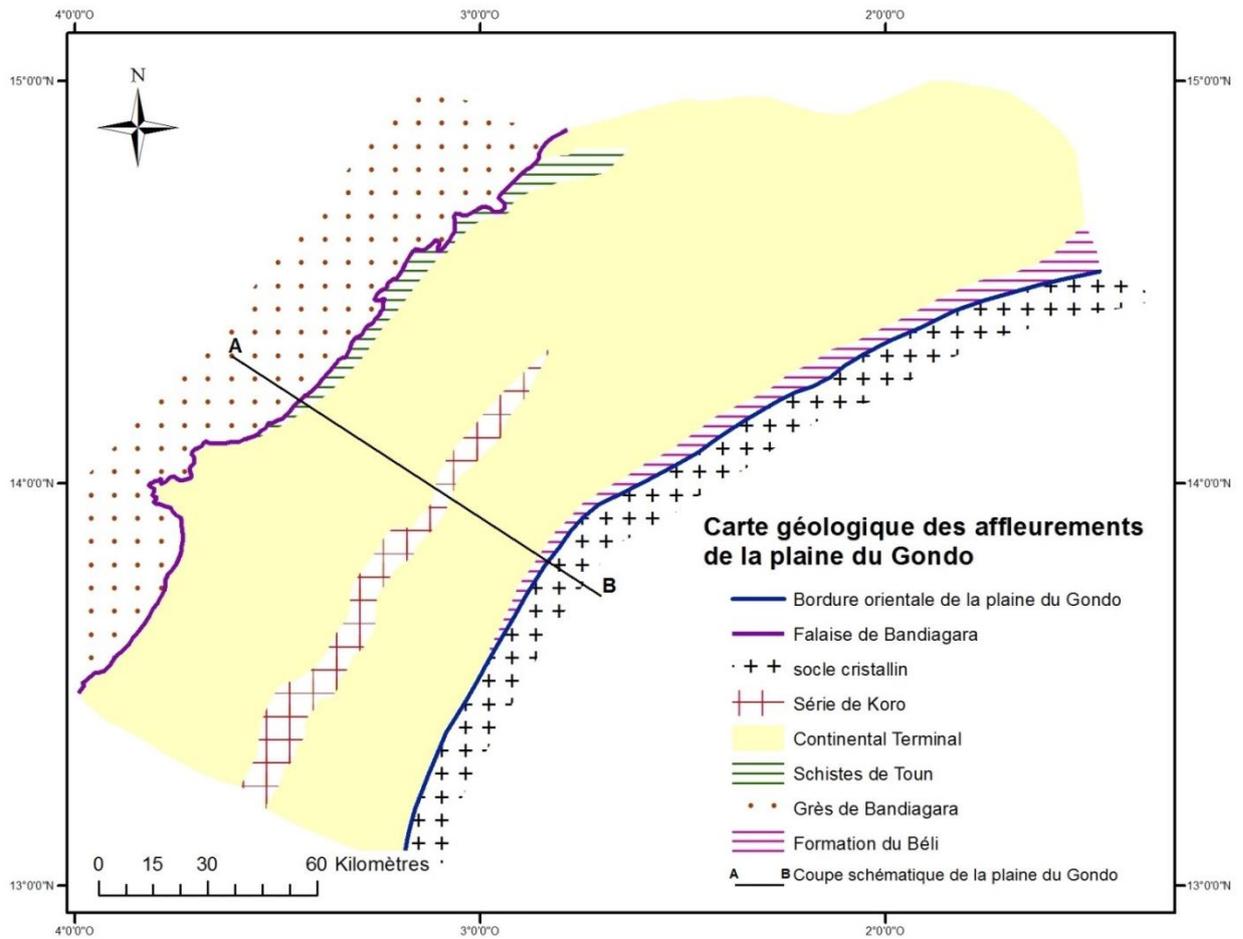


Figure 4 Carte géologique des affleurements de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975)

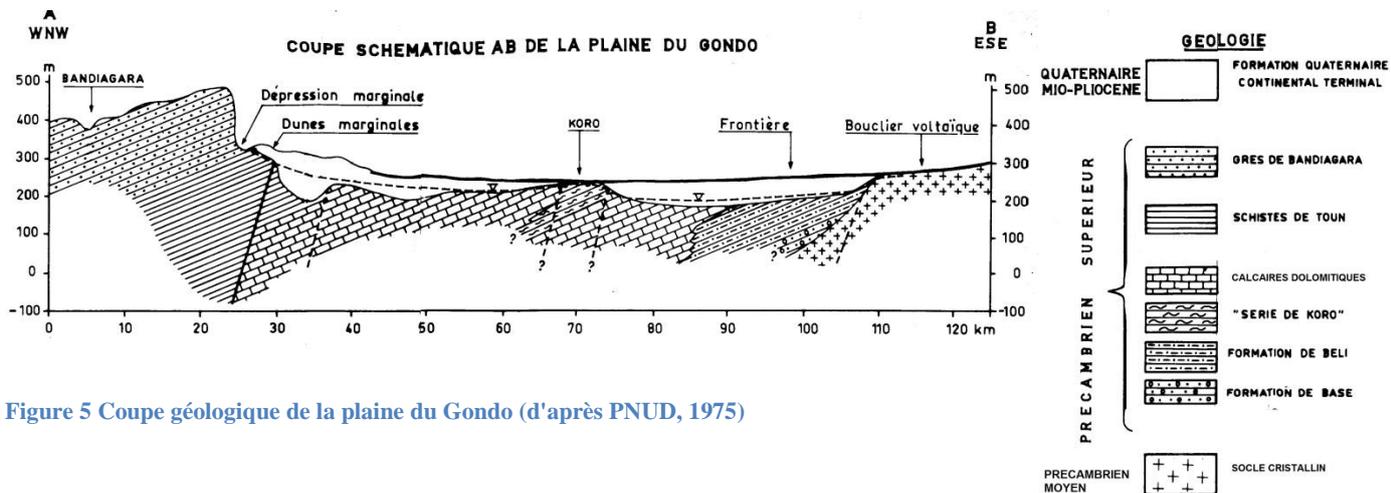


Figure 5 Coupe géologique de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975)

Les forages hydrauliques de la zone n'ayant pas traversé toute l'épaisseur des calcaires de l'Infracambrien, il est impossible d'affirmer la nature de la formation sous-jacente ainsi que sa profondeur, avec certitude. D'après Defossez (1955-1957), il y aurait des grès de base. Enfin d'après Koussoubé (2010), le socle serait granitique, situé à une profondeur estimée à environ 600m.

Ces diverses formations sont affectées par de très nombreuses fractures, généralement subverticales (Guiraud, 1988). C'est ce que nous pouvons voir sur la coupe géologique ci-dessus, tirée du rapport du PNUD (1975) qui avait mené une campagne de prospections géophysiques dans la plaine du Gondo. On constate qu'il y aurait très probablement une faille, parallèle à la falaise de Bandiagara, à environ 5km de cette dernière, entre les schistes de Toun et les calcaires dolomitiques. Elle a été interprétée comme étant la limite tectonique initiale de la plaine qui constituerait une limite sédimentologique (PNUD, 1975). L'existence de celle-ci avait par ailleurs déjà été avancée par Archambault (1951).

Ces failles sont le témoignage d'une tectonique importante. En effet, les formations sédimentaires de la région ont été affectées par deux évènements tectono-orogéniques majeurs (Koussoubé, 2010) :

- L'orogénèse panafricaine (600Ma) qui a entraîné des riftings, des chevauchements et un plissement des terrains
- L'ouverture de l'Atlantique, entamé à partir du Jurassique inférieur (270Ma)

Notons que la formation de la falaise provient de la succession de ces deux évènements tectoniques, dont on peut voir les traces sur la falaise sous forme de laminage de grès.

Enfin, la zone a été le siège d'évènements tectoniques tout aussi importants jusqu'au Tertiaire et au Quaternaire et a, par ailleurs, connu de profonds changements climatiques qui ont eu pour conséquence la latérisation et la silicification. (Gourcy, 1994 ; Koussoubé, 2010).

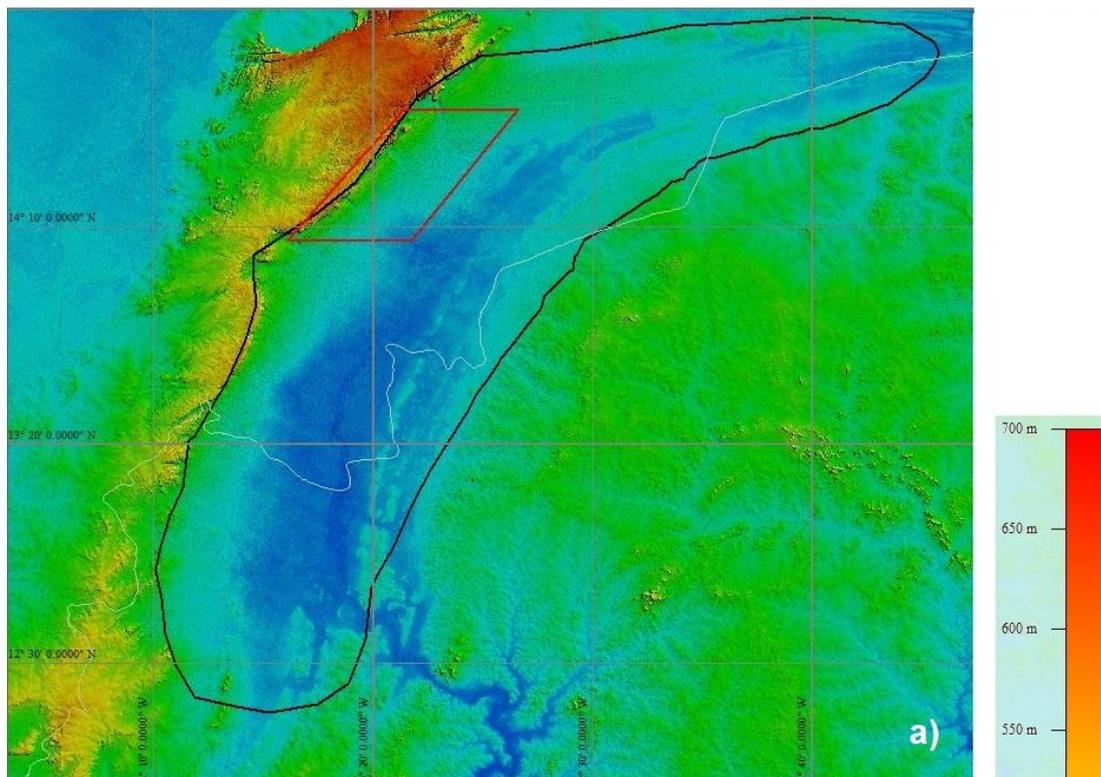
Remarquons pour terminer que, dans les calcaires, les failles sont souvent colmatées par des dépôts argileux ou de calcite, où l'eau circule mal (Scanvic, 1983). C'est d'ailleurs ce

qu'a constaté la mission du PNUD, en 1970-72, sur le forage Ko1., et c'est également l'une des hypothèses de Koussoubé (2010) pour expliquer la distribution spatiale de la piézométrie.

II.2.2. Géomorphologie

La plaine du Gondo, se situe dans la bordure sud-est du vaste bassin sédimentaire de Taoudéni (environ 2 000 000km²), appartenant lui-même au craton ouest-africain.

Cette zone mérite le nom de plaine par son absence presque totale de relief et celui de dépression en raison de son altitude légèrement plus basse au centre que sur les bordures (voir Fig. 6 a)). Les seuls dénivelés notables apparaissent en bordure de la falaise de Bandiagara, au-dessus du parallèle 14°N, c'est-à-dire dans la zone d'étude. En effet, dans cette zone, la plaine est très ensablée et on note la présence d'une dune, parallèle à la falaise, qui monte à l'assaut de l'abrupt gréseux, ainsi que des dunes un peu moins hautes, d'orientation Est-Nord-Est. Toutefois, la pente moyenne de la plaine est de l'ordre de 0,3m/km entre le Nord, qui est à environ 350m d'altitude, et le Sud, qui est à environ 240m. En dépit du caractère très plat de toute la plaine, on aperçoit également, le long de la falaise, des paléo-vallées déjà mentionnées plus haut. Il s'agit de dépressions marginales qui recueillent les eaux ruisselant du plateau. Au Sud-Est, enfin, se trouvent des cuirasses latéritiques ou bauxitiques de l'Eocène du socle cristallin (Koussoubé, 2010).



Plaine du Gondo et zone d'étude

- zone d'étude
- plaine du Gondo
- frontière Mali - Burkina Faso

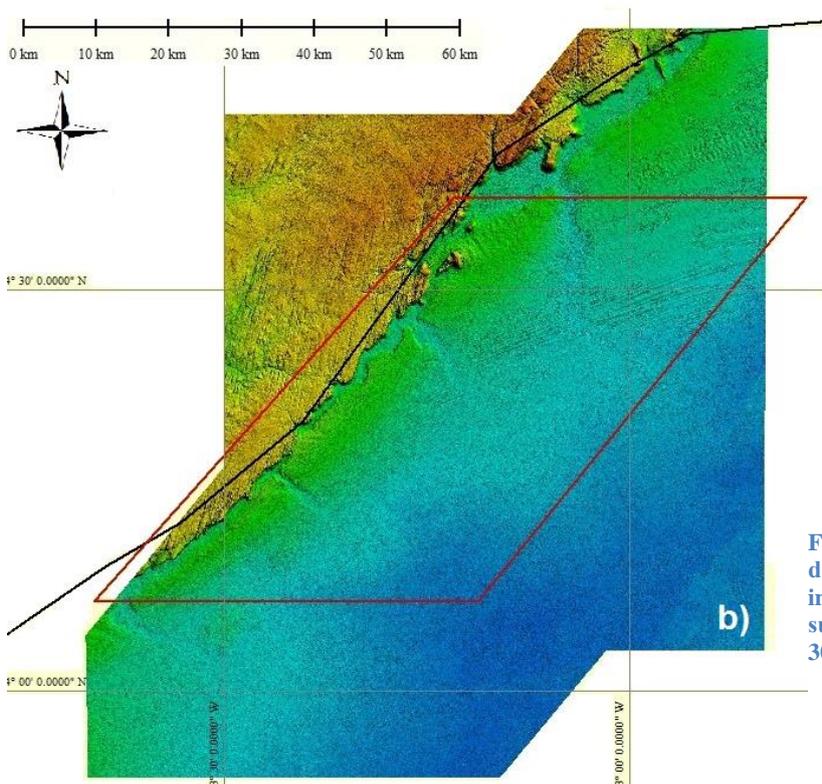
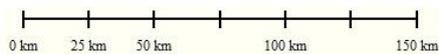


Figure 6 a) MNT SRTM sur la plaine du Gondo, d'une résolution spatiale de 90m, acquis par interférométrie radar ; b) MNE Référence 3D sur la zone d'étude, d'une résolution spatiale de 30m, acquis par stéréoscopie le satellite SPOT5

II.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

La plaine du Gondo renferme un réservoir d'eau souterraine important (Palausi, 1959 ; Koussoubé, 2010), ce qui, si cela était confirmé, serait une opportunité de développement conséquent pour l'ensemble de la zone.

A travers la présentation des aquifères et celle de la piézométrie régionale, nous allons, en premier lieu, voir que la plaine du Gondo est un cas typique « de nappe en creux » qui soulève de nombreuses questions. Puis, les modélisations antérieures de la zone seront présentées afin de mettre en perspective les connaissances hydrogéologiques et leur intégration dans un fonctionnement hydrodynamique global. Enfin, nous présenterons un calcul très sommaire entrepris par Defossez (1955-1957) pour évaluer le potentiel de recharge de la nappe, venant du plateau de Bandiagara.

II.3.1. Hydrosystèmes en présence

Les auteurs ayant travaillé dans la plaine du Gondo, s'accordent à dire qu'il existerait une nappe profonde, unique et continue (Archambault, 1951 ; Palausi, 1959, PNUD, 1975 ; Dakouré, 2003).

Palausi (1959) note également la présence de nappes superficielles locales, à faible profondeur (entre 1m et 15m) qui, pour certaines, tariraient en saison sèche. Ces nappes seraient surtout présentes au pied de la falaise, alimentées par le ruissellement le long de cette dernière. Nous verrons en fait qu'il y a probablement continuité entre ces nappes superficielles et la nappe du Continental Terminal, ce qui n'exclut pas également la présence de nappes perchées, déconnectées de la nappe profonde, comme mentionné dans la partie IV.4.2. Carte piézométrique des années 2010.

D'après le rapport du PNUD (1975), la nappe profonde circulerait dans deux aquifères principaux : à la base du Continental Terminal et dans l'Infracambrien sous-jacent. Précisément, les formations géologiques présentes sous le Continental Terminal sont au nombre de trois : on trouve principalement les calcaires dolomitiques et karstiques (80% de la plaine) mais également, au pied de la falaise, les schistes de Toun et, vers Koro, dans l'axe d'allongement de la plaine, la « série de Koro », c'est-à-dire des argilites calcaires, des marno-calcaires, et des calcaires dolomitiques.

La nappe du premier aquifère, se trouverait entre 20m et 100m de profondeur. Elle serait libre, excepté à certains endroits où elle pourrait être localement captive à cause de niveaux argileux intercalés entre le Continental Terminal et l'Infracambrien (PNUD, 1975). D'après les campagnes de prospections du PNUD (1975), l'épaisseur moyenne du Continental Terminal aquifère serait de 20m mais pourrait atteindre jusqu'à 100m à Bankass (14°4'40''N ; 3°31'00''W) (PNUD, 1975).

L'alimentation de la nappe du Continental Terminal semble venir principalement des bordures de la plaine, notamment de la falaise de Bandiagara, à la fois parce que le relief favorise les précipitations et parce que le ruissellement sur les grès déverse dans la plaine des quantités d'eau très importantes, parce que soustraites rapidement à l'évaporation (Archambault, 1951, Defossez, 1955-1957). Les analyses de l'eau des puits proches de la falaise, montrant sa faible minéralisation, souligne l'importance de ce processus. Quant à l'alimentation directe par la pluie par infiltration puis drainage à travers la zone non saturée de l'aquifère de la plaine, elle semble être d'une importance mineure à cause de la forte reprise évapo-transpiratoire potentielle.

Les études du PNUD (1975) ont également montré que le toit de l'Infracambrien présente un relief très irrégulier. De ce fait, et puisque le niveau piézométrique varie entre 337m et 187m, il semblerait que le Continental Terminal soit sec sur environ 50% de la superficie de la plaine. En effet, sur les 315 puits mesurés (PNUD, 1975), il en a été dénombré 177 captant le Continental Terminal, 135 captant l'Infracambrien et 3 dont la nature de l'aquifère capté a été indéterminée (voir Fig. 7). Par ailleurs, on voit sur la figure que la presque totalité des puits du Nord et Nord Est de la plaine capte l'Infracambrien, nous laissant penser que le Continental Terminal de cette zone est sec.

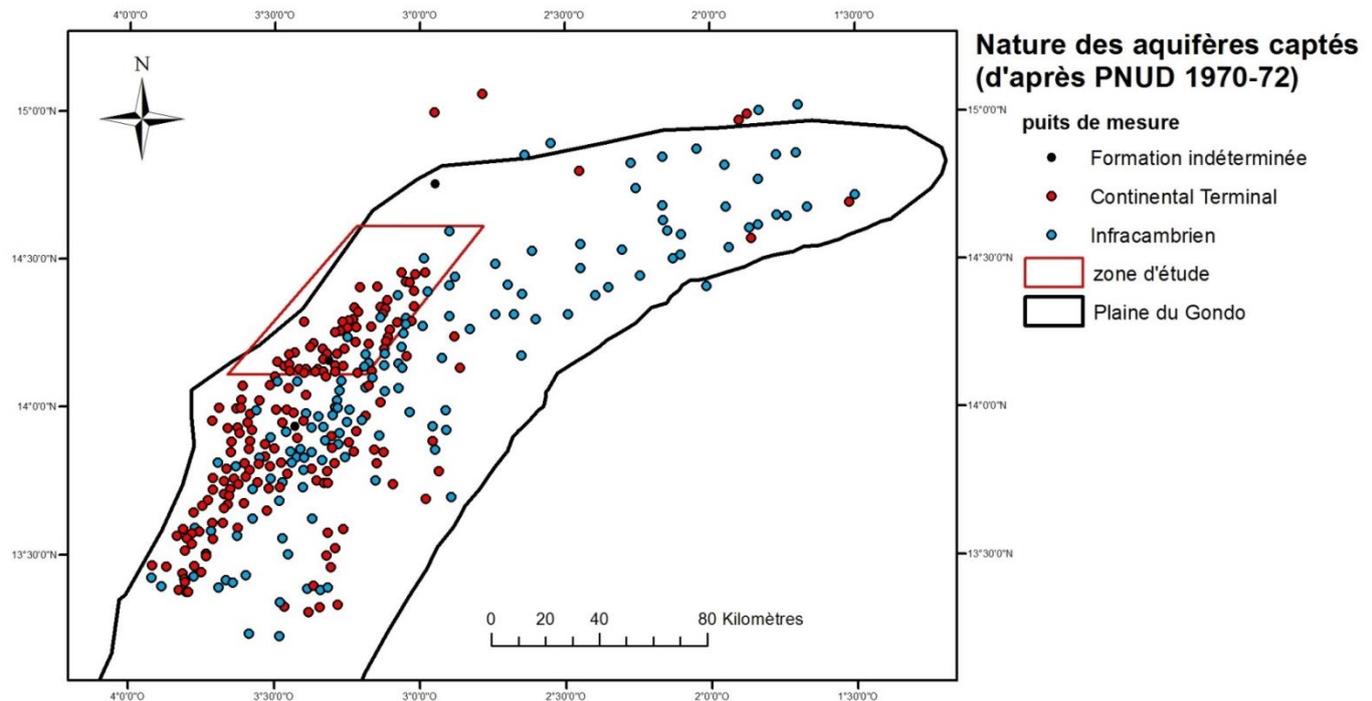


Figure 7 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone (d'après PNUD, 1975)

II.3.2. Piézométrie de la plaine du Gondo

La Plaine du Gondo est un des cas de « nappes en creux », c'est-à-dire une aire dans laquelle on constate une dépression piézométrique d'origine naturelle. On voit sur la figure 8, que les cotes piézométriques sont plus élevées sur les bordures orientales et occidentales de la plaine, qu'au centre. Quant à la différence piézométrique entre le Nord et le Sud de la plaine, elle est plus subtile et, s'appuyant chacun sur leurs mesures piézométriques, les auteurs ne sont donc pas tous d'accord sur le sens d'écoulement des eaux souterraines. Pour Defossez (1955-1957) et Koussoubé (2010), l'écoulement général des eaux irait du Sud vers le Nord, à l'instar de l'ancien fleuve qui traversait la plaine du Gondo et se jetait dans le Niger. En revanche, pour Archambault (1951), ce serait le contraire ; les eaux s'écouleraient globalement du Nord vers le Sud. Enfin pour Palausi (1959), l'écoulement se ferait des bordures vers le centre et les eaux souterraines ne s'évacueraient donc ni vers le Sud, ni vers le Nord. Ce panel de résultats met en lumière la complexité de la question qui reste donc ouverte.

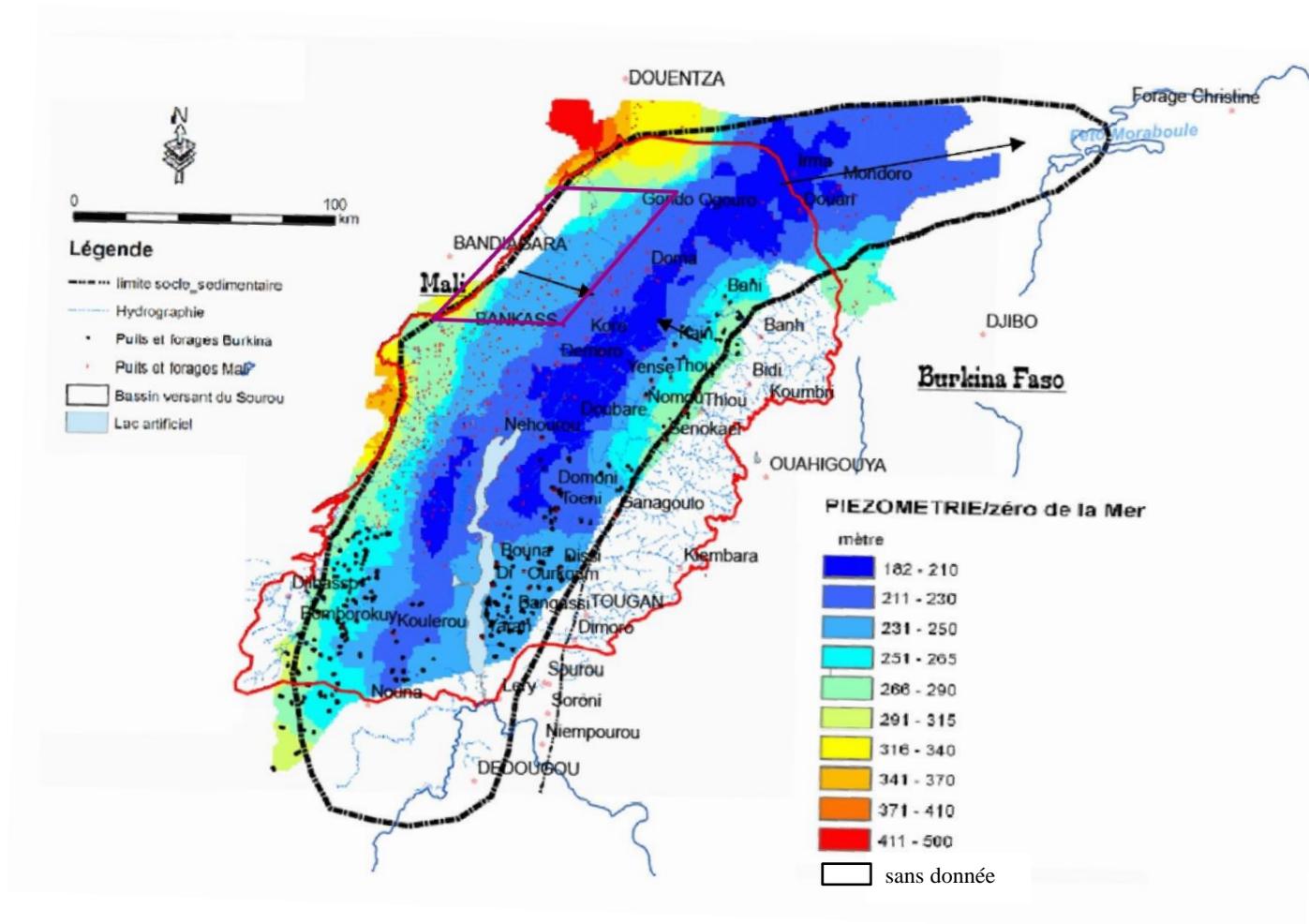


Figure 8 Carte piézométrique de la fin des années 2000 (d'après Koussoubé, 2010)

Le cas de nappe en creux est un phénomène hydrogéologique assez atypique et il convient d'en dire quelques mots. Tout d'abord, il s'agit d'un phénomène circonscrit au domaine semi-aride de l'Afrique de l'Ouest et qui a été identifié, pour la première fois, dans les années 1950 (Degallier, 1954 ; Archambault, 1960). On le trouve surtout dans des aquifères sédimentaires, d'échelle régionale, comme c'est le cas ici.

Bien que le phénomène soit encore mal compris, les causes possibles de ces dépressions sont les suivantes :

- une surexploitation anthropique
- Un phénomène de drainage profond
- Un réajustement hydrostatique en lien avec un changement climatique pendant le Quaternaire. Ce serait le cas des nappes du Ferlo (Sénégal) et du Continental Terminal de Trarza (Mauritanie), d'après Dieng (1987).

- Un déficit dans le bilan infiltration/évapo-transpiration au niveau du centre de la nappe. C'est l'hypothèse la plus souvent utilisée. Elle expliquerait la dépression des nappes du delta intérieur du fleuve Niger (Mali) (Archambault 1960), de Dantiandou (Niger) (Favreau et al. 2002), et de Kadzell (Niger) (Gaultier et al. 2003)

Dans le cas de la plaine du Gondo, plusieurs hypothèses ont été avancées et d'autres ont été unanimement écartées. On peut citer, pour cette dernière catégorie, la surexploitation anthropique qui semble peu probable étant donné l'extension régionale de la dépression et le peu d'infrastructures hydrauliques à haut débit, dans la zone. D'après les hypothèses exposées dans l'introduction, sur les dix communes étudiées, il y aurait un prélèvement d'eau annuel dans la nappe de 1 660 750m³ sur une superficie d'environ 4 000km². Si l'on admet une porosité moyenne de 10%, ces prélèvements équivalraient à une baisse piézométrique de 4mm/an (Si les besoins en eau de la zone étaient satisfaits, cette valeur serait alors de 9mm/an) Cette baisse piézométrique, bien que pas complètement négligeable, ne peut pas expliquer la dépression piézométrique constatée.

D'après Palausi (1959) et Archambault (1960), ce serait un déficit dans le bilan infiltration/évaporation, au centre de la nappe, qui serait la cause de cette dépression. En revanche, pour Koussoubé (2010), la dépression piézométrique de la nappe du Gondo ne serait pas seulement due à une reprise évaporatoire. Koussoubé associe deux autres phénomènes conjugués : d'une part l'activité tectonique ancienne, et d'autre part, une drainance verticale descendante de la couverture du Continental Terminal vers les calcaires infracambriens. En effet, la plaine du Gondo présenterait des failles normales ayant entraîné un effondrement localisé de la couche calcaire de l'Infracambrien et ayant résulté en la compartimentation du système aquifère. De ce fait, l'écoulement souterrain ne se ferait pas des bordures vers le centre mais plutôt des bordures vers le Nord-Est, où se trouverait alors l'exutoire, tandis que l'eau du centre de la dépression serait piégée, sans exutoire (Koussoubé, 2010).

II.3.3. Modélisation

Plusieurs modélisations ont été réalisées dans la zone : il s'agit de deux modélisations 2D sur la bordure est du Gondo (Koussoubé, 2010), d'une modélisation 3D sur l'ensemble de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Dakouré, 2003) et d'une modélisation

3D des aquifères du Continental Terminal et du Continental Intercalaire des systèmes aquifères d'Iullemeden et de Taoudéni Tanezrouft (OSS, 2013). Les trois premières modélisations ont été réalisées en régime permanent, grâce au code Modflow (Mac Donald et Harbaugh, 1988) dans l'interface Processing-Modflow et la dernière a été réalisée en régime permanent et en régime transitoire avec le code Modflow mais dans l'interface Visual Modflow.

Modélisation 3D du Sud Est du bassin de Taoudéni (Dakouré, 2003)

Cette modélisation 3D, monocouche, couvre une zone d'environ 180 000km² (voir annexe 4), délimitée, du Sud-Ouest à l'Est, par le socle cristallin, considéré comme une limite à potentiel imposé et, au Nord-Ouest par le fleuve Niger, considéré comme un drain. Par ailleurs, la falaise de Bandiagara a été prise comme limite à potentiel imposé, à 350m. Il s'agit du modèle à grande échelle que Dakouré a réalisé avant de se focaliser sur une plus petite zone, au Burkina Faso, pour laquelle il avait une densité plus importante d'informations.

Le calage du modèle, en cherchant à reproduire la piézométrie observée et le débit de base aux stations de contrôle, a permis d'ajuster les coefficients de perméabilité ainsi que la recharge. Toutefois, il semblerait que ce calage n'ait pas été fait sur le modèle à grande échelle mais sur celui à petite échelle, qui ne couvre pas la zone d'étude

Dakouré (2003) obtient des zones de recharges variant entre 0mm/an, le long du Mouhoun à 47mm/an dans le secteur des sources, avec une majeure partie de la zone pour laquelle la recharge est de 2mm/an. Quant aux transmissivités, elles varient entre $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Modélisation 2D sur la bordure est du Gondo (Koussoubé, 2010)

En raison de l'abondance d'informations dans le secteur de Sanga-Nomou, cette zone a été plus spécifiquement étudiée. Une coupe géologique de référence a notamment été établie. Celle-ci, de 25km de long, de 300m de profondeur et d'1m d'épaisseur, traverse le bassin sédimentaire et la zone cristalline (absente dans la zone d'étude).

Deux modélisations ont été réalisées (voir annexe 5), l'une correspondant aux années 1960 et l'autre aux années 2000. Des failles ont été introduites dans le modèle. Celles-ci

possèdent des conductivités hydrauliques très faibles du fait de leur colmatage (entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s).

La différence principale entre 1960 et 2000, a été la baisse importante de la pluviométrie (voir Fig. 3). D'où la différence de recharge entre les deux modèles, toutes conditions étant supposées égales par ailleurs. A noter que pour pouvoir caler le modèle des années 2000, il a fallu introduire une exfiltration, qui ne serait, a priori, pas due à une reprise évaporatoire car la profondeur du niveau d'eau a été jugée trop importante, mais à un drainage profond dans la direction nord-est, perpendiculaire à la coupe. Ainsi des exfiltrations de l'ordre de 10^{-6} m³/s ont été imposées.

Les deux modélisations présentent une différence piézométrique traduite par le changement de la limite à potentiel imposé de l'Est. Celle-ci s'expliquerait par la déforestation des bassins versants du socle cristallin, qui aurait alors vu une augmentation du ruissellement et donc de la recharge à la bordure.

Modélisation 3D des aquifères du Continental Terminal et du Continental Intercalaire des systèmes aquifères d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft (OSS, 2013)

Les systèmes aquifères d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft (voir annexe 6) ont en fait été modélisés séparément car bien qu'ils soient en continuité géologique, sur le plan hydraulique, leurs échanges sont très limités voire nuls.

Le système aquifère de Taoudéni/Tanezrouft, qui englobe la plaine du Gondo, a été modélisé par 9 366 mailles de 10km de côté, dans un système monocouche, d'une épaisseur moyenne de 300m, en régime permanent d'abord puis en régime transitoire ensuite.

Le fleuve Niger a été représenté en tant que rivière tandis que les autres rivières pérennes de la région ont été représentées par des potentiels imposés et les sources du Burkina Faso, par des drains.

Dans le système aquifère de Taoudéni/Tanezrouft, plusieurs dépressions piézométriques sont présentes, dont celle qui nous intéresse plus particulièrement dans cette étude, celle de la plaine du Gondo. Elles ont été modélisées par des zones d'exfiltration, symbolisant les reprises évaporatoire et évapotranspiratoire profondes qui seraient la cause de ces dépressions.

Le calage du modèle en régime permanent a permis de fixer une recharge moyenne sur l'ensemble du modèle de l'ordre de 10mm/an et des perméabilités comprises entre 5.10^{-6} et 8.10^{-4} m/s

Le modèle en régime transitoire a été mis en œuvre entre juillet 1998 et juillet 2010. La meilleure valeur du coefficient d'emmagasinement en nappe libre, résultant du calage de ce modèle, a été 1.10^{-2} .

II.3.4. Potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara

Defossez a calculé (Defossez, 1955-1957) qu'avec 600mm de précipitation annuelle, pour une surface de 3 000km² représentant approximativement la superficie du plateau qui contribue au ruissellement vers la plaine du Gondo, de 30 000km² (le rapport du PNUD 1975 parle plutôt de 1 050km² pour la surface contributive du plateau), et avec une évaporation de 50%, on obtiendrait une recharge annuelle de 30mm.

Cependant la recharge de la nappe ne provient pas uniquement du plateau mais également en partie de la bordure orientale et dans une moindre mesure, de la recharge directe, ce qui signifie a priori que la valeur proposée par Defossez est un chiffre a minima.

III. MATERIELS, METHODES ET LIMITES

Nous présenterons ici les données et outils utilisés lors de cette étude, puis la méthodologie qui a été suivie pour parvenir aux objectifs. Enfin nous dirons quelques mots sur les difficultés rencontrées dans l'application de notre méthodologie.

III.1. MATERIELS

La poursuite de nos objectifs a nécessairement débuté par une phase de récupération de données. Mais pour récupérer des données, encore faut-il savoir qu'elles existent. Notre étude, compte tenu du contexte sécuritaire au Mali, s'est appuyée, d'une part sur des mesures in situ récentes réalisées dans la zone par l'ONG Via Sahel (depuis 2009), avec des sondes piézométriques OTT équipées d'un palpeur de fond, et d'autre part sur des anciennes mesures réalisées il y a parfois plusieurs décennies, qu'il a donc d'abord fallu identifier puis retrouver.

Le matériel dont nous avons pu finalement disposer, se décompose en données satellitaires bases de données, coupes électriques, logs de forages et logiciels informatiques.

Les données satellitaires utilisés furent nombreux et d'une qualité remarquable. Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau suivant (voir tableau 1).

Notons aussi que nous disposons de 4 photographies aériennes de février 1952, couvrant une petite partie de la zone Via Sahel, orientée Ouest-Est, allant du plateau autour de Sangha vers la plaine, en traversant la paléo-vallée de Bombou. Ces photographies aériennes ont été fournies par Nuscia Taïbi, dans le cadre de la coopération entre son projet Planet Action d'étude de la désertification au pays Dogon et le projet Via Sahel Hydrogéologie.

| produits satellitaires | satellite | date | couverture géographique | mode spectral | traitement | résolution | précision altimétrique | précision planimétrique | source |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---|---|--|--|---|--------------------------------------|---------------|
| couverture de 4 SPOTVIEW full scène | SPOT1 | 1987 | AOI du Projet | XS (3 bandes spectrales) | Orthorectification WGS84 avec REFERENCE3D et couleurs naturelles | 20m | | meilleure que 350 m sur terrain plat | Planet Action |
| MNE REFERENCE3D | SPOT5 | 2006 à aujourd'hui | carré de 70' de côté + environ 25% d'extension NE et SW | fabriqué à partir des données Haute Résolution Stéréoscopique de SPOT5 | Ré-échantillonnage à 20m | 1 sec d'arc soit environ 30 m à l'équateur | 10 m en absolu @ 90% pour une pente < 20°, 1 à 3 m en relatif sur la plaine | 10 m @ 90% | SPOT Image |
| SRTM-3 | STS-99 (navette spatiale) | 2000 | 80% des terres émergées | 1 bande spectrale | | 3 sec d'arc soit environ 90 m à l'équateur | moins de 16m | | Internet |
| mosaïque de 2 dalles SPOTMAP | SPOT5 | 2011 (différentes dates) | 2 x 1° carré | THX (3 bandes spectrales) | Orthorectification WGS84 avec REFERENCE3D et couleurs naturelles | 2,5m | | meilleure que 30 m sur terrain plat | Planet Action |
| mosaïque de segments | SPOT5 | mars 2012 (saison sèche) | carré de 70' de côté | 4 bandes spectrales THI (=THX+HI) (HI: 1 bande spectrale Moyen Infra Rouge) | idem ci-dessus | 2,5 m et à 20 m ré-échantillonné à 10m | | meilleure que 10 m sur terrain plat | Planet Action |
| mosaïque de segments | SPOT5 | sept-oct 2012 (saison des pluies) | idem ci-dessus | idem ci-dessus | idem ci-dessus | idem ci-dessus | | idem ci-dessus | Planet Action |
| mosaïque de segments | PLEIADES-1A | janv-mars 2013 (saison sèche) | carré de 70' de côté | 4 bandes spectrales (équivalent du THI SPOT5) | idem ci-dessus | 0,5m et Proche Infra Rouge à 10 m | | meilleure que 3 m sur terrain plat | Planet Action |
| mosaïque de segments | PLEIADES-1A | sept-oct 2013 (saison des pluies) | idem ci-dessus | idem ci-dessus | idem ci-dessus | idem ci-dessus | | idem ci-dessus | Planet Action |

Tableau 1 Inventaire des produits satellitaires utilisés

Les bases de données utilisées permettent d'avoir des informations sur le niveau statique et la piézométrie mais aussi sur la pluviométrie de la région et enfin sur l'épaisseur du Continental Terminal. Ces données proviennent de différentes sources et de différentes périodes comme on peut le constater dans le tableau suivant.

Tableau 2 Inventaire des bases de données utilisées

| objet | contenu | dates des mesures | source |
|---|---|----------------------------|---|
| niveau statique, piézométrie | 161 puits Via Sahel sur zone d'étude | entre 2000 et 2013 | Via Sahel |
| | 83 puits autres que Via Sahel sur zone d'étude | entre 2000 et 2013 | Via Sahel |
| | 67 puits Via Sahel sur notre zone d'étude | entre février et mars 2014 | Via Sahel |
| | 1212 puits et forages sur la plaine du Gondo | entre 1940 et 2005 | Koussoubé, 2010 |
| | 52 puits sur la plaine du Gondo dont 14 sur la zone d'étude | 1950 | Archambault, 1951 |
| | 135 puits sur la plaine du Gondo dont 39 sur la zone d'étude | entre 1955 et 1957 | Defossez, 1955-1957 |
| | 315 puits sur la plaine du Gondo dont 134 sur la zone d'étude | entre 1971 et 1972 | PNUD, 1975 |
| pluviométrie | série pluviométrique de Baraboulé | entre 1965 et 2013 | Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso |
| | série pluviométrique de Djibo | entre 1961 et 2013 | Direction Générale de la Météorologie du Burkina Faso |
| | série pluviométrique de Sangha de 2001 à 2013 | entre 2001 et 2013 | Via Sahel |
| puissance du Continental Terminal | 8 puits Via Sahel sur zone d'étude | entre 2007 et 2012 | Via Sahel |
| | 97 puits sur plaine du Gondo | entre 1971 et 1972 | PNUD, 1975 |
| | 75 puits sur plaine du Gondo | entre 1971 et 1972 | PNUD, 1972 |

Notons que Defossez (1955-1957) cite et indique une quinzaine de mesures piézométriques réalisées par Palausi en 1951.

Les coupes électriques, tirées du PNUD (1972) ne peuvent malheureusement pas être présentées ici car il n'a pas été possible de les scanner. En revanche, les deux coupes géologiques et la lithostratigraphie, tirés du PNUD (1975) se trouvent en annexe 8.

Enfin, les logiciels utilisés ont été les suivants (voir tableau 3) :

Tableau 3 Inventaire des logiciels utilisés

| logiciel | utilité |
|------------------|---|
| ArcGIS 10 | réalisation de cartes : administrative, linéamentaire, piézométriques |
| ENVI 4.4 | traitement d'images satellitaires |
| Surfer 9 | calcul de différence de volume entre différentes piézométries |
| Global Mapper 15 | réalisation de coupes |
| Georient | réalisation du diagramme polaire des orientations linéamentaires |
| GMS 6.0 | modélisation |

III.2. METHODES

Le fonctionnement hydrodynamique de la zone a été étudié sous plusieurs aspects :

- nous avons réalisé une carte linéamentaire afin de repérer les éventuelles failles qu'une future étude de terrain pourra venir confirmer ou infirmer.

- en raison du rôle essentiel joué par les mares dans la région, nous les avons cartographiées et avons comparé leur nombre et étendue en saison des pluies et en saison sèche.

- nous avons traité les bases de données fournies par Via Sahel ainsi que celles créées à partir des documents anciens que nous avons retrouvés.

- nous avons réalisé une carte du substratum du Continental Terminal.

- nous avons calculé et cartographié la hauteur d'eau dans les puits.

- nous avons réalisé des coupes et des cartes piézométriques.

- nous avons analysé l'évolution diachronique de la piézométrie à l'échelle de la plaine du Gondo et à l'échelle de la zone d'étude.

- enfin, nous avons modélisé la zone d'étude afin d'intégrer toutes les données existantes.

III.2.1. Réalisation d'une carte linéamentaire

La télédétection est un outil clef dans la recherche d'eau souterraine. Son utilisation précède souvent les prospections géophysiques de terrain en permettant de distinguer des

zones préférentielles où réaliser les mesures qui confirmeront ou infirmeront la présence de fractures. Il semble que s'il existe un aquifère important, l'implantation sur fracture augmente sensiblement le débit et si l'aquifère est médiocre, les chances de succès sont plus fortes si le forage est placé sur une fracture et de préférence, à l'intersection de plusieurs fractures (Scanvic, 1983). Il s'agit donc de chercher, sur des images satellitaires ou photos aériennes, des linéaments qui sont des discontinuités rectilignes ou curvilignes identifiables sur les différents produits de télédétection. Ces linéaments sont repérables grâce à un contraste de tonalités ou de texture mais aussi par l'alignement de certains arbres dont les racines profondes vont chercher l'eau dans les zones de failles. Sur le terrain, les indicateurs directs sont également des contacts géologiques, des filons, des axes de pli, etc.

Grâce à un traitement numérique adapté qui permet de rehausser les images satellitaires, les linéaments deviennent plus visibles et il est alors possible de dessiner une carte linéamentaire de la zone choisie. Un traitement statistique des linéaments permet de révéler, ensuite, les directions majeures de fracturation.

Pour cette étape, nous avons choisi d'utiliser les images du satellite SPOT1, dont la résolution était moins fine que les autres cartes à notre disposition. Ainsi les détails étaient moins visibles mais les grands objets, tel que des linéaments, apparaissaient plus distinctement.

Sur cette carte, grâce au logiciel ENVI, nous avons réalisé les traitements suivants :

- Une composition colorée : on obtient alors une image couleur, ici en fausse couleur, qui permet de mieux distinguer les objets présents dans l'image.
- Filtre directionnel 45° : ce filtre permet de mieux visualiser tout objet ayant pour direction préférentielle 45°. Or, la falaise de Bandiagara étant inclinée approximativement de 45° par rapport au Nord, il est probable que des linéaments de la plaine suivent également cette direction.
- Filtre Sobel : ce filtre est utilisé pour la détection de contours. Il permet donc de mettre en lumière le contour d'objets tels que des linéaments.

Puis nous avons réalisé la carte linéamentaire sous ArcGIS et enfin, avons tracé le diagramme polaire des directions linéamentaires avec le logiciel Georient.

III.2.2. Cartographie des mares en saison sèche et saison des pluies

En zone semi-aride, les rivières et les mares temporaires représentent un point essentiel du cycle hydrologique : concentrant les eaux de surface, elles sont souvent les lieux privilégiés où puisse se produire une infiltration jusqu'à la nappe, du fait d'une évapotranspiration potentielle largement supérieure à la précipitation (Martin-Rosales et al. 2003).

La résolution très haute des images Pléiades a permis d'identifier les mares de la zone d'étude. Ainsi, tuile par tuile nous avons cherché visuellement les mares puis les avons mises sous forme de shapefile avec ArcGIS afin de pouvoir calculer leurs superficies. Les deux images satellitaires Pléiades en notre possession témoignaient de périodes différentes : l'une en saison sèche 2013 et l'autre en fin de saison des pluies 2013, ce qui nous a permis de comparer l'extension des mares dans ces deux cas de figure.

III.2.3. Traitement des données

Une bonne partie du travail de cette étude a consisté à récupérer, fusionner, harmoniser et compléter les données existantes sur la plaine du Gondo. Les découvertes bibliographiques ont été, dans ce sens, très importantes puisque ces documents contiennent nombre d'informations sur la géologie, la géophysique et l'hydrogéologie, que nous avons pu abondamment exploiter et qui ont permis, dans une certaine mesure, de pallier l'impossibilité d'aller effectuer des mesures complémentaires sur le terrain.

Traitement des données fournies par Via Sahel :

Repositionnement des puits avec les images Pléiades :

Les images satellitaires haute résolution et récentes sont indispensables pour corriger les positions GPS des puits et les repositionner à 2 m près. Bien que nous nous situons dans une plaine, nous avons vu que la zone d'étude présentait un relief relativement contrasté, surtout au pied de la falaise. Ainsi, compte tenu de la topographie irrégulière de la zone d'étude, un décalage de position de plusieurs dizaines de mètres peut entraîner une erreur supplémentaire de quelques mètres dans l'altitude du sol (acquise par le MNE Reference3D) à proximité du puits. Cette erreur se reporte sur la profondeur en absolue des niveaux d'eau

dans les puits et in fine sur la représentation topographique de la nappe phréatique de la plaine du Gondo.

Les GPS courants annoncent des précisions de 5 à 10 m et dans les faits une mesure bien faite permet de retrouver les puits sur les images Pléiades dans un rayon d'une vingtaine de mètres. Malgré cela, il a été constaté que le quart des données GPS dans les 161 puits Via Sahel étaient erronées. Cela s'explique par les noms différents de villages et de puits attribués par les traducteurs Dogons dans une région aux multiples dialectes, les erreurs de mesures GPS, d'écritures en coordonnées géographiques (mélange de min et de sec) et le transfert des carnets de voyage à un fichier Excel. Ce constat met en doute de nombreuses données de puits et de forages récupérées par divers services et distribuées globalement.

Les images Pléiades de fin de saison des pluies 2013 se sont avérées fort utiles pour compléter ou vérifier les repositionnements des puits Via Sahel. Une bonne douzaine de cas douteux ont été levés avec la trace nette des villageois allant au puits au milieu des taches vertes de nouvelle végétation. Entre la récupération de positions GPS dans les archives et la visualisation grâce à Pléiades, au début de ce travail, 151 puits ont été repositionnés très précisément. Cette vérification visuelle a été effectuée sur l'ensemble des autres bases de données dans la limite de couverture des images Pléiades restreinte à la zone d'étude Via Sahel.

A notre connaissance, c'est la première fois que des images satellitaires très haute résolution sont utilisées pour repositionner à 2 m près tout un ensemble de puits dans le Sahel. L'argument a posteriori pour l'utilisation de Pléiades résulte de la comparaison entre les positions des 151 puits visualisés par Pléiades et les positions originales GPS dont nous disposons. Un écart moyen de 14 m et un écart type de 29 m confirme que l'utilisation des positions GPS originales auraient entraîné des erreurs de quelques mètres dans les altitudes des puits et ce faisant de la profondeur absolue de la nappe phréatique (voir Fig. 9).

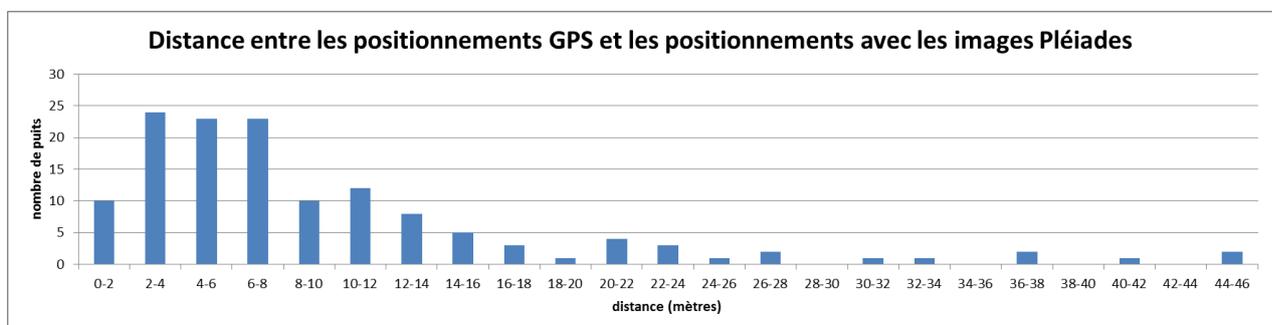


Figure 9 Histogramme des distances entre les positionnements GPS et les positionnements à l'aide des images Pléiades; 6 mesures n'ont pas été mises sur l'histogramme par souci de visibilité, elles ont pour valeur 230m, 215m, 98m, 80m, 70m et 50m.

Validation des mesures de niveau d'eau effectuées dans les puits Via Sahel et les autres :

Dans les anciens puits Via Sahel (1997-2008), seule la profondeur du puits avait été archivée. Pour estimer le niveau statique, et compte tenu de la technique de creusement des puits, il avait été considéré acceptable de retrancher 2m aux mesures disponibles pour avoir une estimation du niveau d'eau. Avec l'arrivée à Via Sahel Sangha d'une sonde piézométrique moderne OTT (précision de lecture au cm près) avec palpeur de fond en octobre 2009, un certain nombre de puits anciens ont été mesurés précisément (dans le cadre du projet Via Sahel Hydrogéologie, une douzaine de sondes OTT ont été récemment acquises). En comparant les doublons entre mesures anciennes et nouvelles, il a été constaté un décalage systématique entre ces mesures croissant avec la profondeur du puits (de 3 à 10 m). Il s'est avéré que nombre de relevés anciens ont été effectués avec une corde lestée mesurée par les puisatiers en coudée (visiblement surestimée) ou avec un ruban piézométrique en notant la mesure quand il y avait du mou dans le déroulement du ruban métré de la sonde (expliquant le décalage croissant avec la profondeur). Les 109 mesures anciennes Via Sahel ont donc été éliminées ainsi que les 38 mesures similaires fournies aimablement par l'ONG Fraternité Dogon² dans des puits construits depuis 1998. La majeure partie des 109 mesures Via Sahel a été remplacée par des mesures effectuées depuis 2009 dont 67 pour les besoins de ce travail. Une fois de plus se pose le problème de la validité des données récupérées par divers services et distribuées globalement.

Certains observateurs effectuent ces mesures en prenant comme référence la margelle sur laquelle est posée la sonde. D'autres retirent systématiquement la hauteur de la margelle (0,8 m en moyenne) prenant comme référence le sol. Il a fallu retrouver les modes opératoires des multiples observateurs de Via Sahel mais une inconnue demeure sur les mesures faites hors Via Sahel.

Les niveaux d'eau mesurés sont aussi entachés d'une erreur due au tirage des habitants. Cet évènement quotidien fait baisser le niveau d'eau dans les puits de quelques dm à 1-2 m (Favreau et al, 2000), et, selon les puits, il faut de quelques heures à toute une nuit pour que le niveau d'eau s'ajuste avec celui de la nappe phréatique. Une autre erreur provient des variations saisonnières, interannuelles et décennales, qu'il n'a pas été possible d'appréhender en raison du manque d'information sur les dates de mesure. Toutefois, la mise

² Fraternite.dogon.pagesperso-orange.fr

en place de puits pilotes, qui devrait avoir lieu prochainement dans le cadre du projet Via Sahel Hydrogéologie, laisse espérer un apport d'informations à ce sujet.

Les niveaux d'eau ont été retranscrits en valeur absolue avec l'altitude du sol autour des puits en utilisant le MNE Reference3D. Ce MNE est plus précis en altitude que le MNT SRTM dans sa version libre d'accès (non militaire US). De plus Reference3D est fourni sur une maille de 30 x 30 m contre 90 x 90 m pour le SRTM. Un essai de validation avec des mesures altimétriques du satellite IceSat n'ayant pas été convaincant, nous avons comparé les altitudes aux positions des puits Via Sahel avec le Reference3D et le SRTM en sachant que leurs méthodes de mesures d'altitude sont indépendantes (issues d'images stéréoscopiques de SPOT-5 ; mesurées par un radar altimétrique) (voir Fig. 10). La moyenne des différences est de - 0,7 m, l'écart moyen de 2,1 m et l'écart type 2,8 m. En sachant que le SRTM est de moins bonne qualité, ces faibles différences suggèrent que la précision du MNE Reference3D est inférieure à 3 m en absolu et probablement de 1 à 2 m en relatif, compte tenu du caractère pas trop accidenté de la plaine du Gondo.

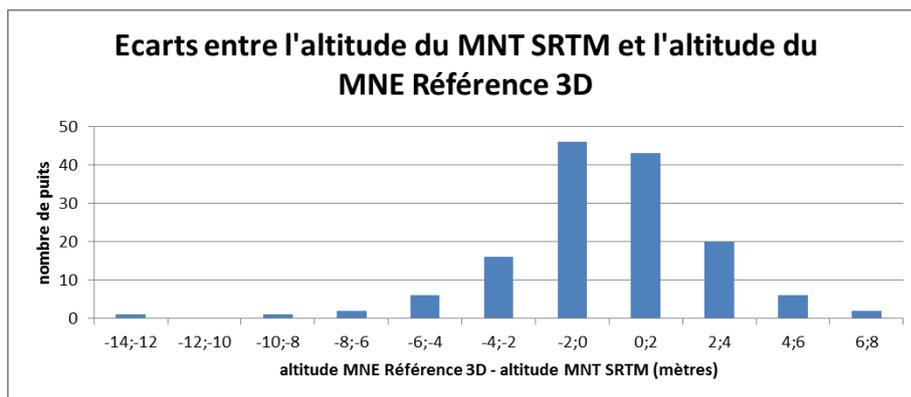


Figure 10 Histogramme des écarts d'altitudes entre le MNT SRTM et le MNE Référence 3D

Traitement des données anciennes :

L'analyse des anciens documents découverts, a révélé une erreur importante dans la réalisation des cartes piézométriques. Il est apparu que les cartes piézométriques réalisées entre les années 50 et 60 par Palausi (1959) et Archambault (1951 et 1960), notamment la carte piézométrique d'Archambault 1960 qui a été reprise de nombreuses fois par la suite, présentaient des erreurs importantes à certains endroits (par exemple à Madougou où le niveau piézométrique d'après Archambault 1960 était de 297m alors que le sol, d'après le

MNE Référence 3D, se trouve à 281m). Déjà Defossez (1955-1957) avait noté que « (...) les cartes au 1/200 000 Bandiagara 36 et Tougan 51 sur lesquelles s'était basé G. Palausi, [présentaient] des erreurs de cotes importantes (40m à Louta) » mais il semble que cette remarque n'ait pas été prise en compte par Archambault en 1960.

Cette constatation faite, nous avons décidé de reprendre directement les données brutes, à savoir la profondeur jusqu'à l'eau pour chaque puits mesuré, et de refaire les cartes piézométriques à partir de la topographie issue du MNE Référence 3D dans notre zone d'étude, ou du SRTM 90 ailleurs. Pour ce faire, il nous a fallu d'abord rechercher ces données brutes qui avaient permis aux auteurs de réaliser leurs cartes piézométriques. Une fois ces données trouvées, nous avons saisi toutes les données sous informatique afin de constituer des bases de données exploitables. Puis, nous les avons complétées en ajoutant, pour chaque point de mesure, le niveau topographique, obtenu à partir du MNE Référence 3D ou du MNT SRTM. Enfin nous avons procédé à un nouveau calcul de la piézométrie.

III.2.4. Réalisation d'une carte du substratum du Continental Terminal

Les prospections géophysiques menées dans la plaine du Gondo lors des missions du PNUD (1972, 1975), ont permis de préciser la géologie des aquifères, spécialement à Bankass et Koro. A ces mesures géophysiques (électriques et sismiques), nous avons rajouté les informations issues des 11 puits Via Sahel ayant nécessité de creuser dans au moins 5m de roche. Au total nous avons récupéré 126 relevés dont une bonne moitié le long d'une section géophysique N-S, qui nous ont permis d'établir, par la méthode d'interpolation en voisins naturels sous ArcGIS 10, une carte du substratum du Continental Terminal. Les mesures pour chaque puits ont été reportées en annexe 9 et une carte de l'épaisseur du Continental Terminal, tracée avec la méthode d'interpolation en voisins naturels également, se trouve en annexe 10. Enfin la carte réalisée a été utilisée par la suite pour tracer l'interface entre le Continental Terminal et l'Infracambrien, lors de la modélisation.

III.2.5. Réalisation de la carte des hauteurs d'eau de chaque puits

Pour chaque puits, nous avons souhaité connaître la quantité d'eau disponible pour les populations. Faute de mieux, on considère la hauteur d'eau dans chaque puits. Nous l'avons

simplement calculée en soustrayant le niveau statique à la profondeur de chaque puits (voir annexe 11)

III.2.6. Calcul du volume d'aquifère saturé du Continental Terminal

Les puits de la région captent essentiellement le Continental Terminal car il est très difficile techniquement et financièrement de creuser dans le calcaire. C'est pourquoi il est intéressant de déterminer le volume d'aquifère saturé du Continental Terminal, afin de voir si la quantité d'eau disponible est suffisante pour répondre aux besoins des habitants. Pour la calculer nous avons simplement soustrait le substratum du Continental Terminal à la piézométrie des années 2010, en utilisant le logiciel Surfer (voir annexe 20).

III.2.7. Réalisation de coupes et de cartes piézométriques

Grâce au logiciel Global Mapper 15, nous avons réalisé des coupes piézométriques : certaines parallèles à la falaise et plus ou moins proches, les autres perpendiculaires à la falaise. Ces coupes permettent de mieux appréhender la piézométrie de la zone avant de passer à la réalisation des cartes piézométriques.

A partir du traitement des données, il a été possible de tracer, pour chaque période de données disponibles, des cartes piézométriques en utilisant le logiciel ArcGIS 10.

Pour la réalisation des cartes piézométriques nous avons utilisé la méthode d'interpolation par voisins naturels qui nous semblait être celle qui convenait le mieux car le résultat se rapproche alors de celui qu'on obtient par tracé manuel. Cette méthode recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler une valeur (Sibson, 1981). Toutes les mesures des niveaux statiques utilisés ont été reportées dans les annexes 12, 14 et 16 et des cartes des niveaux statiques ont été réalisées en annexes 13, 15 et 17.

Nous avons également présenté une carte des puits dont le niveau piézométrique n'était pas en accord avec la piézométrie globale. Les caractéristiques de ces puits se trouvent en annexe 18.

III.2.8. Réalisation d'une carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone d'étude

Une carte de ce type a déjà été présentée dans la partie sur le contexte hydrogéologique de l'étude, sur l'ensemble de la plaine du Gondo ; elle avait été élaborée à partir des données du PNUD (1975). Nous avons souhaité compléter ces informations sur la zone d'étude, par les données récentes de l'ONG Via Sahel. Nous avons donc positionné sur cette carte, les puits, prospectés par Via Sahel, captant le Continental Terminal, ainsi que les puits Via Sahel qui avaient nécessité de creuser dans la roche. Des géologues se sont penchés sur le cas de ces derniers et ont conclu prudemment à la nature calcaire des roches, ce qui signifierait que ces puits captent l'Infracambrien. C'est ce que nous avons admis par la suite. Les caractéristiques de ces puits se trouvent en annexe 19.

III.2.9. Calcul du potentiel de recharge de la nappe par ruissellement de l'eau de pluie tombée du plateau

En suivant la méthode de Defossez (1955-1957), nous avons pu calculer la recharge potentielle de la nappe via le ruissellement de l'eau de pluie tombée sur la partie contributive du plateau à la plaine du Gondo. Pour ce faire nous avons calculé le volume annuel d'eau tombée sur ce plateau. Puis nous avons pris en compte l'évapotranspiration arbitrairement fixée à 50%, comme l'avait fait Defossez. Enfin nous avons considéré ce que cela représentait comme lame d'eau sur l'ensemble de la plaine du Gondo. Les détails des calculs sont présentés dans l'annexe 7.

III.2.10. Comparaison diachronique des cartes piézométriques

Si une première comparaison visuelle a été entreprise, il était important de regarder plus en détails les changements qui avaient eu lieu entre les années 1950 et les années 2010. Toutefois, pour être acceptable, la comparaison devait s'appuyer sur des cartes réalisées dans les mêmes conditions. Ce ne fut jamais le cas étant donnée l'origine diverse des missions mais il est apparu raisonnable de comparer la carte des années 1950 et celle des années 1970, sur une partie de la plaine du Gondo ainsi que la carte des années 1970 et celle des années 2010,

sur une partie de la zone d'étude. A chaque fois, nous avons choisi une zone de comparaison où il y avait les densités de points les plus similaires possible. Nous avons alors utilisé le logiciel ArcGIS 10 pour établir une carte des variations de la nappe. Enfin, nous avons utilisé le logiciel Surfer 9 pour calculer la différence de volume d'aquifère saturé correspondante.

III.2.11. Modélisation hydrogéologique

La troisième et dernière partie du travail a consisté en la modélisation de la zone d'étude, dans le but de représenter au mieux le système aquifère. Nous avons utilisé pour ce faire le logiciel GMS 6.0. et nous nous sommes largement appuyés sur les données synthétisées dans la première partie du travail. Nous avons procédé de la manière suivante :

- réalisation du modèle conceptuel
- réalisation du modèle numérique
- calage du modèle
- test de sensibilité

Le modèle conceptuel a pour but de réunir l'ensemble des informations connues sur le système et traduit une représentation simplifiée d'un hydrosystème complexe. Son élaboration a nécessité dans un premier temps de définir les limites hydrogéologiques de la zone à modéliser. Il a fallu, dans un deuxième temps, identifier les formations géologiques à représenter et connaître l'extension et l'épaisseur de chacune de ces formations. Enfin, dans un troisième temps, nous avons dû rentrer les paramètres hydrodynamiques du système.

Pour la réalisation du modèle numérique, nous avons utilisé le logiciel GMS 6.0. (Groundwater Modeling System) qui s'appuie sur le code Modflow (Mac Donald et Harbaugh, 1988). Il s'agit d'un logiciel aux différences finies, permettant de simuler des écoulements souterrains laminaires dans des systèmes multicouches, en régime permanent ou transitoire. Modflow résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode de différences finies :

$$\operatorname{div} \left(\frac{K\rho}{\mu} \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}} (p \pm \rho gz) \right) = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}$$

Avec K , le coefficient de perméabilité ; ρ , la masse volumique ; μ , la viscosité dynamique ; p , la pression ; z , la cote ; et ω , la porosité

Cela suppose un maillage préalable et des conditions limites et initiales fixées.

Le calage a nécessité de s'appuyer sur des points d'observations. Nous en avons utilisé 105. Puis nous avons fait varier les conductivités hydrauliques de la deuxième couche afin de simuler une piézométrie la plus en accord avec les points d'observation.

Pour finir, nous avons voulu appréhender l'influence de différents facteurs sur la piézométrie à travers des tests de sensibilités. Nous avons donc fait varier le niveau du substratum du Continental Terminal, les conductivités hydrauliques de la couche 1 et de la couche 2. Enfin, nous avons mis des zones de recharges correspondant aux paléo-vallées.

III.3. DIFFICULTES RENCONTREES ET LIMITES DE LA METHODOLOGIE

III.3.1. Au niveau des bases de données

Bien que nous ayons déjà abordé le sujet à travers l'explication du travail réalisé, il nous faut souligner à nouveau les difficultés rencontrées avec les différentes bases de données. D'une part, les localités n'étaient pas toujours dénommées de la même manière ce qui a rendu parfois l'identification difficile (c'est un phénomène courant en raison d'un manque d'harmonisation des noms de villages), et d'autre part, les coordonnées géographiques des localités de chaque base de données n'avaient pas la même précision (sans même parler des erreurs possibles). Ces deux phénomènes conjugués ont donné lieu à des grosses interrogations pour certains points de mesure et nous avons parfois dû trancher les questions de manière arbitraire.

Notons que les données utilisées n'étaient pas synchrones et pour certaines d'entre elles, la date de mesure n'était pas précisée, ce qui a nécessairement limité l'interprétation. Il est probable que la plupart des mesures aient été faites en dehors de la saison des pluies pendant laquelle les routes deviennent souvent impraticables mais entre le début de la saison sèche, où la nappe phréatique est haute car tout juste rechargée par les dernières pluies, et la fin de la saison sèche, où la nappe phréatique est basse car il n'y a pas eu de recharge depuis longtemps, il est difficile de dire si le niveau piézométrique a été surévalué ou sous-estimé.

III.3.2. Au niveau des cartes piézométriques

Il faut se souvenir qu'une carte piézométrique représente, à une date donnée, la distribution spatiale de charges hydrauliques, à partir de l'interpolation d'un certain nombre de points de mesure. Or, la densité de points de mesure n'est pas partout la même : il sera donc permis de douter de la représentation piézométrique d'un endroit avec une faible densité de points alors qu'une forte densité de points sera le gage d'une piézométrie proche de la réalité. Plus généralement, pour toutes cartes dessinées par interpolation, il conviendra de faire une lecture critique et nuancée.

III.3.3. Au niveau de l'utilisation des images Pléiades

Si ces images sont exceptionnelles par la finesse de leur résolution (0,5m), elles se sont avérées difficiles à traiter par un ordinateur ordinaire. Le temps de chargement d'une tuile était d'environ une minute alors que chaque image est constituée de 225 tuiles, ce qui limite considérablement leur exploitation.

III.3.4. Au niveau de la modélisation

Quant à la mise en œuvre du modèle numérique d'écoulement, elle a été limitée par le manque d'information sur le substratum du Continental Terminal ainsi que sur les conductivités hydrauliques.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats présentés dans cette partie sont les suivants :

- Le réseau linéamentaire de la zone d'étude
- La répartition spatiale des mares en saison sèche et en saison des pluies
- La profondeur du substratum du Continental Terminal
- La piézométrie actuelle
- Les hauteurs d'eau dans les puits
- Le volume de l'aquifère saturé du Continental Terminal
- L'analyse diachronique de la piézométrie
- La modélisation numérique des écoulements souterrains.

IV.1. CARTE LINEAMENTAIRE

IV.1.1. Les différents traitements

Les traitements de l'image satellitaire de SPOT1 sont représentés ci-dessous. Ils ont eu pour but d'aider l'observateur à mieux appréhender les linéaments mais bien sûr, la réalisation de toute carte linéamentaire est subjective et entièrement tributaire de l'œil de l'observateur.

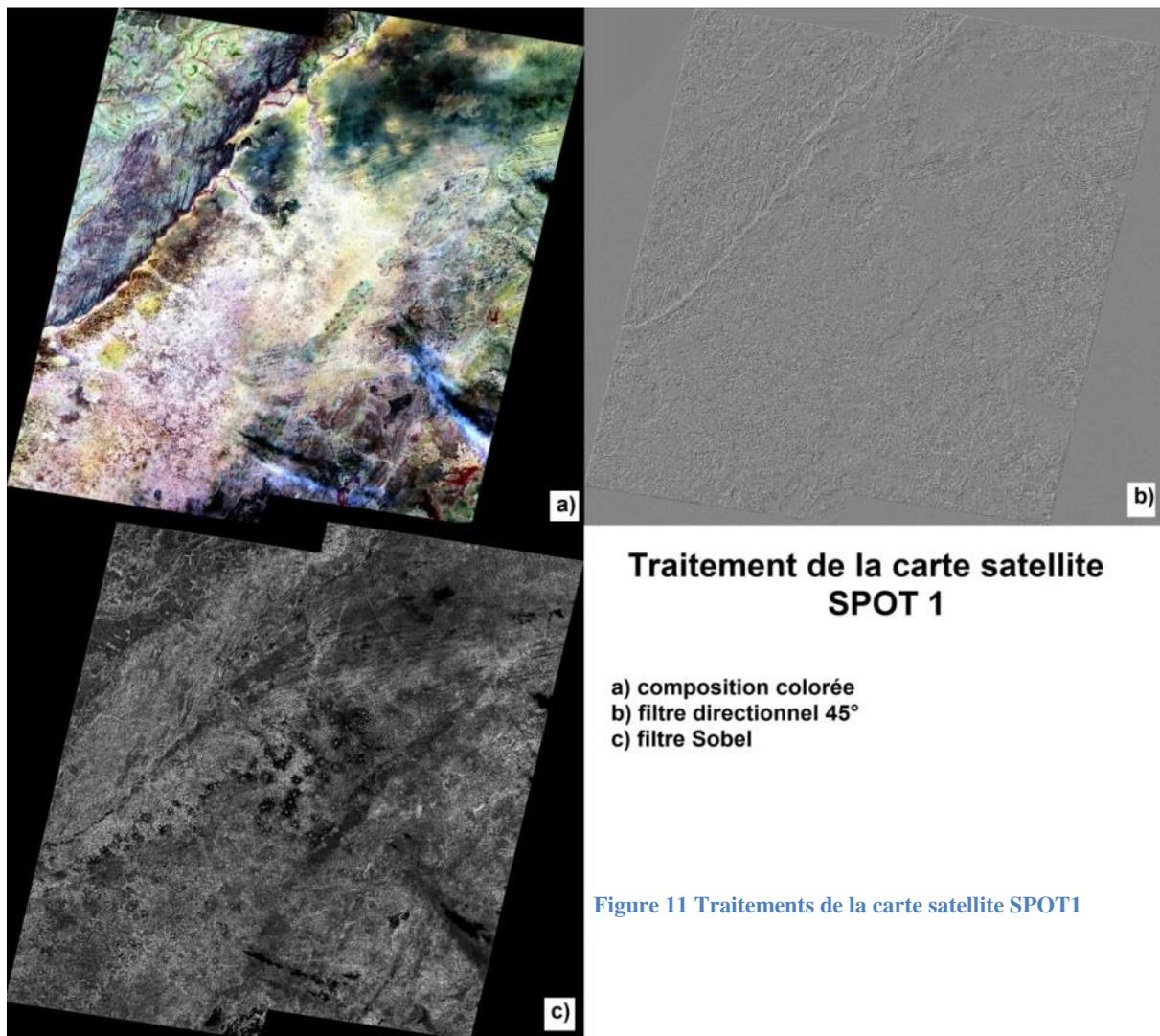
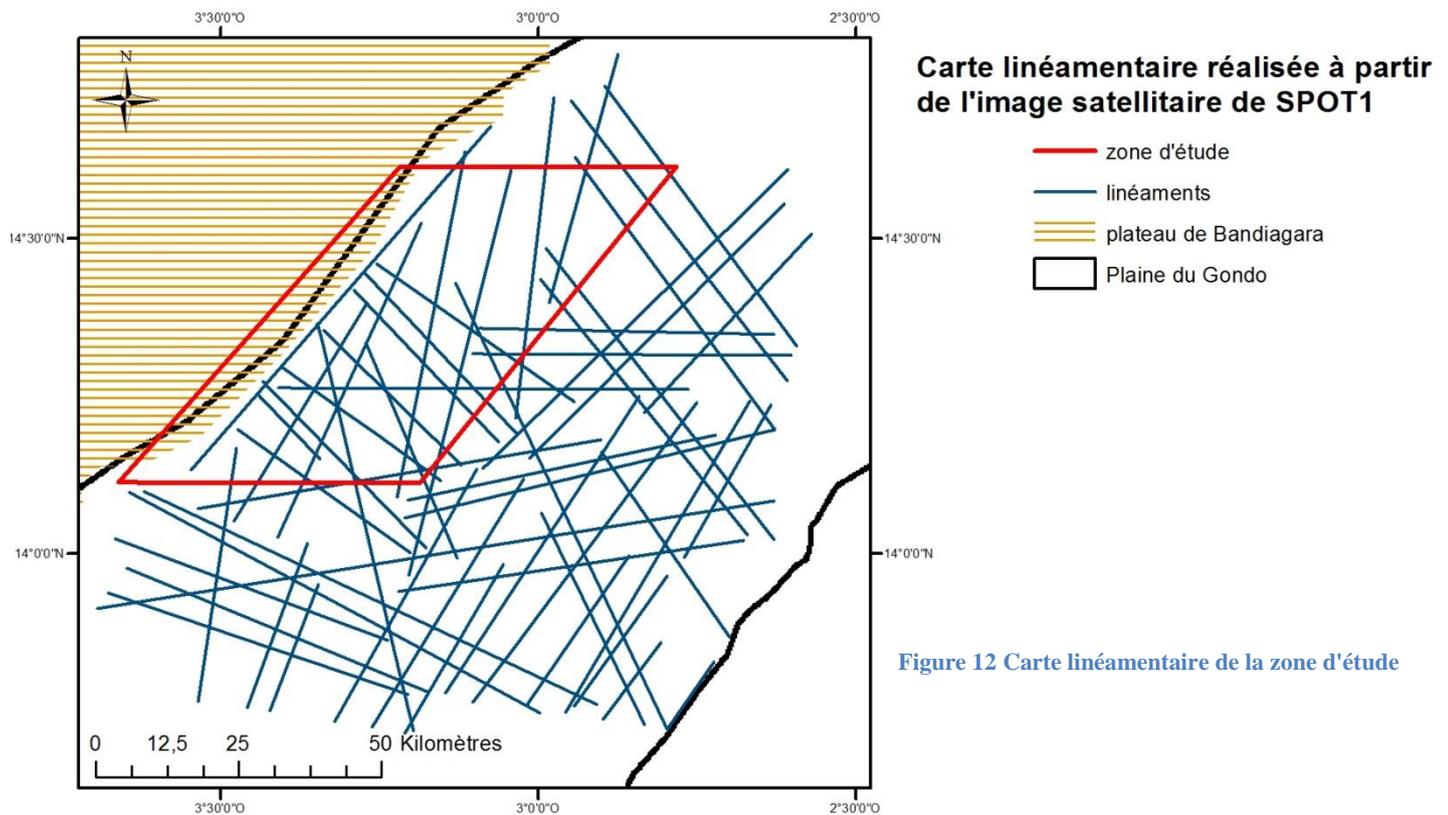


Figure 11 Traitements de la carte satellite SPOT1

IV.1.2. La carte linéamentaire

La région d'étude est une zone très largement fracturée (Koussoubé, 2010), ce qui est illustrée dans une certaine mesure par la carte linéamentaire ci-dessous. Toutefois, comme notre analyse s'est faite à l'échelle de l'image satellitaire de SPOT1, certains linéaments, plus petits, n'ont pas pu être détectés par cette méthode.

Cette carte présente néanmoins deux limites. La première est intrinsèque à l'usage de la télédétection pour le repérage de linéaments : il s'agit de la subjectivité de perception de tout observateur analysant une image satellitaire. La deuxième vient du fait que la présente étude a été menée sans pouvoir faire de terrain, ce qui nous empêche de valider les linéaments proposés. On note toutefois la présence de la faille déjà identifiée par le PNUD en 1975, à 5km de la falaise de Bandiagara.



IV.1.3. Directions préférentielles

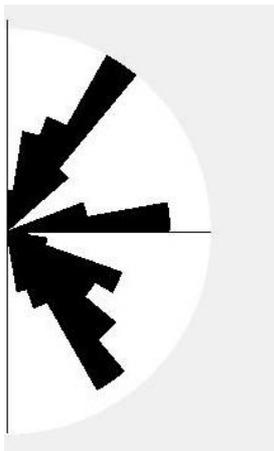


Figure 13 Diagramme polaire des orientations linéamentaires

L'analyse des directions de chaque linéament permet de faire ressortir les directions privilégiées des éventuelles failles. Sur le diagramme polaire, nous pouvons voir que deux directions prévalent : il s'agit de la direction N30-40°, qui correspond à peu près à la direction de la falaise, ce qui semble logique car les processus géologiques et tectoniques à l'origine de la falaise ont également du affecter la plaine du Gondo, et la direction perpendiculaire, N130-150°.

Cependant, comme nous l'avons déjà souligné, la réalité de ces linéaments ne pourra être validée qu'avec une opération de terrain, que nous ne sommes malheureusement pas en mesure de mener pour le moment.

IV.2. CARTE DES MARES EN SAISON SECHE ET SAISON DES PLUIES

La plupart des mares sont temporaires. Elles se concentrent au pied de la falaise et dans les paléo-vallées (voir Fig. 14). Mais toutes les mares ne sont pas temporaires : en raison de l'abondant ruissellement des eaux de pluie sur la falaise, on trouve encore, au pied de celle-ci et dans les paléo-vallées de Diankabou et de Konsogoulé, des mares en saison sèche (voir Fig. 14). En janvier-mars 2013 (saison sèche), nous en avons comptées au total 84, qui couvrent une superficie d'environ 0,29 km². En septembre-octobre 2013 (fin de la saison des pluies), le nombre des mares explose : nous en avons comptés 818, pour une superficie de 2,15km², soit un accroissement de surface inondée de près de 740%.

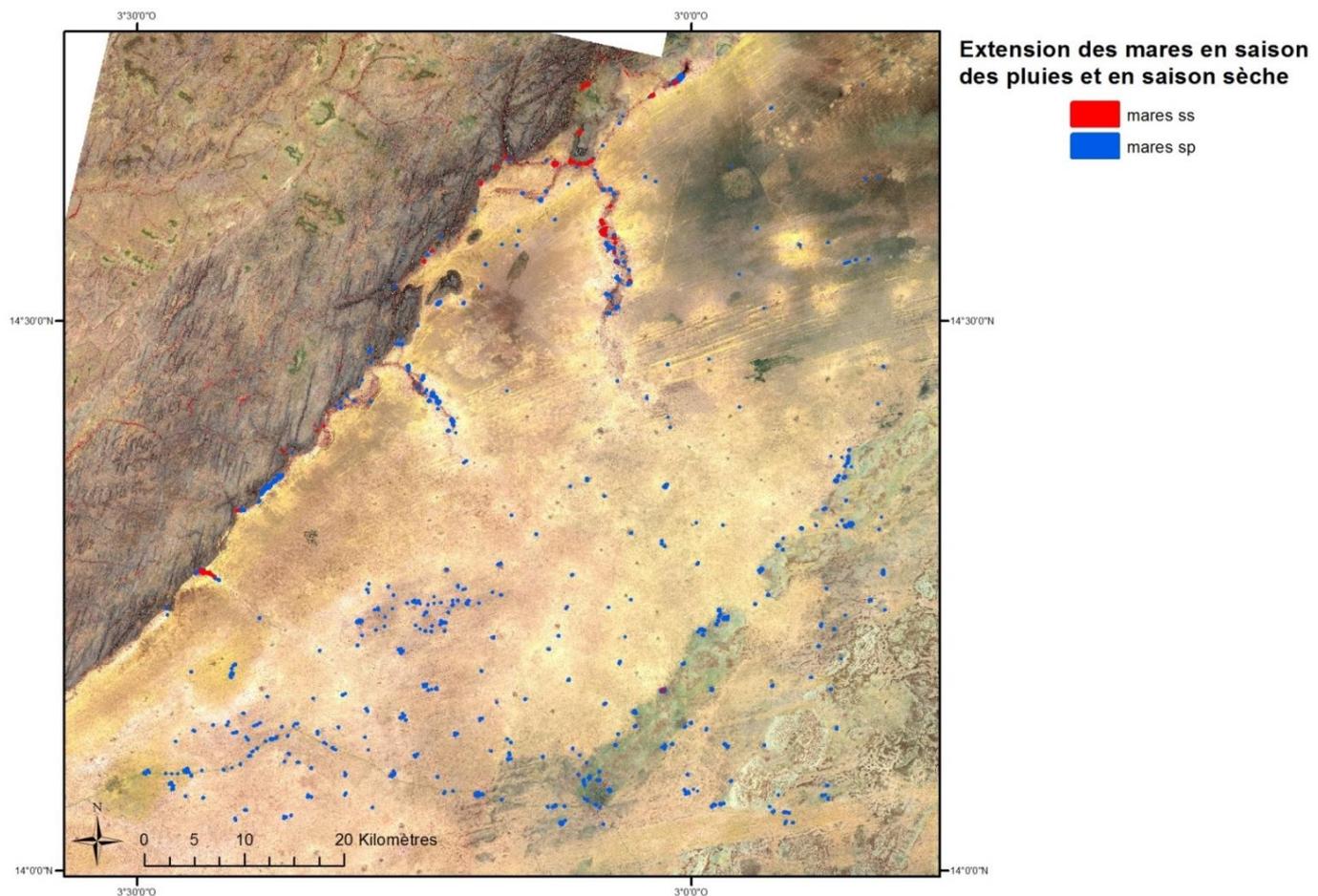


Figure 14 Carte des mares en saison sèche (ss) et en saison des pluies (sp)

La figure 15 illustre la variation saisonnière de l'extension d'une assez grande mare. Celle-ci, située dans la paléo-vallée de Diankabou, mesure 0,1ha en saison sèche mais 4,2ha en saison des pluies.

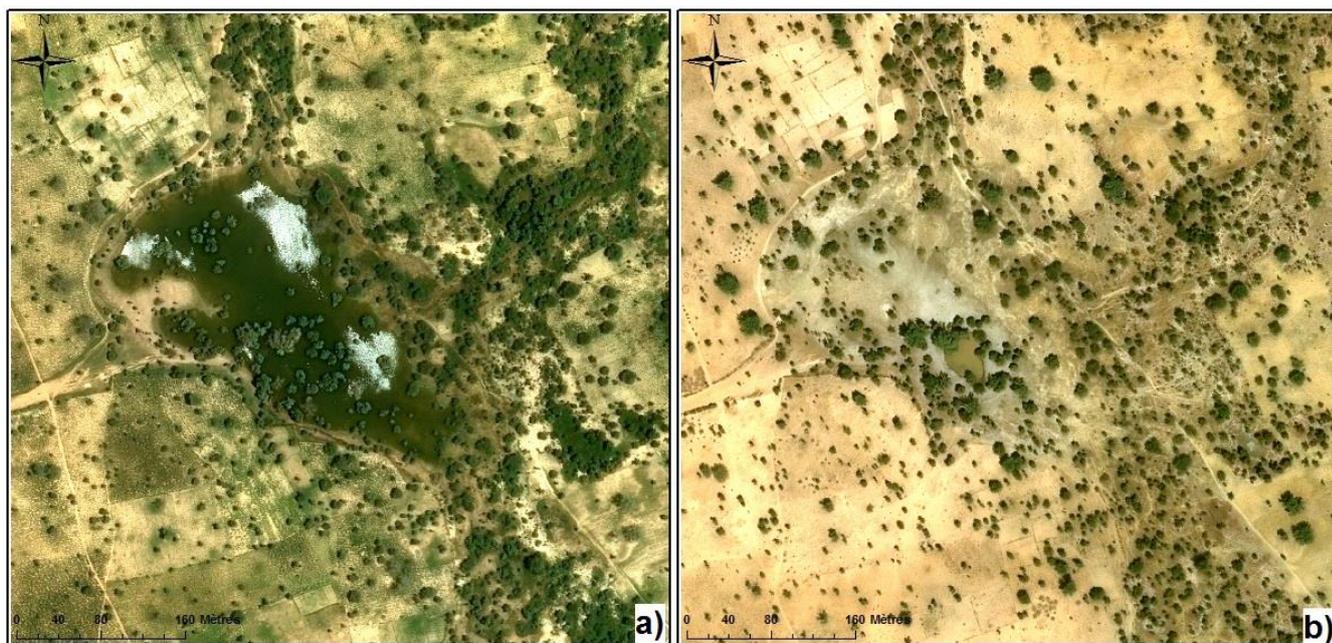


Figure 15 Comparaison saisonnière d'une mare de la paléo-vallée de Diankabou ($3^{\circ}4'1''$ Ouest et $14^{\circ}33'14''$ Nord) d'après les images Pléiades (0,5m de résolution) ; a) septembre-octobre 2013; b) janvier-mars 2013

Il serait fort instructif d'estimer la participation de ces mares à la recharge de la nappe profonde et également de voir s'il y a eu une évolution de ce nombre de mares au fil des années.

Disposant de quatre photographies aériennes de 1951 sur une partie de la zone, c'était un des objectifs initiaux que nous nous étions fixés. Malheureusement, la qualité de ces photographies ainsi que la difficulté de géoréférencer ces dernières n'ont pas pu permettre l'identification des mares et nous avons donc abandonné cet objectif.

Il n'en reste pas moins qu'une étude approfondie sur ces mares pourrait fournir de plus amples informations sur le processus de recharge de la zone.

IV.3. SUBSTRATUM DU CONTINENTAL TERMINAL

Sur la majeure partie de la plaine, le Continental Terminal repose sur les calcaires, épais et de morphologie irrégulière. Dans les environs de Koro, toutefois, le Continental Terminal repose sur ce qu'on appelle « la série de Koro » et à cet endroit, l'épaisseur du Continental Terminal se réduit considérablement, jusqu'à disparaître à certains endroits. Par ailleurs, le long de la falaise, le Continental Terminal reposerait a priori sur une formation schisteuse,

plus ou moins altérées, « les schistes de Toun », sous laquelle on retrouverait les calcaires de l’Infracambrien.

A Bankass, une étude géophysique (PNUD, 1975) a montré qu’on retrouvait localement une formation intercalaire entre le Continental Terminal et les calcaires dolomitiques. Il s’agirait des schistes de Toun. Mais à d’autres endroits, cette formation est absente et les calcaires, situés sous le Continental Terminal, se trouvent à une profondeur de près de 130m.

La carte ci-dessous (voir Fig. 16) présente de fortes hétérogénéités. On voit en effet que le long des profils réalisés, qui forment des lignes courbes continues, la profondeur semble plus importante qu’au niveau des mesures ponctuelles provenant des puits, créant ainsi des effondrements locaux. Il est pourtant fort peu probable que des creux apparaissent uniquement aux endroits où les profils ont été réalisés.

En outre, la répartition spatiale des points de mesures, est fortement disparate. L’absence notable de points dans le Nord-Est nous oblige à être prudents sur l’interprétation de la carte dans cette zone-là. En revanche, les parties centrales et sud-ouest présentent une densité de points plus intéressante, en conséquence de quoi il est possible de leur accorder un crédit plus important.

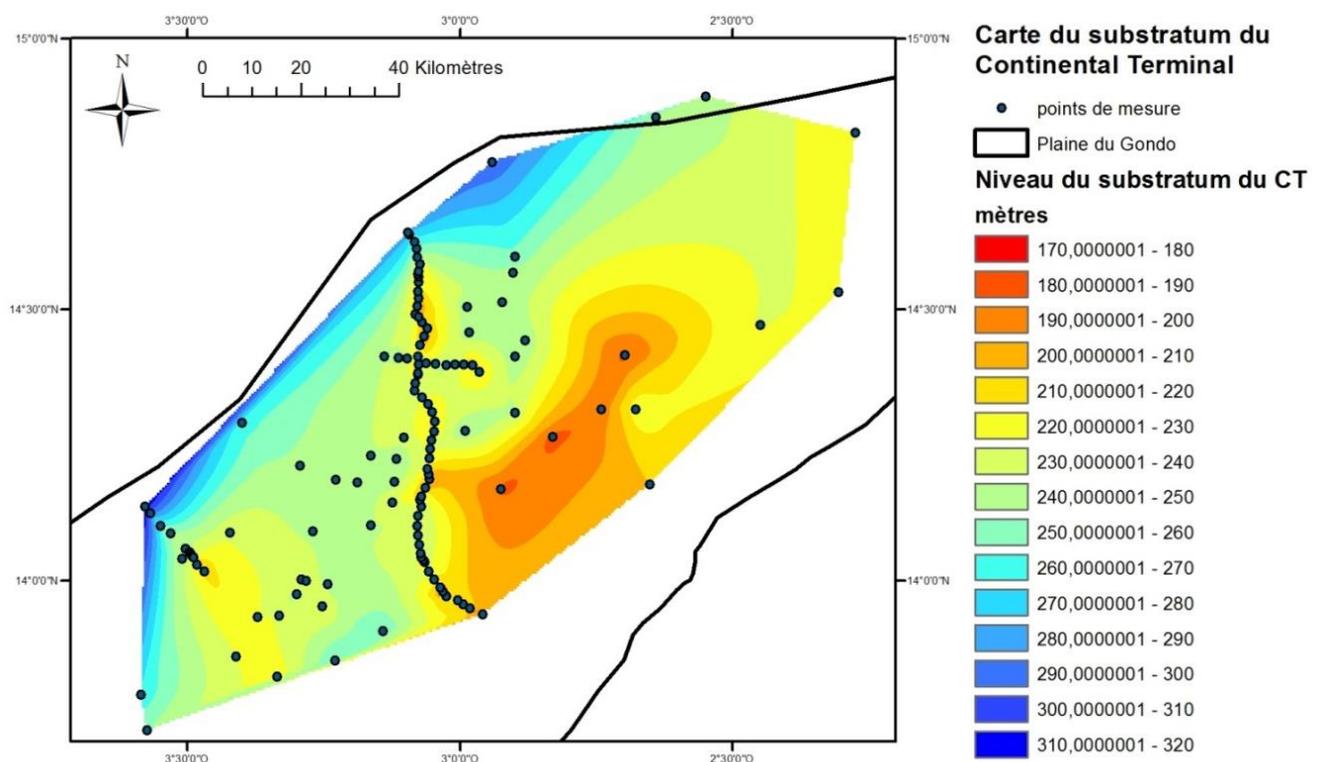


Figure 16 Carte du toit du substratum du Continental Terminal obtenue par la méthode d’interpolation par voisins naturels des données du PNUD (1975) et des données Via Sahel

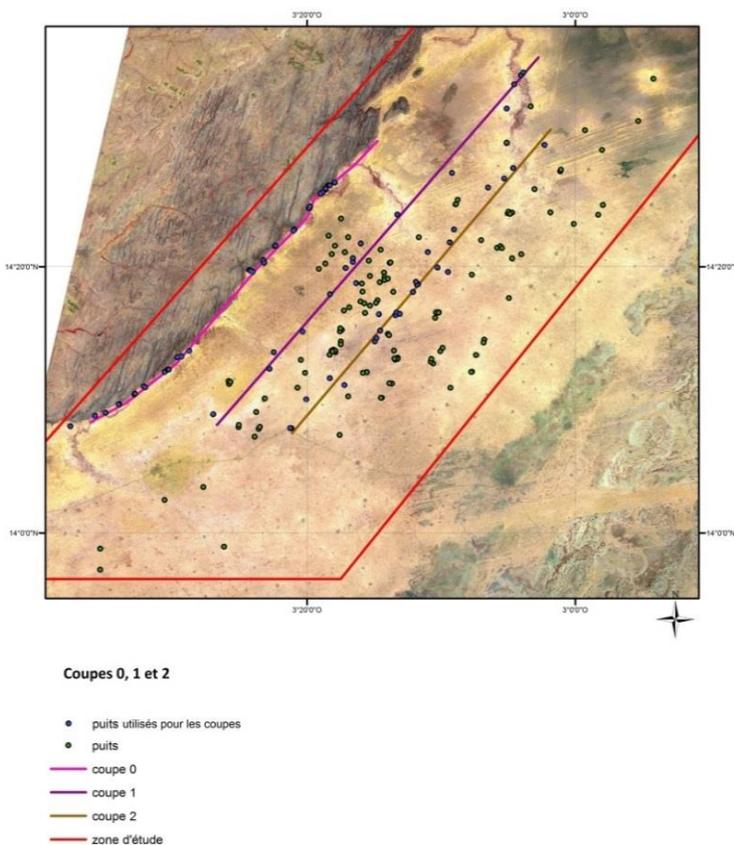
Dans l'idéal, il aurait été utile d'obtenir des points supplémentaires ou de pouvoir vérifier certaines données, notamment celles provenant des profils géophysiques. Cependant, à défaut d'avoir de meilleures informations et par nécessité, cette carte servira de support pour la modélisation.

IV.4. PIEZOMETRIE DES ANNEES 2010

IV.4.1. Coupes piézométriques

Afin de mieux percevoir la piézométrie, nous allons commencer par présenter des coupes qui mettent en parallèle la piézométrie et la topographie. Ces coupes ont été réalisées grâce au logiciel Global Mapper 15.

- Coupes parallèles à la falaise



La coupe 0 (Fig. 18) correspond au pied de la falaise. Contrairement aux autres, il ne s'agit pas d'une ligne droite mais d'une ligne brisée (voir Fig. 17). On voit que le niveau de la nappe est très proche du sol au niveau des puits situés vers le Nord-Est. En revanche, au niveau des puits situés au Sud-Ouest, la nappe est entre 10 et 25m sous le niveau du sol. Précisons que les endroits de la coupe où la topographie n'est pas visible, correspondent à des pans de la falaise qui avancent un peu dans la plaine à cet endroit-là.

Figure 17 Localisation des coupes parallèles à la falaise

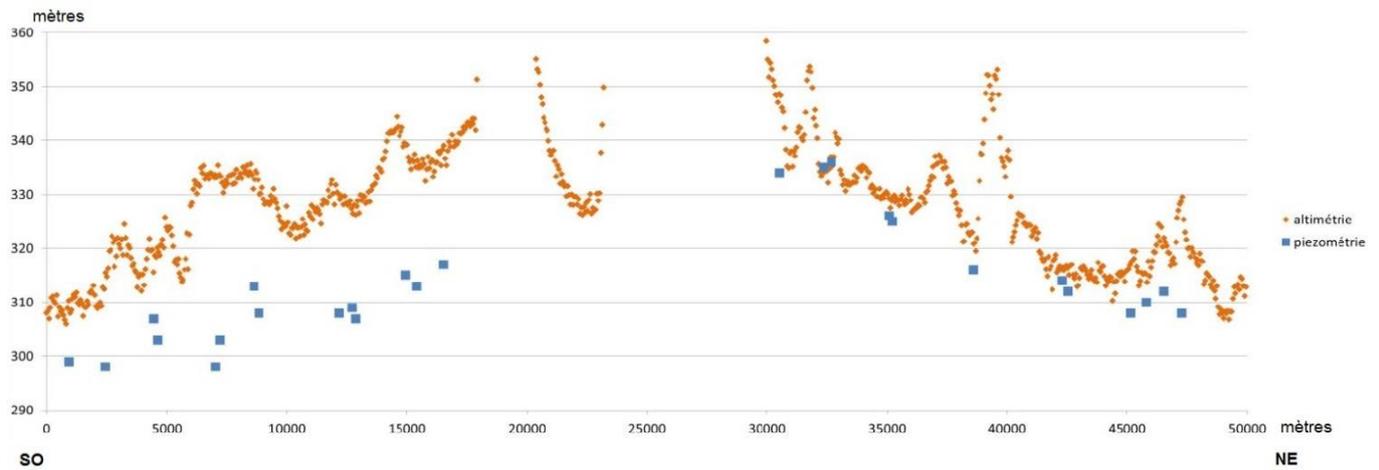


Figure 18 Coupe piézométrique 0

Pour la coupe 1 (Fig. 19), on voit que la topographie présente des reliefs contrastés en raison de la présence de paléo-vallées. Ainsi le dénivelé peut atteindre jusqu'à 30m. Et plus on se rapproche de la falaise, plus ce dénivelé s'accroît.

En dehors des puits situés au creux de ces paléo-vallées, la piézométrie, tourne autour de 250m. La hauteur piézométrique importante des puits situés au creux des paléo-vallées (entre 280 et 290m), nous interpelle et nous porte à croire que ces puits captent des nappes perchées plutôt que la nappe profonde. Nous verrons par la suite que cette interprétation est probablement fautive.

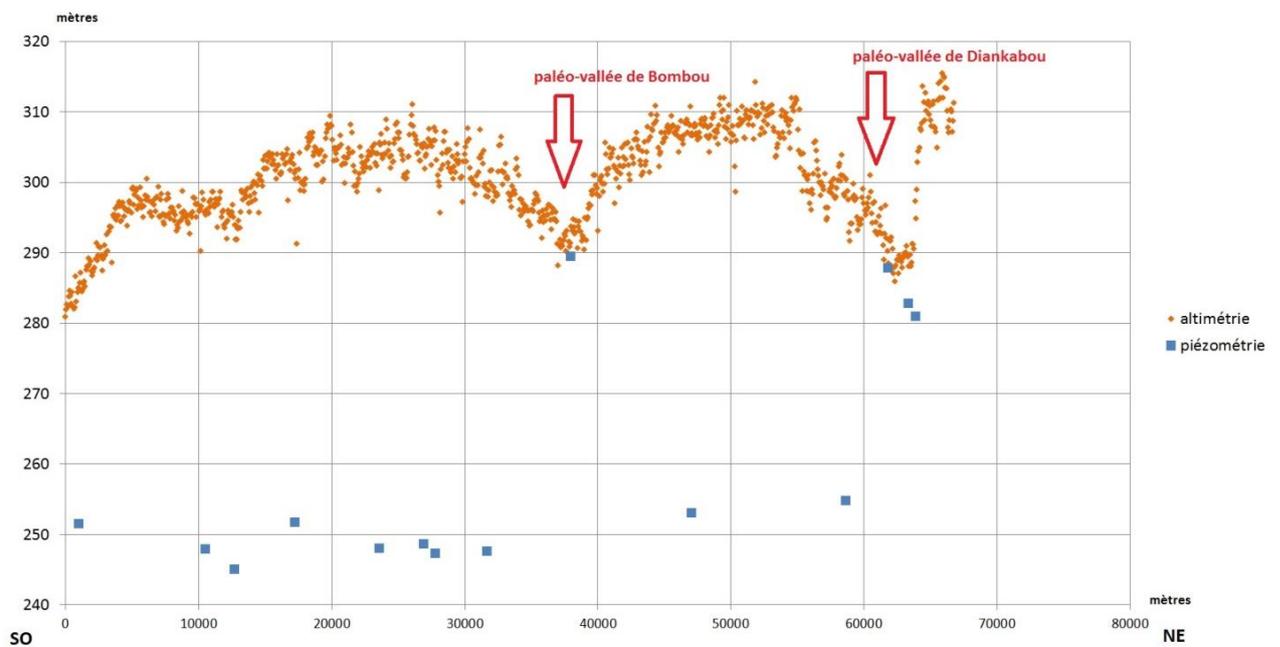


Figure 19 Coupe piézométrique 1

En revanche, pour la coupe 2 (Fig. 20), plus éloignée de la falaise que la première, les paléo-vallées ne sont plus distinctes et on ne peut que les deviner. Il est intéressant alors de voir que la piézométrie ne présente plus de points particuliers. Celle-ci est comprise entre 237m et 253,5m.

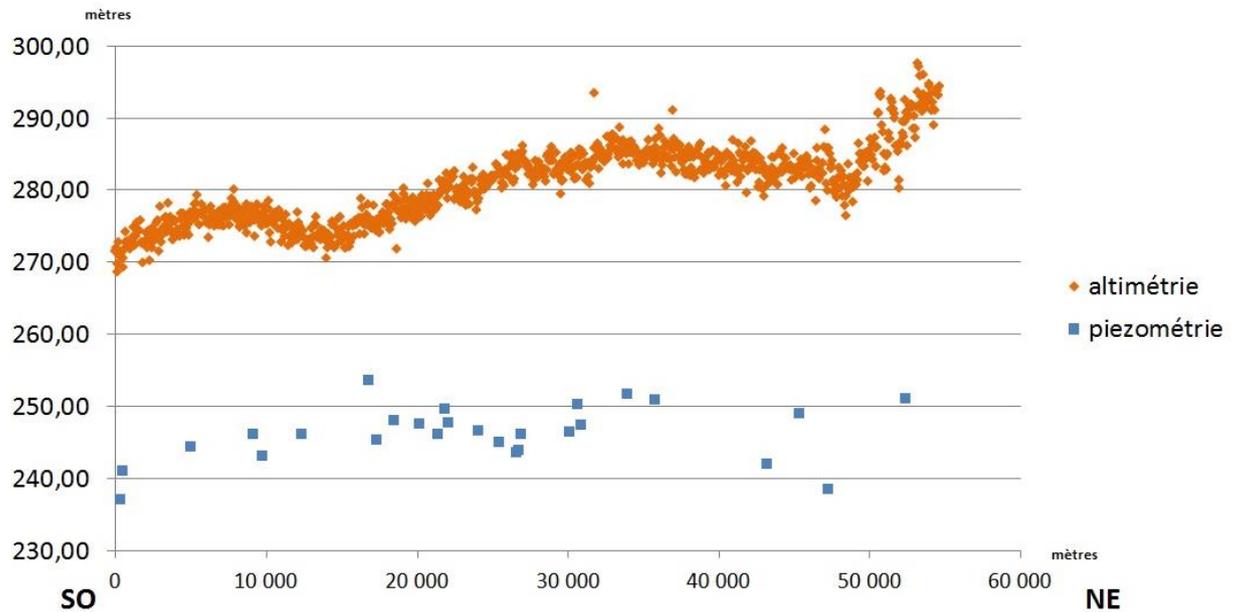


Figure 20 Coupe piézométrique 2

- Coupes perpendiculaires à la falaise

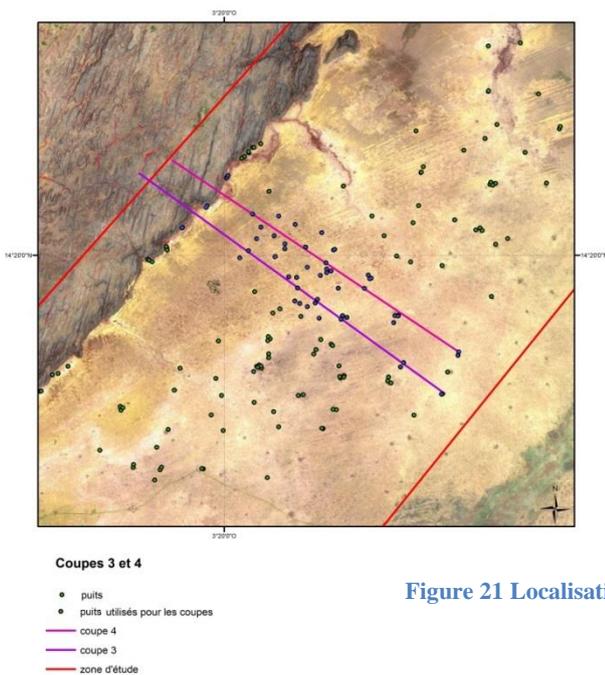


Figure 21 Localisation des coupes perpendiculaires à la falaise

Sur ces deux coupes (voir Fig. 22 et 23), nous remarquons nettement que le pied de la falaise correspond à une paléo- vallée qui longe la falaise avant d'aller s'enfoncer dans la plaine. Nous notons aussi que l'altitude diminue quand on s'éloigne de la falaise, variations que semble également suivre la piézométrie.

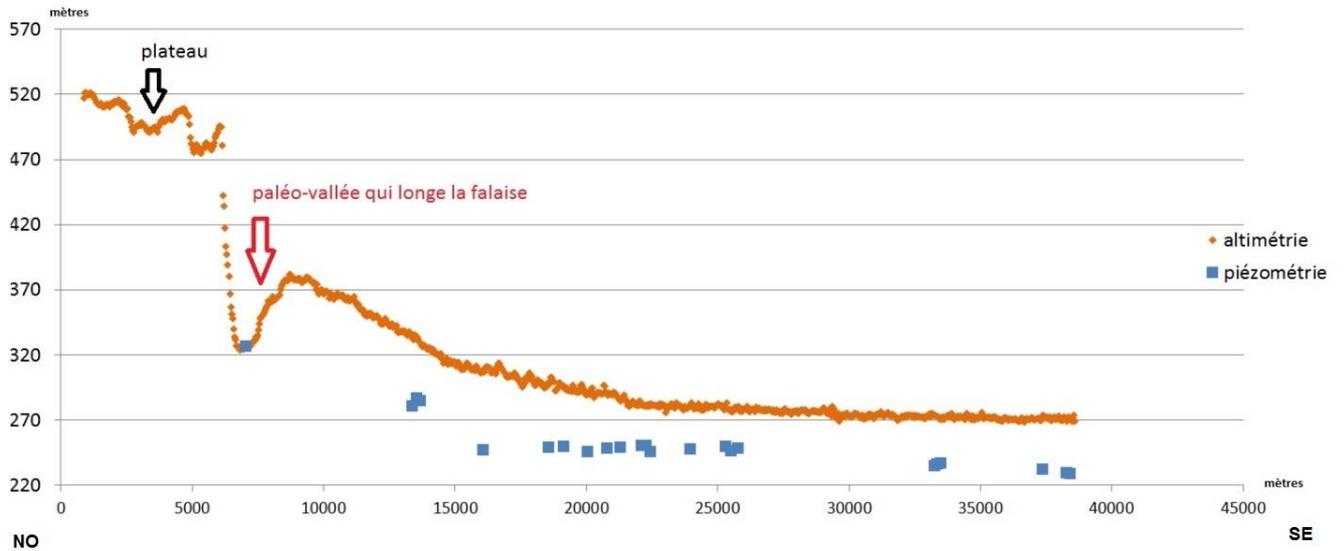


Figure 22 Coupe piézométrique 3

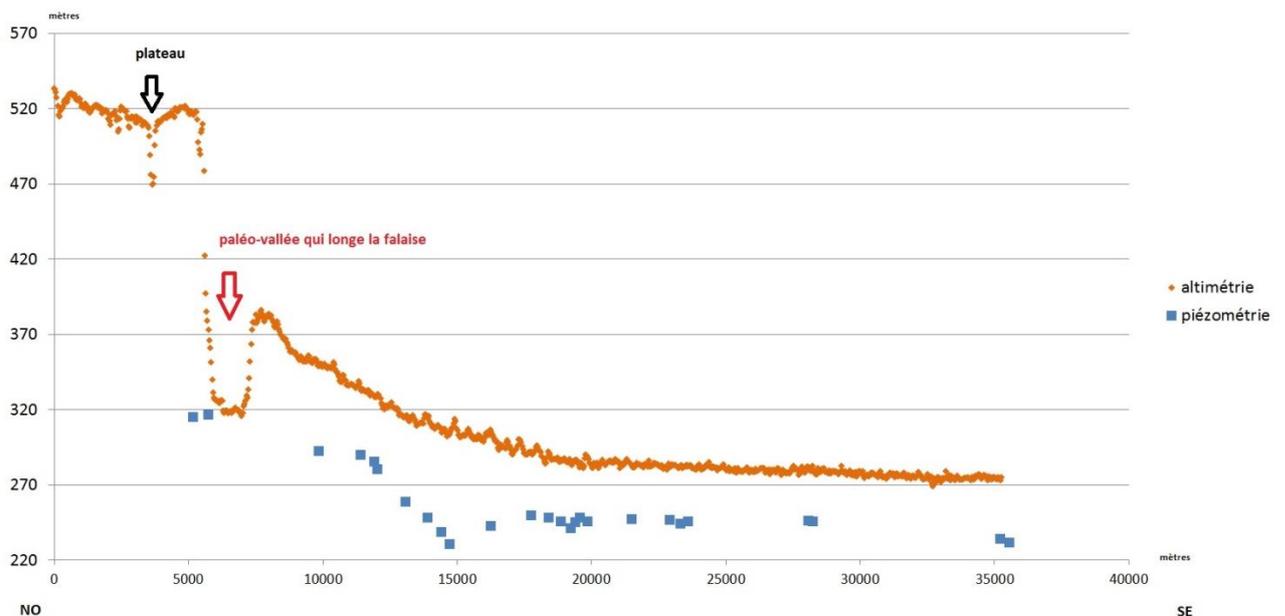


Figure 23 Coupe piézométrique 4

En outre, on retrouve une piézométrie particulièrement haute, quasiment au niveau du sol, au creux de la paléo vallée. Le niveau piézométrique semble ensuite décroître progressivement (avec un gradient de $8,9/1000$), ce qui nous laisse penser que les points à haute piézométrie, précédemment mis en lumière, ne correspondent en fait pas à des nappes perchées mais bien à la nappe profonde dont le niveau élevé au creux des paléo-vallées pourrait s'expliquer par une recharge préférentielle due aux ruissellements provenant du

plateau. Cette hypothèse, bien qu'envisageable, mériterait d'être étayée par des mesures complémentaires réalisées en partant du pied de la falaise et en se dirigeant peu à peu vers la plaine.

Enfin, la coupe 4 met en lumière un fort gradient hydraulique entre 11 400m et 14 700m, de 17,9/1000. Le niveau piézométrique descend très bas (à 230m), puis remonte vers 242m, après 15 000m.

IV.4.2. Carte piézométrique des années 2010

La carte piézométrique (voir Fig. 24) a été réalisée par la méthode d'interpolation des voisins naturels qui correspond le mieux à un tracé piézométrique manuel.

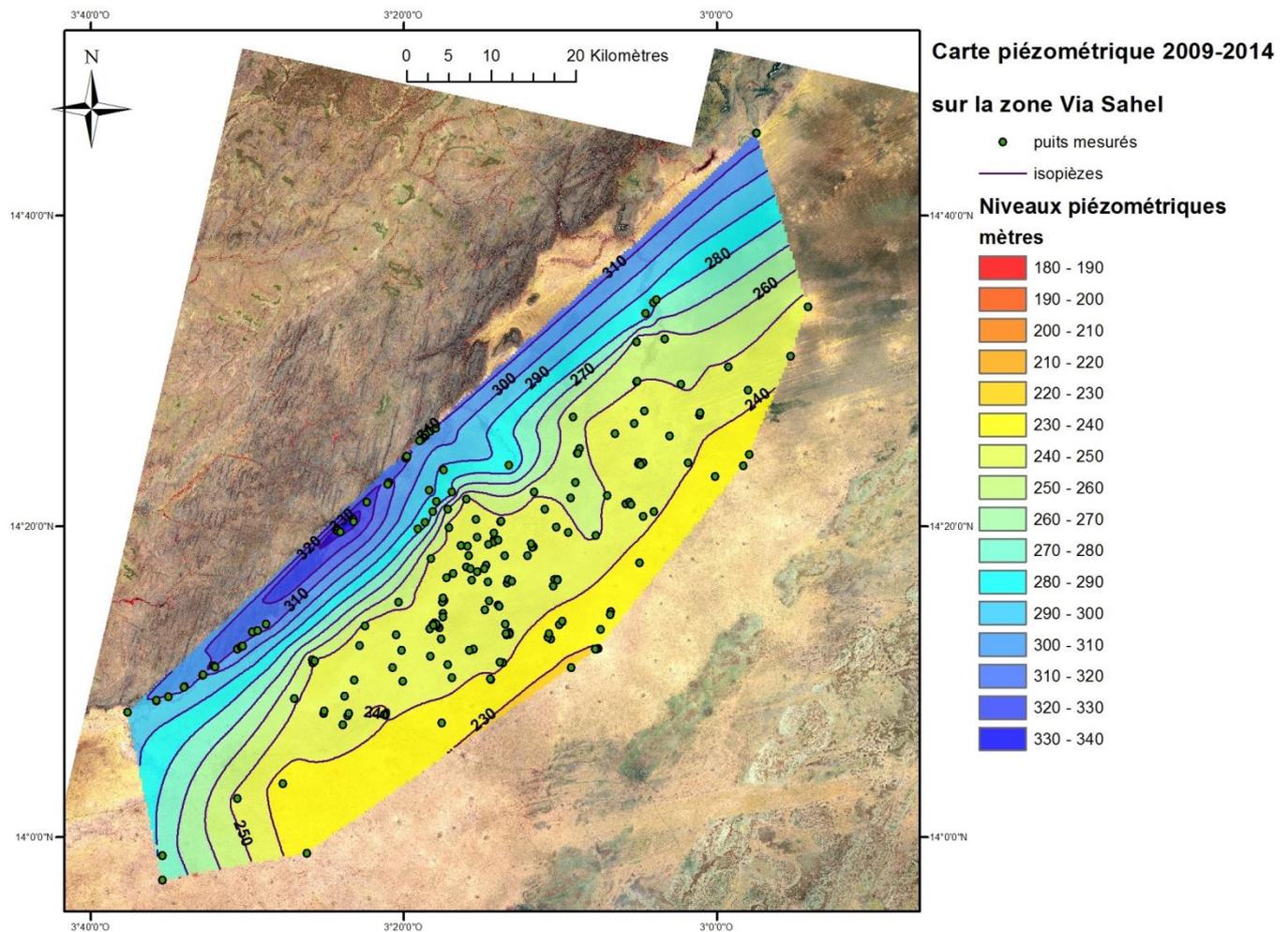


Figure 24 Carte piézométrique de la zone Via Sahel, des années 2010

Sur cette carte, les cotes piézométriques vont de 336 m au pied de la falaise à 227m vers la limite est-sud-est de la zone d'étude, avec un fort gradient hydraulique près de la falaise de 9,2/1000 alors que le gradient hydraulique, plus au centre de la plaine est de 1,25/1000. Cela induit un écoulement hydraulique d'abord difficile du pied de la falaise vers le centre, puis plus facile à mesure que l'on se rapproche du centre de la plaine du Gondo. En raison de l'extension limitée de la zone d'étude, la dépression piézométrique de l'ensemble de la nappe du Gondo n'est pas visible sur cette carte piézométrique qui ne représente qu'un des bords de celle-ci.

Les isopièzes sont globalement parallèles les unes aux autres, excepté au niveau de la paléo-vallée de Bombou au niveau de laquelle la courbure des isopièzes, incurvées vers le Sud-Est, paraît indiquer que les eaux de cette paléo-vallée alimentent la nappe. On distingue par ailleurs une incurvation à la limite sud de la carte, pour laquelle nous n'avons pas d'explication. Du reste, ces courbures sont à relativiser dans la mesure où la densité de points sur lesquels ils reposent, est faible. De même la faible densité des points au Nord-Est de la zone, et notamment le long de la falaise, remet en question la piézométrie proposée dans cette zone.

Pour réaliser cette carte, nous avons écarté de l'ensemble des mesures piézométriques, plusieurs relevés qui étaient en discordance avec les autres mesures voisines, et qui semblaient donc ne pas caractériser le niveau de la nappe profonde (voir Fig. 25).

Parmi eux, il y avait les deux mesures réalisées dans le village de Doma Da, situé à une vingtaine de kilomètres à l'est de notre zone d'étude (voir Fig.1) qui faisaient état d'un niveau statique de 10 et 10,8m alors que dans les environs, la nappe profonde se trouve vers 56-60m de profondeur (voir le point de niveau piézométrique 255,6m sur la Fig. 25). On trouve par ailleurs dans ce village, des jardins et zones maraîchères, fait relativement unique dans ce secteur sahélien. L'ensemble de ces éléments porte à croire que nous sommes en présence d'une nappe perchée isolée.

Les autres puits qui ont été écartés présentent tous un niveau piézométrique anormalement bas par rapport au niveau piézométrique attendu. Bien que peu nombreux (seulement 7 puits sur les 175 construits), ils mettent en exergue toute la complexité hydrogéologique de la zone pour laquelle nous avons considéré que la nappe était continue mais qui présente en fait des discontinuités. Ces dernières sont peut-être dues à des failles

colmatées mais pour s'en assurer, il serait nécessaire de mener une campagne géophysique à ces endroits particuliers.

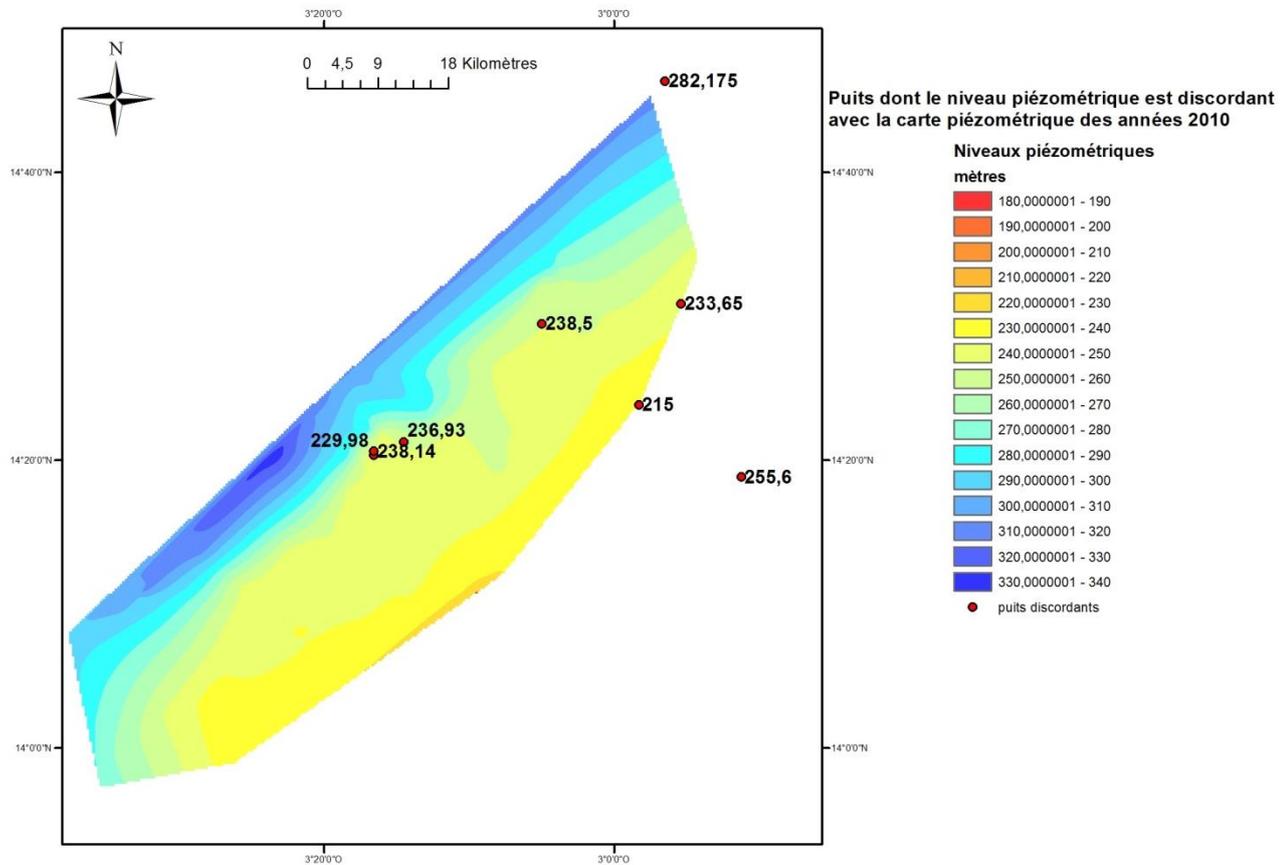


Figure 25 Carte des puits dont la piézométrie est discordante par rapport à la carte piézométrique des années 2010

IV.4.3. Carte des aquifères captés

Si dans l'ensemble de la plaine du Gondo, 56% des puits capte le Continental Terminal, dans la zone d'étude, la proportion est beaucoup plus importante : 82% des puits prospectés dans les années 1970 (82%) capte le Continental Terminal. Quant aux puits prospectés par l'ONG Via Sahel, 191 sur 203 (soit 94%), captent le Continental Terminal (voir Fig. 26).

On remarque sur la figure 26 que des puits captant l'Infracambrien peuvent côtoyer des puits captant le Continental Terminal, montrant ainsi qu'il y a des remontées locales du substratum du Continental Terminal qui est très irrégulier, comme nous l'avons déjà remarqué dans la partie IV.3. Substratum du Continental Terminal.

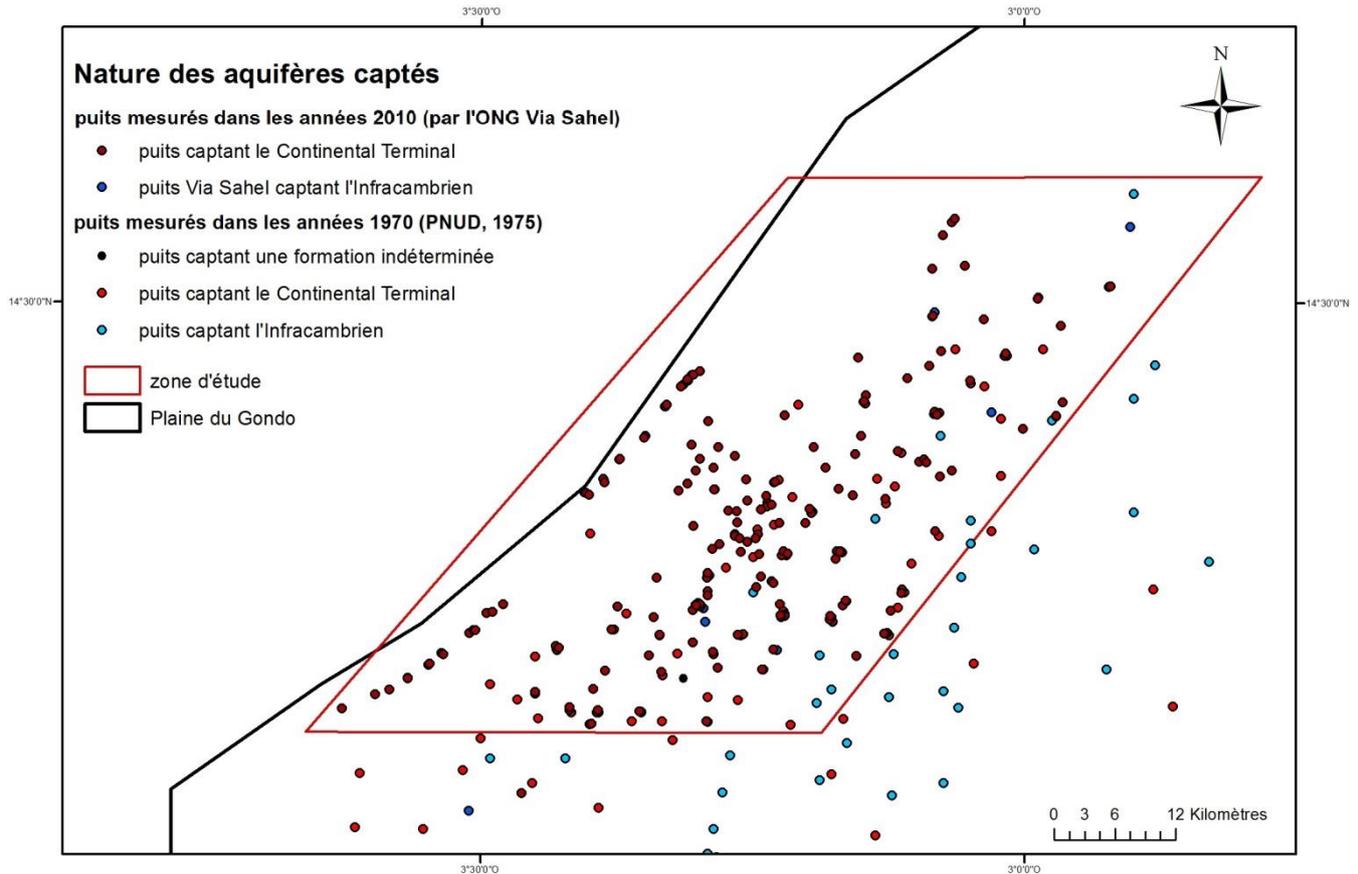


Figure 26 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone d'étude (d'après les données de l' ONG Via Sahel des années 2010 et d'après les données du PNUD des années 1970)

IV.4.4. Hauteur d'eau au fond des puits

Afin de mieux appréhender le potentiel des puits, nous avons réalisé une carte des hauteurs d'eau au fond des puits Via Sahel ainsi qu'un zoom pour illustrer les situations contrastées (dans un même village, un puits peut avoir une forte hauteur d'eau tandis qu'un autre peut être quasiment sec). La carte obtenue (voir Fig. 27) met effectivement en lumière la disparité de ces niveaux d'eau :

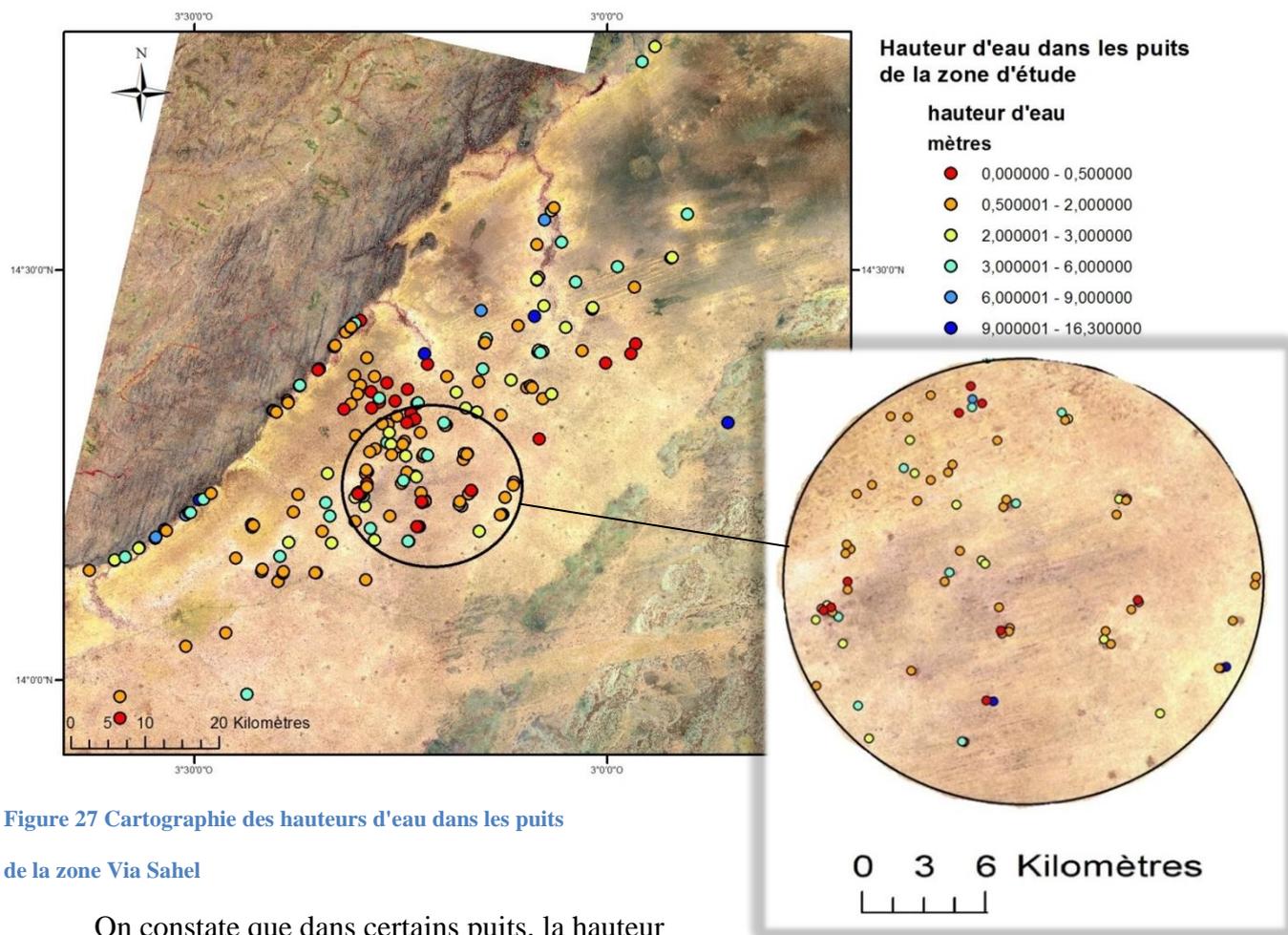


Figure 27 Cartographie des hauteurs d'eau dans les puits de la zone Via Sahel

On constate que dans certains puits, la hauteur d'eau dépasse 3m. Sauf exception (puits achevés l'année suivante), le creusement des puits Via Sahel se termine à la fin de la saison sèche. Lorsque l'eau commence à venir, du ciment est injecté dans les buses d'une hauteur de un mètre, pour terminer le coffrage et, en moyenne, on obtient 2m d'eau. Deux explications sont possibles :

- Les puits ont été creusés en saison sèche, alors que certaines mesures ont pu être faites en fin de saison des pluies, quand le niveau de la nappe était haut. Toutefois, dans la plaine du Gondo, les variations saisonnières du niveau de la nappe sont faibles d'après Koussoubé (2010), ce qui rend cette explication difficilement acceptable.
- La nappe profonde est localement captive. C'est d'ailleurs ce qui a été avancée par le PNUD (1975) et par Koussoubé (2010). Cette explication est donc recevable. Il est néanmoins assez surprenant de voir que dans le même village, il peut y avoir un puits quasiment sec (avec moins de 0,5m de hauteur d'eau) et un puits avec plus de 9mètres de hauteur d'eau.

IV.4.5. Volume de l'aquifère saturé du Continental Terminal

Disposant de la carte du substratum du Continental Terminal et de la piézométrie actuelle, il a été possible de calculer le volume de l'aquifère saturé du Continental Terminal (voir annexe 20).

Le calcul effectué par Surfer, révèle qu'il y a $28,6\text{km}^3$ d'aquifère saturé du Continental Terminal, sur une superficie totale de $2\,378\text{km}^2$ mais pour 578km^2 de cette superficie, le niveau piézométrique est en dessous du substratum du Continental Terminal, ce qui signifie qu'à ces endroits, soit sur 24% de la superficie totale, il y a des remontées de calcaires et que le Continental Terminal est sec. Nous avons calculé que, là où le Continental Terminal n'était pas sec, l'épaisseur d'aquifère saturé moyenne était de 15,9m.

Dans le cas du Continental Terminal, au Sud-Ouest du Niger, la porosité efficace avait été estimée, grâce à la RMP, à 13% (Favreau et al, 2009), en supposant pour notre cas, une gamme de porosité efficace de 5 à 15%, cela équivaut à un volume d'eau compris entre $1,43$ et $4,29\text{km}^3$ contenu dans le Continental Terminal, sur une superficie de $1\,800\text{km}^2$. Or, en s'appuyant sur les mêmes hypothèses que dans l'introduction, le besoin en eau annuel d'une zone de $2\,378\text{km}^2$, serait de $2\,117\,847\text{m}^3$. Ainsi le stock d'eau disponible dans le Continental Terminal, représente entre 675 et 2025 fois ce volume.

Cependant, comme nous l'avons vu dans la partie IV.3. Substratum du Continental Terminal, le niveau du substratum du Continental Terminal n'est pas certain. Si celui-ci était de 5m plus haut que ce qui a été proposé et que la porosité n'était que de 5%, il resterait malgré tout un stock d'eau de $0,981\text{km}^3$, soit environ 463 fois le besoin en eau annuel des habitants de la zone.

En outre, l'Infracambrien sous-jacent est également aquifère mais avec de plus fortes hétérogénéités car l'eau circule principalement dans les failles et les conduits karstiques.

Ces résultats attestent de l'importance du volume d'eau contenu dans la plaine du Gondo, importance déjà mentionnée par Palausi (1959) et permettent d'affirmer que la couverture des besoins en eau des populations ne sera pas limitée par un problème de ressource en eau. L'enjeu dans la plaine du Gondo se situe donc dans la mobilisation de ces ressources.

IV.4.6. Potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara

Nous avons vu que Defossez avait estimé à 30mm la recharge annuelle du plateau provenant du ruissellement de l'eau de pluie tombée sur le plateau de Bandiagara. Pour notre part, nous avons mesuré une superficie du plateau de 1 070km², dont les eaux ruisselleraient jusque dans la plaine (donc bien plus proche du résultat du PNUD 1975). En considérant une pluviométrie moyenne annuelle de 520mm, qui correspond à la pluviométrie moyenne annuelle de Sangha entre 2001 et 2013, et en gardant un taux d'évaporation à 50%, on obtiendrait alors une recharge annuelle de la nappe de 9,3mm (voir annexe 7), ce qui est bien plus faible que l'estimation avancée par Defossez.

IV.5. EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE DES ANNEES 1950 AUX ANNEES 2010

Le travail bibliographique nous a permis de récupérer un grand nombre de données sur les niveaux statiques de différentes époques (années 1950, années 1970 et années 2010), ce qui nous a nécessairement conduits à tenter d'analyser l'évolution de la piézométrie.

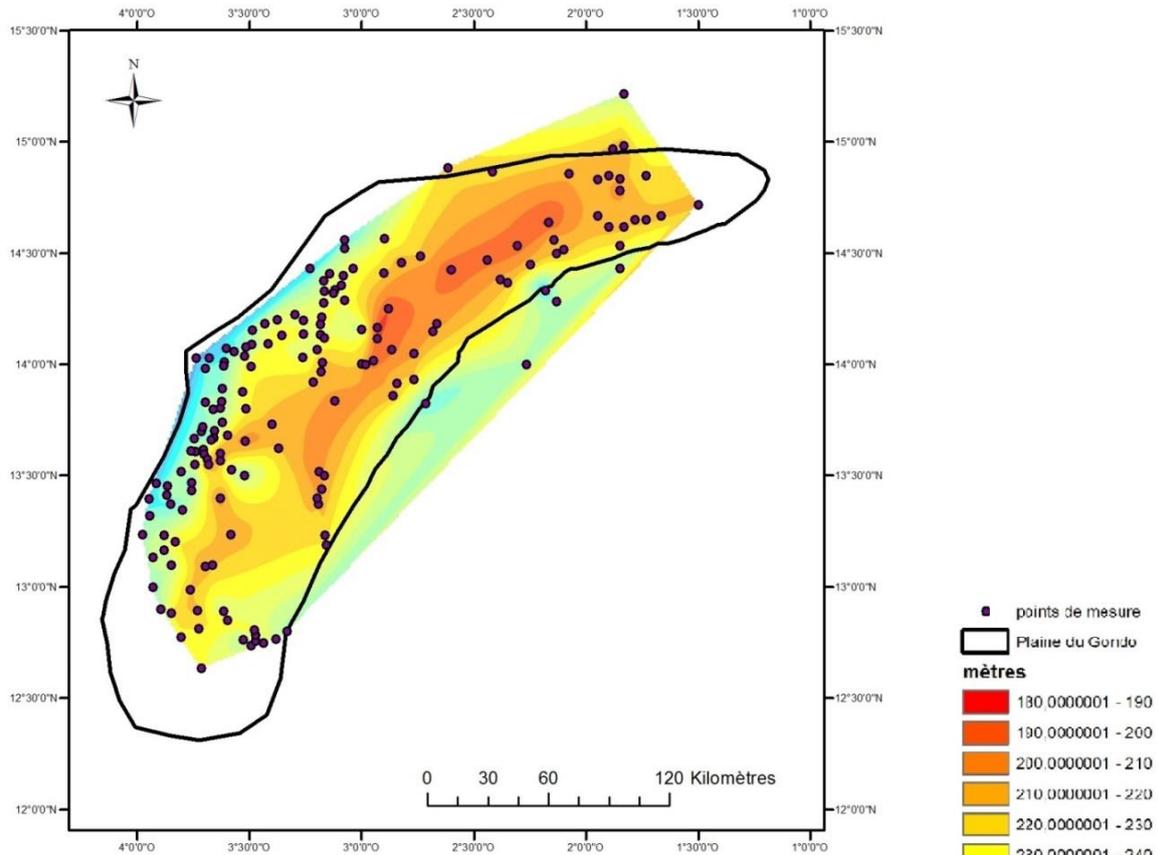
Nos échelles de travail ont varié entre la zone d'étude Via sahel, qui était notre région de travail initiale et qui est toujours notre zone de travail préférentielle, et la plaine du Gondo, qui est l'entité hydrogéologique globale dans laquelle est comprise notre zone d'étude, et qui a été plus largement étudiée dans le passé.

IV.5.1. A l'échelle de la plaine du Gondo

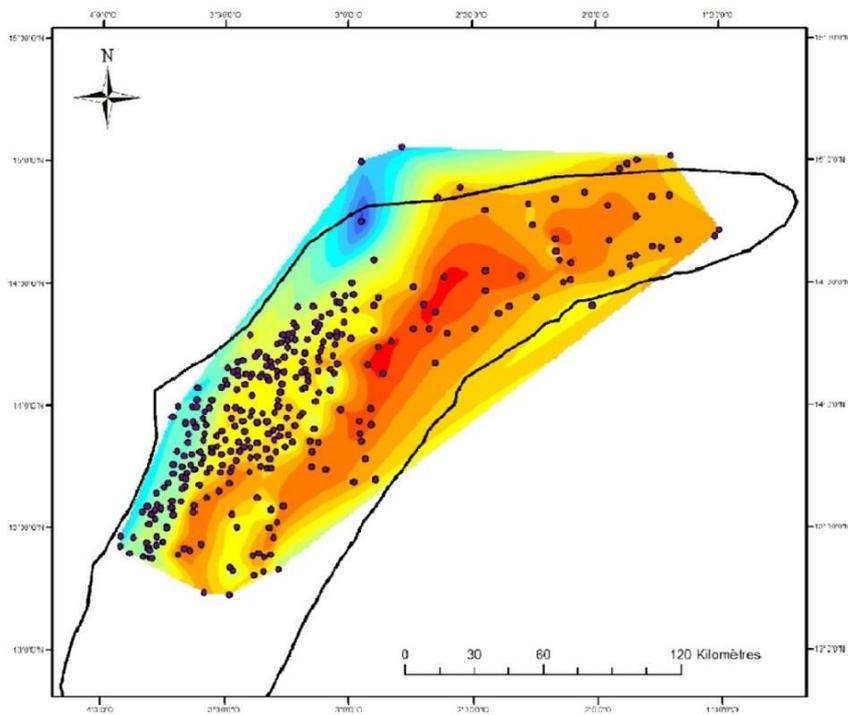
La carte piézométrique des années 1950 a été tracée à partir des données de puits d'Archambault (1951) et de Defossez (1955-1957). Son allure (voir Fig. 28) est comparable à celle de la carte topographique : elle présente des côtes plus élevées sur les bordures (environ 265m à l'est et 305m à l'Ouest) qu'en son centre, où la dépression atteint 185m à Am (ou Hamon selon les appellations ; 14°10'10''N ; 2°55'30''W). En bordure de falaise, les courbes isopièzes sont assez resserrées et l'on passe de la côte 300m à la côte 240m en 16km, ce qui correspond à un gradient hydraulique de 3,5/1000, alors que plus vers le centre, le gradient hydraulique est d'environ 1/1000. Cela signifie que l'écoulement souterrain est plus difficile près de la falaise. On remarque que l'isopièze 200m est totalement fermée : il s'agit là d'une

nappe fermée, sans exutoire, ce qui nous ramène à la question de la cause de la dépression : où va l'eau ?

La carte piézométrique des années 1970 a été tracée à partir des données du PNUD (1975). On retrouve là encore une dépression qui suit la topographie (voir Fig. 28), avec des niveaux plus élevés en bordures de plaine, notamment le long de la falaise où la piézométrie atteint 337m. On observe aussi, de la falaise vers la plaine un fort gradient hydraulique de 10,4/1000. Puis ce gradient hydraulique s'atténue jusqu'à environ 1/1000. Le centre de la dépression, à 187m, se situe approximativement au même endroit que dans les années 1950 : il part de Am et remonte légèrement.



Carte piézométrique de la plaine du Gondo (d'après Archambault 51 et Defossez 55-57)



Carte piézométrique de la plaine du Gondo (d'après PNUD 1970-72)

Figure 28 Evolution de la piézométrie de la plaine du Gondo entre les années 1950 et les années 1970

Ces deux cartes n'ont pas la même extension latérale, ni la même densité de mesures partout. On voit par exemple, que la carte piézométrie des années 1950 ne couvre pas le pied de la falaise. C'est pour cela que la piézométrie est plus haute au Nord-Ouest, sur la carte des années 1970 que sur la carte des années 1950. De même, on trouve un gradient hydraulique plus élevé dans les années 1970.

Nous allons tout de même tenter la comparaison.

On peut tout d'abord regarder l'évolution piézométrique de 71 localités pour lesquelles nous avons des mesures et dans les années 1950 et dans les années 1970 (voir annexes 21, 22 et 23). On constate que sur ces 71 mesures, 34 indiquent une baisse piézométrique, 2 une stabilité et 35 une hausse, en conséquence de quoi il est difficile de dégager une tendance. Toutefois, les baisses enregistrées ont été d'intensité plus forte et on obtient ainsi une moyenne de ces valeurs égale à -0,79m.

Nous avons aussi cherché à évaluer la différence de volume d'aquifère saturée entre ces deux dates. Pour ce faire, il nous a fallu choisir une zone sur laquelle la densité de points de chaque piézométrie était comparable. A défaut de mieux, nous avons ainsi choisi une zone de 11 529km² (voir annexe 22), avec 265 points de la piézométrie des années 1970 et 107 points de la piézométrie des années 1950. Le calcul de différence de volume sur cette zone (voir annexe 23) met en valeur une diminution de 9,97km³ d'aquifère saturée, ce qui équivaut à une baisse piézométrique de 0,86m en 20 ans, ou encore de 4cm/an.

Cette évolution est contraire à la constatation faite par Defossez (1955-1957) qui faisait état d'une hausse de la nappe de 2m en moyenne, depuis 5ans. Toutefois l'échantillon utilisé pour la comparaison était de seulement 15 points, ce qui limite la portée de sa conclusion.

IV.5.2. A l'échelle de la zone d'étude

Grâce aux données que nous avons récupérées et traitées, il est aussi possible de voir comment a évolué le niveau piézométrique dans la zone Via Sahel, depuis les années 1950 à aujourd'hui. La zone Via Sahel se trouve au bord de la falaise, au Nord-Ouest de la plaine du Gondo. La piézométrie observée (voir Fig. 29) met en relief un écoulement de la falaise, où la piézométrie est haute (en moyenne, 310m), vers le centre de la plaine, où la piézométrie est basse (220m).

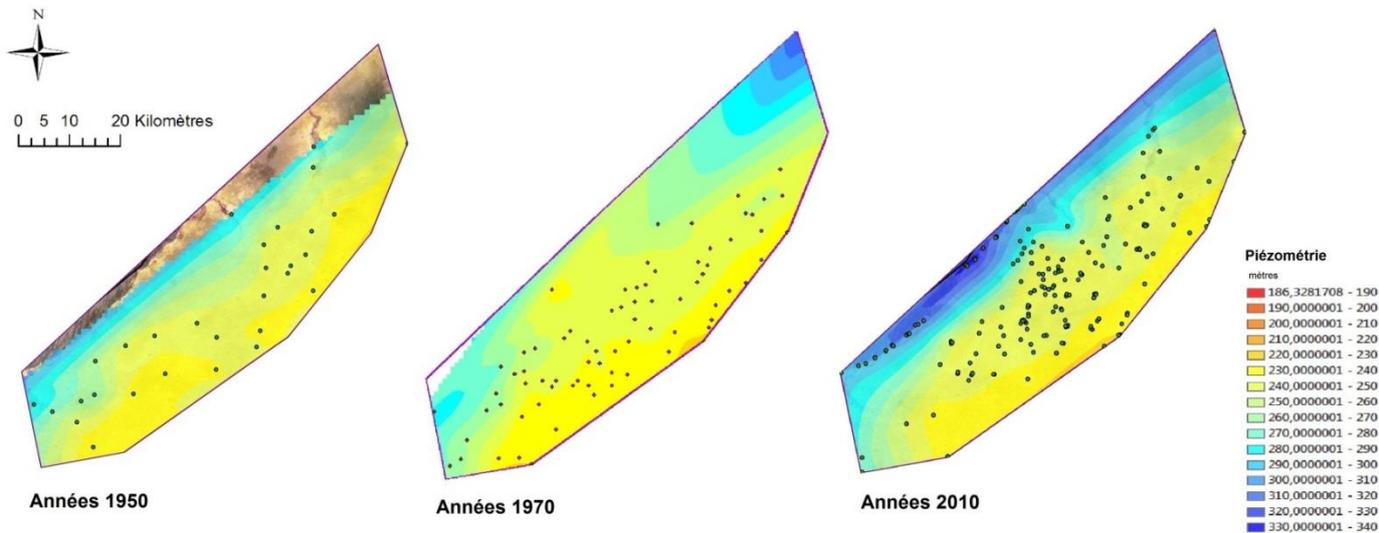


Figure 29 Comparaison de la piézométrie de la zone Via Sahel, entre les années 1950 (d'après Archambault 1951 et Defossez 1955-1957), les années 1970 (d'après le PNUD 1975) et les années 2010

On constate que la densité de points utilisés dans cette zone varie en fonction des années. La carte des années 1950, avec 30 points sur 2 829km², semble donc difficile à comparer avec les deux autres. La densité de points de la carte des années 70, avec 74 points sur 2 829km² est certes plus faible que celle des années 2009-2014 avec 199 points sur 2 829km² mais pour cette dernière, un certain nombre de mesures ont été effectuées dans les différents puits d'un même village. On remarque que vers le centre de la zone, les densités de points sont plus similaires et il paraît alors raisonnable de comparer l'évolution du niveau de la nappe à cet endroit.

A cet endroit, et à première vue, on ne remarque pas de changement important. Cela laisse penser que la nappe est dans son état d'équilibre et que les facteurs climatiques et anthropiques n'ont pas eu d'effet sur celle-ci. Toutefois, nos intervalles de niveaux piézométriques sont de 10m et nous devons regarder ce qu'il s'est passé à une échelle plus fine.

Les variations de la nappe sont assez hétérogènes et il n'apparaît pas de zones localisées pour lesquelles on puisse dire que l'évolution soit plus marquée dans un sens ou dans un autre mais globalement une tendance à la hausse semble se dégager (voir Fig. 31 et 32).

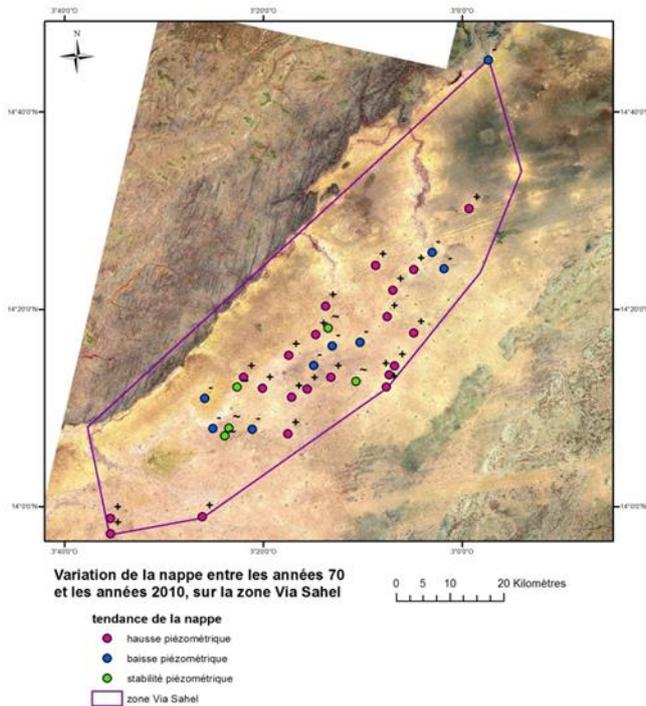


Figure 31 Variation des niveaux d'eau dans les puits entre les années 1970 et les années 2010

En effet, 20 puits, parmi les 35 de l'échantillon, accusent une hausse de la nappe, tandis que 9 indiquent une baisse. En moyenne, la hausse serait de 3,5m.

Le calcul de différence de volume d'eau entre la nappe des années 1970 et celle des années 2010, a été effectué avec Surfer, sur la zone centrale pour laquelle on compte 58 points de mesure des années 1970 et 131 des années 2010, pour une superficie de 878km² (voir annexes 24 et 25). Ce calcul met en lumière une augmentation de 0,56km³, sur 791km², ce qui représente une hausse moyenne du niveau de la nappe d'environ

71cm (bien plus faible que la moyenne de 3,5m trouvée précédemment), soit 1,8cm par an depuis les années 1970.

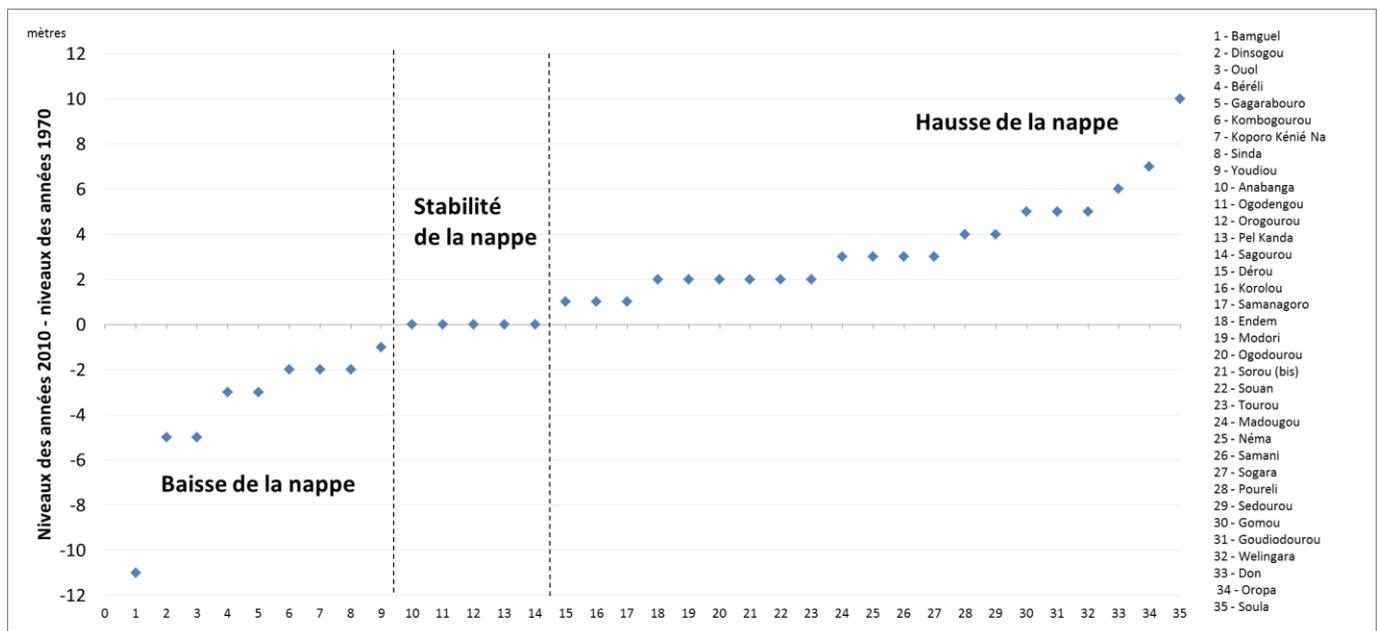


Figure 32 Ecart piézométrique classés (années 2010 - années 1970) sur la zone Via Sahel

Nous n'avons pas de raison de penser que cette variation de la nappe n'a eu lieu que sur la zone d'étude et nous pouvons donc a priori dire que toute la plaine du Gondo est concernée. Afin de s'en assurer, des mesures nouvelles complémentaires réalisées dans toute la plaine, devraient être entreprises.

Cette hausse piézométrique, qui va dans le sens contraire des variations pluviométriques qui ont eu lieu dans les années 70-90, reste à expliquer. A l'heure actuelle, nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour pouvoir avancer une hypothèse mais il est possible que le phénomène découvert au Sud-Ouest du Niger (Favreau et al., 2009), et qui s'est visiblement produit ailleurs au Sahel en réponse au déboisement à diverses périodes au cours du 20^{ème} siècle (Favreau et al, 2012), à savoir que le changement de mise en culture des sols a favorisé le ruissellement et que l'eau s'accumule alors dans des mares qui rechargent la nappe, soit à l'origine du phénomène.

IV.5.3. Discussions

A travers les différentes analyses effectuées, il apparaît que la nappe du Gondo aurait subi une baisse piézométrique entre les années 1950 et les années 1970, d'environ 86cm. Mais depuis les années 1970, le phénomène inverse semble être observé : la nappe est remontée de 71cm en 40ans.

Ces observations mériteraient d'être confirmées par des études complémentaires. De plus, il n'est pas sûr, si changement de variation il y a bien eu, que ce dernier ait eu lieu précisément dans les années 1970. Pour pouvoir l'affirmer, il aurait fallu posséder une série régulière de relevés piézométriques dans la plaine du Gondo, ce qui n'a pas été le cas.

IV.6. MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

IV.6.1. Objectifs

La réalisation d'une modélisation des écoulements souterrains vise non seulement à estimer la recharge et les paramètres hydrodynamiques mais aussi à vérifier la cohérence entre

les hypothèses de départ et la réalité physique. Une fois le modèle réalisé, ce dernier peut également devenir un outil de prévision, en lui appliquant différents scénarii (Dassargues, 1995). Dans notre cas, la modélisation ne servira pas d'instrument de prévision mais permettra d'intégrer l'ensemble des données disponibles et de comprendre le fonctionnement du système aquifère.

IV.6.2. Modèle conceptuel

Hypothèses

Le système aquifère de la zone Via Sahel, sera assimilé à une nappe d'eau souterraine unique, hébergée au sein d'un aquifère bicouche : l'Infracambrien à la base, et le Continental Terminal en surface. Nous ne prendrons pas ici en compte les fluctuations saisonnières en raison d'un manque d'information à ce sujet et nous supposerons que la nappe est dans un état d'équilibre, en conséquence de quoi, la modélisation sera réalisée en régime permanent.

Par ailleurs, bien que la présence de fractures soit attestée dans la zone, nous avons choisi de ne pas les modéliser et d'utiliser plutôt des perméabilités globales qui les prendront implicitement en compte. Ce choix s'explique par l'impossibilité d'effectuer une mission de terrain qui nous permettrait de localiser précisément des failles.

Enfin, en raison de l'échelle locale de la zone à modéliser, nous avons choisi de négliger la dynamique des écoulements souterrains du Sud-Ouest vers le Nord-Est, pourtant avancés par certains auteurs (Defosse, 1955-1957 ; Koussoubé, 2010). Ce choix se justifie par la carte piézométrique obtenue précédemment sur laquelle on ne distingue pas d'écoulement dans cette direction.

Extension du modèle

Le domaine modélisé part du pied de la falaise de Bandiagara, à l'Ouest, et s'étend dans la plaine du Gondo, vers l'est. Il est arbitrairement limité au Nord et au Sud, afin de couvrir le maximum de puits d'observations. La frontière à l'Est a été choisie la plus éloignée possible de la zone Via Sahel afin que la condition limite imposée, qui n'a pas été validée sur le terrain, n'influence pas trop la piézométrie dans la zone Via sahel, tout en veillant à ne pas

dépasser non plus le centre de la dépression, qui aurait été compliqué à modéliser. Le modèle ne présente donc qu'une seule frontière naturelle et couvre une superficie voisine de 4 100km².

Structure du modèle

Nous avons choisi, pour la modélisation de notre zone d'étude de représenter un système bi-couche (voir Fig. 33): la première couche jouant le rôle des dépôts du Continental Terminal et la deuxième jouant principalement le rôle des calcaires de l'Infracambrien mais pouvant également, à certains endroits symboliser d'autres formations : la série de Koro ou les schistes de Toun.

Le toit de la première couche correspond à la topographie et nous avons utilisé le MNE Référence 3D pour la représenter. Le niveau du mur de la deuxième couche n'étant pas connu, puisqu'aucun forage ne l'a jamais entièrement traversée, nous l'avons arbitrairement fixée à 0m. Enfin, reste la profondeur de l'interface entre les deux couches : le toit calcaire. Pour le tracer, nous nous sommes appuyés sur la carte du substratum du Continental Terminal préalablement élaborée (voir Fig. 16) .

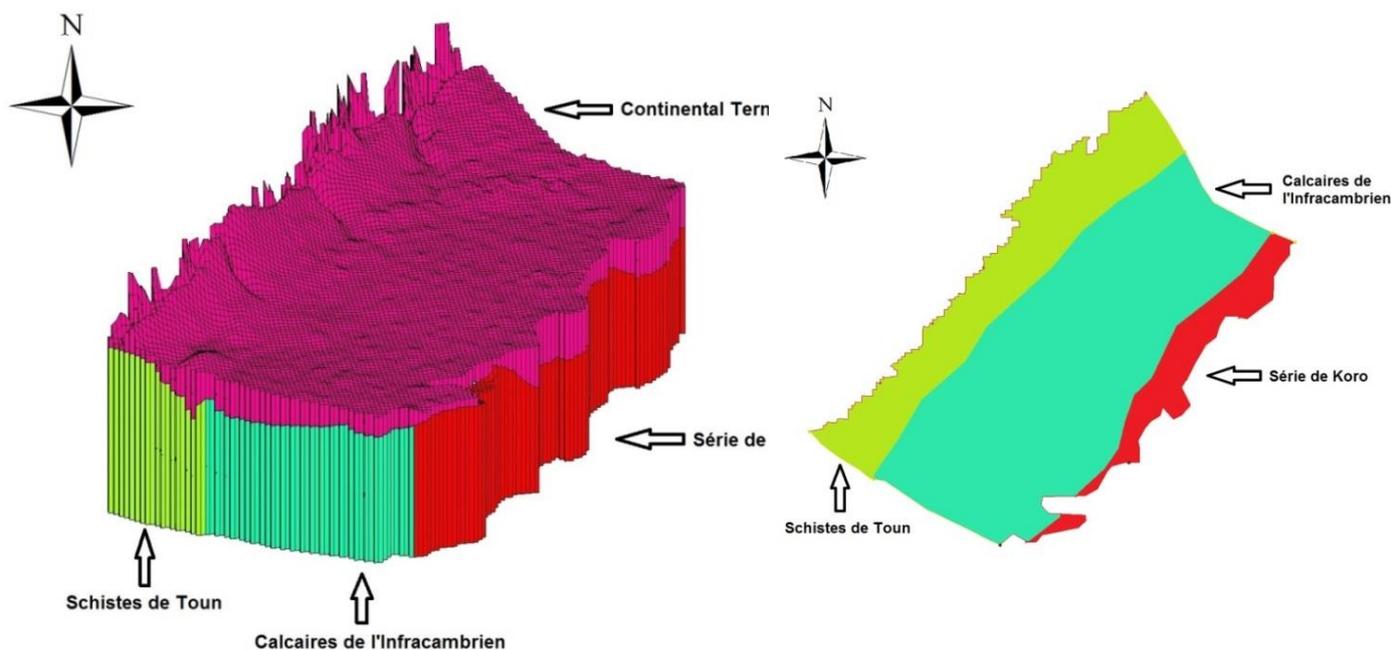


Figure 33 Modèle géologique

Conditions aux limites

Une partie de l'eau qui tombe sur le plateau de Bandiagara, ruisselle le long de la falaise et vient alimenter la nappe de la plaine. A certains endroits, ce ruissellement a lieu même en saison sèche. Nous avons donc choisi de mettre une limite à potentiel imposé (condition de Dirichlet) le long de la falaise pour traduire ce phénomène (voir Fig. 34).

Les autres conditions limites ont été plus délicates à poser car il ne s'agissait plus de frontières naturelles. A l'Est, nous avons choisi de mettre un potentiel constant (210m) car le tracé de cette frontière a été fait en suivant l'isopièze 210m de la carte piézométrique réalisée par Koussoubé (2010). Au Nord et au Sud, en nous appuyant sur l'hypothèse qu'il n'y a pas d'écoulement dans ces directions, nous avons choisi de mettre des limites à flux nul (condition de Neumann) en suivant des lignes de courant, d'après la carte piézométrique 2009-2014 que nous avons préalablement réalisée.

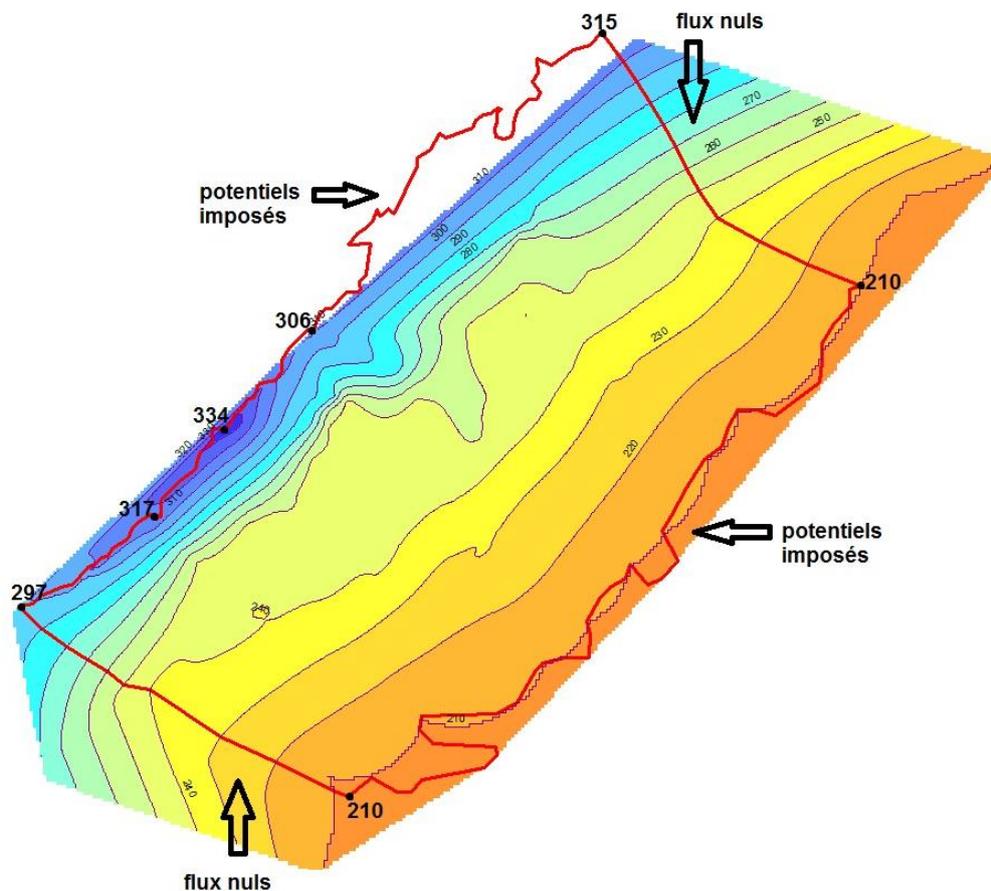


Figure 34 Conditions aux limites du modèle sur fond de carte piézométrique des années 2010

Paramétrage hydrodynamique

Le réseau hydrographique de la zone étant très peu développé, il n'y a ni rivière ni drain à paramétrer. En outre, les prélèvements d'eau souterraine ne sont pas suffisamment conséquents pour devoir être pris en compte dans le modèle. Les paramètres hydrodynamiques restant à fixer sont donc les conductivités hydrauliques de chaque formation et la recharge. Nous avons choisi les conductivités hydrauliques horizontales suivantes :

- Continental Terminal : $3 \cdot 10^{-5} m/s$ (PNUD, 1975)
- Calcaires dolomitiques et karstiques : $10^{-3} m/s$
- Série de Koro : $10^{-5} m/s$
- Schistes de Toun : $10^{-5} m/s$

La conductivité hydraulique utilisée pour le Continental Terminal est celle donnée par le PNUD (1975). Notons que cette valeur est en accord avec celles trouvée pour le Continental Terminal, dans le Soud-Ouest du Niger, qui varient entre $1 \cdot 10^{-5}$ et $3 \cdot 10^{-4} m/s$, d'après des estimations croisées d'essais de pompage et de données géophysiques en résonance magnétique des protons (Boucher et al, 2012).

La conductivité hydraulique des calcaires dolomitiques et karstiques peut surprendre par sa forte valeur. Il s'agit en fait de donner une valeur globale à une formation qui n'est pas très perméable mais qui est largement fissurée de telle sorte que la perméabilité en gros est finalement assez élevée.

Pour la recharge, nous avons négligé l'impact de la pluie, en raison de la forte évapotranspiration de la zone (Martin-Rosales et al, 2003). Quant à la recharge provenant du ruissellement de l'eau de pluie sur la falaise et de l'infiltration de l'eau dans les paléo-vallées, elle est implicitement modélisée par les potentiels qui ont été imposés au pied de la falaise.

IV.6.3. Modèle numérique

Le maillage en différences finies que nous avons choisi, est constitué de deux couches de cellules rectangulaires de taille régulière : 150 cellules en X sur 107km et 150 cellules en Y sur environ 100m ; une cellule représente donc un rectangle de $0,476\text{km}^2$. La première couche a une épaisseur qui varie entre 0 et 130m tandis que la deuxième couche a une épaisseur de plusieurs centaines de mètres (le mur de la couche 2 est pris à 0m).

Le modèle a été paramétré pour fonctionner en régime permanent.

Les charges initiales entrées correspondent à l'interpolation des points limites imposés. Cela permet d'obtenir une charge initiale se rapprochant déjà de la piézométrie souhaitée.

Nous avons choisi d'utiliser le « LPF package » qui permet à l'utilisateur de définir les conductivités hydrauliques horizontale et verticale pour chaque cellule. Modflow calcule ensuite la charge pour chaque cellule en prenant en compte la géométrie de chaque couche

IV.6.4. Calage

Une fois le modèle numérique réalisé, la dernière étape consiste à caler le modèle. Pour ce faire, on a utilisé les 105 points d'observations Via Sahel pour lesquels on avait observé la charge et on les a comparés aux charges qui ont été simulées dans les cellules correspondantes.

Nous avons fixé un degré de tolérance de 2m, ce qui veut dire que la piézométrie est considérée comme acceptable tant que la différence entre la charge observée et la charge simulée ne dépasse pas 2m (qui correspond probablement au cumul des erreurs sur la piézométrie). Au-delà de cette limite, et jusqu'à 4m, la cible est moyennement calée. Enfin, quand la différence est plus grande que 4m, on considèrera que le puits est mal calé.

Pour ajuster notre modèle nous avons joué exclusivement sur les conductivités hydrauliques de la couche 2, couche pour laquelle nous n'avons aucune information préalable. Nous avons ainsi différencié 13 zones homogènes, en nous appuyant sur les orientations privilégiées des discontinuités (voir IV.1. Carte linéamentaire), à savoir la direction de la falaise et sa direction perpendiculaire. Puis nous leur avons attribué à chacune une certaine valeur de conductivité hydraulique (voir Fig. 35). On remarque que la limite entre la série de Koro et les calcaires de l'Infracambrien n'est plus visible car ces formations présentent les mêmes conductivités hydrauliques.

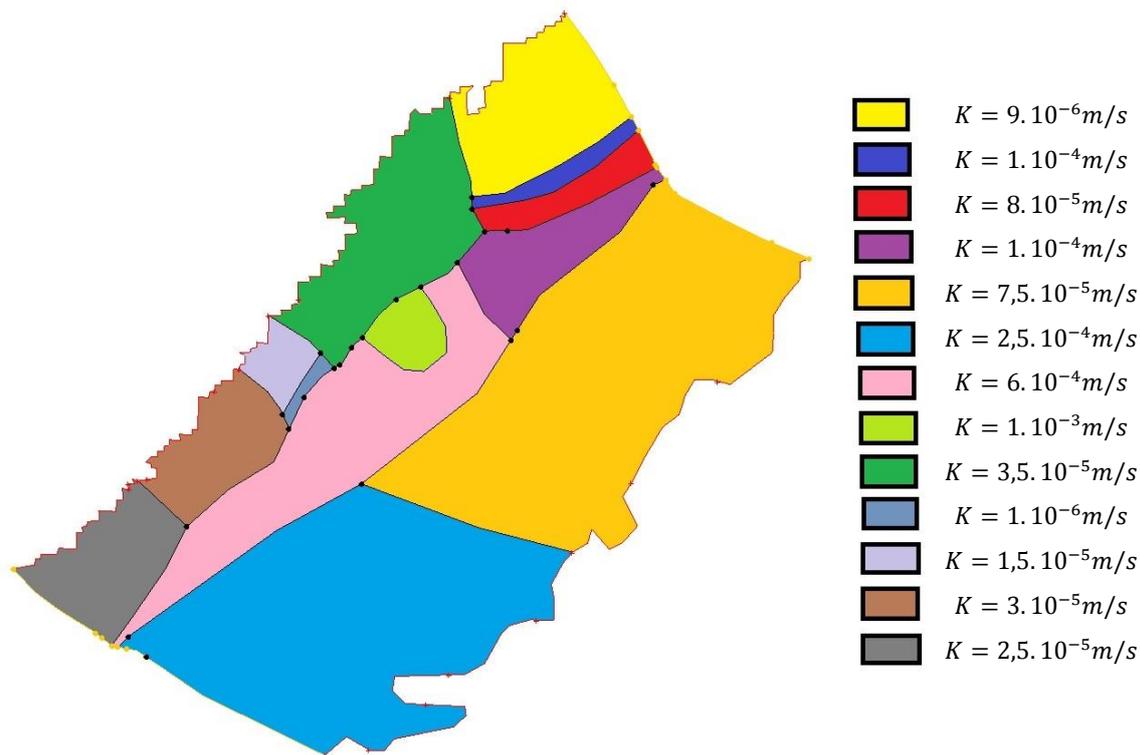


Figure 35 Calage du modèle en fonction des conductivités hydrauliques de la couche 2

La comparaison entre les valeurs piézométriques simulées par le modèle (après calibration) et les valeurs mesurées sur le terrain aux différents puits d'observations, est reprise sur le graphe ci-dessous (voir Fig. 36). On constate que la majeure partie des charges se situe entre 240 et 250m, ce qui crée un nuage de points relativement compact autour de la droite à 45 degrés, illustrant la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs observées. En revanche, certains points, à plus haute piézométrie, notamment autour de 290m sont assez écartés de la droite à 45 degrés, ce qui signifie que ces points n'ont pas réussi à être calés. Cela peut s'expliquer par la présence de failles que nous avons prise en compte globalement mais qui ont des conséquences très locales sur la piézométrie. Il faut noter par ailleurs qu'à certains endroits, près de la falaise, le gradient hydraulique est très fort, donc les isopièzes sont très resserrées, ce qui rend le calage plus délicat.

Finalement, on obtient pour ce calage, 59 puits bien calés, 25 puits moyennement calés et 21 puits mal calés. Eu égard à la simplicité du modèle, nous pouvons considérer ce calage comme acceptable.

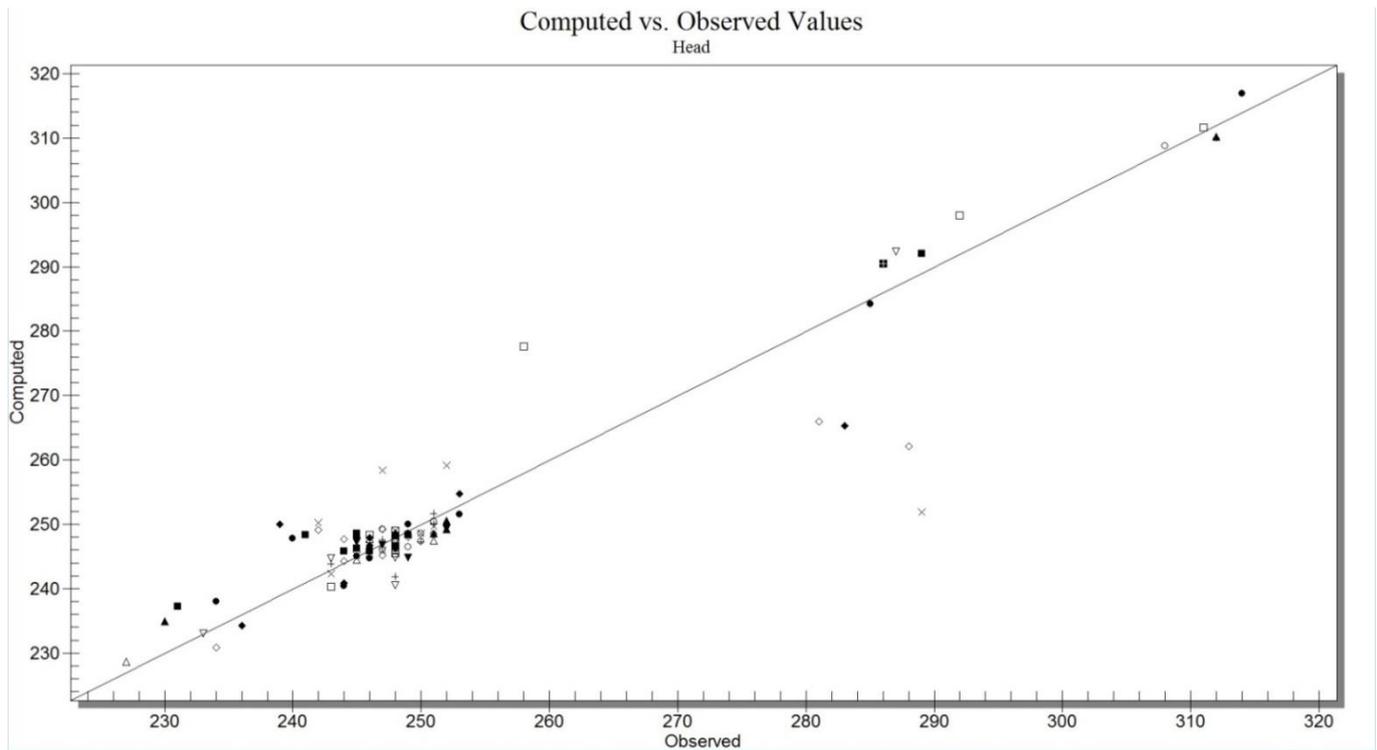


Figure 36 Corrélation entre les piézométries simulée et observée

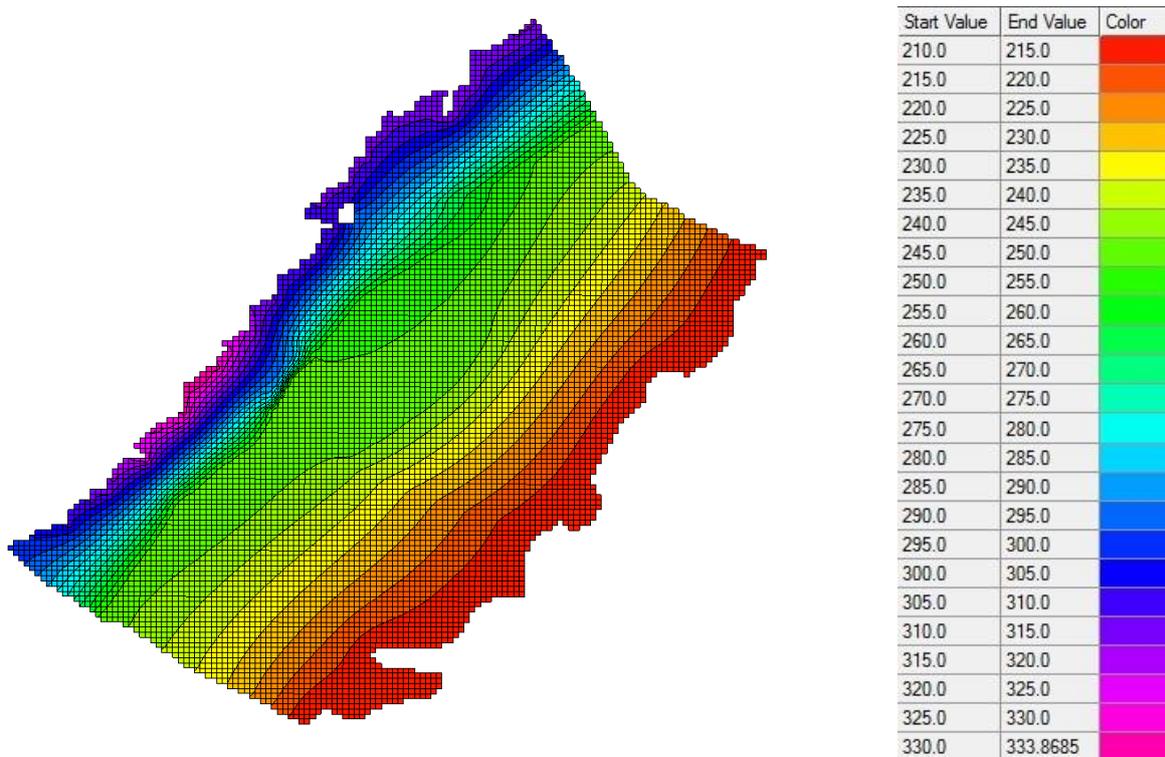


Figure 37 Piézométrie simulée

Nous avons également cherché à caler notre modèle de manière automatique avec l'option « parameter estimation » de Modflow. Pour ce faire, nous avons rentré les paramètres que nous voulions faire varier pour caler notre modèle, en l'occurrence les conductivités hydrauliques de la couche 2. Le résultat obtenu illustre la limite du calage automatique puisque celui-ci est moins bon que ce que nous avons obtenu manuellement. En effet, seuls 53 puits sont bien calés, 25 le sont moyennement et 27 ne le sont pas du tout. En outre, le flux entrant d'eau correspond à $11,85\text{m}^3/\text{s}$, ce qui n'est pas possible dans la réalité compte tenu de la pluviométrie (voir paragraphe suivant).

IV.6.5. Calcul du taux d'évaporation

Les potentiels imposés au pied de la falaise sont l'expression d'un flux d'eau entrant. D'après notre modèle, il correspond à $4,1\text{m}^3/\text{s}$, soit environ $0,13\text{km}^3/\text{an}$.

Or, nous avons estimé à près de 725km^2 , la superficie du plateau dont l'eau de pluie ruisselle jusqu'au pied de la falaise. Ainsi, avec une pluviométrie moyenne annuelle de $520\text{mm}/\text{an}$, on obtient un volume de $0,377\text{km}^3/\text{an}$ qui pourrait potentiellement s'infiltrer.

On voit donc que seul 34,3% de l'eau tombée sur le plateau, s'infiltrer au pied de la falaise, ce qui suppose un taux d'évaporation de 65,7%. Ce taux est plus élevé que celui envisagé par Defossez (1955-1957) qui était de 50% (voir II.3.4. Potentiel de recharge de la nappe). Palausi (1959), quant à lui, évaluait à 40% la part d'eau tombée sur le plateau qui venait alimenter la nappe. La valeur obtenue aujourd'hui est donc un peu plus faible que celles de Defossez et Palausi mais du même ordre de grandeur. La différence constatée est peut-être due à la sécheresse qui a eu lieu dans les décennies 1970 et 1980.

IV.6.6. Tests de sensibilités

Sensibilité par rapport au toit calcaire

La profondeur du Continental Terminal est une donnée mal connue, comme nous avons pu le voir précédemment. C'est une information essentielle pour les puisatiers qui n'ont pas les moyens techniques et financiers de creuser dans le calcaire et qui creusent donc des puits dans l'aquifère du Continental Terminal. Ainsi il est intéressant de voir quel rôle cette profondeur joue sur le niveau piézométrique. Pour ce faire, nous avons fait varier de $\pm 5\text{m}$ le

niveau du toit calcaire initial.

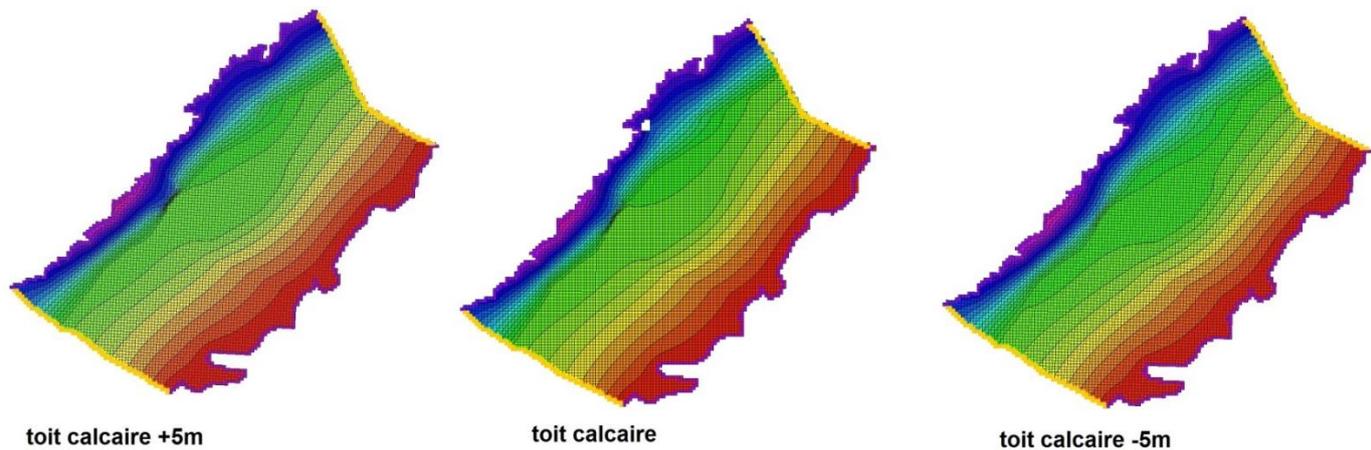


Figure 38 Sensibilité de la piézométrie par rapport au niveau du toit calcaire

La comparaison des trois piézométries obtenues (voir Fig. 38) met en lumière quelques variations au niveau de la zone centrale, entre 245m et 255m mais la piézométrie des bordures semblent à peu près semblable.

Sur les corrélations entre les piézométries simulées et observées (voir Fig. 39) et le tableau ci-dessous, on remarque que la baisse du toit calcaire a eu pour effet d'augmenter d'environ 3,6m, les niveaux piézométriques simulés des puits dont la charge est comprise entre 239 et 260m, d'augmenter également de 2,2m les niveaux piézométriques simulés des puits dont la charge est inférieure à 239m mais de baisser légèrement (de 0,4m) ceux des puits dont la charge est supérieure à 280m.

A l'inverse, une hausse du toit calcaire entraîne une légère baisse (0,2m) des niveaux piézométriques simulés des puits dont la charge est inférieure à 239m, ainsi qu'une légère baisse (0,4m) de ceux des puits dont la charge est comprise entre 239 et 260m, mais résulte en une légère hausse (0,1m) de ceux des puits dont la charge est supérieure à 280m.

Tableau 4 Sensibilité du niveau du toit calcaire

| statistiques pour les charges < 239m | | | | |
|---|--------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| | | toit calcaire initial | toit calcaire +5m | toit calcaire -5m |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle (toit calcaire ±5m) et celle du modèle initial | | | -0,229371429 | 2,224371429 |
| cibles | vert | 3 | 2 | 2 |
| | orange | 2 | 3 | 2 |
| | rouge | 2 | 2 | 3 |
| statistiques pour les charges comprises entre 239m et 260m | | | | |
| | | toit calcaire initial | toit calcaire +5m | toit calcaire -5m |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle (toit calcaire ±5m) et celle du modèle initial | | | -0,443260714 | 3,607445238 |
| cibles | vert | 51 | 47 | 19 |
| | orange | 22 | 24 | 34 |
| | rouge | 11 | 13 | 31 |
| statistiques pour les charges > 280m | | | | |
| | | toit calcaire initial | toit calcaire +5m | toit calcaire -5m |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle (toit calcaire ±5m) et celle du modèle initial | | | 0,125685714 | -0,35245 |
| cibles | vert | 5 | 4 | 6 |
| | orange | 1 | 2 | 2 |
| | rouge | 8 | 8 | 6 |

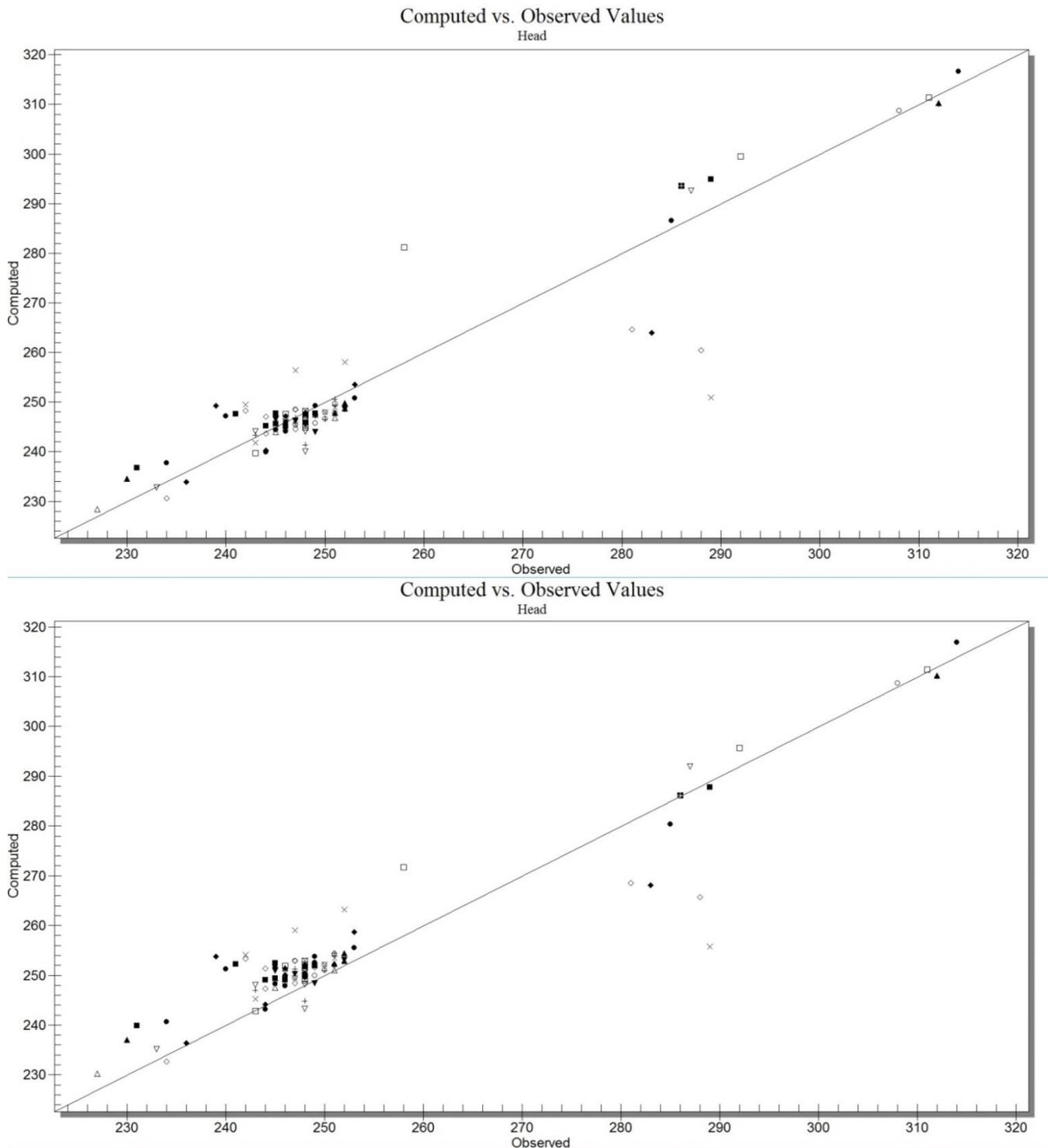


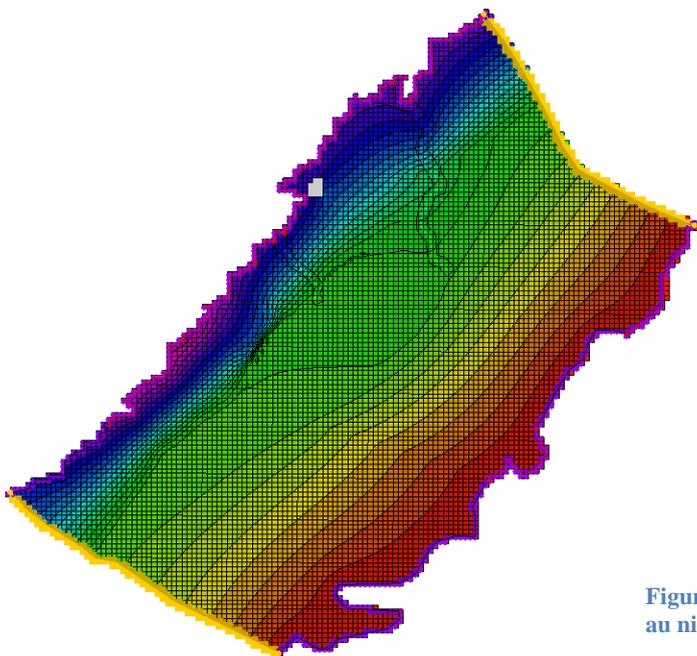
Figure 39 Corrélations entre les piézométries simulée et observée (haut : toit calcaire +5m; bas : toit calcaire -5m)

La baisse du toit calcaire semble avoir un impact sur la piézométrie simulée plus important que sa hausse mais globalement, le niveau du toit calcaire fait assez peu varier la piézométrie (de 3,6m au maximum).

Sensibilité par rapport à la présence de paléo-vallées

Sur la carte piézométrique des années 2010 (voir Fig. 24), nous pouvons voir deux incurvations, l'une assez notable qui se superpose approximativement à la paléo-vallée de Bombou, et l'autre plus discrète au niveau de la vallée de Diankabou. Etant donné le faible nombre de points de mesure dans ces régions, nous ne pouvons leur accorder qu'un crédit modéré et c'est pour cette raison que nous avons choisi de ne pas en tenir compte dans le premier temps de la modélisation. Toutefois, il n'est pas inintéressant de chercher à modéliser ces paléo-vallées et de voir leur effet sur la piézométrie. C'est ce que nous nous proposons de faire maintenant.

Pour modéliser les paléo-vallées, nous avons choisi d'utiliser des zones de recharge (voir Fig. 40). En effet, ces paléo-vallées ne pouvaient pas être modélisées par des rivières puisque l'eau n'y coule que par intermittence, et nous ne pouvions pas non plus utiliser des drains puisque ces entités permettent de drainer l'eau quand le niveau de la nappe est plus haut que l'altitude du drain mais ne permettent pas l'inverse, c'est-à-dire d'alimenter la nappe quand celle-ci est basse. Or, c'est ce comportement qui nous intéresse ici. Ainsi, l'option la plus pertinente qui restait fut de dessiner des zones de recharge coïncidant approximativement aux zones des paléo-vallées.



L'introduction de ces paléo-vallées a eu pour effet principal d'élargir la bande piézométrique comprise entre 250 et 255m, dans la zone centrale.

On compte alors 46 cibles bien calées, 25 moyennement calées et 34 mal calées.

Figure 40 Piézométrie simulée avec recharge au niveau des paléo-vallées

Sensibilité par rapport aux conductivités hydrauliques de la deuxième couche

Comme nous l'avons dit précédemment, les différentes tentatives de calage du modèle ont toutes consisté à jouer sur les conductivités hydrauliques de la deuxième couche. Lors de ces essais, il est apparu qu'il était possible d'obtenir des calages sensiblement semblables avec des valeurs de conductivités hydrauliques complètement différentes. C'est le problème des équivalences : plusieurs paramétrages peuvent aboutir à la même solution.

Cette ambiguïté a pu être en partie levée par le flux d'eau entrant dans le modèle, que nous savions ne pouvoir dépasser la valeur correspondante à la pluie totale tombée sur la partie du plateau contribuant au ruissellement dans la plaine, soit $0,377\text{km}^3/\text{an}$ d'après nos calculs précédents.

Ainsi, grâce à cette information, nous avons pu contraindre le modèle pour aboutir à une solution plus proche de la réalité.

Sensibilité par rapport à la conductivité hydraulique de la première couche

D'après Boucher et al. (2012), la conductivité hydraulique du Continental Terminal du Niger varie entre 1.10^{-5} et 3.10^{-4} m/s . Nous avons donc souhaité voir l'influence de ce paramètre, dans la gamme de valeurs proposée, sur la piézométrie simulée.

Nous avons utilisé les conductivités hydrauliques suivantes : 1.10^{-5}m/s ; 3.10^{-5}m/s ; 6.10^{-5}m/s ; 1.10^{-4}m/s ; 3.10^{-4}m/s .

Il ressort du tableau 5 que la diminution de la conductivité hydraulique fait baisser la piézométrie tandis qu'une hausse de ce paramètre l'augmente. La variation de la conductivité hydraulique entre 1.10^{-5}m/s et 6.10^{-5}m/s fait varier la piézométrie de plus ou moins 2m, tandis que l'augmentation de la conductivité hydraulique jusqu'à 3.10^{-4}m/s , induit une hausse de la piézométrie d'environ 15m.

On constate par ailleurs, que la variation de la conductivité hydraulique impacte plus les niveaux piézométriques des puits dont la charge est située entre 239 et 260m que ceux des puits dont la charge est inférieure à 239m. Quant à la variation induite sur les niveaux piézométriques des puits dont la charge est supérieure à 280m, elle est beaucoup plus faible (au maximum de 4,1m), ce qui semble logique puisque ces puits sont plus proches de la falaise, donc plus proches des potentiels imposés.

La fourchette de conductivités hydrauliques du Continental Terminal, qui a été

proposée est donc assez large pour faire sensiblement varier la piézométrie.

Tableau 5 Sensibilité de la conductivité hydraulique de la première couche

| statistiques pour les charges < 239m | | | | | | |
|---|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | K (CT) = 3,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-5 m/s | K (CT) = 6,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-4 m/s | K (CT) = 3,10-4 m/s |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle et celle du modèle initial | | | -1,052785714 | 1,562157143 | 3,547342857 | 12,67472857 |
| cibles | vert | 3 | 2 | 3 | 2 | 0 |
| | orange | 2 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| | rouge | 2 | 2 | 3 | 4 | 7 |
| statistiques pour les charges comprises entre 239m et 260m | | | | | | |
| | | K (CT) = 3,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-5 m/s | K (CT) = 6,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-4 m/s | K (CT) = 3,10-4 m/s |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle et celle du modèle initial | | | -1,635116667 | 2,37867619 | 5,325197619 | 17,41704167 |
| cibles | vert | 51 | 33 | 43 | 7 | 0 |
| | orange | 22 | 27 | 21 | 22 | 0 |
| | rouge | 11 | 24 | 20 | 55 | 84 |
| statistiques pour les charges > 280m | | | | | | |
| | | K (CT) = 3,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-5 m/s | K (CT) = 6,10-5 m/s | K (CT) = 1,10-4 m/s | K (CT) = 3,10-4 m/s |
| moyenne des différences entre la piézométrie du nouveau modèle et celle du modèle initial | | | -0,529092857 | 0,698107143 | 1,645435714 | 4,063814286 |
| cibles | vert | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| | orange | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| | rouge | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 |

Limite à flux imposés à l'Ouest plutôt que des potentiels imposés

Plutôt que de mettre des potentiels imposés le long de la frontière ouest, celle qui correspond au pied de la falaise, il était intéressant de mettre des flux imposés.

En mettant des flux imposés correspondant à un total entrant de $4,1\text{m}^3/\text{s}$, nous avons obtenu une piézométrie pour laquelle 48 des puits d'observation étaient bien calés (cibles vertes), 32 étaient moyennement calés (cibles oranges) et 25 n'ont pas réussi à être calés (cibles rouges).

Afin de voir l'influence de ces flux imposés sur la piézométrie, nous les avons faits varier, tous les autres facteurs restant les mêmes par ailleurs. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

| | | | | | | | |
|---|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| flux entrant (m³/s) | 4,1 | 4,2 | 3,8 | 4,8 | 5,4 | 6,0 | |
| % du total de la pluie annuelle tombée sur la partie contributive du plateau | 34% | 35% | 32% | 41% | 45% | 50% | |
| cibles | vert | 48 | 60 | 20 | 7 | 1 | 0 |
| | orange | 32 | 21 | 34 | 22 | 2 | 1 |
| | rouge | 25 | 24 | 51 | 76 | 102 | 104 |

On constate que le calage est optimisé avec un flux entrant légèrement supérieur à celui trouvé avec des potentiels imposés (4,2m³/s au lieu de 4,1m³/s). Mais dès que le flux entrant dépasse plus de 40% du total de la pluie annuelle tombée sur la partie contributive du plateau, le calage devient très mauvais avec moins de 8 puits bien calés. Enfin quand on réduit ce flux entrant à 32% du total de la pluie annuelle tombée sur la partie contributive du plateau, le nombre de puits bien calés tombe à 20 et 51 puits ne sont pas du tout calés. Par ailleurs, une réduction plus importante de ce flux fait diverger le modèle.

Une variation du flux entrant de $\pm 2\%$ du total de la pluie annuelle tombée sur la partie contributive du plateau correspond à une variation de la lame d'eau tombée sur le plateau de $\pm 10\text{mm}$, ce qui est très faible. On en déduit donc que notre modèle est très sensible au flux entrant.

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

V.I CONCLUSIONS

Au terme de ces travaux, nous avons obtenu des résultats aussi bien sur la connaissance des aquifères en présence que sur leur fonctionnement hydrodynamique.

Le sous-sol de la plaine du Gondo en général, et de la zone d'étude en particulier, renfermant deux formations aquifères principales, l'une généralement profonde composée de calcaires, karstiques par endroits, et l'autre superficielle composée de dépôts sablo-argileux, présente un fonctionnement hydrodynamique complexe.

La compilation des données climatiques, géologiques et hydrogéologiques de la région, nous a permis d'exposer le cadre général et d'évaluer la pertinence d'anciennes données.

Nous avons par ailleurs proposé une représentation optimisée de la piézométrie par usage de la télédétection haute résolution de la piézométrie, avec un gain de localisation de 29m en positionnement 2D (écart type) et de 2,8m en charge piézométrique/ altitude des ouvrages de captage et de mesure du niveau des aquifères (écart type). Puis nous avons étudié l'évolution de la piézométrie dans le temps qui semble indiquer d'abord une baisse de 86cm entre les années 1950 et les années 1970, puis une hausse plus lente de 71cm entre les années 1970 et les années 2010.

En outre, nous avons pu déterminer, bien qu'approximativement, le niveau du substratum du Continental Terminal à partir des données électriques et sismiques (PNUD, 1975) mais aussi des données de terrain plus récentes acquises par le projet Via Sahel.

La mise en parallèle de la carte piézométrique des années 2010 et de la carte du substratum du Continental Terminal a permis de mettre en évidence, d'une part que le Continental Terminal est déterminé comme étant sec sur 24% de la zone d'étude, et d'autre part qu'il existe un volume d'eau souterraine important entre 1,43 et 4,29km³, sur une superficie de près de 2 400km², ce qui représente un stock d'eau disponible à même de satisfaire les besoins en eau potable des habitants de la région pendant plusieurs décennies.

Enfin la modélisation des écoulements souterrains sur la zone Via Sahel, a intégré l'ensemble des informations disponibles sur la zone et a permis, d'une part d'illustrer le fonctionnement global du système aquifère, et d'autre part d'estimer le flux d'eau entrant provenant du ruissellement du plateau de Bandiagara, simulé de l'ordre de 34% du total

pluviométrique.

V.2. PERSPECTIVES

Notre étude a permis d'apporter des informations rassurantes sur les ressources en eau de la plaine du Gondo et sur leur possibilité de mobilisation puisque le Continental Terminal ne serait sec que sur 24% de la zone d'étude et présenterait ailleurs une épaisseur saturée moyenne de 16m. Toutefois, pour améliorer la connaissance hydrogéologique de la zone, il serait utile d'engager des recherches complémentaires.

En 1975, le rapport des Nations Unies (PNUD, 1975) estimait que la nappe du Gondo était une des plus importantes du Mali. Ce rapport préconisait l'amélioration des connaissances relatives aux caractéristiques hydrauliques du Continental Terminal, aquifère le plus capté dans la zone, à travers les méthodes classiques de prospections géophysiques, mais également la mise en œuvre de recherches poussées sur les zones tectonisées et probablement karstifiées, qui sont les seules capables de fournir des débits réellement importants.

Notre étude ne vise pas le même objectif puisque l'ONG Via Sahel ne réalise pas des forages mais des puits. L'essentiel est donc d'identifier les endroits où le Continental Terminal est saturé, et offre les meilleurs débits possibles. La carte du substratum du Continental Terminal est en cela, un résultat important, quoiqu'imparfait. C'est pourquoi, nous recommandons, à l'instar de la mission du PNUD (1975) et quand le contexte sécuritaire sera favorable, la mise en œuvre de campagnes de prospections géophysiques (notamment RMP) qui, alliée à la reconnaissance linéamentaire par télédétection par satellite déjà réalisée, permettra de localiser précisément ces endroits.

Par ailleurs, la mise en place et le suivi de puits pilotes considérés comme représentatifs en piézométrie, qui ont été proposés par l'ONG Via Sahel afin d'étudier précisément les variations saisonnières, interannuelles et décennales du niveau de la nappe, pourrait venir confirmer la hausse piézométrique observée depuis les années 1970.

Enfin, au terme de cette étude, plusieurs aspects du fonctionnement hydrodynamique de la plaine du Gondo restent encore mal compris : en premier lieu la cause de la dépression piézométrique et en deuxième lieu le processus de recharge de la nappe. Il serait intéressant

de se pencher plus en profondeur sur ce deuxième aspect. En effet, au Sud-Ouest du Niger, il a été montré que le changement de mise en culture des sols et le déboisement avaient entraîné une augmentation du ruissellement et de là une infiltration plus importante au niveau des mares. (Favreau et al, 2009). Le processus de recharge de la nappe du Gondo pourrait être similaire. Pour le confirmer, il faudrait conduire une étude sur l'occupation des sols et faire une analyse diachronique afin de voir s'il y a eu une diminution du couvert végétal naturel et en conséquence directe, une augmentation de l'érosion et du ravinement au cours du temps. Ces travaux pourraient s'appuyer sur les images satellitaires Pléiades qui, grâce à leur très haute résolution, représente un excellent support.

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

- Archambault J. (1951). Données pour un équipement hydraulique au Sud de la boucle du Niger (Soudan Français). BURGEAP, 47p. + annexes
- Archambault J. (1960). Eaux souterraines de l'Afrique occidentale. Berger-Levrault éd. Nancy, 139 p.
- Boucher M., Favreau G., Nazoumou Y., Cappelaere B., Massuel S., Legchenko A. (2012). Constraining groundwater modeling with magnetic resonance soundings. *Ground Water* 50, no.5 : 775-784.
- Dakouré D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali). Essai de modélisation. Thèse doctorat, UPMC, 222 p. + annexes
- Dassargues (1995). Modèles en hydrogéologie. Programme Tempus JEP 3801. Sciences de l'eau et environnement. Ed. Didac. et Pedag., R.A. Bucuresti, 134 p.
- Defossez M. (1955-57). Etude géologique et hydrogéologique de la plaine du Gondo (Soudan). Haut Commissariat de la République en Afrique Occidentale Française – Service de géologie et de prospection minière. 47p. + annexes
- Degallier R. (1954). Hydrogéologie du Ferlo septentrional (Sénégal). A-ch. Dir. Féd. Min. Géol. Dakar. Dakar, Sénégal.
- Dieng B. (1987). Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitative du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. Thèse de Doctorat, ENSMP, 172 p. + annexes.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C. (2000). Reliability of geochemical and hydrodynamics sampling in a semi-arid water table. *Journal of African Earth Science*, 31, 3/4, 669-678.
- Favreau G., Leduc C., Marlin C., Guéro A. (2002). Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud-Ouest du Niger). *C. R. Geoscience* 334, 395–401.
- Favreau G., Cappelaere B., Massuel S., Leblanc M., Boucher M., Boulain N., Leduc C. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger. *Water Resources Research*, vol. 45, W00A16, doi:10.1029/2007WR006785.
- Favreau G., Nazoumou Y., Leblanc M., Goni I.B. (2012). Groundwater resources increase in the Iullemeden Basin, West Africa. In : Treidel H., Martin-Bordes J.L., Gurdak J.J. (Eds.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources : A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. International Contributions to Hydrogéology (27), 7, 113-128, CRC Press Inc., Leiden, The Netherlands.
- Gaultier G., Marlin C., Leduc C., Filly A., Massault M. (2003). Hydrogéologie isotopique de la dépression piézométrique du Kadzell (Niger Oriental). *IAHS*, 278, 168-173.
- Gourcy L. (1994). Fonctionnement hydrogéochimique de la cuvette lacustre du fleuve Niger (Mali) : Bilans et suivi des flux hydriques, particuliers et dissous et des flux de méthane. Thèse de Doctorat, Univ. Paris XI Orsay, 293 p. + annexes.
- Guiraud R. (1988). L'hydrogéologie de l'Afrique. *Journal of African Earth Sciences*, 7, 3, 519-543.

- Koussoubé Y. (1996). Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province de Yatenga). Thèse de doctorat, Univ. Cheick Anta Diop, 231p. + annexes.
- Koussoubé Y. (2010). Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (Bassin du Sourou) – Burkina Faso / Mali. Thèse de doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, 285p. + annexes.
- Le Barbé L., Lebel T. (1997). Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, 188, 43-73
- Mac Donald M.G., Harbaugh A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6. U.S. Geological Survey.
- Martin-Rosales W., Leduc C. (2003). Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel : l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Geoscience* 335, no. 5 : 461 – 468.
- Nations Unies (2000). Résolution adoptée par l'Assemblée Générale. 55/2. Déclaration du Millénaire.
- OSS (2013). Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/tanezrouft, et du fleuve Niger. GICRESAIT. Rapport Modélisation et Vulnérabilité.
- Palausi G. (1959). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des formations primaires au Soudan méridional et en Haute-Volta.
- PNUD (1972). Projet des eaux souterraines. Rapport Géophysique. Prospection géophysique dans la plaine du Gondo. Mali. Nations Unies. 25p. + annexes.
- PNUD (1975). Renforcement des services gouvernementaux chargés de découvrir et de mettre en valeur les eaux souterraines. Mali. Conclusions et Recommandations. Nations Unies, New York. 75p + annexes.
- Scanvic J.Y. (1983). Utilisation de la télédétection dans les sciences de la Terre. Manuels et méthodes n°7. BRGM. 158 p.
- Sibson R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation, interpreting multivariate data. Wiley.
- Taïbi A. N., Munoz N., Ballouche A., Dolfo B., Plassais A. (2011). Désertification en zone soudano-sahélienne (pays Dogon, Mali) ? Apport de la cartographie et du suivi diachronique des parcs agroforestiers par télédétection satellitaire et aérienne, 25^e conférence cartographique internationale, Paris, 3-8 juillet 2011. Actes
- Taupin J.D., Amani A., Lebel T. (1998). Variabilité spatiale des pluies au Sahel : une question d'échelles. 1. Approche expérimentale. 2. Modélisation. *Water Resources Variability in Africa during the 20th Century : International Conference*, Abidjan (CIV, 1998/11/16-19).

Sites internet

<http://www.geohive.com/cntry/mail.aspx> [28/03/2014] source : Institut National de la Statistique du Mali, Mali. Note : 2009 census data are preliminary results.

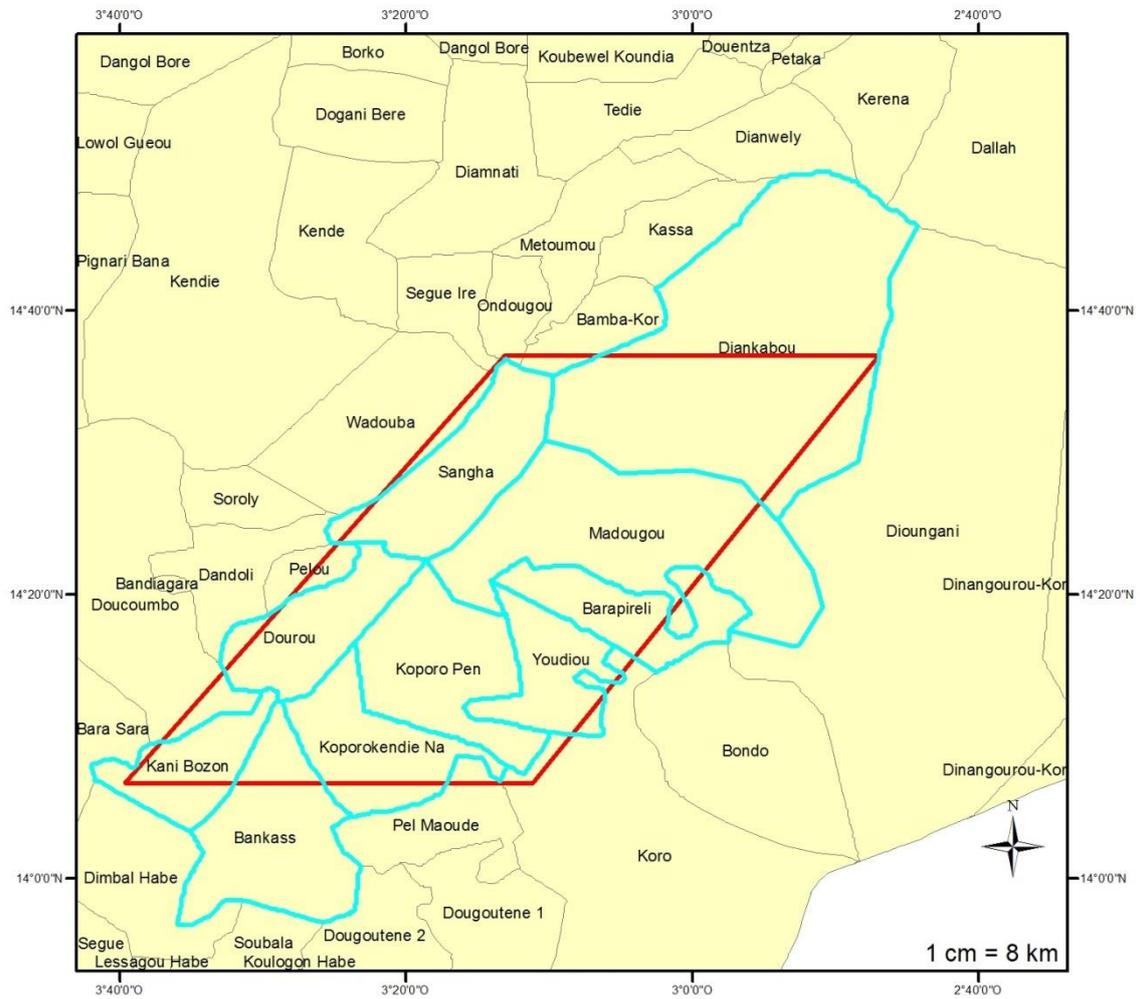
<http://www.oss-online.org/fr/projet-gicresait> [16/05/2014] source : Projet De Gestion Intégré et Concerté des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du fleuve Niger (GICRESAIT), Observatoire du Sahara et du Sahel

VII. ANNEXES

| | |
|---|-----|
| Annexe 1 Découpage administratif de la zone d'étude | 85 |
| Annexe 2 Pluviométrie à Sangha | 86 |
| Annexe 3 Situation de la plaine du Gondo par rapport aux bassins versants du Sourou et de la Volta (d'après Koussoubé, 2010) | 87 |
| Annexe 4 Situation géographique de la modélisation de Dakouré (2003) (d'après Dakouré, 2003)..... | 88 |
| Annexe 5 Modélisation de la zone de Sanga Nomou – a) Années 1960 ; b) Années 2010 (d'après Koussoubé, 2010)..... | 89 |
| Annexe 6 Situation géographique des systèmes aquifères d'Iullemeden (SAI) et de Taoudéni/Tanezrouft (d'après l'OSS)..... | 90 |
| Annexe 7 Méthode de calcul du potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara..... | 91 |
| Annexe 8 Coupes géologiques et lithostratigraphie (d'après PNUD, 1975)..... | 92 |
| Annexe 9 Mesures de l'épaisseur du Continental Terminal | 95 |
| Annexe 10 Carte de l'épaisseur du Continental Terminal (d'après le PNUD (1975) et Via Sahel)..... | 99 |
| Annexe 11 Mesures de la hauteur d'eau dans les puits (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)..... | 100 |
| Annexe 12 Mesures piézométriques des années 2010 sur la zone d'étude (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)..... | 106 |
| Annexe 13 Carte des niveaux statiques des années 2010 (d'après les données de Via Sahel) | 112 |
| Annexe 14 Mesures piézométriques des années 1950 sur la plaine du Gondo (d'après les mesures d'Archambault 1951 et Defossez 1955-1957) | 113 |
| Annexe 15 Carte des niveaux statiques des années 1950 (d'après Archambault (1951) et Defossez (1955-1957))..... | 118 |
| Annexe 16 Mesures piézométriques des années 1970 (d'après PNUD 1975)..... | 119 |
| Annexe 17 Carte des niveaux statiques des années 1970 (d'après le PNUD (1975)) | 127 |
| Annexe 18 Puits dont le niveau piézométrique est en discordance avec la carte piézométrique des années 2010 (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| Annexe 19 Puits Via Sahel captant probablement l'Infracambrien..... | 129 |
| Annexe 20 Calcul du volume d'aquifère saturé du Continental Terminal, avec surfer..... | 130 |
| Annexe 21 Ecart piézométriques classés (années 1970 – années 1950) sur la plaine du Gondo | 132 |
| Annexe 22 Variation du niveau piézométrique entre 1950 et 1970 sur une zone de densité comparable | 133 |
| Annexe 23 Calcul de différence de volume entre la piézométrie des années 1970 et des années 1950, sous Surfer..... | 134 |
| Annexe 24 Variation du niveau piézométrique entre 1970 et 2010 sur une zone de points de densité comparable..... | 136 |
| Annexe 25 Calcul de différence de volume entre la piézométrie des années 2010 et des années 1970, sous Surfer..... | 137 |

Annexe 1 Découpage administratif de la zone d'étude



Découpage administratif et zone d'étude

- zone d'étude
- communes
- communes concernées par notre étude

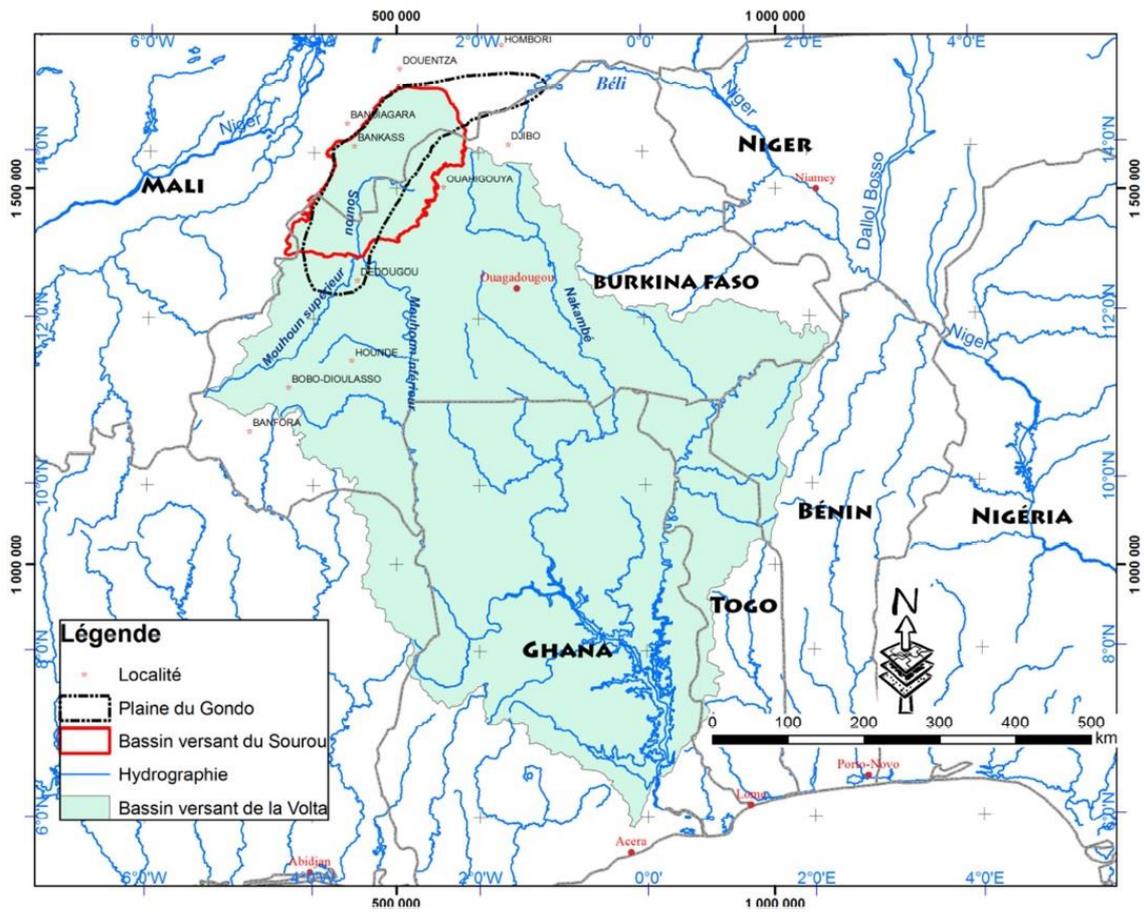
Annexe 2 Pluviométrie à Sangha

Pluviometrie Sangha (en mm)

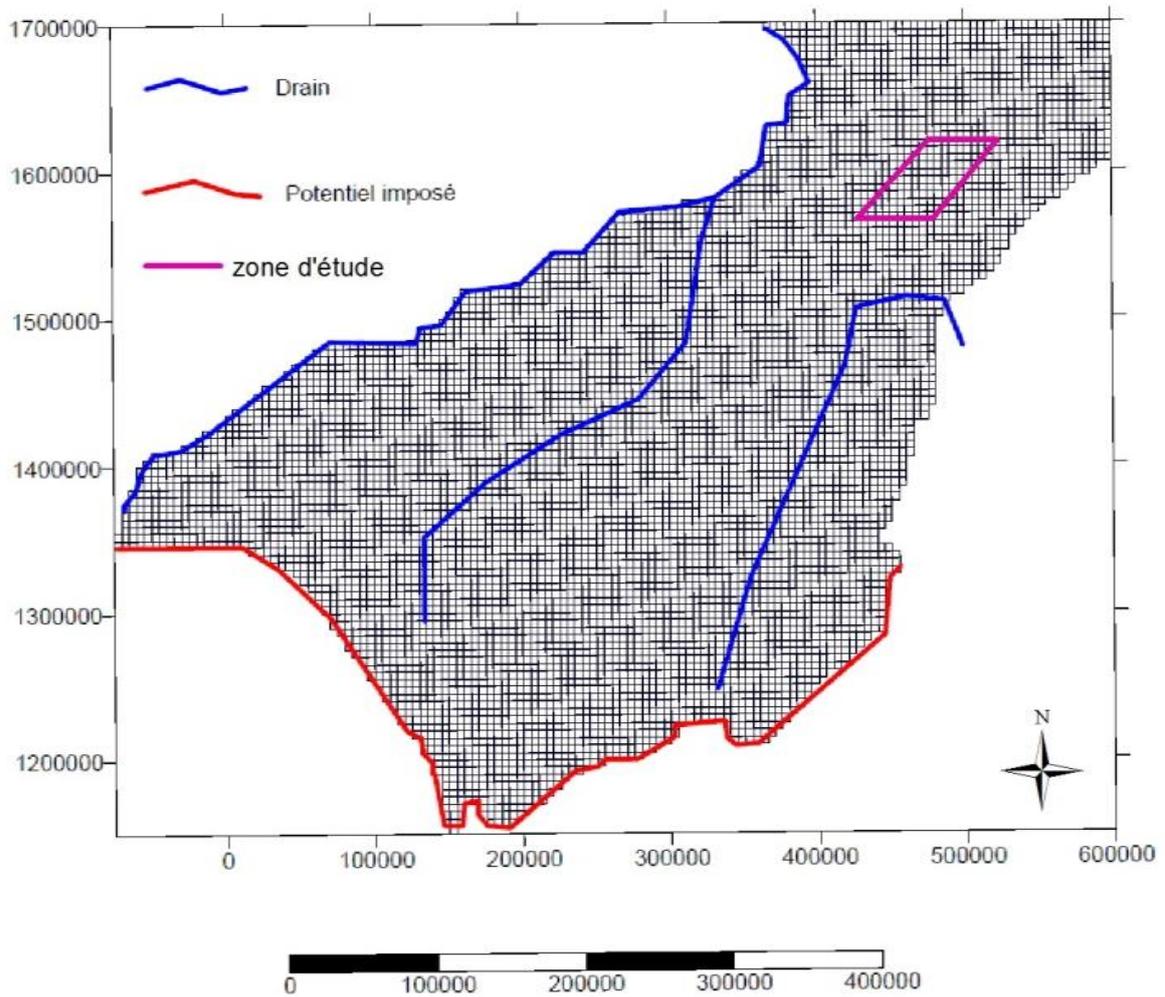
| | MAI | JUIN | JUILLET | AOUT | SEPT | OCT | TOTAL |
|------|-----|------|---------|------|------|-----|-------|
| 2001 | 0 | 70 | 67 | 150 | 127 | 12 | 426 |
| 2002 | 62 | 63 | 102 | 83 | 31 | 27 | 368 |
| 2003 | 23 | 174 | 123 | 237 | 112 | 80 | 749 |
| 2004 | 0 | 86 | 137 | 223 | 68 | 0 | 514 |
| 2005 | 0 | 120 | 180 | 175 | 78 | 0 | 553 |
| 2006 | 0 | 106 | 98 | 171 | 75 | 0 | 450 |
| 2007 | 22 | 16 | 327 | 199 | 82 | 0 | 646 |
| 2008 | 16 | 36 | 166 | 209 | 47 | 24 | 498 |
| 2009 | 22 | 75 | 141 | 180 | 57 | 15 | 490 |
| 2010 | 20 | 124 | 150 | 169 | 203 | 49 | 715 |
| 2011 | 0 | 54 | 111 | 165 | 26 | 0 | 356 |
| 2012 | 7 | 83 | 167 | 245 | 46 | 83 | 631 |
| 2013 | 20 | 55 | 33 | 157 | 51 | 50 | 366 |

Ces données ont été recueillies par le consultant permanent de Via Sahel hydrogéologie à Sangha, Alain Vallet.

Annexe 3 Situation de la plaine du Gondo par rapport aux bassins versants du Sourou et de la Volta (d'après Koussoubé, 2010)

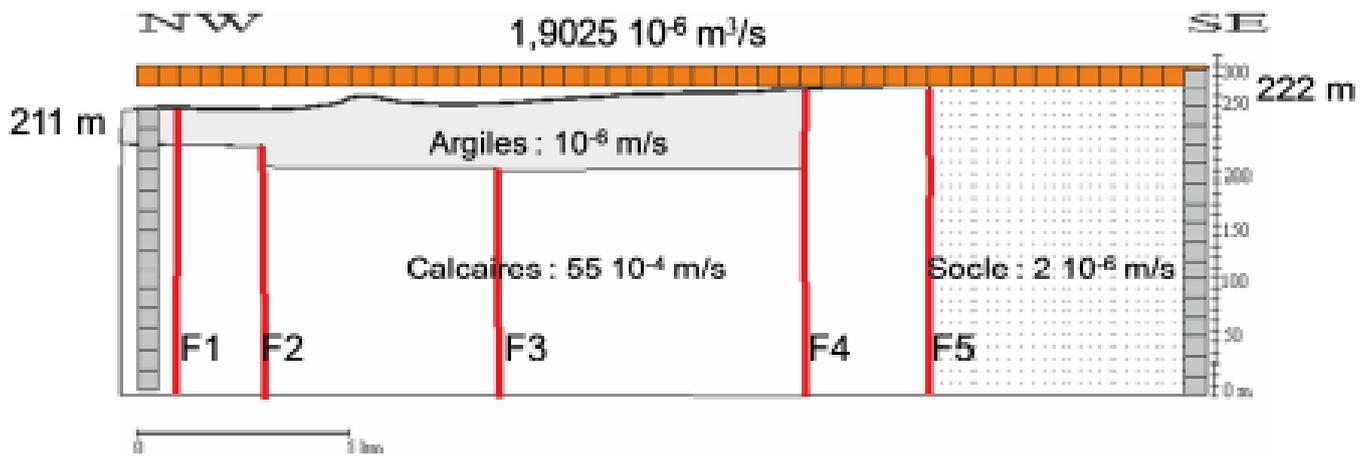


Annexe 4 Situation géographique de la modélisation de Dakouré (2003) (d'après Dakouré, 2003)



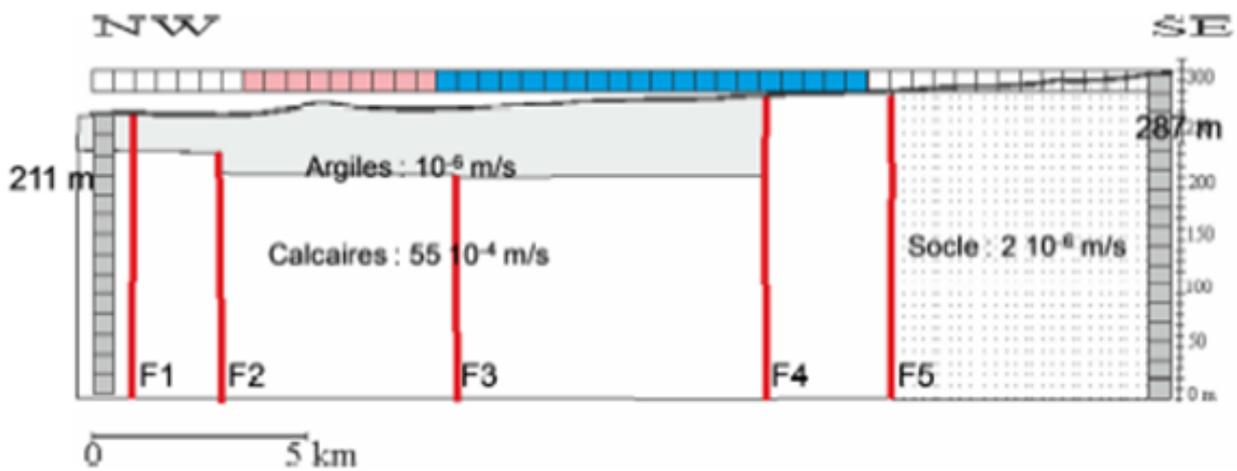
Annexe 5 Modélisation de la zone de Sanga Nomou – a) Années 1960 ; b) Années 2010 (d’après Koussoubé, 2010)

a) Années 1960



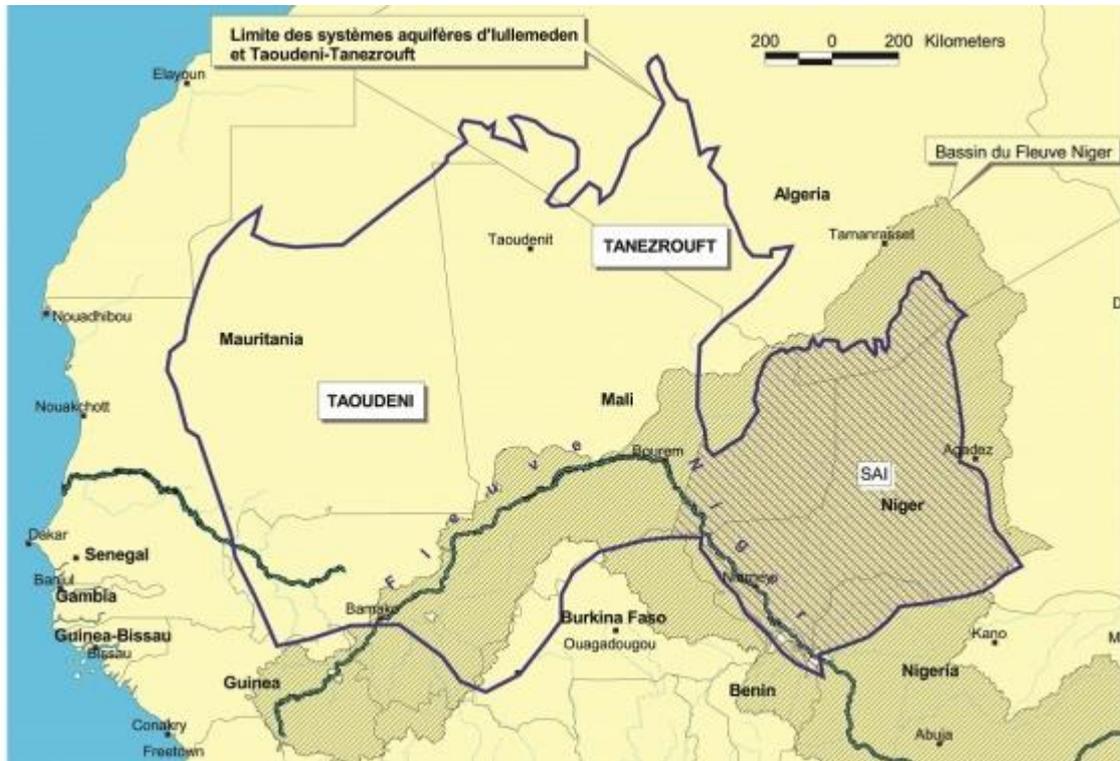
en rouge : failles subverticales

b) Années 2000



en rouge : failles subverticales

Annexe 6 Situation géographique des systèmes aquifères d'Iullemeden (SAI) et de Taoudéni/Tanezrouft (d'après l'OSS)



Annexe 7 Méthode de calcul du potentiel de recharge de la nappe par ruissellement d'eau de pluie sur le plateau de Bandiagara

- Calcul du volume d'eau annuel tombé sur la partie contributive du plateau, V1 :

$$V1 = \text{Pluie annuelle tombée sur le plateau} \times \text{surface contributive du plateau}$$

- Calcul du volume d'eau rechargeant la nappe de la plaine du Gondo, V2 :

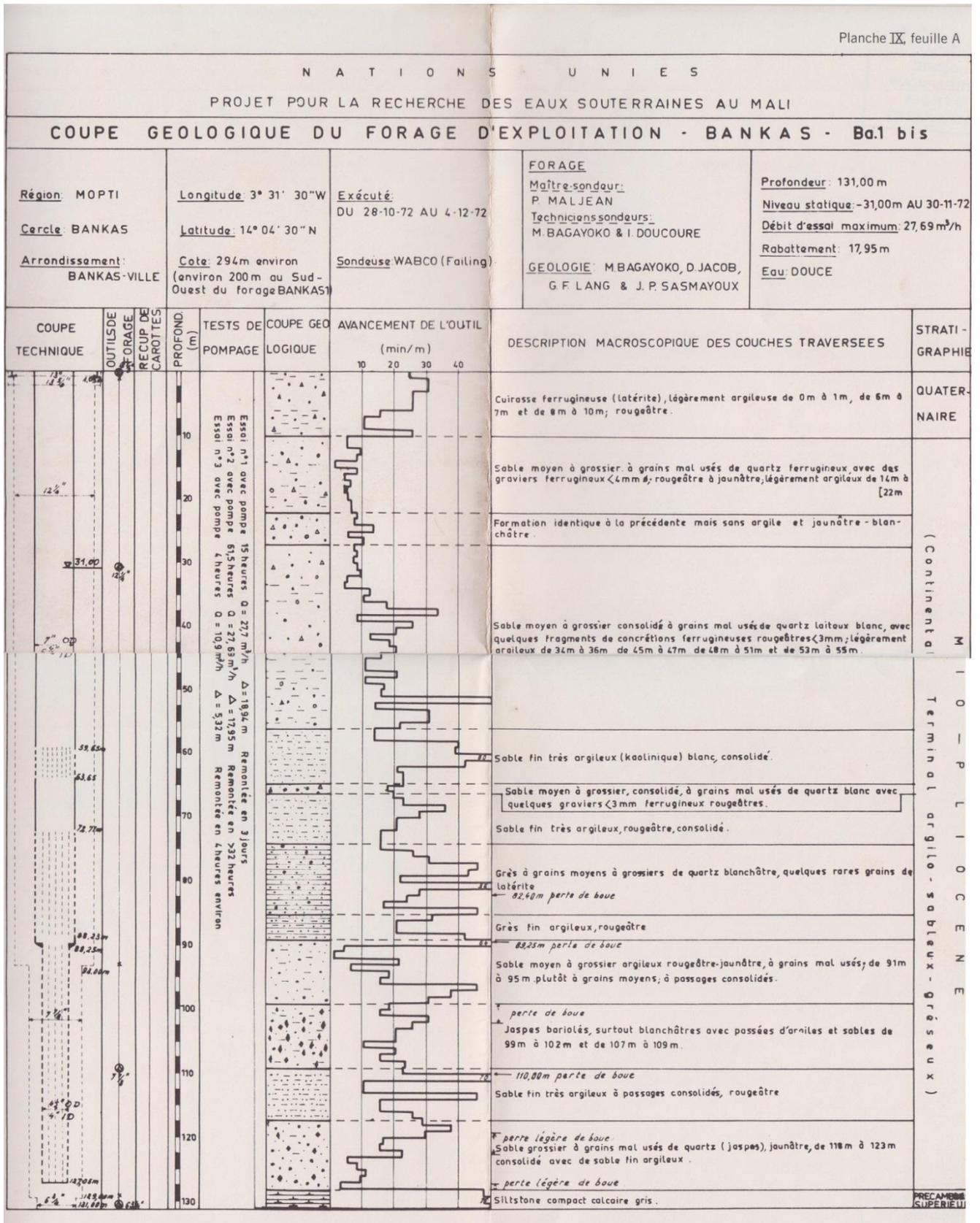
$$V2 = V1 \times \text{taux d'évaporation}$$

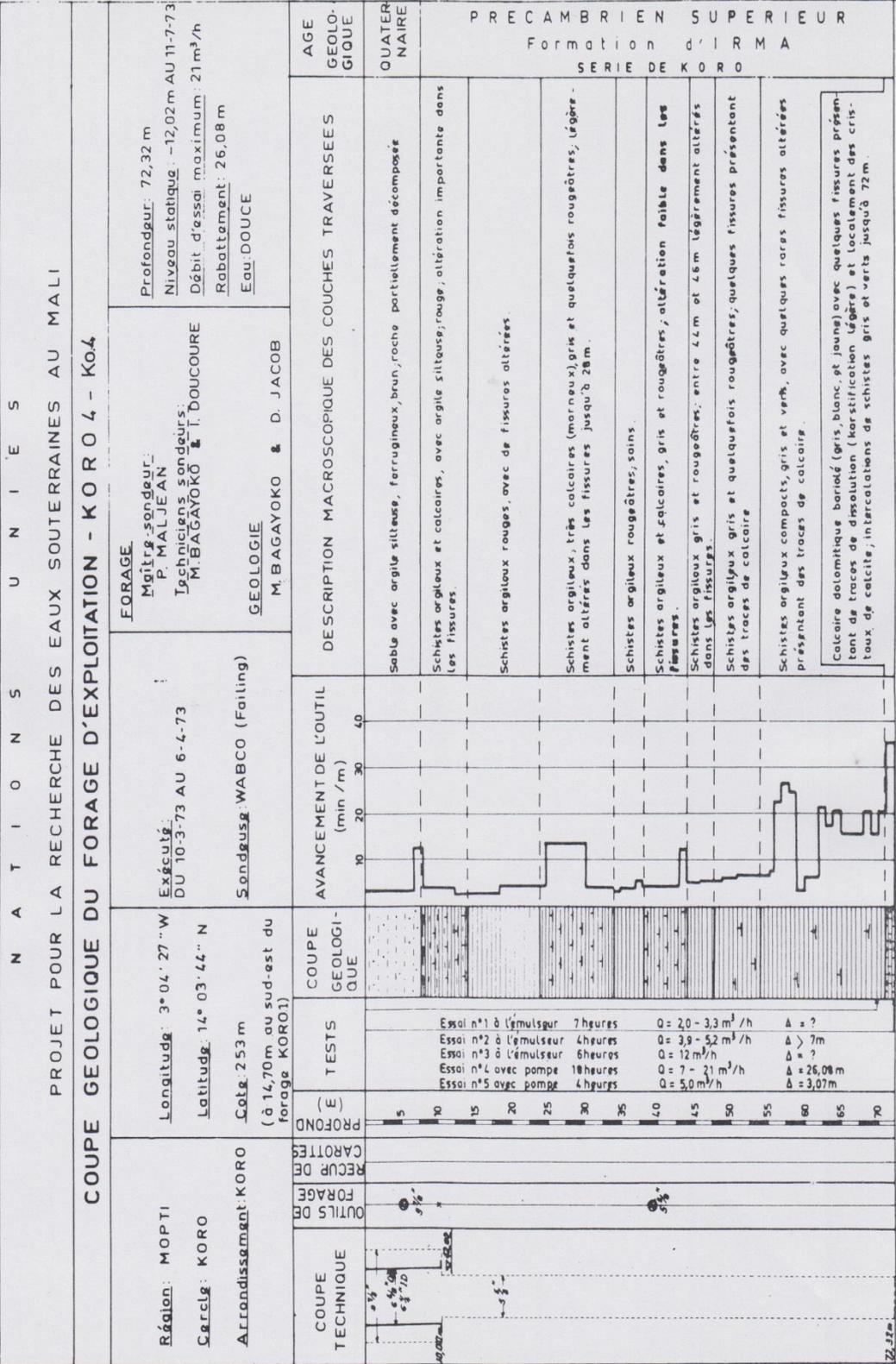
- Calcul de la recharge annuelle de la nappe, R :

$$R = V2 / \text{surface de la plaine du Gondo}$$

Ainsi $V1 = 520.10^{-3} \times 1\,070.10^6 = 5\,564.10^5 \text{ m}^3$
 $V2 = 5\,564.10^5 \times 0,5 = 2\,782.10^5 \text{ m}^3$
 $R = 2\,782.10^5 / 30\,000.10^6 \approx 9,3.10^{-3} \text{ m}$

Annexe 8 Coupes géologiques et lithostratigraphie (d'après PNUD, 1975)





LITHOSTRATIGRAPHIE DE LA ZONE DE BANKAS

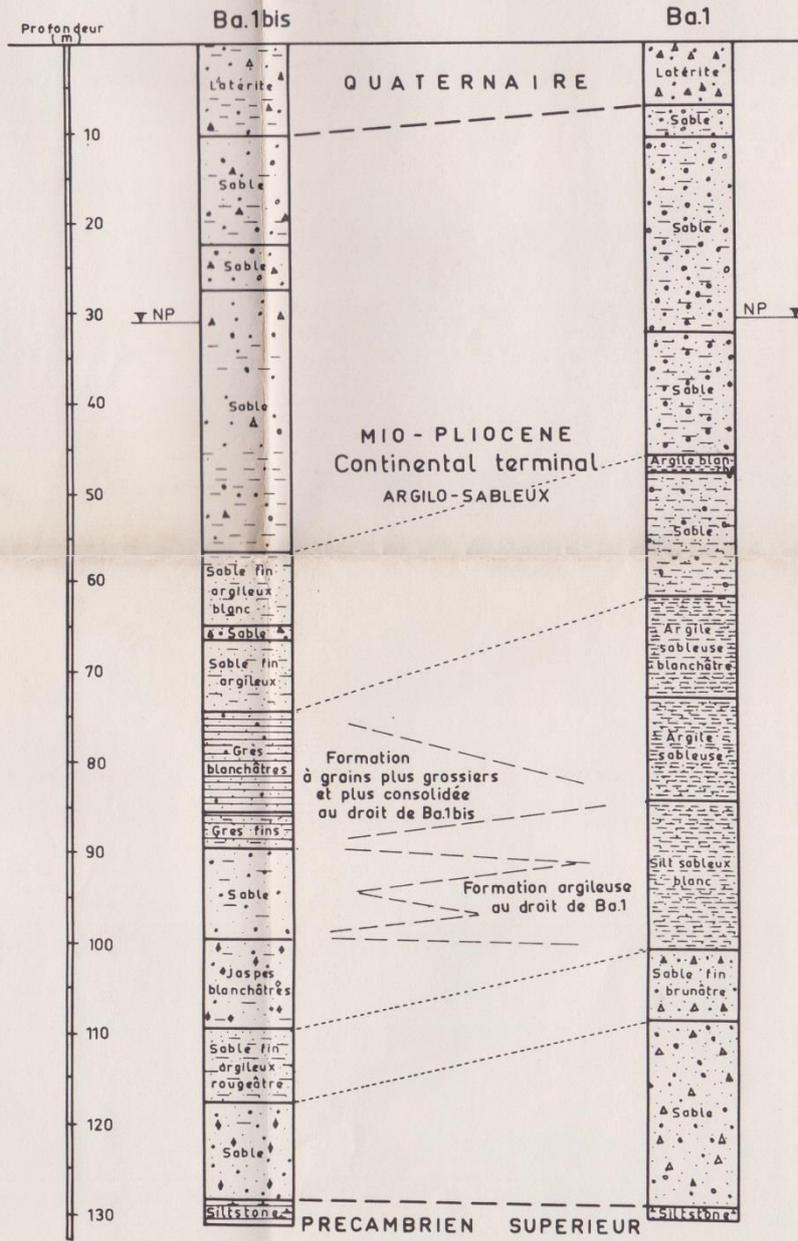
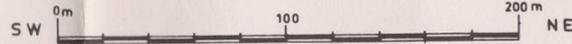
CORRELATION DES FORAGES BANKAS 1 ET 1bis

COUPE SCHEMATIQUE N45°E

700 m → BANKAS VILLE

COMITÉ
INTERAFRICAIN
D'ÉTUDES
HYDRAULIQUES

5701



Annexe 9 Mesures de l'épaisseur du Continental Terminal

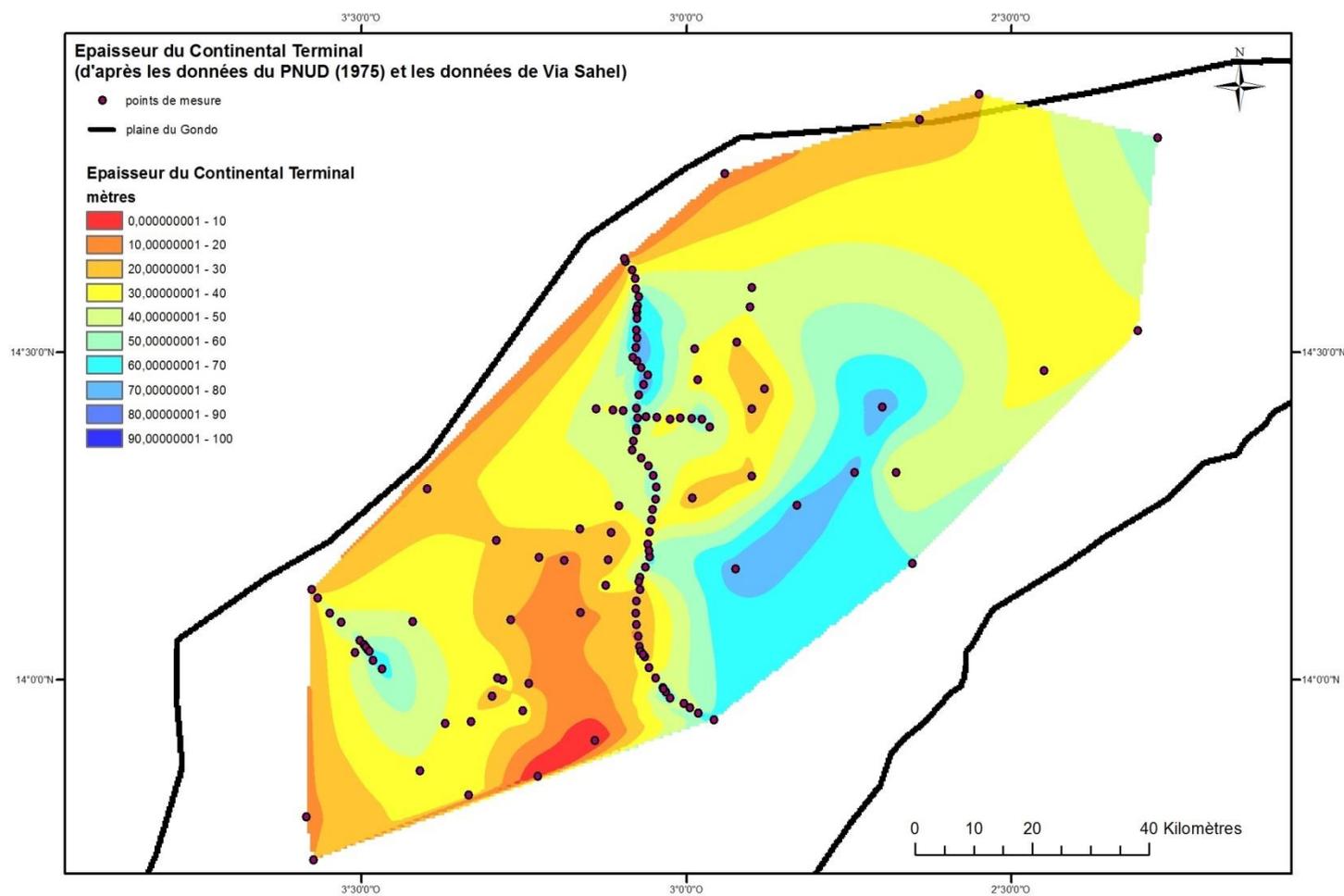
| points de mesures | coordonnées géographiques | | épaisseur du Continental Terminal (m) | niveau du substratum du Continental Terminal (m) | Source |
|-------------------|---------------------------|--------|---------------------------------------|--|-------------|
| | long DD | lat DD | | | |
| 1 | -3,078 | 14,084 | 35 | 224 | PNUD (1975) |
| 2 | -3,079 | 14,102 | 20 | 240 | PNUD (1975) |
| 3 | -3,078 | 14,12 | 22 | 240 | PNUD (1975) |
| 4 | -3,072 | 14,138 | 20 | 244 | PNUD (1975) |
| 5 | -3,072 | 14,156 | 57 | 204 | PNUD (1975) |
| 6 | -3,073 | 14,051 | 20 | 241 | PNUD (1975) |
| 7 | -3,071 | 14,043 | 40 | 220 | PNUD (1975) |
| 8 | -3,065 | 14,035 | 30 | 231 | PNUD (1975) |
| 9 | -3,068 | 14,039 | 20 | 242 | PNUD (1975) |
| 10 | -3,058 | 14,018 | 35 | 228 | PNUD (1975) |
| 11 | -3,048 | 14,003 | 25 | 234 | PNUD (1975) |
| 12 | -3,037 | 13,988 | 85 | 174 | PNUD (1975) |
| 13 | -3,026 | 13,972 | 70 | 195 | PNUD (1975) |
| 14 | -3,005 | 13,964 | 42,5 | 220 | PNUD (1975) |
| 15 | -2,995 | 13,957 | 0 | 268 | PNUD (1975) |
| 16 | -2,982 | 13,949 | 82,5 | 187 | PNUD (1975) |
| 17 | -3,064 | 14,172 | 50 | 217 | PNUD (1975) |
| 18 | -3,057 | 14,188 | 75 | 193 | PNUD (1975) |
| 19 | -3,06 | 14,207 | 37 | 230 | PNUD (1975) |
| 20 | -3,074 | 14,15 | 45 | 218 | PNUD (1975) |
| 21 | -3,058 | 14,197 | 32 | 208 | PNUD (1975) |
| 22 | -3,057 | 14,226 | 40 | 228 | PNUD (1975) |
| 23 | -3,055 | 14,244 | 45 | 226 | PNUD (1975) |
| 24 | -3,053 | 14,26 | 42 | 232 | PNUD (1975) |
| 25 | -3,048 | 14,276 | 55 | 217 | PNUD (1975) |
| 26 | -3,047 | 14,294 | 55 | 217 | PNUD (1975) |
| 27 | -3,052 | 14,312 | 55 | 219 | PNUD (1975) |
| 28 | -3,059 | 14,327 | 50 | 224 | PNUD (1975) |
| 29 | -3,07 | 14,339 | 42 | 234 | PNUD (1975) |
| 30 | -3,084 | 14,351 | 45 | 233 | PNUD (1975) |
| 31 | -3,082 | 14,365 | 55 | 226 | PNUD (1975) |
| 32 | -3,078 | 14,384 | 80 | 199 | PNUD (1975) |
| 33 | -3,076 | 14,4 | 55 | 226 | PNUD (1975) |
| 34 | -3,078 | 14,415 | 70 | 212 | PNUD (1975) |
| 35 | -3,074 | 14,435 | 55 | 227 | PNUD (1975) |
| 36 | -3,067 | 14,451 | 95 | 184 | PNUD (1975) |
| 37 | -3,06 | 14,466 | 70 | 214 | PNUD (1975) |
| 38 | -3,07 | 14,477 | 65 | 218 | PNUD (1975) |

| points de mesures | coordonnées géographiques | | épaisseur du Continental Terminal (m) | niveau du substratum du Continental Terminal (m) | Source |
|-------------------|---------------------------|----------|---------------------------------------|--|-------------|
| | long DD | lat DD | | | |
| 39 | -3,077 | 14,487 | 65 | 217 | PNUD (1975) |
| 40 | -3,079 | 14,507 | 95 | 188 | PNUD (1975) |
| 41 | -3,077 | 14,522 | 82 | 207 | PNUD (1975) |
| 42 | -3,078 | 14,534 | 75 | 213 | PNUD (1975) |
| 43 | -3,077 | 14,552 | 65 | 227 | PNUD (1975) |
| 44 | -3,077 | 14,562 | 60 | 229 | PNUD (1975) |
| 45 | -3,076 | 14,571 | 65 | 223 | PNUD (1975) |
| 46 | -3,074 | 14,585 | 77 | 216 | PNUD (1975) |
| 47 | -3,079 | 14,597 | 32 | 257 | PNUD (1975) |
| 48 | -3,08 | 14,613 | 25 | 284 | PNUD (1975) |
| 49 | -3,084 | 14,626 | 45 | 250 | PNUD (1975) |
| 50 | -3,094 | 14,639 | 37 | 261 | PNUD (1975) |
| 51 | -3,063 | 14,402 | 55 | 225 | PNUD (1975) |
| 52 | -3,046 | 14,401 | 50 | 231 | PNUD (1975) |
| 53 | -3,026 | 14,398 | 25 | 250 | PNUD (1975) |
| 54 | -3,01 | 14,4 | 35 | 243 | PNUD (1975) |
| 55 | -2,993 | 14,399 | 62 | 216 | PNUD (1975) |
| 56 | -2,977 | 14,398 | 65 | 211 | PNUD (1975) |
| 57 | -2,965 | 14,386 | 52 | 221 | PNUD (1975) |
| 58 | -3,098 | 14,411 | 50 | 232 | PNUD (1975) |
| 59 | -3,114 | 14,412 | 32 | 251 | PNUD (1975) |
| 60 | -3,14 | 14,414 | 45 | 240 | PNUD (1975) |
| 61 | -2,98333 | 14,45833 | 34 | 246 | PNUD (1975) |
| 62 | -2,88056 | 14,44444 | 24 | 248 | PNUD (1975) |
| 63 | -2,90000 | 14,41389 | 26 | 246 | PNUD (1975) |
| 64 | -2,69861 | 14,41667 | 77 | 187 | PNUD (1975) |
| 65 | -2,45000 | 14,47222 | 33 | 231 | PNUD (1975) |
| 66 | -2,90000 | 14,31111 | 27 | 242 | PNUD (1975) |
| 67 | -2,99167 | 14,27778 | 22 | 250 | PNUD (1975) |
| 68 | -2,92500 | 14,16944 | 76 | 188 | PNUD (1975) |
| 69 | -3,16454 | 14,23085 | 31 | 241 | Via Sahel |
| 70 | -2,83056 | 14,26667 | 73 | 187 | PNUD (1975) |
| 71 | -2,74167 | 14,31667 | 73 | 192 | PNUD (1975) |
| 72 | -2,67778 | 14,31667 | 38 | 227 | PNUD (1975) |
| 73 | -2,65278 | 14,17778 | 61 | 210 | PNUD (1975) |
| 74 | -3,032 | 13,981 | 85 | 177 | PNUD (1975) |
| 75 | -3,29368 | 14,21251 | 30 | 246 | Via Sahel |
| 76 | -3,40000 | 14,29167 | 25 | 264 | PNUD (1975) |
| 77 | -2,94196 | 14,77324 | 16 | 299 | Via Sahel |

| points de mesures | coordonnées géographiques | | épaisseur du Continental Terminal (m) | niveau du substratum du Continental Terminal (m) | Source |
|-------------------|---------------------------|----------|---------------------------------------|--|-------------|
| | long DD | lat DD | | | |
| 78 | -3,51066 | 14,04135 | 37 | 246 | Via Sahel |
| 79 | -3,37222 | 13,93333 | 39 | 229 | PNUD (1975) |
| 80 | -3,41111 | 13,86111 | 38 | 230 | PNUD (1975) |
| 81 | -3,28333 | 14,00000 | 37 | 230 | PNUD (1975) |
| 82 | -3,24306 | 13,99444 | 19 | 244 | PNUD (1975) |
| 83 | -3,30000 | 13,97500 | 19 | 247 | PNUD (1975) |
| 84 | -3,25278 | 13,95278 | 38 | 227 | PNUD (1975) |
| 85 | -3,33194 | 13,93611 | 38 | 231 | PNUD (1975) |
| 86 | -3,22917 | 13,85278 | 0 | 260 | PNUD (1975) |
| 87 | -3,03611 | 13,98611 | 50 | 210 | PNUD (1975) |
| 88 | -3,14167 | 13,90694 | 0 | 260 | PNUD (1975) |
| 89 | -3,58611 | 13,79028 | 16 | 269 | PNUD (1975) |
| 90 | -3,57500 | 13,72500 | 20 | 251 | PNUD (1975) |
| 91 | -3,33611 | 13,82361 | 39 | 223 | PNUD (1975) |
| 92 | -3,578 | 14,138 | 20 | 319 | PNUD (1975) |
| 93 | -3,568 | 14,125 | 40 | 291 | PNUD (1975) |
| 94 | -3,55 | 14,102 | 45 | 257 | PNUD (1975) |
| 95 | -2,95833 | 13,93889 | 61 | 202 | PNUD (1975) |
| 96 | -3,18889 | 14,18194 | 15 | 251 | PNUD (1975) |
| 97 | -3,10417 | 14,26528 | 41 | 234 | PNUD (1975) |
| 98 | -3,11667 | 14,22500 | 20 | 252 | PNUD (1975) |
| 99 | -3,12083 | 14,18333 | 20 | 247 | PNUD (1975) |
| 100 | -3,078 | 14,566 | 70 | 221 | PNUD (1975) |
| 101 | -3,42222 | 14,08889 | 41 | 233 | PNUD (1975) |
| 102 | -3,27083 | 14,09167 | 20 | 243 | PNUD (1975) |
| 103 | -3,29167 | 14,00278 | 37 | 230 | PNUD (1975) |
| 104 | -3,12500 | 14,14444 | 35 | 230 | PNUD (1975) |
| 105 | -2,90295 | 14,56890 | 42 | 245 | Via Sahel |
| 106 | -3,504 | 14,06 | 60 | 237 | PNUD (1975) |
| 107 | -3,16389 | 14,10278 | 16 | 242 | PNUD (1975) |
| 108 | -3,492 | 14,046 | 70 | 214 | PNUD (1975) |
| 109 | -3,07500 | 14,06667 | 5 | 258 | PNUD (1975) |
| 110 | -3,483 | 14,03 | 65 | 218 | PNUD (1975) |
| 111 | -3,469 | 14,017 | 65 | 215 | PNUD (1975) |
| 112 | -3,07778 | 14,38056 | 34 | 245 | PNUD (1975) |
| 113 | -3,08309 | 14,49199 | 47 | 239 | Via Sahel |
| 114 | -2,64167 | 14,85556 | 25 | 248 | PNUD (1975) |
| 115 | -2,55000 | 14,89444 | 29 | 245 | PNUD (1975) |
| 116 | -3,22803 | 14,18705 | 22 | 244 | Via Sahel |

| points de mesures | coordonnées géographiques | | épaisseur du Continental Terminal (m) | niveau du substratum du Continental Terminal (m) | Source |
|-------------------|---------------------------|----------|---------------------------------------|--|-------------|
| | long DD | lat DD | | | |
| 117 | -3,532 | 14,088 | 40 | 249 | PNUD (1975) |
| 118 | -3,497 | 14,054 | 40 | 254 | PNUD (1975) |
| 119 | -2,27500 | 14,82778 | 57 | 220 | PNUD (1975) |
| 120 | -3,494 | 14,05 | 35 | 254 | PNUD (1975) |
| 121 | -2,90000 | 14,59861 | 44 | 257 | PNUD (1975) |
| 122 | -3,489 | 14,043 | 75 | 208 | PNUD (1975) |
| 123 | -2,98750 | 14,50556 | 40 | 246 | PNUD (1975) |
| 124 | -2,92293 | 14,51514 | 29 | 241 | Via Sahel |
| 125 | -2,30556 | 14,53333 | 37 | 228 | PNUD (1975) |
| 126 | -3,096 | 14,643 | 10 | 285 | PNUD (1975) |

Annexe 10 Carte de l'épaisseur du Continental Terminal (d'après le PNUD (1975) et Via Sahel)



Annexe 11 Mesures de la hauteur d'eau dans les puits (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|--------------------------|---------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 3-Goudiodourou-1 | -3,2307 | 14,3381 | 2,3 |
| 4-Somanagoro | -3,0824 | 14,2943 | 0,13 |
| 6-Pegue | -3,2991 | 14,4388 | 0,2 |
| 8-Dayanom-1 | -3,2667 | 14,3624 | 0,5 |
| 9-Tenndiou-Dognou | -3,1945 | 14,3703 | 2 |
| 10-Bassogou | -3,2419 | 14,3545 | 0,35 |
| 12-Madougou-Dognou | -3,0838 | 14,4003 | 0,55 |
| 13-Madina-Amani | -3,2568 | 14,3409 | 0,35 |
| 14-Babouro | -3,2989 | 14,3597 | 0,7 |
| 15-Bakin | -3,2865 | 14,3517 | 0,2 |
| 16-Ponoteteme | -3,2822 | 14,3703 | 0,9 |
| 17-Namtoulaye-Amani | -3,2764 | 14,3393 | 0,18 |
| 18-Sorou-1 | -3,1487 | 14,4115 | 1,1 |
| 23-Pourel | -3,1169 | 14,3666 | 2,6 |
| 24-Ana-Bagala | -3,2262 | 14,3019 | 1 |
| 25-Tagourou-Saye | -3,1560 | 14,3639 | 1,8 |
| 26-Inteminou-Kou | -3,2181 | 14,3856 | 0 |
| 27-Ama-Douyon | -3,2913 | 14,3937 | 1 |
| 29-Ireli-Bara | -3,3067 | 14,4352 | 3,4 |
| 33-Sedourou | -3,1286 | 14,3234 | 0,6 |
| 34-Domblossogou-Ouest | -3,0971 | 14,3571 | 1,2 |
| 35-Kadiawere | -3,0758 | 14,5618 | 8 |
| 36-Tanoua | -3,2371 | 14,3202 | 7,5 |
| 38-Anakana | -3,1713 | 14,3324 | 2,3 |
| 42-Youdiou-Peulh | -3,1741 | 14,2694 | 1,27 |
| 44-Nema | -3,2458 | 14,2914 | 2 |
| 45-Dangabouro | -3,1083 | 14,4326 | 2 |
| 47-Bereli-1 | -3,2236 | 14,2727 | 0,8 |
| 49-Segramma-Saye | -3,2653 | 14,3122 | 1 |
| 50-Namtoulaye-Ireli | -3,1583 | 14,3268 | 2,58 |
| 51-Bore | -3,0017 | 14,3870 | 0,1 |
| 52-Sono | -3,2670 | 14,2899 | 3,2 |
| 53-Madina-Kou | -3,2553 | 14,3219 | 1,5 |
| 54-Tagourou-Ireli-Douyon | -3,1832 | 14,3516 | 2,1 |
| 57-Tassogo-2 | -3,2213 | 14,3987 | 15,8 |
| 58-Ireli-Ganie | -3,3052 | 14,4353 | 4,4 |

| Identifiant | Coordonnée Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|----------------------|--------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 60-Kengue-1 | -3,0186 | 14,4528 | 2,4 |
| 61-Koumbomou | -3,0381 | 14,4859 | 5 |
| 63-Binsoi-4 | -3,2727 | 14,3127 | 0,57 |
| 65-Kinde | -3,0553 | 14,5342 | 4,65 |
| 67-Atem-1 | -3,2330 | 14,2491 | 2,5 |
| 68-Dourou-Bara | -3,2442 | 14,2737 | 2,7 |
| 69-Ireli-Dama | -3,3142 | 14,4267 | 4,1 |
| 70-Kombo-Ogourou | -3,2492 | 14,2398 | 1,8 |
| 71-Dombiossogou-Nord | -3,0930 | 14,3590 | 2 |
| 72-Madougou-Arou | -3,0829 | 14,4023 | 3 |
| 74-Seguemara-Dogon | -3,0853 | 14,5313 | 1,8 |
| 75-Yalouwa | -3,2552 | 14,2846 | 2 |
| 77-Tourou-Maraicher | -3,1264 | 14,2024 | 11,95 |
| 79-Warana | -2,9668 | 14,4797 | 1,4 |
| 80-Begnekana | -3,3344 | 14,1673 | 2,2 |
| 81-Songobouro-1 | -3,3455 | 14,1819 | 1,4 |
| 82-Oro | -3,2822 | 14,1708 | 2,2 |
| 83-Simerou | -3,0883 | 14,4438 | 13 |
| 84-Gondo-Ogorou | -2,9029 | 14,5689 | 3,8 |
| 85-Kassawa-Dognou- | -2,9716 | 14,3981 | 0,4 |
| 86-Bereli-2 | -3,2223 | 14,2761 | 0,7 |
| 87-Orodiouro | -3,1508 | 14,3802 | 4 |
| 89-Endem | -2,9880 | 14,5043 | 4,5 |
| 90-Soye | -3,0831 | 14,4920 | 1,7 |
| 91-Samani | -3,2207 | 14,2194 | 2 |
| 92-Gomotogo | -3,3388 | 14,2521 | 2,5 |
| 93-Orogourou | -3,3986 | 14,1205 | 2 |
| 94-Amako | -3,2280 | 14,1871 | 9,4 |
| 95-Orokamba | -3,0771 | 14,4569 | 2,5 |
| 96-Dombiossogou-Est | -3,0909 | 14,3567 | 1 |
| 97-Madougou-Domino | -3,0786 | 14,4013 | 1,7 |
| 98-Kobadie | -2,9229 | 14,5151 | 2,8 |
| 99-Ogonogou | -3,2426 | 14,2535 | 2 |
| 100-Samani-2 | -3,2211 | 14,2178 | 1,53 |
| 101-Koporo-Pen | -3,3006 | 14,2294 | 2,35 |
| 102-Don-Bolibana | -3,2870 | 14,1852 | 4,1 |
| 103-Sinda | -3,4188 | 14,1324 | 2 |
| 104-Beniouma | -3,3860 | 14,1683 | 2,8 |
| 105-Korolou | -3,3748 | 14,2263 | 2 |
| 106-Sagourou | -3,3802 | 14,2055 | 1,8 |

| Identifiant | Coordonnée Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|---------------------------------|--------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 107-Youdiou | -3,1730 | 14,2762 | 2,88 |
| 108-Tonon-Ana | -3,3053 | 14,1939 | 1 |
| 109-Madougou-Dah | -3,0811 | 14,3997 | 4,5 |
| 110-Banikani | -3,0784 | 14,3438 | 1,5 |
| 111-Banikani-Badourou | -3,0672 | 14,3491 | 2,25 |
| 112-Dinsogou | -3,0507 | 14,4304 | 2,65 |
| 113-Gangarabouro | -3,0307 | 14,4016 | 1,1 |
| 114-Kengue-2 | -3,0177 | 14,4550 | 2,4 |
| 115--Sorou-2 | -3,1463 | 14,4170 | 3,4 |
| 116-Doma-Da | -2,8540 | 14,3143 | 9,45 |
| 117-Ogodengou-Kana | -3,1551 | 14,1818 | 2,13 |
| 118-Ogodengou-Tanoro | -3,1768 | 14,2123 | 1,9 |
| 119-Ogodourou-Na | -3,1235 | 14,2227 | 2,85 |
| 120-Omonoubere | -3,1645 | 14,2309 | 0,6 |
| 121-Tanoua-Dognou | -3,2378 | 14,3260 | 0,5 |
| 122-Songobourou-2 | -3,2764 | 14,3440 | 3,1 |
| 123-Hamdallaye | -3,3066 | 14,3723 | 1,9 |
| 124-Sobanou-Da | -3,1533 | 14,4509 | 8,6 |
| 125-Koporo-Pen-Nongobolo-Koun-1 | -3,3029 | 14,2280 | 2 |
| 127-Derou | -3,2903 | 14,2542 | 1,67 |
| 130-Gingual | -3,4501 | 14,1487 | 1,5 |
| 131-Barkala | -3,3967 | 14,1514 | 3,5 |
| 132-Anamoila | -3,1952 | 14,3116 | 2,7 |
| 133-Youdiou-Dinon-Nogou | -3,1697 | 14,2764 | 1,5 |
| 134-Tanoua-Na | -3,2372 | 14,3167 | 5,93 |
| 135-Amani-Djanogou | -3,3312 | 14,4066 | 3,08 |
| 136-Gomou | -3,3359 | 14,2005 | 4,78 |
| 137-Korokoum | -3,2937 | 14,2125 | 2,6 |
| 138-Koporo-Pen-Nogobolo-Koun-2 | -3,2955 | 14,2244 | 3,75 |
| 139-Koporo-Pen-Gomorogara | -3,3055 | 14,2231 | 2,9 |
| 140-Bamguel-Velde | -2,9420 | 14,7732 | 2,95 |
| 143-Atem-2 | -3,2315 | 14,2477 | 2,65 |
| 144-Nema-Amani | -3,2478 | 14,2880 | 1,85 |
| 145-Souan-Degomoro | -3,1132 | 14,2419 | 0,85 |
| 146-Ogodengou-Guinroukene | -3,1797 | 14,2144 | 2,55 |
| 147-Amadomon-Ana | -3,2810 | 14,2824 | 1,33 |

| Identifiant | Coordonnée Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|----------------------------|--------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 150-Anakila-1 | -3,0674 | 14,5733 | 2,35 |
| 151-Anakila-2 | -3,0645 | 14,5766 | 1,05 |
| 152-Dianweli | -3,5107 | 14,0414 | 0,7 |
| 153-Sogara | -3,4368 | 13,9826 | 3,68 |
| 154-Soula-Ouro | -3,5908 | 13,9539 | 0,1 |
| 155-Welingara | -3,5908 | 13,9802 | 0,53 |
| 156-Sinda-Sagounogou | -3,4185 | 14,1352 | 1,72 |
| 157-Bereli-3 | -3,2181 | 14,2743 | 5,75 |
| 158-Madina | -3,2645 | 14,3021 | 2,4 |
| 159-Sono-Amatonyon | -3,2623 | 14,2876 | 2,45 |
| 160-Goudiodourou-2 | -3,2295 | 14,3388 | 4,25 |
| 161-Guimto-4 | -3,3107 | 14,3374 | 0,6 |
| 1-Oropa-Anakanagomoro-S | -3,2638 | 14,2005 | 0,7 |
| 2-Youdiou-Dinon-Nogou-S | -3,1701 | 14,2757 | 1,7 |
| 3-Tanoua-S | -3,2329 | 14,3183 | 0 |
| 4-Anamoila-S1 | -3,1967 | 14,3110 | 1 |
| 5-Anamoila-S2 | -3,1981 | 14,3144 | 5 |
| 6-Pel-Kanda-S1 | -3,3935 | 14,1301 | 1,7 |
| 7-Pel-Kanda-S2 | -3,3922 | 14,1326 | 1,4 |
| 8-Koporo-Na-Gomorogara-S1 | -3,3529 | 14,1311 | 2 |
| 9-Koporo-Na-Gomorogara-S2 | -3,3543 | 14,1313 | 1 |
| 10-Mondoro-S1 | -3,2928 | 14,1227 | 1 |
| 11-Wol-Konssogou-S1 | -3,4303 | 14,1866 | 1,9 |
| 12-Wol-Konssogou-S2 | -3,4310 | 14,1902 | 0,3 |
| 13-Wol-Maounde-S | -3,4286 | 14,1889 | 1,2 |
| 14-Sakoun-S | -3,3413 | 14,2166 | 4 |
| 15-Kombogourou-Peulh-S2 | -3,2471 | 14,2439 | 4,2 |
| 16-Derou-S1 | -3,2925 | 14,2523 | 2 |
| 17-Derou-S2 | -3,2920 | 14,2563 | 0,7 |
| 18-Koporo-Pen-Nogonbolo-S1 | -3,2983 | 14,2264 | 1 |
| 19-Koporo-Pen-Nogonbolo-S2 | -3,2988 | 14,2284 | 0,4 |
| 20-Koporo Pen-Penere-S | -3,3019 | 14,2271 | 0,4 |
| 21-Gueourou-S1 | -3,2406 | 14,1693 | 0,4 |
| 22-Gueourou-S2 | -3,2415 | 14,1694 | 3,7 |
| 23-Amako-S | -3,2311 | 14,1874 | 0,45 |

| Identifiant | Coordonnée Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|-------------------------------|--------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 24-Saradine-S | -3,1678 | 14,2275 | 1 |
| 25-Omonoubere-S | -3,1648 | 14,2317 | 0,5 |
| 26-Gama-S2 | -2,9656 | 14,4106 | 0,4 |
| 27-Kassawa-Dognou | -2,9715 | 14,3984 | 0,3 |
| 28-Kobadie-S | -2,9214 | 14,5157 | 3 |
| 29-Soye-S1 | -3,0853 | 14,4883 | 10,6 |
| 30-Soye-S2 | -3,0851 | 14,4887 | 2,3 |
| 31-Mediougo-Ana-S | -3,3028 | 14,3490 | 0,6 |
| 32-Batourou-S | -3,2613 | 14,2754 | 0,8 |
| 33-Amani-Gondom-S1 | -3,2853 | 14,3319 | 0,25 |
| 34-Amani-Gondom-S2 | -3,2857 | 14,3318 | 0,25 |
| 35-Guimto-S | -3,3187 | 14,3307 | 0,4 |
| 36-Samani-Peulh-S | -3,2256 | 14,2285 | 0,65 |
| 37-Sono-Komokan-S | -3,2876 | 14,2784 | 0,6 |
| 38-Sekana-S1 | -3,3048 | 14,2988 | 1,5 |
| 39-Koporo-Pen- Anabirin-S1 | -3,2917 | 14,2399 | 0,2 |
| 40-Koporo-Pen- Anabirin-S2 | -3,2916 | 14,2362 | 1 |
| 41-Samani-Dogon-S | -3,2242 | 14,2169 | 2 |
| 42-Samani-Dogon-S | -3,2248 | 14,2183 | 0,1 |
| 43-Kessagourou-S | -3,4624 | 14,0574 | 1,3 |
| 44-Ogodengou-St- elevage-S | -3,1789 | 14,2180 | 1,75 |
| 45-Babel-S | -3,2430 | 14,3141 | 0,4 |
| 46-Ogodourou-Na-S | -3,1235 | 14,2227 | 1 |
| 47-Tourou-S1 | -3,1285 | 14,2018 | 13,6 |
| 48-Tourou-S2 | -3,1293 | 14,2016 | 1,3 |
| 49-Souan-S | -3,1139 | 14,2383 | 1,25 |
| 50-Banguel-S | -2,9575 | 14,7550 | 4,1 |
| 51-Sourou-S | -3,1482 | 14,4117 | 1,9 |
| 52-Kombokani- Gomboro-S | -3,3731 | 14,3591 | 5,5 |
| 1-Kani-Bozon | -3,6279 | 14,1337 | 1,55 |
| 2-Kani-Komole-Ogobo | -3,5972 | 14,1463 | 3,55 |
| 3-Kani-Komole-eglise | -3,5970 | 14,1466 | 2,1 |
| 4-Kani-Komole-Dassalam | -3,5841 | 14,1505 | 3,35 |
| 5-Tely-1 | -3,5671 | 14,1615 | 0,05 |
| 6-Tely-2 | -3,5675 | 14,1609 | 2,9 |
| 7-Walia-1 | -3,5482 | 14,1733 | 4,65 |
| 8-Walia-2 | -3,5474 | 14,1744 | 8,15 |

| Identifiant | Coordonnée Géographiques | | hauteur d'eau moyenne dans les puits (m) |
|-------------------------|--------------------------|---------|--|
| | Long DD | Lat DD | |
| 9-Ede-Guine-Kada-jardin | -3,5366 | 14,1836 | 1,25 |
| 10-Ede-Guine-Kada | -3,5345 | 14,1825 | 1,65 |
| 11-Pagourou-1 | -3,5106 | 14,2017 | 6,65 |
| 12-Pagourou-2 | -3,5069 | 14,2044 | 3,15 |
| 13-Pagourou-3 | -3,5054 | 14,2047 | 4,05 |
| 14-Yawotalou-1 | -3,4947 | 14,2201 | 16,3 |
| 15-Yawotalou-2 | -3,4894 | 14,2212 | 4,25 |
| 16-Doudiourou | -3,4800 | 14,2282 | 1,55 |
| 17-Nomori-1 | -3,4053 | 14,3293 | 0,9 |
| 18-Nomori-2 | -3,4039 | 14,3285 | 0,6 |
| 19-Nomori-3 | -3,4010 | 14,3271 | 0,9 |
| 20-Idieli-na-1 | -3,3873 | 14,3402 | 0,7 |
| 21-Idieli-na-2 | -3,3877 | 14,3414 | 0,8 |
| 22-Idieli-Gotouga | -3,3870 | 14,3382 | 1,55 |
| 23-Komokani-1 | -3,3731 | 14,3591 | 3,6 |
| 24-Komokani-2 | -3,3726 | 14,3596 | 3,9 |
| 25-Tereli-Kou-1 | -3,3493 | 14,3801 | 8,3 |
| 26-Tereli-Kou-2 | -3,3504 | 14,3784 | 0,3 |
| 27-Amani-Dianogo | -3,3307 | 14,4067 | 2,3 |
| 28-Amani-Soumba | -3,3298 | 14,4086 | 1,35 |
| 29-Irely-Dama | -3,3168 | 14,4250 | 1 |
| 30-Ireli-Da | -3,3103 | 14,4302 | 0,3 |
| 31-Irely-Yene | -3,3104 | 14,4313 | 1 |

Annexe 12 Mesures piézométriques des années 2010 sur la zone d'étude (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|--------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 3-Goudiodourou-1 | -3,23069 | 14,33813 | 282 | 34 | 248 |
| 4-Somanagoro | -3,08240 | 14,29427 | 277 | 43 | 234 |
| 6-Pegue | -3,29911 | 14,43878 | 318 | 10 | 308 |
| 8-Dayanom-1 | -3,26672 | 14,36244 | 304 | 57 | 247 |
| 9-Tenndiou-Dognou | -3,19450 | 14,37034 | 291 | 40 | 251 |
| 12-Madougou-Dognou | -3,08378 | 14,40031 | 280 | 32 | 248 |
| 13-Madina-Amani | -3,25675 | 14,34089 | 301 | 59 | 242 |
| 14-Babouro | -3,29890 | 14,35972 | 336 | 47 | 289 |
| 15-Bakin | -3,28648 | 14,35168 | 313 | 55 | 258 |
| 16-Ponoteteme | -3,28224 | 14,37027 | 326 | 41 | 285 |
| 18-Sorou-1 | -3,14866 | 14,41150 | 285 | 34 | 251 |
| 23-Pourel | -3,11691 | 14,36659 | 283 | 33 | 250 |
| 24-Ana-Bagala | -3,22616 | 14,30194 | 281 | 34 | 247 |
| 25-Tagourou-Saye | -3,15604 | 14,36391 | 288 | 36 | 252 |
| 27-Ama-Douyon | -3,29132 | 14,39370 | 342 | 55 | 287 |
| 29-Ireli-Bara | -3,30673 | 14,43518 | 323 | 11 | 312 |
| 33-Sedourou | -3,12862 | 14,32342 | 286 | 35 | 251 |
| 34-Domblossogou-Ouest | -3,09713 | 14,35710 | 279 | 33 | 246 |
| 35-Kadiawere | -3,07580 | 14,56182 | 290 | 2 | 288 |
| 36-Tanoua | -3,23705 | 14,32019 | 280 | 39 | 241 |
| 38-Anakana | -3,17134 | 14,33236 | 285 | 39 | 246 |
| 42-Youdiou-Peulh | -3,17413 | 14,26936 | 277 | 32 | 245 |
| 44-Nema | -3,24577 | 14,29139 | 281 | 31 | 250 |
| 45-Dangabouro | -3,10825 | 14,43259 | 282 | 40 | 242 |
| 47-Bereli-1 | -3,22360 | 14,27268 | 277 | 31 | 246 |
| 49-Segramma-Saye | -3,26530 | 14,31224 | 291 | 42 | 249 |
| 50-Namtoulaye-Ireli | -3,15834 | 14,32685 | 283 | 34 | 249 |
| 51-Bore | -3,00171 | 14,38704 | 277 | 47 | 231 |
| 52-Sono | -3,26702 | 14,28986 | 288 | 40 | 248 |
| 53-Madina-Kou | -3,25526 | 14,32188 | 290 | 41 | 249 |
| 54-Tagourou-Ireli-Douyon | -3,18324 | 14,35165 | 287 | 40 | 247 |
| 57-Tassogo-2 | -3,22130 | 14,39871 | 292 | 3 | 289 |
| 58-Ireli-Ganie | -3,30522 | 14,43532 | 322 | 11 | 312 |
| 59-Anamoila-Kana | -3,20172 | 14,30179 | 282 | 37 | 245 |
| 60-Kengue-1 | -3,01859 | 14,45282 | 279 | 36 | 243 |
| 61-Koumbomou | -3,03806 | 14,48590 | 287 | 36 | 251 |
| 63-Binsoi-4 | -3,27269 | 14,31270 | 296 | 47 | 249 |

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|-----------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 65-Kinde | -3,05528 | 14,53418 | 284 | 31 | 253 |
| 67-Atem-1 | -3,23301 | 14,24913 | 277 | 30 | 247 |
| 68-Dourou-Bara | -3,24415 | 14,27370 | 277 | 29 | 248 |
| 69-Ireli-Dama | -3,31419 | 14,42672 | 317 | 6 | 311 |
| 71-Dombiossogou-Nord | -3,09304 | 14,35905 | 280 | 40 | 240 |
| 72-Madougou-Arou | -3,08290 | 14,40230 | 281 | 31 | 250 |
| 74-Seguemara-Dogon | -3,08531 | 14,53131 | 292 | 40 | 252 |
| 75-Yalouwa | -3,25523 | 14,28455 | 284 | 34 | 250 |
| 77-Tourou-Maraicher | -3,12642 | 14,20236 | 274 | 42 | 232 |
| 79-Warana | -2,96683 | 14,47969 | 274 | 30 | 244 |
| 80-Begnekana | -3,33437 | 14,16734 | 279 | 35 | 244 |
| 81-Songobouro-1 | -3,34547 | 14,18192 | 281 | 37 | 244 |
| 82-Oro | -3,28221 | 14,17079 | 271 | 28 | 243 |
| 83-Simerou | -3,08833 | 14,44379 | 280 | 31 | 249 |
| 84-Gondo-Ogorou | -2,90295 | 14,56890 | 287 | 42 | 245 |
| 86-Bereli-2 | -3,22233 | 14,27608 | 281 | 32 | 249 |
| 87-Orodiouro | -3,15077 | 14,38016 | 286 | 35 | 251 |
| 88-Oropa | -3,25916 | 14,20124 | 271 | 23 | 248 |
| 89-Endem | -2,98801 | 14,50426 | 287 | 38 | 249 |
| 91-Samani | -3,22068 | 14,21940 | 274 | 26 | 248 |
| 92-Gomotogo | -3,33884 | 14,25212 | 299 | 47 | 252 |
| 93-Orogourou | -3,39864 | 14,12048 | 275 | 30 | 245 |
| 94-Amako | -3,22803 | 14,18705 | 266 | 25 | 241 |
| 95-Orokamba | -3,07711 | 14,45688 | 281 | 43 | 239 |
| 96-Dombiossogou-Est | -3,09095 | 14,35669 | 280 | 32 | 248 |
| 97-Madougou-Domino | -3,07855 | 14,40130 | 281 | 32 | 249 |
| 99-Ogonogou | -3,24258 | 14,25347 | 279 | 31 | 248 |
| 100-Samani-2 | -3,22108 | 14,21781 | 271 | 27 | 244 |
| 101-Koporo-Pen | -3,30059 | 14,22938 | 278 | 31 | 247 |
| 102-Don-Bolibana | -3,28696 | 14,18519 | 275 | 32 | 243 |
| 103-Sinda | -3,41879 | 14,13243 | 277 | 32 | 246 |
| 104-Beniouma | -3,38597 | 14,16833 | 285 | 39 | 246 |
| 105-Korolou | -3,37483 | 14,22627 | 295 | 48 | 247 |
| 106-Sagourou | -3,38021 | 14,20553 | 295 | 47 | 248 |
| 107-Youdiou | -3,17297 | 14,27615 | 280 | 32 | 248 |
| 108-Tonon-Ana | -3,30525 | 14,19388 | 280 | 34 | 246 |
| 109-Madougou-Dah | -3,08113 | 14,39967 | 281 | 30 | 251 |
| 110-Banikani | -3,07842 | 14,34376 | 278 | 33 | 245 |
| 111-Banikani-Badourou | -3,06718 | 14,34909 | 277 | 34 | 243 |
| 112-Dinsogou | -3,05065 | 14,43045 | 278 | 31 | 247 |

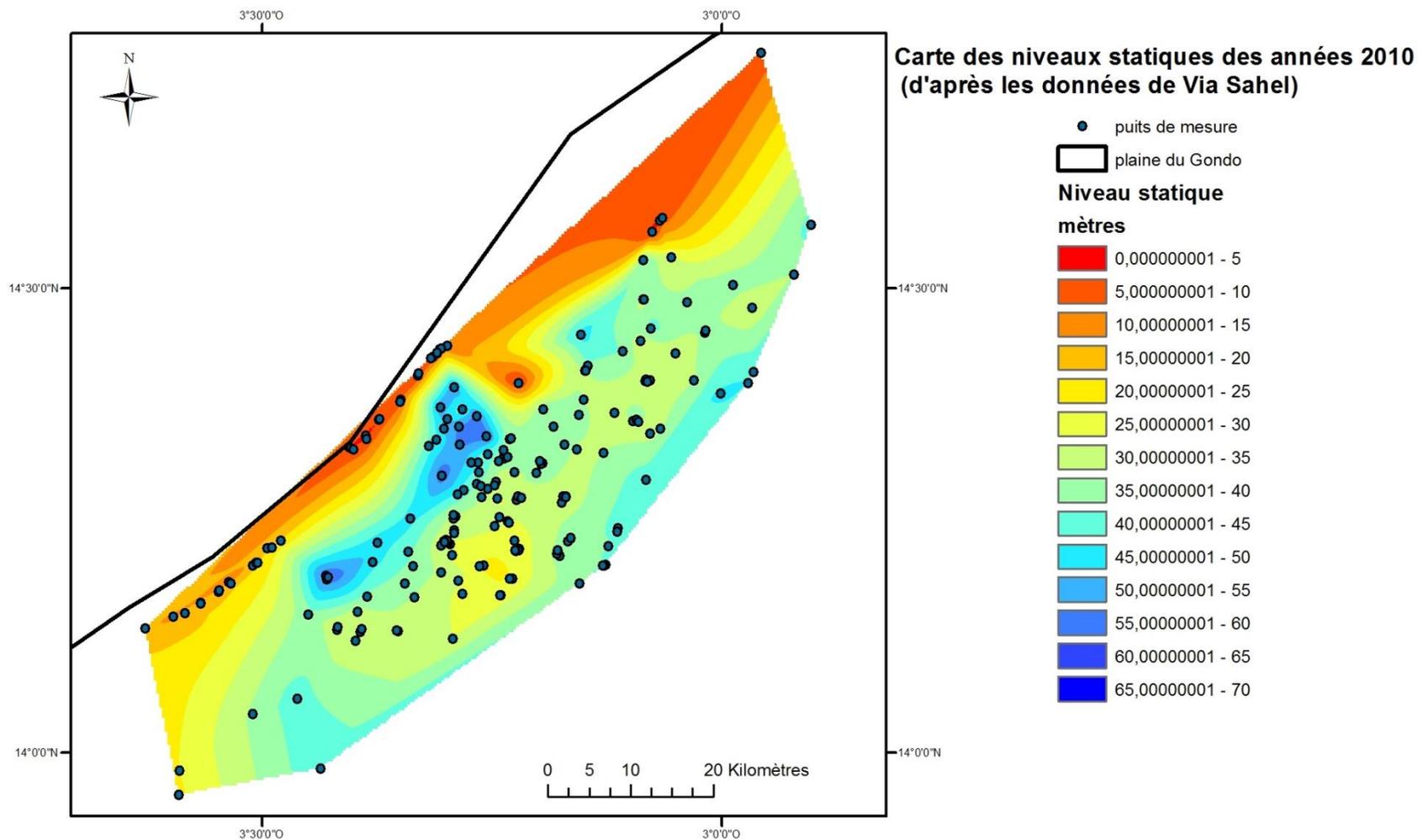
| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|---------------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 113-Gangarabouro | -3,03069 | 14,40162 | 276 | 34 | 242 |
| 114-Kengue-2 | -3,01774 | 14,45495 | 284 | 36 | 248 |
| 115--Sorou-2 | -3,14627 | 14,41702 | 292 | 40 | 252 |
| 117-Ogodengou-Kana | -3,15513 | 14,18178 | 266 | 39 | 227 |
| 118-Ogodengou-Tanoro | -3,17676 | 14,21232 | 272 | 36 | 236 |
| 119-Ogodourou-Na | -3,12348 | 14,22269 | 273 | 39 | 234 |
| 120-Omonoubere | -3,16454 | 14,23085 | 272 | 33 | 239 |
| 121-Tanoua-Dognou | -3,23778 | 14,32598 | 285 | 40 | 245 |
| 123-Hamdallaye | -3,30661 | 14,37228 | 347 | 55 | 292 |
| 124-Sobanou-Da | -3,15333 | 14,45088 | 300 | 47 | 253 |
| 125-Koporo-Pen-Nongobolo-Koun-1 | -3,30289 | 14,22795 | 276 | 31 | 246 |
| 127-Derou | -3,29025 | 14,25419 | 280 | 34 | 246 |
| 130-Gingual | -3,45009 | 14,14866 | 289 | 38 | 251 |
| 131-Barkala | -3,39665 | 14,15137 | 280 | 33 | 248 |
| 132-Anamoila | -3,19522 | 14,31156 | 283 | 39 | 244 |
| 133-Youdiou-Dinon-Nogou | -3,16970 | 14,27638 | 278 | 32 | 246 |
| 134-Tanoua-Na | -3,23720 | 14,31672 | 283 | 35 | 248 |
| 135-Amani-Djanogou | -3,33116 | 14,40655 | 317 | 3 | 314 |
| 136-Gomou | -3,33592 | 14,20049 | 285 | 39 | 246 |
| 137-Korokoum | -3,29368 | 14,21251 | 276 | 29 | 247 |
| 138-Koporo-Pen-Nogobolo-Koun-2 | -3,29552 | 14,22439 | 276 | 31 | 245 |
| 139-Koporo-Pen-Gomorogara | -3,30552 | 14,22308 | 279 | 32 | 247 |
| 143-Atem-2 | -3,23152 | 14,24772 | 276 | 30 | 246 |
| 144-Nema-Amani | -3,24776 | 14,28797 | 283 | 38 | 245 |
| 145-Souan-Degomoro | -3,11315 | 14,24190 | 275 | 42 | 233 |
| 146-Ogodengou-Guinroukene | -3,17973 | 14,21438 | 267 | 37 | 230 |
| 147-Amadomon-Ana | -3,28096 | 14,28242 | 289 | 43 | 246 |
| 150-Anakila-1 | -3,06742 | 14,57329 | 288 | 5 | 283 |
| 151-Anakila-2 | -3,06455 | 14,57661 | 288 | 7 | 281 |
| 152-Dianweli | -3,51066 | 14,04135 | 283 | 36 | 247 |
| 153-Sogara | -3,43678 | 13,98263 | 277 | 44 | 233 |
| 154-Soula-Ouro | -3,59079 | 13,95389 | 301 | 24 | 278 |
| 155-Welingara | -3,59075 | 13,98024 | 300 | 25 | 275 |
| 156-Sinda-Sagounogou | -3,41848 | 14,13515 | 276 | 31 | 245 |
| 157-Bereli-3 | -3,21814 | 14,27427 | 281 | 33 | 248 |
| 158-Madina | -3,26447 | 14,30214 | 290 | 45 | 245 |
| 159-Sono-Amatonyon | -3,26234 | 14,28759 | 287 | 39 | 248 |
| 160-Goudiodourou-2 | -3,22953 | 14,33880 | 284 | 36 | 248 |
| 161-Guimto-4 | -3,31065 | 14,33741 | 329 | 43 | 286 |
| 1-Oropa- Anakanagomoro-S | -3,26380 | 14,20052 | 273 | 27 | 246 |

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|----------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 2-Youdiou-Dinon-Nogou-S | -3,17005 | 14,27565 | 275 | 29 | 246 |
| 3-Tanoua-S | -3,23290 | 14,31830 | 284 | 39 | 245 |
| 4-Anamoila-S1 | -3,19665 | 14,31095 | 284 | 41 | 244 |
| 5-Anamoila-S2 | -3,19805 | 14,31443 | 283 | 37 | 246 |
| 6-Pel-Kanda-S1 | -3,39353 | 14,13010 | 274 | 30 | 244 |
| 7-Pel-Kanda-S2 | -3,39215 | 14,13262 | 272 | 28 | 244 |
| 8-Koporo-Na-Gomorogara-S1 | -3,35292 | 14,13107 | 273 | 32 | 241 |
| 9-Koporo-Na-Gomorogara-S2 | -3,35432 | 14,13128 | 270 | 33 | 237 |
| 10-Mondoro-S1 | -3,29283 | 14,12265 | 265 | 30 | 236 |
| 11-Wol-Konssogou-S1 | -3,43025 | 14,18657 | 307 | 57 | 250 |
| 12-Wol-Konssogou-S2 | -3,43095 | 14,19018 | 310 | 60 | 250 |
| 13-Wol-Maounde-S | -3,42857 | 14,18893 | 312 | 62 | 250 |
| 14-Sakoun-S | -3,34128 | 14,21658 | 284 | 41 | 243 |
| 15-Kombogourou-Peulh-S2 | -3,24712 | 14,24385 | 276 | 31 | 245 |
| 16-Derou-S1 | -3,29250 | 14,25232 | 281 | 33 | 248 |
| 17-Derou-S2 | -3,29198 | 14,25625 | 280 | 34 | 246 |
| 18-Koporo-Pen-Nogonbolo-S1 | -3,29832 | 14,22638 | 273 | 27 | 246 |
| 19-Koporo-Pen-Nogonbolo-S2 | -3,29878 | 14,22842 | 274 | 29 | 245 |
| 20-Koporo Pen-Penere-S | -3,30193 | 14,22713 | 274 | 29 | 245 |
| 21-Gueourou-S1 | -3,24060 | 14,16928 | 266 | 27 | 239 |
| 22-Gueourou-S2 | -3,24153 | 14,16935 | 263 | 26 | 237 |
| 23-Amako-S | -3,23107 | 14,18742 | 271 | 25 | 246 |
| 24-Saradine-S | -3,16778 | 14,22752 | 274 | 37 | 237 |
| 25-Omonoubere-S | -3,16482 | 14,23170 | 275 | 39 | 236 |
| 26-Gama-S2 | -2,96558 | 14,41058 | 275 | 44 | 231 |
| 27-Kassawa-Dognou | -2,97152 | 14,39842 | 277 | 45 | 232 |
| 28-Kobadie-S | -2,92140 | 14,51568 | 279 | 35 | 244 |
| 29-Soye-S1 | -3,08529 | 14,48827 | 284 | 33 | 251 |
| 30-Soye-S2 | -3,08507 | 14,48872 | 286 | 36 | 250 |
| 31-Mediougo-Ana-S | -3,30278 | 14,34895 | 331 | 51 | 280 |
| 32-Batourou-S | -3,26128 | 14,27537 | 283 | 35 | 249 |
| 33-Amani-Gondom-S1 | -3,28533 | 14,33192 | 303 | 57 | 246 |
| 34-Amani-Gondom-S2 | -3,28565 | 14,33178 | 304 | 57 | 247 |
| 35-Guimto-S | -3,31873 | 14,33067 | 326 | 42 | 284 |
| 36-Samani-Peulh-S | -3,22555 | 14,22848 | 273 | 26 | 247 |
| 37-Sono-Komokan-S | -3,28763 | 14,27843 | 292 | 45 | 247 |
| 38-Sekana-S1 | -3,30480 | 14,29880 | 307 | 59 | 248 |
| 39-Koporo-Pen-Anabirin-S1 | -3,29165 | 14,23988 | 280 | 33 | 247 |
| 40-Koporo-Pen-Anabirin-S2 | -3,29157 | 14,23622 | 275 | 30 | 245 |
| 41-Samani-Dogon-S | -3,22415 | 14,21692 | 274 | 26 | 248 |

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|---------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 42-Samani-Dogon-S | -3,22480 | 14,21825 | 274 | 27 | 247 |
| 43-Kessagourou-S | -3,46238 | 14,05744 | 279 | 43 | 236 |
| 44-Ogodengou-St-elevage-S | -3,17893 | 14,21798 | 270 | 36 | 234 |
| 45-Babel-S | -3,24297 | 14,31408 | 284 | 39 | 245 |
| 46-Ogodourou-Na-S | -3,12348 | 14,22268 | 273 | 41 | 232 |
| 47-Tourou-S1 | -3,12848 | 14,20182 | 269 | 41 | 228 |
| 48-Tourou-S2 | -3,12928 | 14,20163 | 269 | 40 | 229 |
| 49-Souan-S | -3,11385 | 14,23833 | 273 | 42 | 231 |
| 50-Banguel-S | -2,95748 | 14,75495 | 321 | 6 | 315 |
| 51-Sourou-S | -3,14819 | 14,41173 | 285 | 33 | 252 |
| 52-Kombokani-Gomboro-S | -3,37310 | 14,35908 | 330 | 4 | 326 |
| 1-Kani-Bozon | -3,62790 | 14,13368 | 316 | 19 | 297 |
| 2-Kani-Komole-Ogobo | -3,59717 | 14,14627 | 311 | 11 | 300 |
| 3-Kani-Komole-eglise | -3,59700 | 14,14658 | 309 | 11 | 298 |
| 4-Kani-Komole-Dassalam | -3,58408 | 14,15045 | 317 | 19 | 298 |
| 5-Tely-1 | -3,56712 | 14,16152 | 326 | 19 | 307 |
| 6-Tely-2 | -3,56750 | 14,16085 | 319 | 16 | 303 |
| 7-Walia-1 | -3,54815 | 14,17330 | 316 | 18 | 298 |
| 8-Walia-2 | -3,54740 | 14,17438 | 320 | 17 | 303 |
| 9-Ede-Guine-Kada-jardin | -3,53657 | 14,18358 | 322 | 9 | 313 |
| 10-Ede-Guine-Kada | -3,53453 | 14,18248 | 326 | 18 | 308 |
| 11-Pagourou-1 | -3,51058 | 14,20170 | 327 | 19 | 308 |
| 12-Pagourou-2 | -3,50692 | 14,20440 | 327 | 18 | 309 |
| 13-Pagourou-3 | -3,50538 | 14,20470 | 326 | 19 | 307 |
| 14-Yawotalou-1 | -3,49472 | 14,22010 | 333 | 19 | 315 |
| 15-Yawotalou-2 | -3,48942 | 14,22122 | 335 | 22 | 313 |
| 16-Doudiourou | -3,47998 | 14,22820 | 337 | 20 | 317 |
| 17-Nomori-1 | -3,40525 | 14,32933 | 339 | 5 | 334 |
| 18-Nomori-2 | -3,40387 | 14,32852 | 339 | 5 | 334 |
| 19-Nomori-3 | -3,40100 | 14,32708 | 338 | 5 | 333 |
| 20-Idieli-na-1 | -3,38727 | 14,34017 | 333 | 5 | 328 |
| 21-Idieli-na-2 | -3,38772 | 14,34138 | 340 | 4 | 336 |
| 22-Idieli-Gotouga | -3,38700 | 14,33815 | 340 | 5 | 335 |
| 23-Komokani-1 | -3,37308 | 14,35912 | 333 | 6 | 327 |
| 24-Komokani-2 | -3,37263 | 14,35957 | 329 | 5 | 325 |
| 25-Tereli-Kou-1 | -3,34928 | 14,38013 | 322 | 12 | 310 |
| 26-Tereli-Kou-2 | -3,35035 | 14,37838 | 323 | 7 | 316 |
| 27-Amani-Dianogo | -3,33068 | 14,40673 | 316 | 6 | 310 |
| 28-Amani-Soumba | -3,32982 | 14,40862 | 317 | 5 | 312 |
| 29-Irely-Dama | -3,31683 | 14,42502 | 314 | 6 | 308 |

| Identifiant | Coordonnées Géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Piézométrie moyenne (m) |
|---------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 30-Ireli-Da | -3,31028 | 14,43017 | 315 | 5 | 310 |
| 31-Irely-Yene | -3,31038 | 14,43125 | 317 | 6 | 311 |

Annexe 5 Carte des niveaux statiques des années 2010 (d'après les données de Via Sahel)



Annexe 14 Mesures piézométriques des années 1950 sur la plaine du Gondo (d'après les mesures d'Archambault 1951 et Defossez 1955-1957)

| Villages | Coordonnées géographiques | | Niveau statique d'après Archambault 1951(m) | Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m) | Niveau statique moyen (m) | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau piézométrique (m) |
|----------------|---------------------------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | | | |
| Toléouindou | -2,077 | 14,858 | 56 | | 56 | | 269 | 213 |
| Thiamaladio | -1,95 | 14,83 | 54 | | 54 | | 271 | 217 |
| Mondoro | -1,949 | 14,667 | 62 | 61,2 | 62 | | 278 | 216 |
| Guédérou | -2,145 | 14,561 | 60 | 58,6 | 59 | | 278 | 219 |
| Douari | -2,307 | 14,535 | 76 | 73 | 75 | | 267 | 192 |
| Guesséré | -2,443 | 14,469 | 68 | 74 | 71 | | 266 | 195 |
| Tini | -2,602 | 14,427 | 77 | 76,1 | 77 | | 267 | 190 |
| Naouodio | -2,738 | 14,486 | 50 | 47,5 | 49 | | 268 | 219 |
| Bana | -2,825 | 14,458 | 52 | 49,3 | 51 | | 263 | 212 |
| Karakindé | -2,903 | 14,41 | 49 | 44,7 | 47 | 271 | | 224 |
| Naye | -3,039 | 14,433 | 43 | | 43 | 281 | | 238 |
| Madougou | -3,082 | 14,401 | 33 | 31,7 | 32 | 281 | | 249 |
| Domblossogou | -3,093 | 14,356 | 36 | 30,2 | 33 | 280 | | 247 |
| Nangadougou | -3,121 | 14,335 | 38 | | 38 | 282 | | 244 |
| Sedourou | -3,127 | 14,321 | 36 | 34,8 | 35 | 280 | | 245 |
| Youdiou | -3,172 | 14,278 | 34 | 29,4 | 32 | 281 | | 249 |
| Ogodengou | -3,179 | 14,212 | 36 | | 36 | 269 | | 233 |
| Tina | -3,186 | 14,133 | | 19,7 | 20 | 263 | | 243 |
| Koporokénié Pé | -3,298 | 14,226 | 32 | 30,25 | 31 | 275 | | 244 |
| Koporokénié Ma | -3,358 | 14,13 | 35 | | 35 | 272 | | 237 |
| Tendeli | -3,418 | 14,092 | 40 | | 40 | 275 | | 235 |
| Sokora | -3,492 | 14,09 | 32 | | 32 | 305 | | 273 |
| Bankass | -3,517 | 14,078 | 33 | 32,4 | 33 | 300 | | 267 |
| Dimbal | -3,614 | 14,013 | 28 | | 28 | 302 | | 274 |
| Logo | -3,68 | 14,028 | 33 | 29,9 | 31 | | 331 | 300 |
| Garou Ley | -3,739 | 14,029 | 46 | 44,4 | 45 | | 351 | 306 |
| Nassagou | -3,699 | 13,831 | 53 | | 53 | | 322 | 269 |
| Koumi | -3,663 | 13,798 | 33 | | 33 | | 302 | 269 |
| Diallassagou | -3,624 | 13,74 | 25 | 23,4 | 24 | | 283 | 259 |
| Yaléna | -3,715 | 13,701 | | | 0 | | 298 | 298 |
| Ouendiana | -3,657 | 13,704 | 22 | | 22 | | 283 | 261 |
| Tiré | -3,662 | 13,671 | 25 | | 25 | | 285 | 260 |
| Bobosso | -3,673 | 13,661 | 24 | 25 | 25 | | 285 | 260 |
| Tori | -3,707 | 13,617 | 20 | 21 | 21 | | 277 | 256 |
| Oninden Koro | -3,705 | 13,597 | 35 | | 35 | | 274 | 239 |

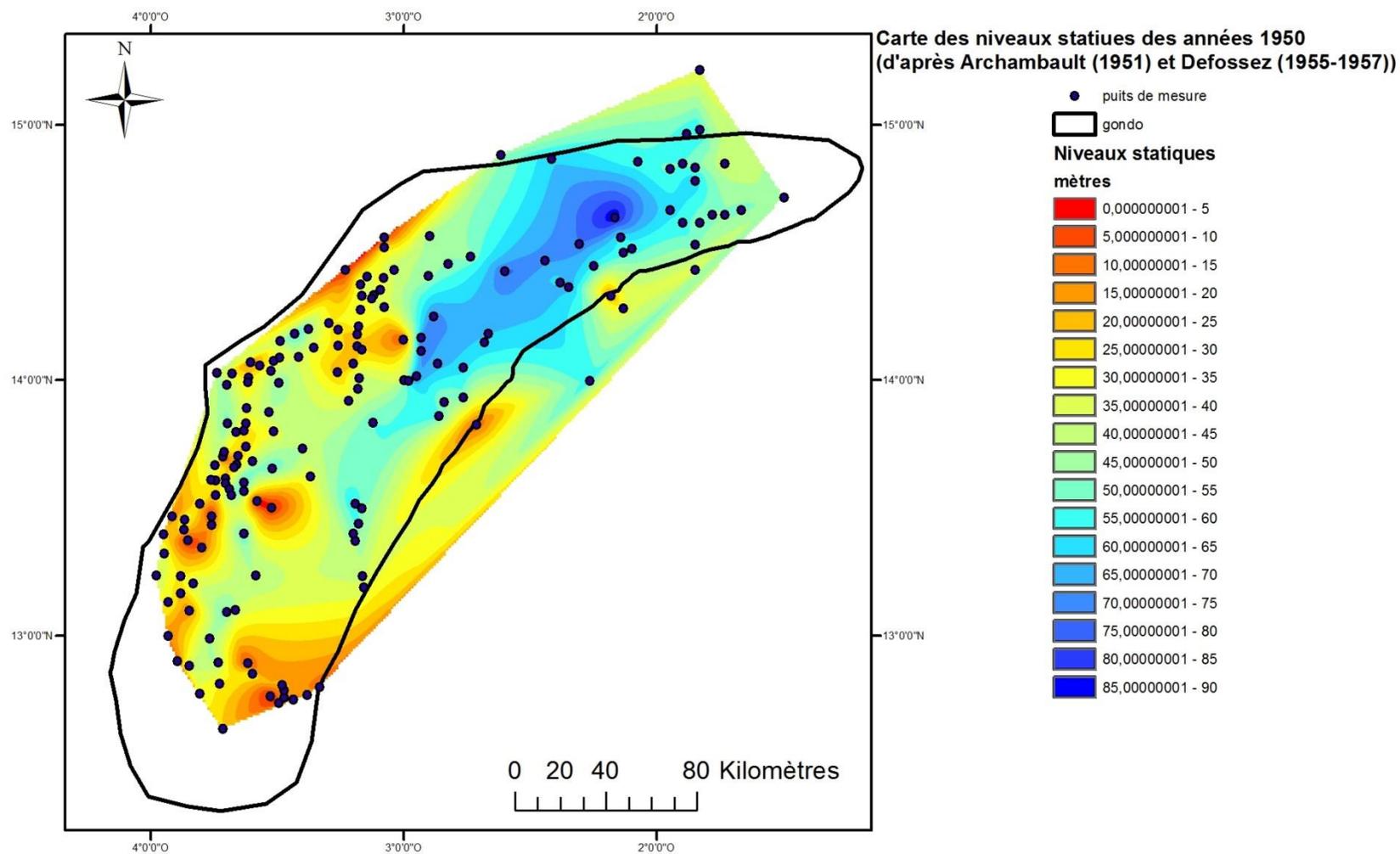
| Villages | Coordonnées géographiques | | Niveau statique d'après Archambault 1951(m) | Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m) | Niveau statique moyen (m) | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau piézométrique (m) |
|----------------|---------------------------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | | | |
| Ardiema | -3,689 | 13,575 | 35 | 42 | 39 | | 269 | 230 |
| Koumbouriba | -3,745 | 13,551 | 21 | 25 | 23 | | 276 | 253 |
| Sokoura | -3,761 | 13,469 | | | 0 | | 280 | 280 |
| Ouenkoro | -3,854 | 13,373 | | | 0 | | 285 | 285 |
| Tinani | -3,581 | 13,527 | | | 0 | | 259 | 259 |
| Poura | -3,523 | 13,501 | | | 0 | | 260 | 260 |
| Diallaye | -3,522 | 13,656 | 56 | | 56 | | 258 | 202 |
| Baï | -3,371 | 13,624 | 37 | 32,5 | 35 | | 256 | 221 |
| Domoni | -3,192 | 13,518 | 62 | | 62 | | 264 | 202 |
| Louta | -3,168 | 13,5 | 50 | 50 | 50 | | 264 | 214 |
| Toeni | -3,181 | 13,439 | 56 | 57,5 | 57 | | 262 | 205 |
| Dagalé | -3,194 | 13,372 | 44 | | 44 | | 264 | 220 |
| Dissi | -3,165 | 13,233 | 43 | | 43 | | 267 | 224 |
| Kouy | -3,16 | 13,189 | 45 | 31 | 38 | | 270 | 232 |
| Moara | -3,333 | 12,8 | 11 | | 11 | | 279 | 268 |
| Léri | -3,383 | 12,767 | 19 | | 19 | | 269 | 250 |
| Koury | -3,495 | 12,737 | 6 | | 6 | | 263 | 257 |
| Sorou | -3,474 | 12,757 | 20 | | 20 | | 256 | 236 |
| Sono S | -3,474 | 12,785 | 21 | | 21 | | 257 | 236 |
| Sono N | -3,481 | 12,807 | 22 | | 22 | | 258 | 236 |
| Siéla | -3,529 | 12,763 | | | 0 | | 265 | 265 |
| Diankogo | -3,729 | 12,813 | 30 | | 30 | | 260 | 230 |
| Soin | -3,808 | 12,774 | 34 | | 34 | | 267 | 233 |
| Bourasso | -3,717 | 12,634 | 25 | | 25 | | 262 | 237 |
| Diam | -3,622 | 13,893 | | 35,5 | 36 | 307 | | 271 |
| Yelega | -3,711 | 13,721 | | 33 | 33 | | 305 | 272 |
| Oboro | -3,744 | 13,609 | | 27 | 27 | | 290 | 263 |
| Boundieri | -3,763 | 13,611 | | 28,5 | 29 | | 290 | 261 |
| Kikille | -3,633 | 13,804 | | 28 | 28 | | 293 | 265 |
| Bankassi | -3,761 | 13,433 | | 16 | 16 | | 284 | 268 |
| Kinsere | -3,7 | 13,094 | | 55,8 | 56 | | 264 | 208 |
| Pe | -3,95 | 13,397 | | 26,1 | 26 | | 320 | 294 |
| Sanan Kadougou | -3,948 | 13,321 | | 38,3 | 38 | | 308 | 270 |
| Siragourou | -3,87 | 13,415 | | 27,7 | 28 | | 289 | 261 |
| Karekui | -3,833 | 13,205 | | 40,1 | 40 | | 271 | 231 |
| Bidi | -3,917 | 13,467 | | 13,2 | 13 | | 308 | 295 |
| Tira | -3,933 | 13,133 | | 33 | 33 | | 285 | 252 |
| Boulamporo | -3,85 | 13,099 | | 15,25 | 15 | | 272 | 257 |

| Villages | Coordonnées géographiques | | Niveau statique d'après Archambault 1951(m) | Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m) | Niveau statique moyen (m) | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau piézométrique (m) |
|----------------|---------------------------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | | | |
| Doubare | -2,863 | 13,86 | | 56,6 | 57 | | 271 | 214 |
| Korokoto | -3,8 | 13,346 | | 10,65 | 11 | | 277 | 266 |
| Tiendougou | -3,585 | 13,236 | | 44,5 | 45 | | 258 | 213 |
| Sougoussi | -3,517 | 13,801 | | 33,6 | 34 | | 268 | 234 |
| Bangassi | -3,978 | 13,237 | | 40,25 | 40 | | 307 | 267 |
| Kende | -3,494 | 13,991 | | 49,5 | 50 | 280 | | 230 |
| Irma I | -2,167 | 14,639 | | 89,8 | 90 | | 277 | 187 |
| Sougou Kadiel | -3,49 | 14,154 | | 43,25 | 43 | 305 | | 262 |
| Torou | -3,002 | 14,159 | | 6,6 | 7 | 263 | | 256 |
| Lagassagou | -3,626 | 13,833 | | 29,9 | 30 | | 298 | 268 |
| Boule | -3,807 | 13,518 | | 28,6 | 29 | | 288 | 259 |
| Seguemara | -3,079 | 14,522 | | 28,8 | 29 | 290 | | 261 |
| Kadiavere | -3,078 | 14,561 | | 2,8 | 3 | 289 | | 286 |
| Endem | -3,001 | 14,002 | | 38,2 | 38 | | 261 | 223 |
| Sorou (bis) | -3,146 | 14,408 | | 37,9 | 38 | 287 | | 249 |
| Tebji | -3,172 | 14,375 | | 42,2 | 42 | 289 | | 247 |
| Boumbou | -3,233 | 14,433 | | 2,2 | 2 | 294 | | 292 |
| Anakanda | -3,168 | 14,331 | | 38,35 | 38 | 285 | | 247 |
| Soumana Gourou | -3,079 | 14,288 | | 37,15 | 37 | 275 | | 238 |
| Bodeouel | -3,178 | 14,008 | | 45,85 | 46 | 260 | | 214 |
| Kourouni | -3,868 | 13,455 | | 35,95 | 36 | | 296 | 260 |
| Kourou Kanda | -3,748 | 13,668 | | 42 | 42 | | 312 | 270 |
| Anamouniela | -3,533 | 13,877 | | 43,6 | 44 | | 280 | 236 |
| Sonkoun | -3,617 | 13,993 | | 29,25 | 29 | 302 | | 273 |
| Kouankoira | -3,896 | 12,9 | | 9 | 9 | | 276 | 267 |
| Sourou 1 | -3,438 | 12,75 | | 8 | 8 | | 262 | 254 |
| Tou | -2,767 | 13,933 | | 53 | 53 | | 276 | 223 |
| Bare Kanda | -3,571 | 14,058 | | 21 | 21 | 294 | | 273 |
| Sadia | -3,606 | 14,072 | | 14,3 | 14 | 306 | | 292 |
| Nene | -3,6 | 13,683 | | 42 | 42 | | 271 | 229 |
| Kareto Kossel | -3,2 | 13,4 | | 52 | 52 | | 262 | 210 |
| Yalo | -3,933 | 13 | | 16 | 16 | | 287 | 271 |
| Barani | -3,883 | 13,167 | | 23,8 | 24 | | 275 | 251 |
| Bogo | -3,883 | 13,233 | | 29 | 29 | | 283 | 254 |
| Oropa | -3,261 | 14,199 | | 26,1 | 26 | 269 | | 243 |
| Temagolo | -3,262 | 14,138 | | 28,2 | 28 | 267 | | 239 |
| Birga | -3,263 | 14,033 | | 21,45 | 21 | 267 | | 246 |
| Goussal | -3,167 | 14,121 | | 25,3 | 25 | 263 | | 238 |

| Villages | Coordonnées géographiques | | Niveau statique d'après Archambault 1951(m) | Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m) | Niveau statique moyen (m) | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau piézométrique (m) |
|-----------------|---------------------------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | | | |
| Sagourou | -3,378 | 14,202 | | 49,15 | 49 | 291 | | 242 |
| Hombo | -2,867 | 14,067 | | 67,8 | 68 | 265 | | 197 |
| Kanhi | -2,767 | 14,05 | | 62 | 62 | | 270 | 208 |
| Tomni (Tongore) | -2,683 | 14,15 | | 64 | 64 | | 273 | 209 |
| Dinangourou | -2,25 | 14,45 | | 58,7 | 59 | | 274 | 215 |
| Andelaye | -3,633 | 13,567 | | 58,8 | 59 | | 260 | 201 |
| Ouol | -3,433 | 14,183 | | 61 | 61 | 307 | | 246 |
| Yadianga | -3,2 | 14,067 | | 19,5 | 20 | 262 | | 242 |
| Sobengourou | -2,667 | 14,183 | | 65 | 65 | | 271 | 206 |
| Guiri | -2,183 | 14,333 | | 15 | 15 | | 313 | 298 |
| Yoro | -2,133 | 14,283 | | 35,8 | 36 | | 295 | 259 |
| Guimini | -2,35 | 14,367 | | 70,4 | 70 | | 285 | 215 |
| Dioguiel | -1,85 | 14,433 | | 37 | 37 | | 299 | 262 |
| Kobou | -1,5 | 14,717 | | 47,5 | 48 | | 264 | 216 |
| Mognekana | -1,667 | 14,667 | | 52 | 52 | | 268 | 216 |
| Garemi | -1,833 | 15,217 | | 34,5 | 35 | | 291 | 256 |
| Pissa | -3,4 | 13,733 | | 46 | 46 | | 259 | 213 |
| Saredina | -1,85 | 14,783 | | 63,5 | 64 | | 269 | 205 |
| Kassaoua | -2,133 | 14,5 | | 58,8 | 59 | | 274 | 215 |
| Sambaladio | -1,85 | 14,833 | | 51 | 51 | | 265 | 214 |
| Yorinderou | -2,1 | 14,517 | | 58 | 58 | | 273 | 215 |
| Tiguila | -1,9 | 14,85 | | 55 | 55 | | 266 | 211 |
| Hamon | -2,933 | 14,167 | | 74,7 | 75 | 260 | | 185 |
| Sebengourou | -1,883 | 14,967 | | 60 | 60 | | 276 | 216 |
| Dougoussa | -1,833 | 14,983 | | 59,5 | 60 | | 273 | 213 |
| Douna | -1,733 | 14,65 | | 49,7 | 50 | | 265 | 215 |
| Niangassagou | -1,783 | 14,65 | | 48,5 | 49 | | 271 | 222 |
| Boundouyerou | -1,733 | 14,85 | | 40,3 | 40 | | 272 | 232 |
| Dionoua | -1,85 | 14,533 | | 53,2 | 53 | | 283 | 230 |
| Toikana | -1,833 | 14,617 | | 50,9 | 51 | | 268 | 217 |
| Malgou | -1,9 | 14,617 | | 57,5 | 58 | | 273 | 215 |
| Gangafani | -2,383 | 14,383 | | 62,3 | 62 | | 274 | 212 |
| Gondoogourou | -2,9 | 14,567 | | 47 | 47 | 289 | | 242 |
| Yorou | -2,883 | 14,25 | | 72,8 | 73 | 263 | | 190 |
| Dim Deima | -2,933 | 14,117 | | 73,2 | 73 | 263 | | 190 |
| Dounde | -3,7 | 13,983 | | 44,95 | 45 | | 319 | 274 |
| Torolli | -3,218 | 13,92 | | 37 | 37 | 258 | | 221 |
| Demoro | -3,183 | 13,967 | | 39 | 39 | 259 | | 220 |

| Villages | Coordonnées géographiques | | Niveau statique d'après Archambault 1951(m) | Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m) | Niveau statique moyen (m) | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau piézométrique (m) |
|---------------|---------------------------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | | | |
| Zon | -3,122 | 13,836 | | 55 | 55 | | 260 | 205 |
| Tinto | -3,525 | 14,038 | | 40 | 40 | 288 | | 248 |
| Douna (bis) | -3,186 | 14,181 | | 20 | 20 | 266 | | 246 |
| Enesse | -2,843 | 13,916 | | 47 | 47 | | 268 | 221 |
| Nomo | -2,715 | 13,826 | | 8,7 | 9 | | 290 | 281 |
| Yale | -2,417 | 14,867 | | 64 | 64 | | 289 | 225 |
| Toula | -2,617 | 14,883 | | 48,5 | 49 | | 274 | 225 |
| Dim Na | -2,983 | 14 | | 67,5 | 68 | | 264 | 196 |
| Dim Sogo | -2,95 | 14,017 | | 70,1 | 70 | | 263 | 193 |
| Yarema | -2,267 | 14 | | 58 | 58 | | 322 | 264 |
| Esserve | -3,667 | 13,1 | | 41 | 41 | | 258 | 217 |
| Tionou | -3,633 | 13,4 | | 56,8 | 57 | | 260 | 203 |
| Diensaye | -3,683 | 13,55 | | 54 | 54 | | 261 | 207 |
| Poura Fouenni | -3,633 | 13,6 | | 61 | 61 | | 265 | 204 |
| Vare | -3,6 | 12,85 | | 32,75 | 33 | | 257 | 224 |
| Cesse | -3,735 | 12,896 | | 46 | 46 | | 262 | 216 |
| Tomboudougou | -3,85 | 12,883 | | 42,25 | 42 | | 268 | 226 |
| Kolerou | -3,767 | 12,988 | | 46 | 46 | | 265 | 219 |
| Salemana | -3,617 | 12,892 | | 3,75 | 4 | | 260 | 256 |

Annexe 15 Carte des niveaux statiques des années 1950 (d'après Archambault (1951) et Defossez (1955-1957))



Annexe 16 Mesures piézométriques des années 1970 (d'après PNUD 1975)

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|---------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 1 - Bormon | -3,2083 | 14,4083 | 297 | | 35 | 262 |
| 2 - Goudiadorou | -3,2264 | 14,3403 | 282 | | 39 | 243 |
| 3 - Binédama | -3,0639 | 14,4583 | 281 | | 35 | 246 |
| 4 - Kengué | -3,0167 | 14,4528 | 286 | | 33 | 253 |
| 5 - Diensagou | -3,0500 | 14,4278 | 283 | | 31 | 252 |
| 6 - Naye | -3,0375 | 14,4250 | 280 | | 31,5 | 249 |
| 7 - Sorou | -3,1472 | 14,4097 | 287 | | 37 | 250 |
| 8 - Gangouroubourou | -3,0222 | 14,3958 | 277 | | 31,9 | 245 |
| 9 - Madougou Peulh | -3,0778 | 14,3806 | 279 | | 33 | 246 |
| 10 - Pourali | -3,1139 | 14,3653 | 282 | | 36,5 | 246 |
| 11 - Yaguen | -3,0222 | 14,3444 | 274 | | 41,5 | 233 |
| 12 - Sanaoro | -3,1361 | 14,3417 | 282 | | 35 | 247 |
| 13 - Nangadorou | -3,1194 | 14,3347 | 280 | | 33 | 247 |
| 14 - Nema | -3,4000 | 14,2917 | 389 | | 52 | 237 |
| 15 - Korolou | -3,3667 | 14,2194 | 292 | | 46,5 | 246 |
| 16 - Saourou | -3,3778 | 14,2056 | 298 | | 50,5 | 248 |
| 17 - Gomou | -3,3361 | 14,2000 | 282 | | 41,5 | 241 |
| 18 - Wol Maoundé | -3,4306 | 14,1875 | 311 | | 56,5 | 255 |
| 19 - Woro | -3,4500 | 14,1806 | 306 | | 53,5 | 253 |
| 20 - Bakon | -3,2139 | 14,3250 | 287 | | 43 | 244 |
| 21 - Anabanga | -3,2306 | 14,3000 | 282 | | 35,5 | 247 |
| 22 - Nema bis | -3,2458 | 14,2958 | 282 | | 35,5 | 247 |
| 23 - Ogobéné | -3,2667 | 14,2917 | 286 | | 40,5 | 246 |
| 24 - Béréli | -3,2194 | 14,2722 | 282 | | 31,5 | 251 |
| 25 - Bathrou | -3,2500 | 14,2708 | 279 | | 35,5 | 244 |
| 26 - Goro | -3,2750 | 14,2611 | 282 | | 36 | 246 |
| 27 - Déri | -3,2917 | 14,2556 | 283 | | 38 | 245 |
| 28 - Youdiou | -3,1681 | 14,2750 | 278 | | 31 | 247 |
| 29 - Kombo Ogourou | -3,2500 | 14,2389 | 276 | | 29,5 | 247 |
| 30 - Samani | -3,2222 | 14,2222 | 273 | | 28 | 245 |
| 31 - Ogodengou | -3,1778 | 14,2167 | 271 | | 35 | 236 |
| 32 - Oropa | -3,2611 | 14,2000 | 270 | | 31,5 | 239 |
| 33 - Don | -3,2861 | 14,1833 | 273 | | 36,5 | 237 |
| 34 - Gomou kanda | -3,3194 | 14,1833 | 278 | | 36,5 | 242 |
| 35 - Douna | -3,1889 | 14,1819 | 266 | | 30 | 236 |
| 36 - Sédourou | -3,1278 | 14,3194 | 280 | | 33,5 | 247 |
| 37 - Nahabéné | -3,1375 | 14,3056 | 280 | | 34 | 246 |
| 38 - Barapiré | -3,0500 | 14,3042 | 271 | | 40,5 | 231 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|----------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 39 - Bandé | -3,0306 | 14,2944 | 272 | | 40,5 | 232 |
| 40 - Samanagoro | -3,0792 | 14,2903 | 275 | | 42 | 233 |
| 41 - Yassi | -3,0500 | 14,2833 | 269 | | 43 | 226 |
| 42 - Patin | -3,1042 | 14,2653 | 275 | | 41 | 234 |
| 43 - Orokou | -3,0583 | 14,2528 | 272 | | 43,5 | 229 |
| 44 - Souan | -3,1111 | 14,2389 | 271 | | 41,5 | 230 |
| 45 - Ogodourou | -3,1167 | 14,2250 | 272 | | 40,5 | 232 |
| 46 - Tourou | -3,1250 | 14,2000 | 268 | | 41 | 227 |
| 47 - Ogodourou Kondo | -3,1208 | 14,1833 | 267 | | 62 | 205 |
| 48 - Dana | -3,0472 | 14,1750 | 265 | | 49 | 216 |
| 49 - Sadia | -3,6111 | 14,0750 | 303 | | 14,5 | 289 |
| 50 - Nangoudama | -3,5000 | 14,1069 | 296 | | 32,5 | 264 |
| 51 - Bankas | -3,5167 | 14,0778 | 299 | | 33,4 | 266 |
| 52 - Dimbal | -3,6153 | 14,0264 | 301 | | 24 | 277 |
| 53 - Ogodiré | -3,5528 | 14,0250 | 292 | | 31,2 | 261 |
| 54 - Sogou | -3,4917 | 14,1556 | 308 | | 36,5 | 272 |
| 55 - Durkou | -3,4667 | 14,1417 | 289 | | 36 | 253 |
| 56 - Iribanga | -3,4500 | 14,1472 | 289 | | 39,5 | 250 |
| 57 - Guengual | -3,4472 | 14,1250 | 280 | | 38,5 | 242 |
| 58 - Sinda | -3,4167 | 14,1306 | 281 | | 33 | 248 |
| 59 - Perkana | -3,3917 | 14,1306 | 275 | | 31 | 244 |
| 60 - Koporo Kénié Na | -3,3528 | 14,1306 | 272 | | 32,8 | 239 |
| 61 - Témama | -3,3333 | 14,1222 | 270 | | 34,5 | 236 |
| 62 - Anamouéla | -3,3611 | 14,1222 | 270 | | 34,5 | 236 |
| 63 - Orogourou | -3,4000 | 14,1194 | 277 | | 32,5 | 245 |
| 64 - Sokora | -3,4917 | 14,0889 | 304 | | 40,5 | 264 |
| 65 - Tendeli | -3,4222 | 14,0889 | 274 | | 40 | 234 |
| 66 - Ogossogou | -3,4528 | 14,0667 | 281 | | 48,5 | 233 |
| 67 - Tanossogou | -3,3917 | 14,0444 | 278 | | 43 | 235 |
| 68 - Bélíma | -3,3333 | 14,1639 | 276 | | 38 | 238 |
| 69 - Djimérou | -3,3139 | 14,1611 | 278 | | 35,5 | 243 |
| 70 - Sembéré | -3,2917 | 14,1444 | 268 | | 31,5 | 237 |
| 71 - Témégolo | -3,2639 | 14,1417 | 267 | | 30 | 237 |
| 72 - Pomboro Dossou | -3,1778 | 14,1514 | 267 | | 37 | 230 |
| 73 - Sassougou | -3,1917 | 14,1389 | 266 | | 36,5 | 230 |
| 74 - Tina | -3,2153 | 14,1194 | 265 | | 36,5 | 229 |
| 75 - Modori | -3,2917 | 14,1222 | 266 | | 32 | 234 |
| 76 - Taounougou | -3,3236 | 14,1056 | 269 | | 32,5 | 237 |
| 77 - M'Pel | -3,2708 | 14,0917 | 263 | | 31,2 | 232 |
| 78 - Yadianga | -3,1889 | 14,0694 | 260 | | 25 | 235 |
| 79 - Témogou Ouro | -3,2778 | 14,0583 | 266 | | 36 | 230 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|--------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 80 - Baraniongolé | -3,2861 | 14,0250 | 265 | | 33,5 | 232 |
| 81 - Anakaga | -3,2917 | 14,0028 | 267 | | 36 | 231 |
| 82 - Droukoro | -3,1778 | 14,0750 | 260 | | 14,5 | 246 |
| 83 - Segnébé | -3,0750 | 14,1500 | 266 | | 43 | 223 |
| 84 - Péné | -3,1250 | 14,1444 | 265 | | 34,5 | 231 |
| 85 - Andakaga | -3,0611 | 14,1347 | 262 | | 11 | 251 |
| 86 - Gouiffa | -3,1667 | 14,1250 | 264 | | 37,5 | 227 |
| 87 - Benbara | -3,1639 | 14,1028 | 258 | | 31,5 | 227 |
| 88 - Koro | -3,0750 | 14,0667 | 263 | | 6,1 | 257 |
| 89 - Sogou bis | -3,1222 | 14,0556 | 257 | | 34 | 223 |
| 90 - Nini | -3,1375 | 14,0194 | 258 | | 15 | 243 |
| 91 - Léré | -3,0653 | 14,2069 | 270 | | 45 | 225 |
| 92 - Douentza | -2,9500 | 15,0000 | | 300 | 5,9 | 294 |
| 93 - Toula | -2,6417 | 14,8556 | | 273 | 49,5 | 224 |
| 94 - Gasé | -2,5500 | 14,8944 | | 274 | 57 | 217 |
| 95 - Bamgel | -2,9500 | 14,7583 | 340 | | 14,2 | 326 |
| 96 - Serma | -2,2750 | 14,8278 | | 277 | 57 | 220 |
| 97 - Gondo Ogourou | -2,9000 | 14,5986 | 301 | | 43,5 | 258 |
| 98 - Endem | -2,9875 | 14,5056 | 286 | | 39,5 | 247 |
| 99 - Douari | -2,3056 | 14,5333 | | 265 | 73 | 192 |
| 100 - Yirma | -2,1639 | 14,6333 | | 274 | 35 | 239 |
| 101 - Bangadié | -2,1028 | 14,5861 | | 270 | 73,5 | 197 |
| 102 - Guédérou | -2,1500 | 14,5972 | | 268 | 59,5 | 209 |
| 103 - Yéremdourou | -2,1056 | 14,5167 | | 273 | 58,5 | 215 |
| 104 - Kassanga | -2,1319 | 14,5056 | | 273 | 59 | 214 |
| 105- Mantéou | -2,9833 | 14,4583 | 280 | | 30 | 250 |
| 106 - Bodowali | -2,8806 | 14,4444 | 272 | | 47 | 225 |
| 107 - Karakindé | -2,9000 | 14,4139 | 272 | | 52,2 | 220 |
| 108 - Kasawa | -2,9750 | 14,3944 | 275 | | 45 | 230 |
| 109 - Nawadié | -2,7417 | 14,4875 | | 269 | 49 | 220 |
| 110 - Daïdourou | -2,6986 | 14,4167 | | 264 | 76 | 188 |
| 111 - Aldouma | -2,6500 | 14,3861 | | 263 | 74,5 | 189 |
| 112 - Diéséré | -2,4500 | 14,4722 | | 264 | 65,2 | 199 |
| 113 - Sari | -2,3528 | 14,4083 | | 276 | 61 | 215 |
| 114 - Gangafani | -2,3972 | 14,3806 | | 277 | 62,7 | 214 |
| 115 - Dinangorou | -2,2444 | 14,4458 | | 276 | 59,5 | 217 |
| 116 - Orotouгна | -2,0167 | 14,4111 | | 294 | 55,5 | 239 |
| 117 - Doma | -2,9000 | 14,3111 | 269 | | 28,5 | 241 |
| 118 - Domni | -2,9917 | 14,2778 | 272 | | 42,5 | 230 |
| 119 - Yourou | -2,8819 | 14,2417 | 262 | | 74 | 188 |
| 120 - Am | -2,9250 | 14,1694 | 264 | | 75 | 189 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|------------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 121 - Gourti | -2,8306 | 14,2667 | | 260 | 73 | 187 |
| 122 - Dioungani | -2,7417 | 14,3167 | | 265 | 73,2 | 192 |
| 123 - Aldouma bis | -2,6778 | 14,3167 | | 265 | 75,5 | 190 |
| 124 - Komni | -2,6042 | 14,3000 | | 265 | 59,2 | 206 |
| 125 - Sabangouma | -2,6528 | 14,1778 | | 271 | 60,6 | 210 |
| 126 - Batou | -2,4917 | 14,3167 | | 270 | 64,5 | 206 |
| 127 - Orowara | -2,8639 | 14,1361 | 263 | | 75,5 | 188 |
| 128 - Lenga (Kokoulou) | -2,1667 | 14,8472 | | 277 | 59,7 | 217 |
| 129 - Isey | -2,0472 | 14,8750 | | 280 | 61,4 | 219 |
| 130 - Yalé | -2,4519 | 14,8000 | | 280 | 69 | 211 |
| 131 - Yirma bis | -2,1667 | 14,6833 | | 279 | 88 | 191 |
| 132 - Diom Kom | -2,2583 | 14,7417 | | 286 | 64,5 | 222 |
| 133 - Niaki | -2,6167 | 14,5306 | | 277 | 91 | 186 |
| 134 - Koba | -2,4500 | 14,5528 | | 268 | 78 | 190 |
| 135 - Féténoti | -1,8750 | 14,9917 | | 272 | 57 | 215 |
| 136 - Korkana | -1,9028 | 14,9722 | | 272 | 55,5 | 217 |
| 137 - Godowaré | -1,7750 | 14,8556 | | 264 | 49,5 | 215 |
| 138 - Boundouérou | -1,7056 | 14,8611 | | 268 | 49 | 219 |
| 139 - Samaladio | -1,9528 | 14,8208 | | 265 | 60,8 | 204 |
| 140 - Sardina | -1,8361 | 14,7722 | | 270 | 61,5 | 209 |
| 141 - Mondoro | -1,9486 | 14,6778 | | 270 | 60,7 | 209 |
| 142 - Moniékana | -1,6681 | 14,6778 | | 270 | 55,5 | 215 |
| 143 - Kobou | -1,5028 | 14,7181 | | 266 | 47 | 219 |
| 144 - Kobo | -1,5222 | 14,6931 | | 266 | 54 | 212 |
| 145 - Toïkana | -1,8375 | 14,6167 | | 267 | 51 | 216 |
| 146 - Banay | -1,8667 | 14,6083 | | 267 | 50,5 | 217 |
| 147 - Bania | -1,8625 | 14,5722 | | 269 | 52,6 | 216 |
| 148 - Dionouga | -1,9389 | 14,5417 | | 269 | 55 | 214 |
| 149 - Niangassagou | -1,7736 | 14,6514 | | 272 | 53 | 219 |
| 150- Douna bis | -1,7389 | 14,6472 | | 266 | 50,5 | 216 |
| 151 - Gano | -2,7861 | 15,0611 | | 312 | 14,5 | 298 |
| 152 - Dougoussa | -1,8333 | 15,0056 | | 270 | 56,5 | 214 |
| 153 - Boumboun | -1,6986 | 15,0222 | | 277 | 52 | 225 |
| 154 - Sokanda | -3,6917 | 13,9986 | | 313 | 36 | 277 |
| 155 - Doundé | -3,7139 | 13,9556 | | 327 | 46,5 | 281 |
| 156 - Konsogou | -3,6306 | 13,9972 | 305 | | 30,5 | 275 |
| 157 - Sonlé | -3,6167 | 13,9986 | 302 | | 28,5 | 274 |
| 158 - Wélingara | -3,5833 | 13,9792 | 299 | | 28,6 | 270 |
| 159 - Guiwagou | -3,5639 | 13,9917 | 293 | | 28,2 | 265 |
| 160 - Soula | -3,5917 | 13,9500 | 300 | | 32,5 | 268 |
| 161 - Koumé | -3,6611 | 13,9306 | 322 | | 52 | 270 |

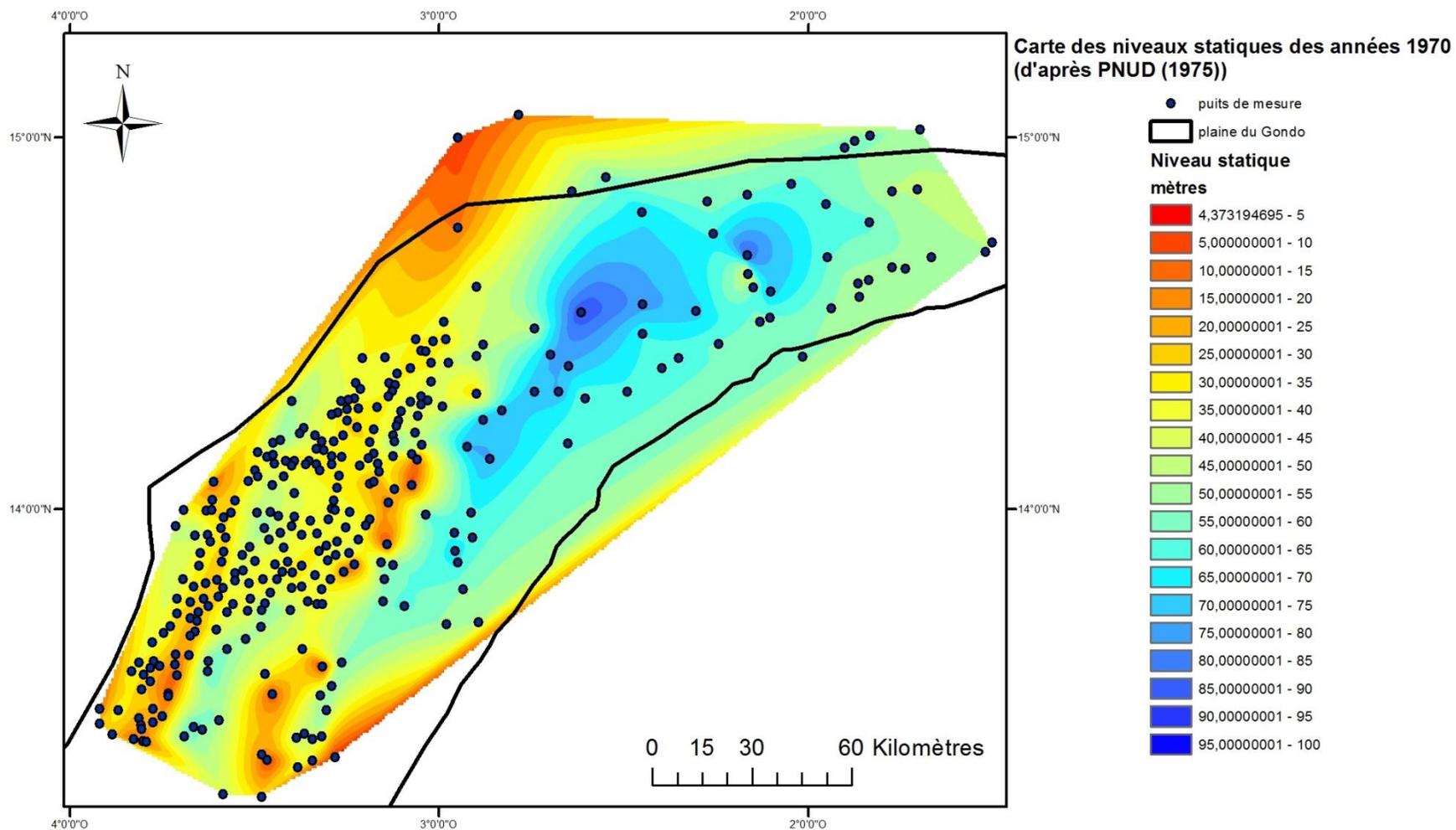
| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|------------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 162 - Foulamdama | -3,6278 | 13,9333 | 312 | | 39 | 273 |
| 163 - Soulakanda | -3,5778 | 13,9250 | 297 | | 27,8 | 269 |
| 164 - Sardina bis | -3,6194 | 13,9153 | 306 | | 35 | 271 |
| 165 - Forodou | -3,5139 | 13,9000 | 280 | | 49,1 | 231 |
| 166 - Basséri | -3,6472 | 13,8847 | | 308 | 36,2 | 272 |
| 167 - Goumouni | -3,5833 | 13,8875 | | 293 | 27,5 | 266 |
| 168 - Anamouniéla | -3,5333 | 13,8778 | | 279 | 44,6 | 234 |
| 169 - Kana | -3,5889 | 13,8611 | | 291 | 25 | 266 |
| 170 - Soubala | -3,5000 | 13,8625 | | 272 | 40,2 | 232 |
| 171 - Saban | -3,6500 | 13,8500 | | 311 | 34 | 277 |
| 172 - Bahada | -3,5319 | 13,8361 | | 272 | 42 | 230 |
| 173 - Kendé | -3,4944 | 13,9931 | 284 | | 48,8 | 235 |
| 174 - Dessogou | -3,4583 | 13,9944 | 279 | | 47 | 232 |
| 175 - Sogara | -3,4361 | 13,9833 | 276 | | 45,6 | 230 |
| 176 - Otékana | -3,3917 | 13,9806 | 275 | | 41 | 234 |
| 177 - Kaniana | -3,4000 | 13,9569 | 271 | | 39,5 | 232 |
| 178 - Baratiguéné | -3,3500 | 13,9708 | 271 | | 37 | 234 |
| 179 - Dougara | -3,4736 | 13,9500 | 278 | | 56,2 | 222 |
| 180 - Péléhourou | -3,4306 | 13,9375 | 276 | | 43 | 233 |
| 181 - Azanga | -3,3722 | 13,9333 | 268 | | 38 | 230 |
| 182 - Soguéna | -3,4611 | 13,9194 | 274 | | 42 | 232 |
| 183 - Gassogou | -3,4222 | 13,8986 | 271 | | 40,9 | 230 |
| 184 - Déna | -3,4444 | 13,8528 | | 269 | 38 | 231 |
| 185 - Sansogou | -3,4111 | 13,8611 | | 268 | 37 | 231 |
| 186 - Téna | -3,3722 | 13,8500 | | 266 | 32,5 | 234 |
| 187 - Ongou | -3,2833 | 14,0000 | 267 | | 36 | 231 |
| 188 - Barayogoulé Kana | -3,2431 | 13,9944 | 263 | | 37,5 | 226 |
| 189 - Kanama | -3,3000 | 13,9750 | 266 | | 37,2 | 229 |
| 190 - Démoro | -3,1889 | 13,9736 | 262 | | 32,5 | 230 |
| 191 - Diga | -3,2528 | 13,9528 | 265 | | 36,5 | 229 |
| 192 - Ledzéko | -3,2000 | 13,9583 | 259 | | 35 | 224 |
| 193 - Saalé | -3,3319 | 13,9361 | 269 | | 38 | 231 |
| 194 - Guéréssogou | -3,2778 | 13,9139 | 265 | | 33,5 | 232 |
| 195 - Toroulou | -3,2194 | 13,9208 | 261 | | 39,5 | 222 |
| 196 - Onbon | -3,3056 | 13,9042 | 261 | | 34 | 227 |
| 197 - Gourousindé | -3,3264 | 13,8889 | | 264 | 33,5 | 231 |
| 198 - Gandourou | -3,2806 | 13,8778 | | 263 | 40 | 223 |
| 199 - Nema ter | -3,2444 | 13,8833 | | 258 | 47 | 211 |
| 200 - Donpélé | -3,3028 | 13,8639 | | 262 | 39,5 | 223 |
| 201 - Tagourou | -3,2292 | 13,8528 | | 260 | 10 | 250 |
| 202 - Kiri | -3,0361 | 13,9861 | | 260 | 60,9 | 199 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|---------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 203 - Saalo | -3,2833 | 13,3347 | | 263 | 3,5 | 260 |
| 204 - Tiendougou | -3,5861 | 13,2361 | | 259 | 45 | 214 |
| 205 - Kawere | -3,4667 | 13,3278 | | 258 | 2,5 | 256 |
| 206 - Bouro | -3,3444 | 13,3250 | | 259 | 32,8 | 226 |
| 207 - Sissac | -3,1417 | 13,9069 | | 260 | 5,5 | 255 |
| 208 - Oula | -3,3833 | 13,3083 | | 259 | 36 | 223 |
| 209 - Yogoubénémé | -3,1583 | 13,8583 | | 261 | 56,5 | 205 |
| 210 - Zon | -3,1250 | 13,8514 | | 259 | 57,5 | 202 |
| 211 - Dom | -3,6944 | 13,8139 | | 321 | 41 | 280 |
| 212 - Ounouna | -3,7111 | 13,7611 | | 314 | 39,5 | 275 |
| 213 - Guingual | -3,6736 | 13,7528 | | 299 | 30 | 269 |
| 214 - Yaléma | -3,7111 | 13,7222 | | 301 | 30,5 | 271 |
| 215 - Mougoué | -3,6736 | 13,7083 | | 293 | 24 | 269 |
| 216 - Toukoro | -3,7292 | 13,6875 | | 301 | 32 | 269 |
| 217 - Kouroukanda | -3,7472 | 13,6681 | | 310 | 39,3 | 271 |
| 218 - Pansadougou | -3,5528 | 13,8306 | | 276 | 42,2 | 234 |
| 219 - Lessogou | -3,6028 | 13,8125 | | 290 | 26,6 | 263 |
| 220 - Tanhama | -3,5542 | 13,8097 | | 278 | 45,3 | 233 |
| 221 - Kikélé | -3,6333 | 13,8028 | | 294 | 28 | 266 |
| 222 - Sogoussi | -3,5153 | 13,8028 | | 268 | 36,5 | 232 |
| 223 - Massé | -3,5861 | 13,7903 | | 285 | 31,2 | 254 |
| 224 - Maka | -3,5986 | 13,7667 | | 286 | 27,3 | 259 |
| 225 - Dia | -3,6389 | 13,7611 | | 289 | 26,5 | 263 |
| 226 - Minima | -3,5125 | 13,7611 | | 267 | 33,5 | 234 |
| 227 - Sokorokanda | -3,5583 | 13,7472 | | 270 | 38,5 | 232 |
| 228 - Dialassagou | -3,6250 | 13,7417 | | 283 | 25,3 | 258 |
| 229 - Baraguina | -3,5750 | 13,7250 | | 271 | 40,5 | 231 |
| 230 - Dinto | -3,6528 | 13,7250 | | 287 | 25,5 | 262 |
| 231 - Wandiana | -3,6569 | 13,7014 | | 284 | 19 | 265 |
| 232 - Néné | -3,6042 | 13,6778 | | 269 | 39,2 | 230 |
| 233 - Sanguala | -3,6611 | 13,6722 | | 281 | 19 | 262 |
| 234 - Koumé bis | -3,6653 | 13,7944 | | 300 | 33 | 267 |
| 235 - Minimakanda | -3,5194 | 13,7278 | | 265 | 37,9 | 227 |
| 236 - Kouloumatinti | -3,4250 | 13,8333 | | 266 | 35 | 231 |
| 237 - Anagara | -3,3986 | 13,8319 | | 265 | 31 | 234 |
| 238 - Anakanda | -3,3361 | 13,8236 | | 262 | 38 | 224 |
| 239 - Aridiana | -3,4778 | 13,8139 | | 269 | 33 | 236 |
| 240 - Koundougou | -3,4403 | 13,8139 | | 266 | 46,4 | 220 |
| 241 - Dian | -3,3722 | 13,7944 | | 260 | 36,5 | 224 |
| 242 - Sodougara | -3,4000 | 13,7903 | | 260 | 38,5 | 222 |
| 243 - Sodo | -3,4569 | 13,7778 | | 263 | 37,4 | 226 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|----------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 244 - Libé | -3,3569 | 13,7542 | | 259 | 36,5 | 223 |
| 245 - Bodogoudou | -3,4722 | 13,7486 | | 263 | 55,8 | 207 |
| 246 - Siratinti | -3,4806 | 13,7306 | | 261 | 58,9 | 202 |
| 247 - Pissa | -3,4028 | 13,7306 | | 259 | 49 | 210 |
| 248 - Lossogou | -3,4833 | 13,6861 | | 255 | 51,5 | 204 |
| 249 - Babouro | -3,2583 | 13,8333 | | 259 | 14,5 | 245 |
| 250 - Douré | -3,2944 | 13,8139 | | 261 | 37 | 224 |
| 251 - Niamia | -3,3194 | 13,7861 | | 260 | 36,5 | 224 |
| 252 - Bouré | -3,3306 | 13,7472 | | 259 | 35,5 | 224 |
| 253 - Baradougou | -3,3167 | 13,7472 | | 259 | 36 | 223 |
| 254 - Sogou ter | -3,1494 | 13,8139 | | 257 | 56 | 201 |
| 255 - Lourougan | -3,1528 | 13,7542 | | 258 | 57,9 | 200 |
| 256 - M'Bana | -3,0944 | 13,7417 | | 261 | 61,5 | 200 |
| 257 - Bobosso | -3,6736 | 13,6611 | | 285 | 19,5 | 266 |
| 258 - Sodjinadou | -3,7778 | 13,6444 | | 314 | 39,5 | 275 |
| 259 - Tori | -3,7139 | 13,6111 | | 279 | 21,3 | 258 |
| 260 - Bérinbé | -3,6778 | 13,6097 | | 274 | 19,5 | 255 |
| 261 - Madina Ali | -3,8139 | 13,5889 | | 306 | 34 | 272 |
| 262 - Wankorowéli | -3,7736 | 13,5931 | | 288 | 31,5 | 257 |
| 263 - Srabougou | -3,7167 | 13,5833 | | 275 | 18,5 | 257 |
| 264 - Sè | -3,7583 | 13,5806 | | 287 | 24 | 263 |
| 265 - Wéréguara | -3,7833 | 13,5750 | | 290 | 28,8 | 261 |
| 266 -Mankanou Oubéré | -3,8333 | 13,5667 | | 310 | 34,5 | 276 |
| 267 - Mankanou | -3,8000 | 13,5569 | | 297 | 31,5 | 266 |
| 268 - Kolonkan | -3,7111 | 13,5556 | | 269 | 9,5 | 260 |
| 269 - Tégué | -3,7833 | 13,5389 | | 286 | 24 | 262 |
| 270 - Boulé | -3,8069 | 13,5167 | | 287 | 27 | 260 |
| 271 - Sokoura | -3,7333 | 13,5056 | | 272 | 11,5 | 261 |
| 272 - Dialaye | -3,5250 | 13,6528 | | 258 | 52,2 | 206 |
| 273 - Mooro | -3,5750 | 13,6250 | | 260 | 57 | 203 |
| 274 - Poura Foueni | -3,6250 | 13,5931 | | 264 | 58,5 | 206 |
| 275 - Andélaye | -3,6278 | 13,5667 | | 258 | 61,4 | 197 |
| 276 - Bai | -3,3708 | 13,6250 | | 259 | 37,2 | 222 |
| 277 - Songoré | -3,4722 | 13,5583 | | 258 | 37,2 | 221 |
| 278 - Goéré | -3,4528 | 13,5042 | | 254 | 8,5 | 246 |
| 279 - Saé | -3,2639 | 13,5903 | | 257 | 56 | 201 |
| 280 - Minta | -3,3167 | 13,5778 | | 259 | 2,5 | 257 |
| 281 - Oufou | -3,2911 | 13,5264 | | 260 | 55,5 | 205 |
| 282- Zéréma | -3,3222 | 13,5014 | | 260 | 49 | 211 |
| 283 - Bidi | -3,9194 | 13,4653 | | 309 | 14 | 295 |

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Altitude SRTM (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) |
|-------------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 284 - Kourouni | -3,8694 | 13,4611 | | 295 | 35,5 | 260 |
| 285 - Saran | -3,9208 | 13,4250 | | 304 | 27 | 277 |
| 286 - Yalankoro | -3,8861 | 13,3958 | | 288 | 28 | 260 |
| 287 - Massakana Wori | -3,7333 | 13,4986 | | 276 | 10,5 | 266 |
| 288 - Souhé | -3,4819 | 13,2278 | | 255 | 28 | 227 |
| 289 - Djigan | -3,7750 | 13,4653 | | 278 | 26,5 | 252 |
| 290 - Sirikélé | -3,8139 | 13,4389 | | 280 | 21,5 | 259 |
| 291 - Lanfiéra | -3,7500 | 13,4444 | | 275 | 19,5 | 256 |
| 292 - Nion | -3,7764 | 13,4292 | | 278 | 18,5 | 260 |
| 293 - Férobé | -3,8083 | 13,4208 | | 291 | 25 | 266 |
| 294 - Mabéré | -3,8056 | 13,4111 | | 292 | 26 | 266 |
| 295 - Wankoro | -3,8278 | 13,3833 | | 285 | 10,6 | 274 |
| 296 - Diarédé | -3,8028 | 13,3778 | | 286 | 12 | 274 |
| 297 - Bankoma | -3,7944 | 13,3764 | | 284 | 15,5 | 269 |
| 298 - Tindé | -3,6903 | 13,3917 | | 262 | 58,5 | 204 |
| 299 - Soumba | -3,6653 | 13,4167 | | 260 | 67,9 | 192 |
| 300 - Ganida | -3,5972 | 13,4333 | | 256 | 53 | 203 |
| 301 - Tionou | -3,6417 | 13,4083 | | 261 | 54,5 | 207 |
| 302 - Sogué | -3,3875 | 13,3875 | | 258 | 46 | 212 |
| 303 - Saalé bis | -3,3653 | 13,3986 | | 259 | 48,5 | 211 |
| 304 - Ira | -3,3431 | 13,3833 | | 257 | 46 | 211 |
| 305 - Karé | -3,4806 | 13,3417 | | 260 | 17,5 | 243 |
| 306 - Dissa | -3,3056 | 13,4611 | | 258 | 56,5 | 202 |
| 307 - Dien | -3,3181 | 13,3917 | | 261 | 46 | 215 |
| 308- Gomesso | -2,9139 | 13,9917 | | 262 | 64 | 198 |
| 309 - Bargo | -2,9583 | 13,9389 | | 263 | 63,5 | 200 |
| 310 - Bi Nangabara Boma | -2,9111 | 13,9250 | | 262 | 63,5 | 199 |
| 311 - Déero | -2,9569 | 13,8889 | | 263 | 67,5 | 196 |
| 312 - Worodourou | -2,9500 | 13,8583 | | 267 | 67,5 | 200 |
| 313 - Tibiri | -2,9361 | 13,7861 | | 267 | 54,5 | 213 |
| 314 - Saïma | -2,8944 | 13,6986 | | 273 | 50,5 | 223 |
| 315 - Gokou | -2,9806 | 13,6917 | | 266 | 53,5 | 213 |

Annexe 17 Carte des niveaux statiques des années 1970 (d'après le PNUD (1975))



Annexe 18 Puits dont le niveau piézométrique est en discordance avec la carte piézométrique des années 2010 (d'après les mesures de l'ONG Via Sahel)

| Identifiant | Coordonnée géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique moyen (m) | Niveau piézométrique moyen (m) |
|---------------------|--------------------------|----------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | |
| 10-Bassogou | -3,24186 | 14,35453 | 295 | 58,07 | 236,93 |
| 17-Namtoulaye-Amani | -3,27635 | 14,33928 | 305 | 75,02 | 229,98 |
| 85-Kassawa-Dognou- | -2,97163 | 14,39805 | 276 | 61 | 215 |
| 90-Soye | -3,08309 | 14,49199 | 286 | 47,5 | 238,5 |
| 98-Kobadie | -2,92293 | 14,51514 | 270 | 36,35 | 233,65 |
| 116-Doma-Da | -2,85399 | 14,31431 | 266 | 10,4 | 255,6 |
| 122-Songobourou-2 | -3,27644 | 14,34398 | 304 | 65,86 | 238,14 |
| 140-Bamguel-Velde | -2,94196 | 14,77324 | 315 | 32,825 | 282,175 |

Annexe 19 Puits Via Sahel captant probablement l'Infracambrien

| Identifiant | Coordonnées géographiques | | Altitude REF 3D (m) | Niveau statique (m) | Niveau piézométrique (m) | Profond du puits (m) |
|--------------------------------|---------------------------|----------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|
| | Long DD | Lat DD | | | | |
| 77-Tourou-Maraicher | -3,12642 | 14,20236 | 274 | 44,8 | 229,2 | 58,2 |
| 84-Gondo-Ogorou | -2,90295 | 14,56890 | 287 | 42,4 | 244,6 | 46,5 |
| 85-Kassawa-Dognou- | -2,97163 | 14,39805 | 276 | 99,9 | 215 | 61,7 |
| 90-Soye | -3,08309 | 14,49199 | 285 | 47,5 | 237,5 | 49,1 |
| 94-Amako | -3,22803 | 14,18705 | 266 | 24,6 | 241,4 | 33,8 |
| 98-Kobadie | -2,92293 | 14,51514 | 270 | 35,45 | 234,55 | 39,45 |
| 113-Gangarabouro | -3,03069 | 14,40162 | 276 | 36 | 240 | 38 |
| 120-Omonoubere | -3,16454 | 14,23085 | 272 | 32,8 | 239,2 | 33,4 |
| 137-Korokoum | -3,29368 | 14,21251 | 276 | 29 | 247 | 34 |
| 138-Koporo-Pen-Nogobolo-Koun-2 | -3,29552 | 14,22439 | 276 | 30,17 | 245,83 | 33,86 |
| 152-Dianweli | -3,51066 | 14,04135 | 999 | 36,3 | 248,7 | 37 |
| 140-Bamguel-Velde | -2,94196 | 14,77324 | 999 | 33,05 | 284,95 | 35,75 |

Grid Volume Computations

Tue May 27 17:20:05 2014

Upper Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul volume aquifere
CT\piezo 2013.grd
Grid Size: 100 rows x 100 columns

X Minimum: 436648
X Maximum: 510455
X Spacing: 745.52525252525

Y Minimum: 1542706
Y Maximum: 1631223
Y Spacing: 894.111111111111

Z Minimum: 227.87482128896
Z Maximum: 335.22117631612

Lower Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul volume aquifere CT\toit
calcaire.grd
Grid Size: 100 rows x 100 columns

X Minimum: 436648
X Maximum: 510455
X Spacing: 745.52525252525

Y Minimum: 1542706
Y Maximum: 1631223
Y Spacing: 894.111111111111

Z Minimum: 187.22241493138
Z Maximum: 309.52314661918

Volumes

Z Scale Factor: 1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule: 25271153778.317
Simpson's Rule: 25336802958.934
Simpson's 3/8 Rule: 25301632888.904

Cut & Fill Volumes

| | |
|-------------------------|-----------------|
| Positive Volume [Cut]: | 28558702545.259 |
| Negative Volume [Fill]: | 3287548766.9416 |
| Net Volume [Cut-Fill]: | 25271153778.317 |

Areas

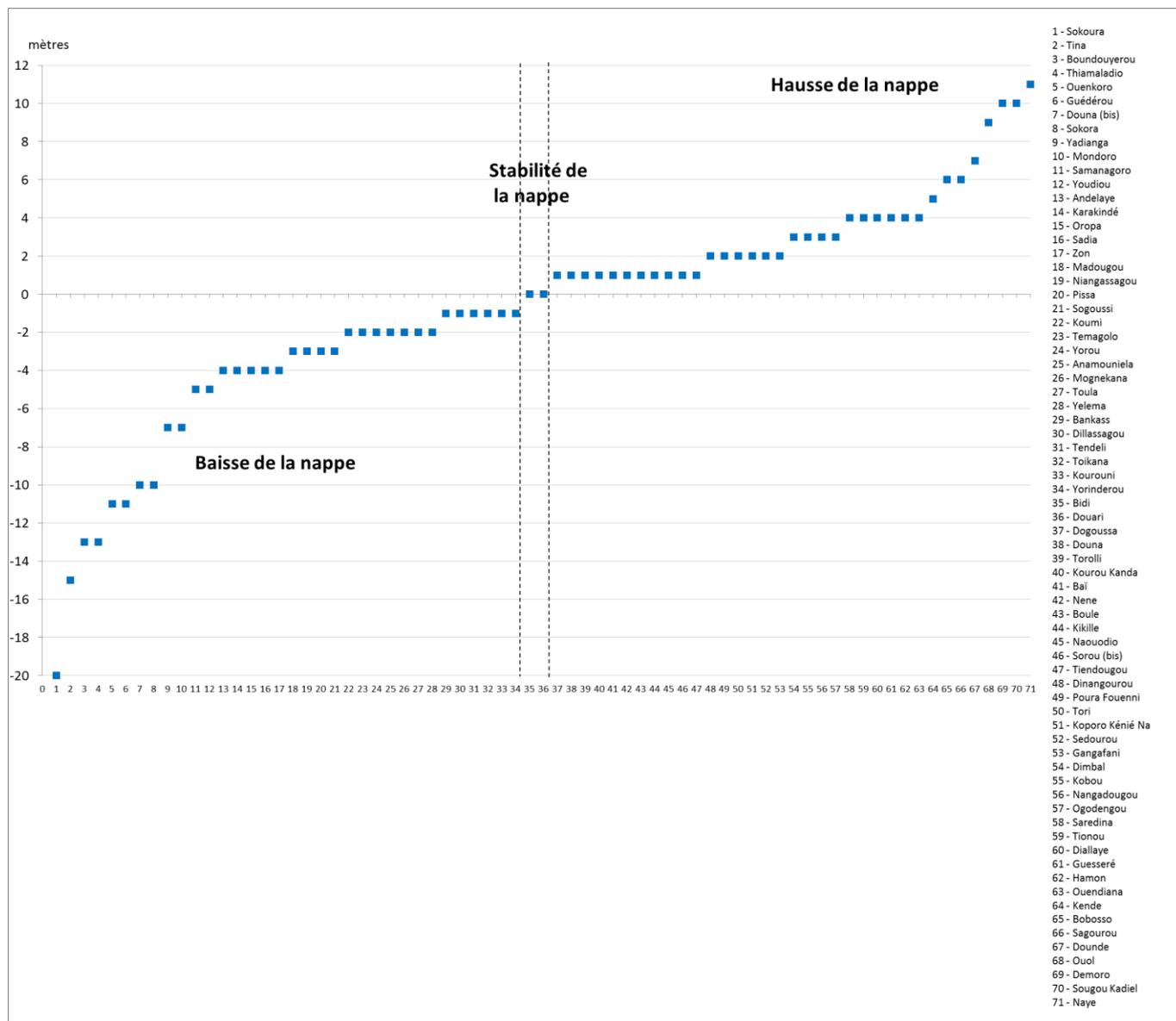
Planar Areas

| | |
|------------------------------|-----------------|
| Positive Planar Area [Cut]: | 1798778443.9013 |
| Negative Planar Area [Fill]: | 577921145.71657 |
| Blanked Planar Area: | 4156474629.3822 |
| Total Planar Area: | 6533174219 |

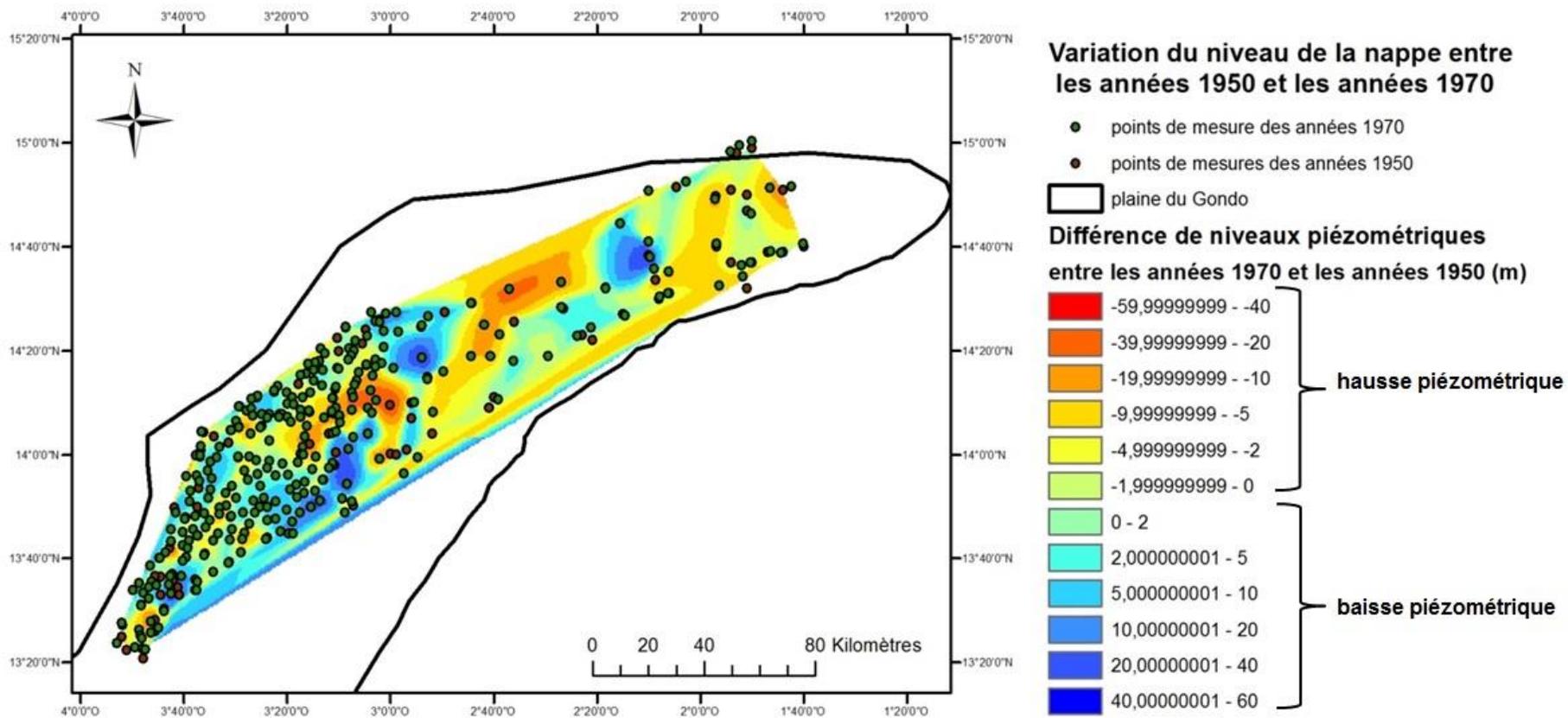
Surface Areas

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| Positive Surface Area [Cut]: | 1798799002.2928 |
| Negative Surface Area [Fill]: | 577925017.17246 |

Annexe 21 Ecart piézométrique classés (années 1970 – années 1950) sur la plaine du Gondo



Annexe 22 Variation du niveau piézométrique entre 1950 et 1970 sur une zone de densité comparable



Annexe 23 Calcul de différence de volume entre la piézométrie des années 1970 et des années 1950, sous Surfer

Grid Volume Computations

Tue May 20 16:45:50 2014

Upper Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul de volume\années 70
dans zone à comparer 70-50.grd
Grid Size: 100 rows x 80 columns

X Minimum: 1478898
X Maximum: 1656776
X Spacing: 2251.6202531646

Y Minimum: 405812
Y Maximum: 643417
Y Spacing: 2400.0505050505

Z Minimum: 187.14587328115
Z Maximum: 280.58023732472

Lower Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul de volume\années 50
dans zone à comparer 70-50.grd
Grid Size: 100 rows x 80 columns

X Minimum: 1478898
X Maximum: 1656776
X Spacing: 2251.6202531646

Y Minimum: 405812
Y Maximum: 643417
Y Spacing: 2400.0505050505

Z Minimum: 187.41803828885
Z Maximum: 293.65826635215

Volumes

Z Scale Factor: 1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule: -9967368773.7016
Simpson's Rule: -9749051099.8707
Simpson's 3/8 Rule: -9908433169.6721

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]: 29353803252.314
Negative Volume [Fill]: 39321172026.015
Net Volume [Cut-Fill]: -9967368773.7016

Areas

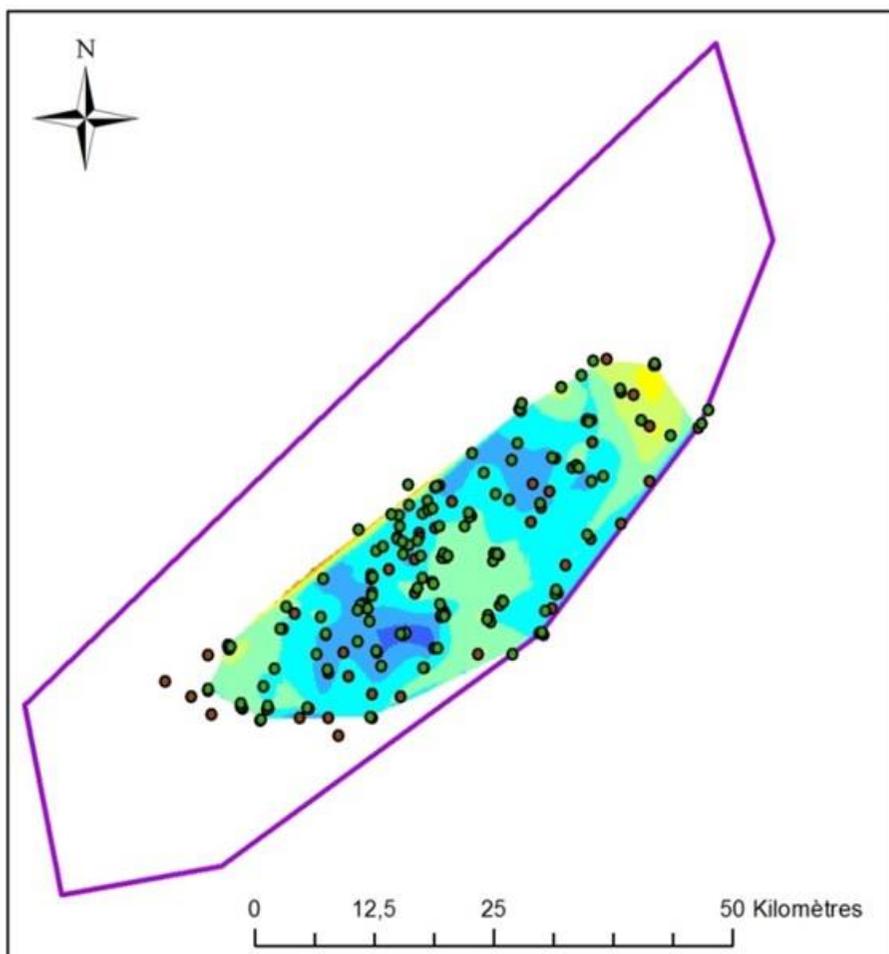
Planar Areas

Positive Planar Area [Cut]: 4911294022.4474
Negative Planar Area [Fill]: 6618144939.6246
Blanked Planar Area: 30735263227.928
Total Planar Area: 42264702190

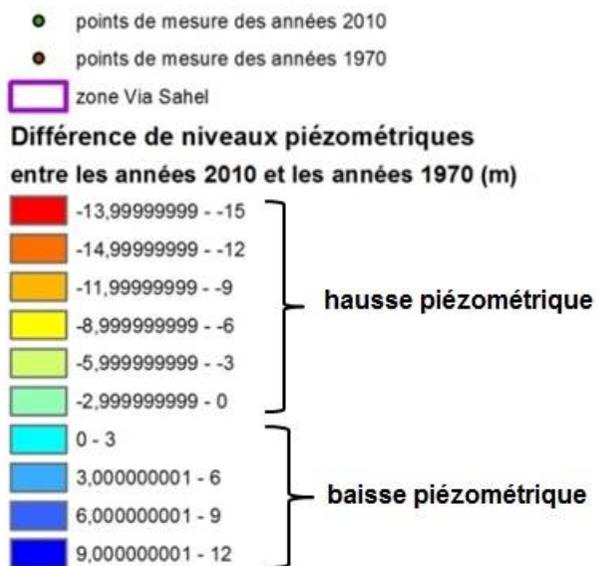
Surface Areas

Positive Surface Area [Cut]: 4911310540.5004
Negative Surface Area [Fill]: 6618158258.8041

Annexe 24 Variation du niveau piézométrique entre 1970 et 2010 sur une zone de points de densité comparable



Variation du niveau de la nappe entre les années 1970 et les années 2010



Annexe 25 Calcul de différence de volume entre la piézométrie des années 2010 et des années 1970, sous Surfer

Grid Volume Computations

Wed May 07 15:36:45 2014

Upper Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul de volume\puits VS et sup dans zone à comparer.grd
Grid Size: 70 rows x 100 columns

X Minimum: 446940
X Maximum: 502695
X Spacing: 563.18181818182

Y Minimum: 1559424
Y Maximum: 1598257
Y Spacing: 562.79710144928

Z Minimum: 227.95390159849
Z Maximum: 251.7476340508

Lower Surface

Grid File Name: C:\Users\lahubert\Desktop\Stage VSH\BD\calcul de volume\puits Bro dans zone à comparer.grd
Grid Size: 70 rows x 100 columns

X Minimum: 446940
X Maximum: 502695
X Spacing: 563.18181818182

Y Minimum: 1559424
Y Maximum: 1598257
Y Spacing: 562.79710144928

Z Minimum: 209.13163312202
Z Maximum: 268.9570768229

Volumes

Z Scale Factor: 1

Total Volumes by:

Trapezoidal Rule: 560296297.46958
Simpson's Rule: 559751772.512

Simpson's 3/8 Rule: 560569869.38502

Cut & Fill Volumes

Positive Volume [Cut]: 1149944145.1474
Negative Volume [Fill]: 589647847.67784
Net Volume [Cut-Fill]: 560296297.46957

Areas

Planar Areas

Positive Planar Area [Cut]: 500936239.26776
Negative Planar Area [Fill]: 289713233.86465
Blanked Planar Area: 1374484441.8676
Total Planar Area: 2165133915

Surface Areas

Positive Surface Area [Cut]: 500936906.36561
Negative Surface Area [Fill]: 289713521.60376