



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 4000km^2 , 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/km^2 . 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/km^2 . 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 $4,2\text{km}^2$. Pour comparaison, pour une densité de population d'environ 30hab/km^2 , on trouve en moyenne un ouvrage tous les 10km^2 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.

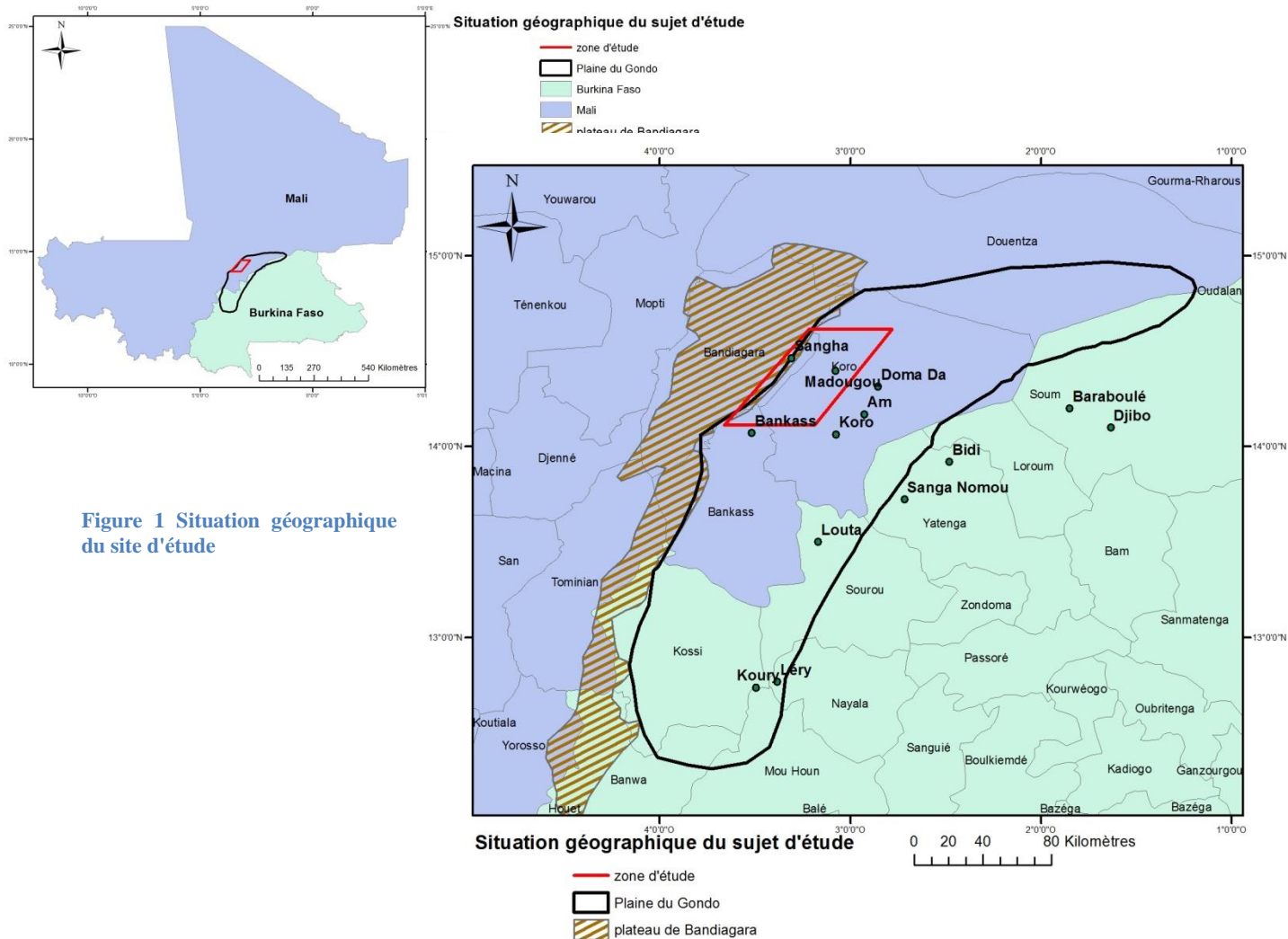


Figure 1 Situation géographique du site d'étude

II.1.2. Climat

La zone d'étude se situe en climat sahélien. Les précipitations sur cette zone sont régies par les variations verticales de la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT), interface entre les masses d'air sec provenant du Nord (l'Harmattan) et les masses d'air humide provenant du Sud (la Mousson). La ZCIT se déplace vers le Nord entre janvier et août, pour atteindre la latitude nord de 20°, puis redescend vers le Sud l'autre partie de l'année pour atteindre la latitude nord de 5°. Ce phénomène conditionne la saison des pluies qui dure, au pays Dogon, de mai à octobre (voir Fig. 2).

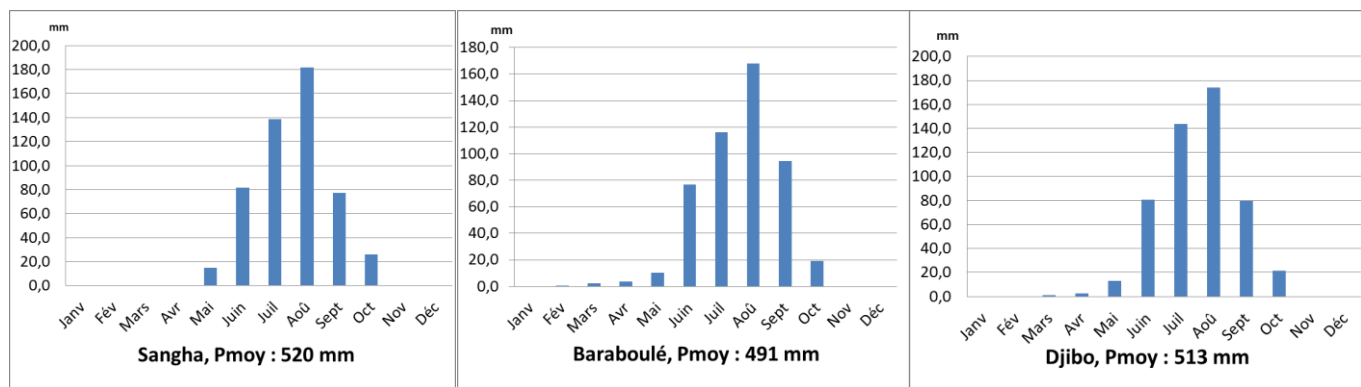


Figure 2 Variations des pluies mensuelles interannuelles à Djibo, Baraboulé et Sangha entre 2001 et 2013

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.

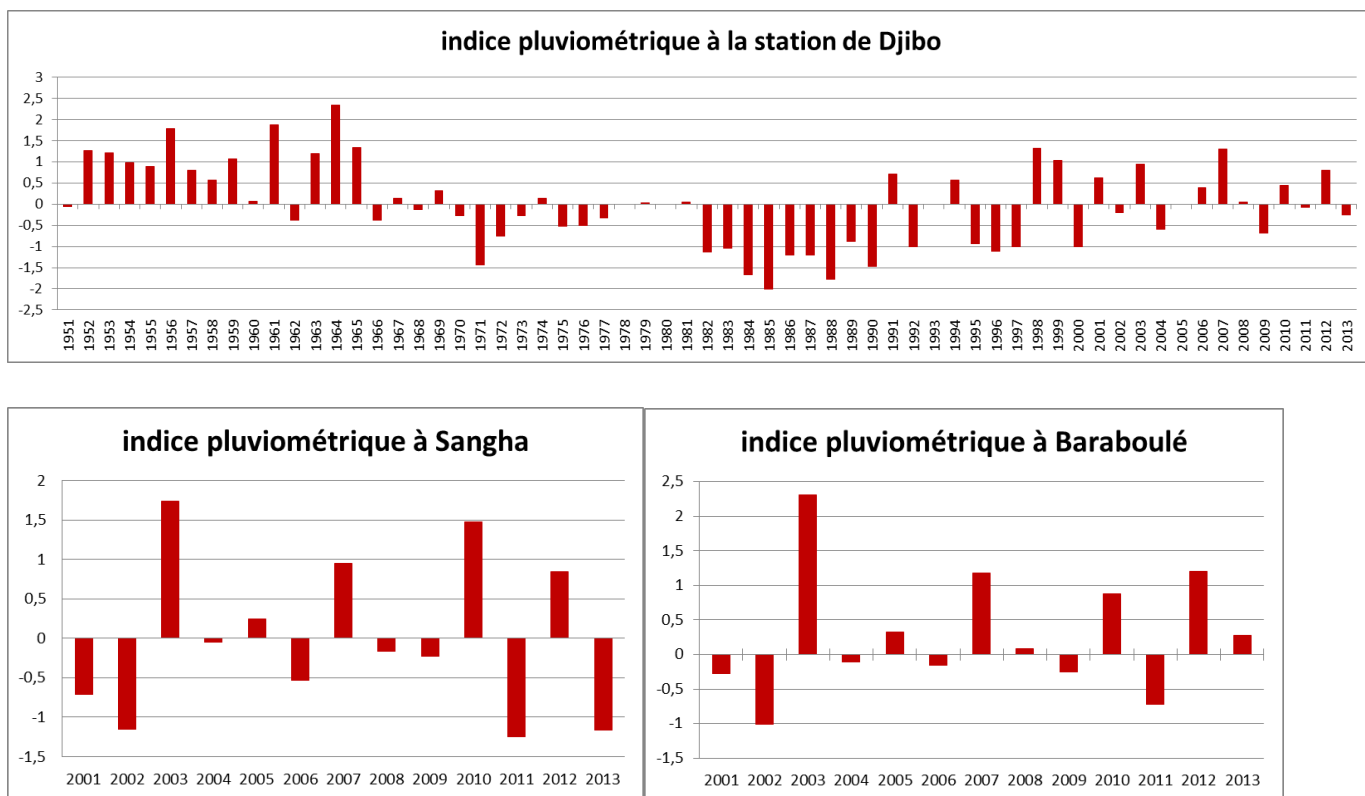


Figure 3 Variations de l'indice pluviométrique à Djibo (entre 1951 et 2013) et à Baraboulé et Sangha (entre 2001 et 2013)

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).

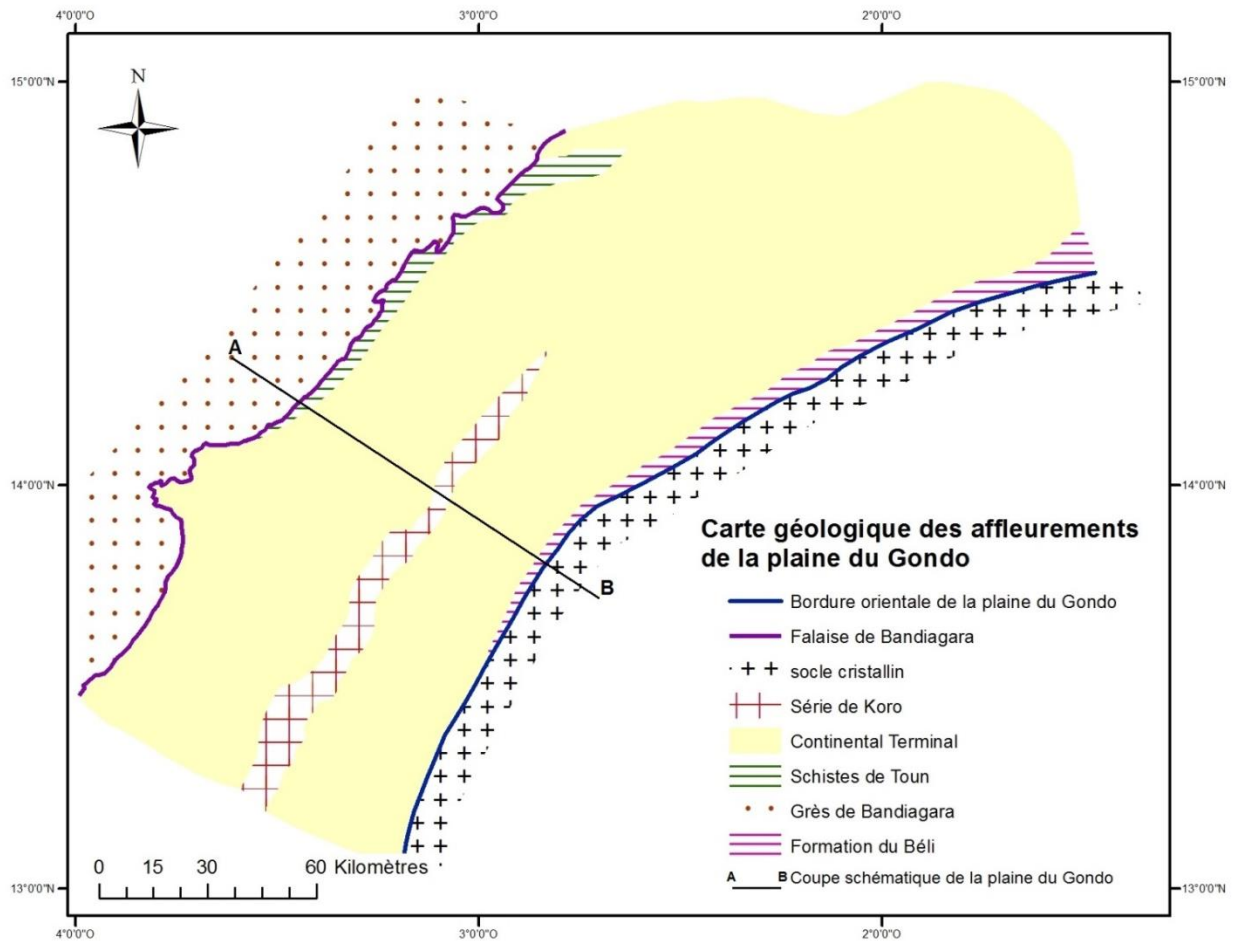


Figure 4 Carte géologique des affleurements de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975)

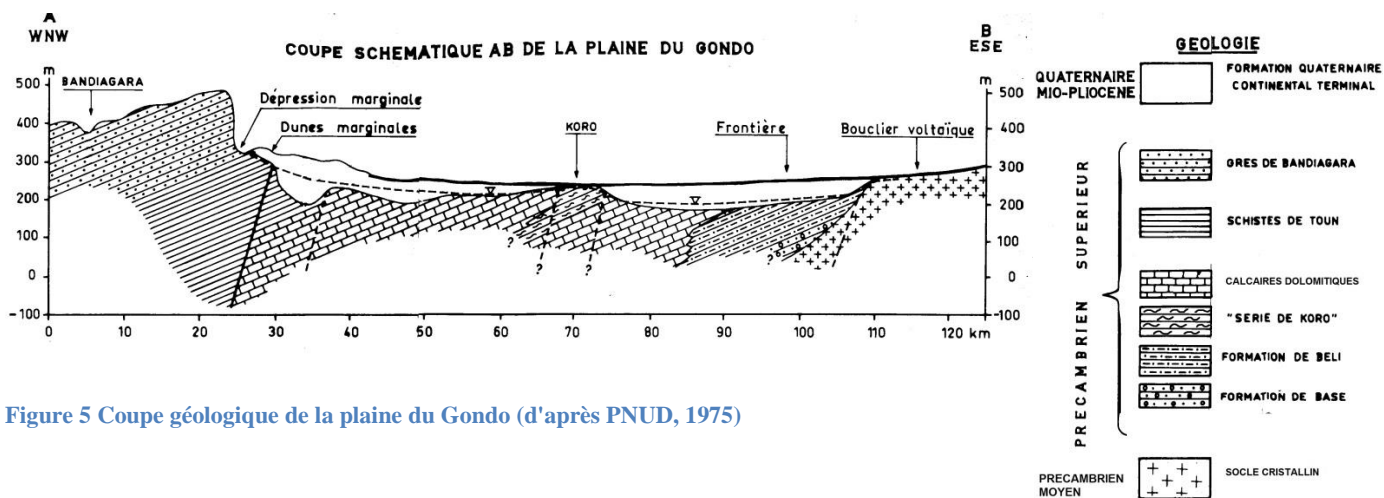


Figure 5 Coupe géologique de la plaine du Gondo (d'après PNUD, 1975)

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).

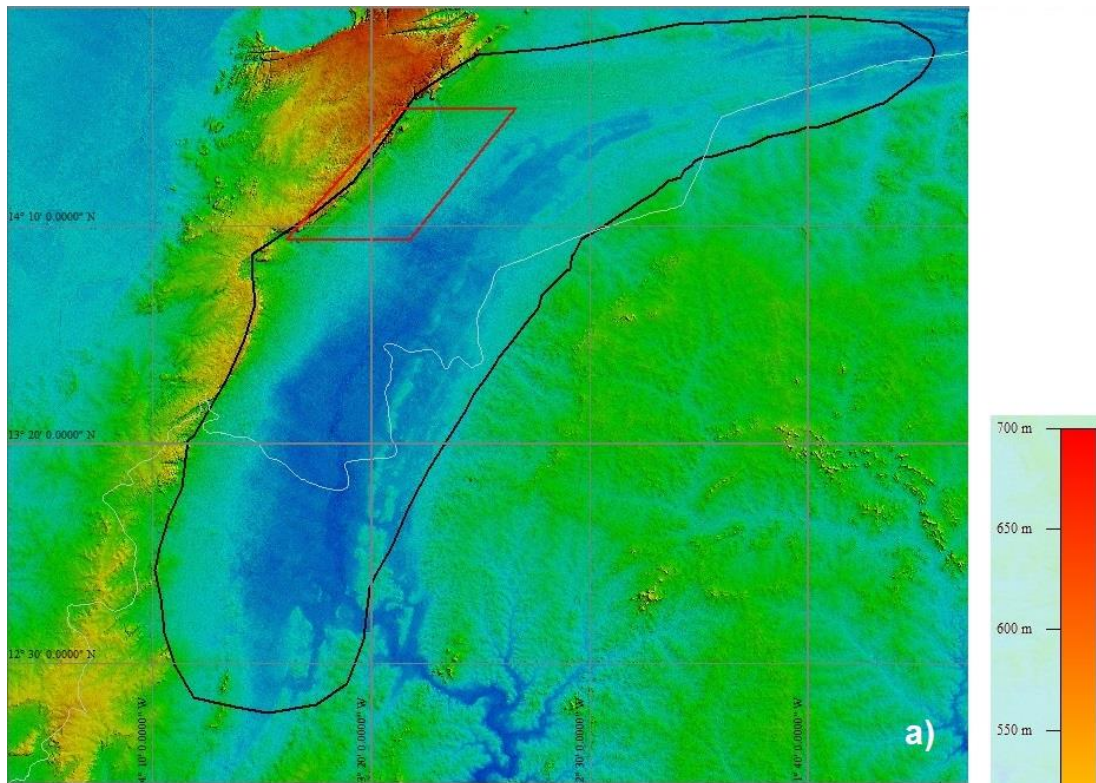
Remarquons pour terminer que, dans les calcaires, les failles sont souvent colmatées par des dépôts argileux ou de calcite, où l'eau circule mal (Scanvic, 1983). C'est d'ailleurs ce

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

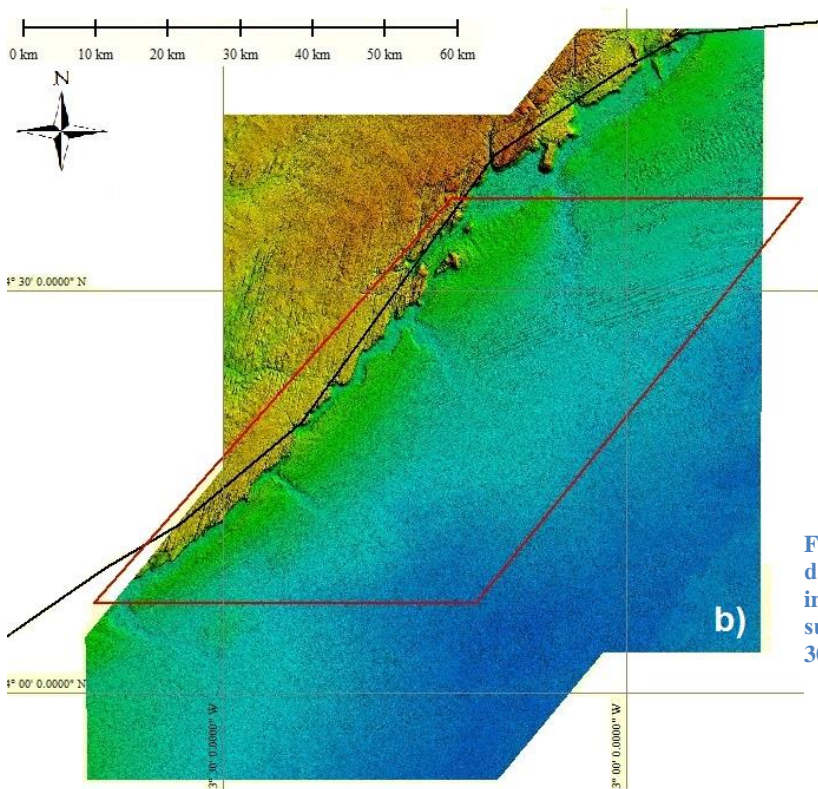
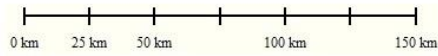


Figure 6 a) MNT SRTM sur la plaine du Gondo, d'une résolution spatiale de 90m, acquis par interférométrie radar ; b) MNE Référence 3D sur la zone d'étude, d'une résolution spatiale de 30m, acquis par stéréoscopie le satellite SPOT5

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.

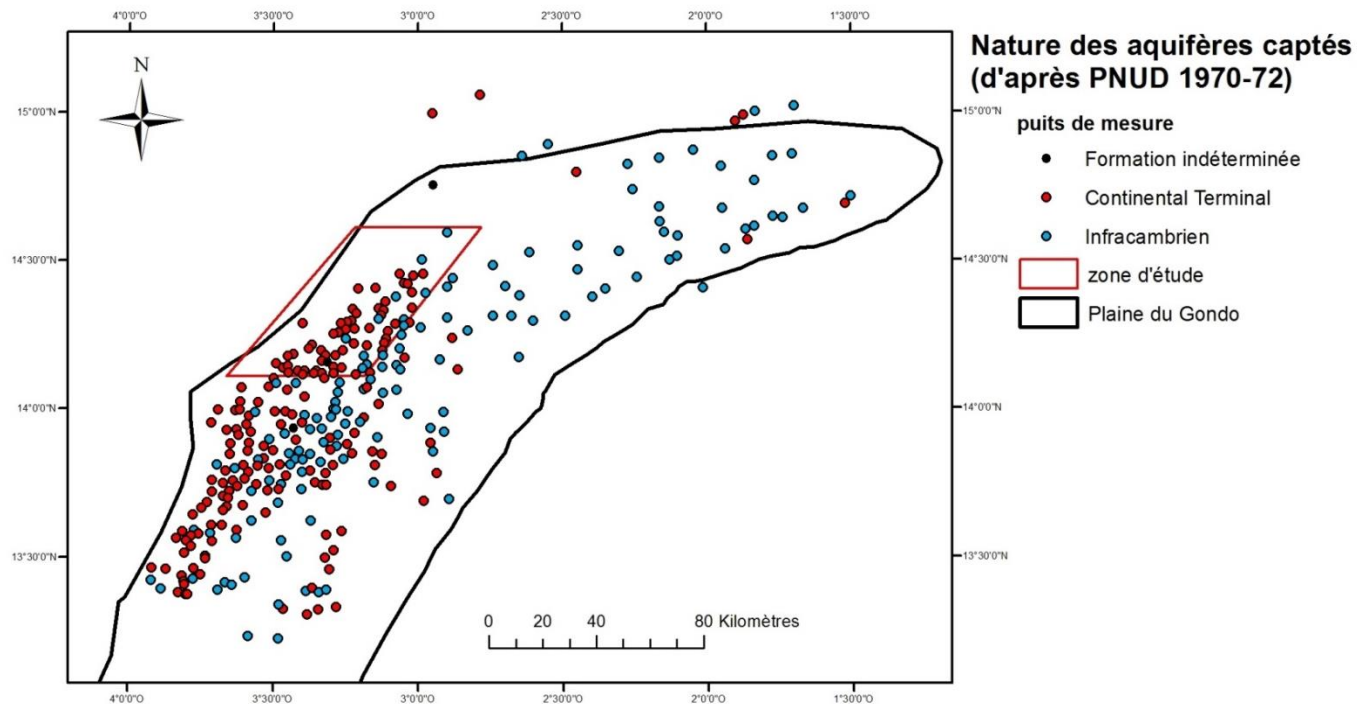


Figure 7 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone (d'après PNUD, 1975)

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.

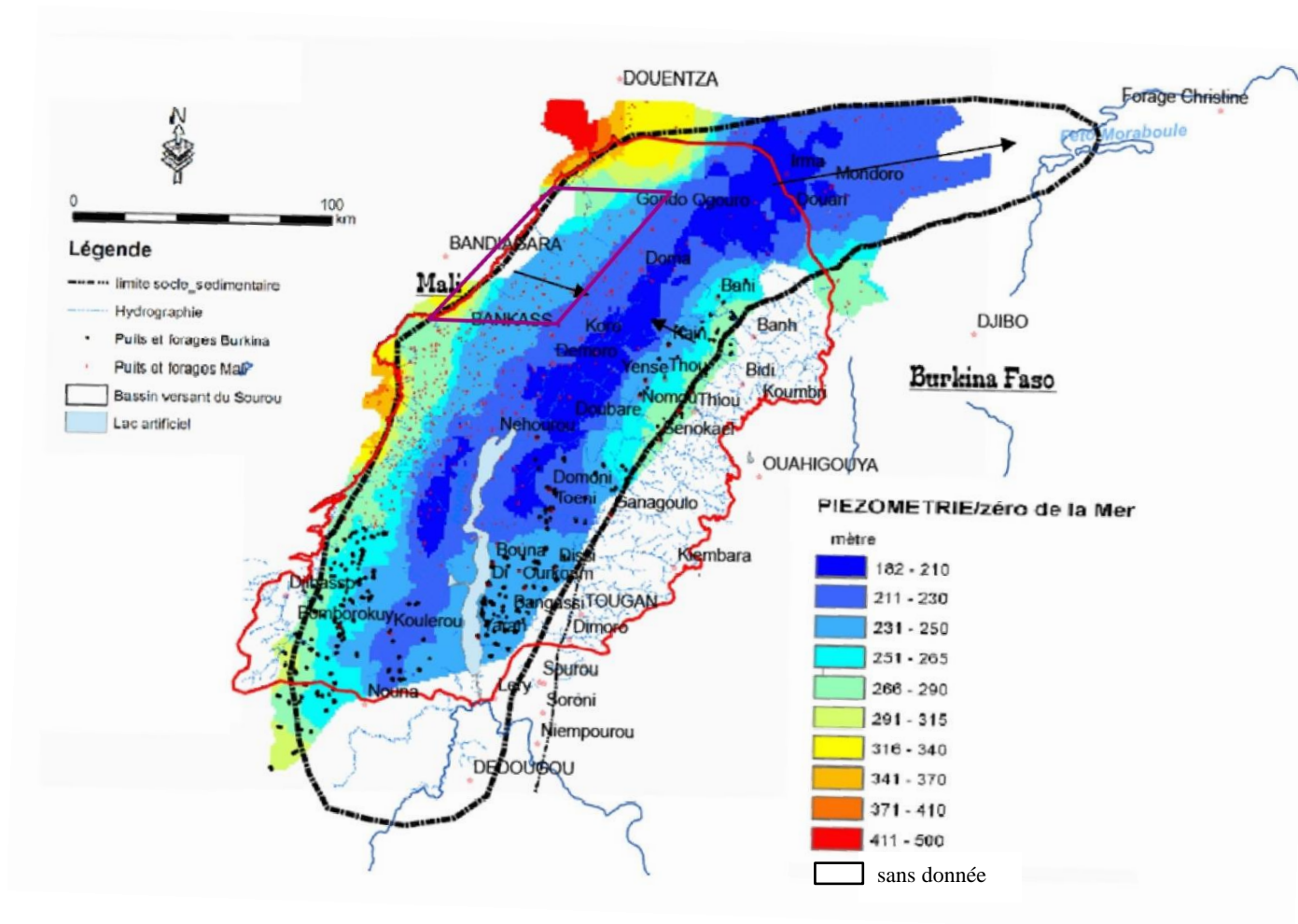


Figure 8 Carte piézométrique de la fin des années 2000 (d'après Koussoubé, 2010)

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).

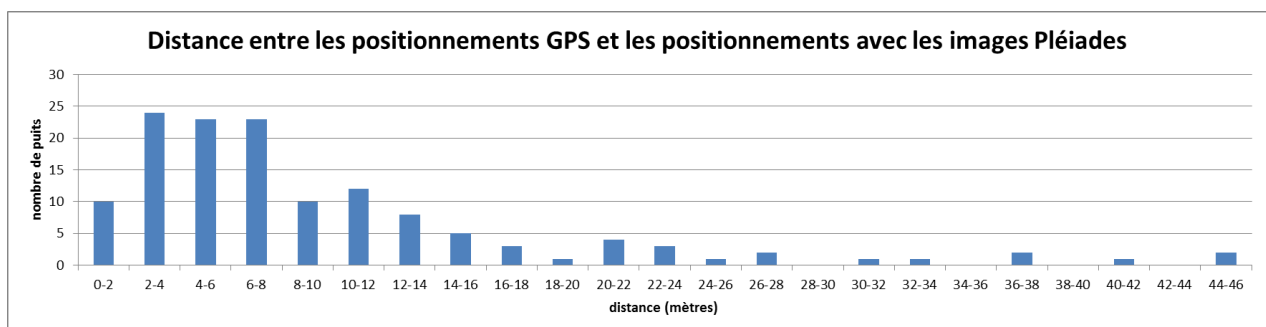


Figure 9 Histogramme des distances entre les positionnements GPS et les positionnements à l'aide des images Pléiades; 6 mesures n'ont pas été mises sur l'histogramme par souci de visibilité, elles ont pour valeur 230m, 215m, 98m, 80m, 70m et 50m.

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.

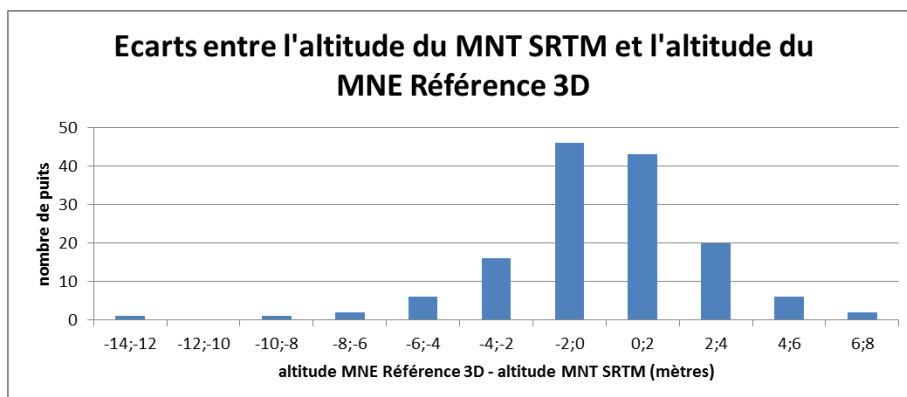


Figure 10 Histogramme des écarts d'altitudes entre le MNT SRTM et le MNE Référence 3D

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 :

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

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.

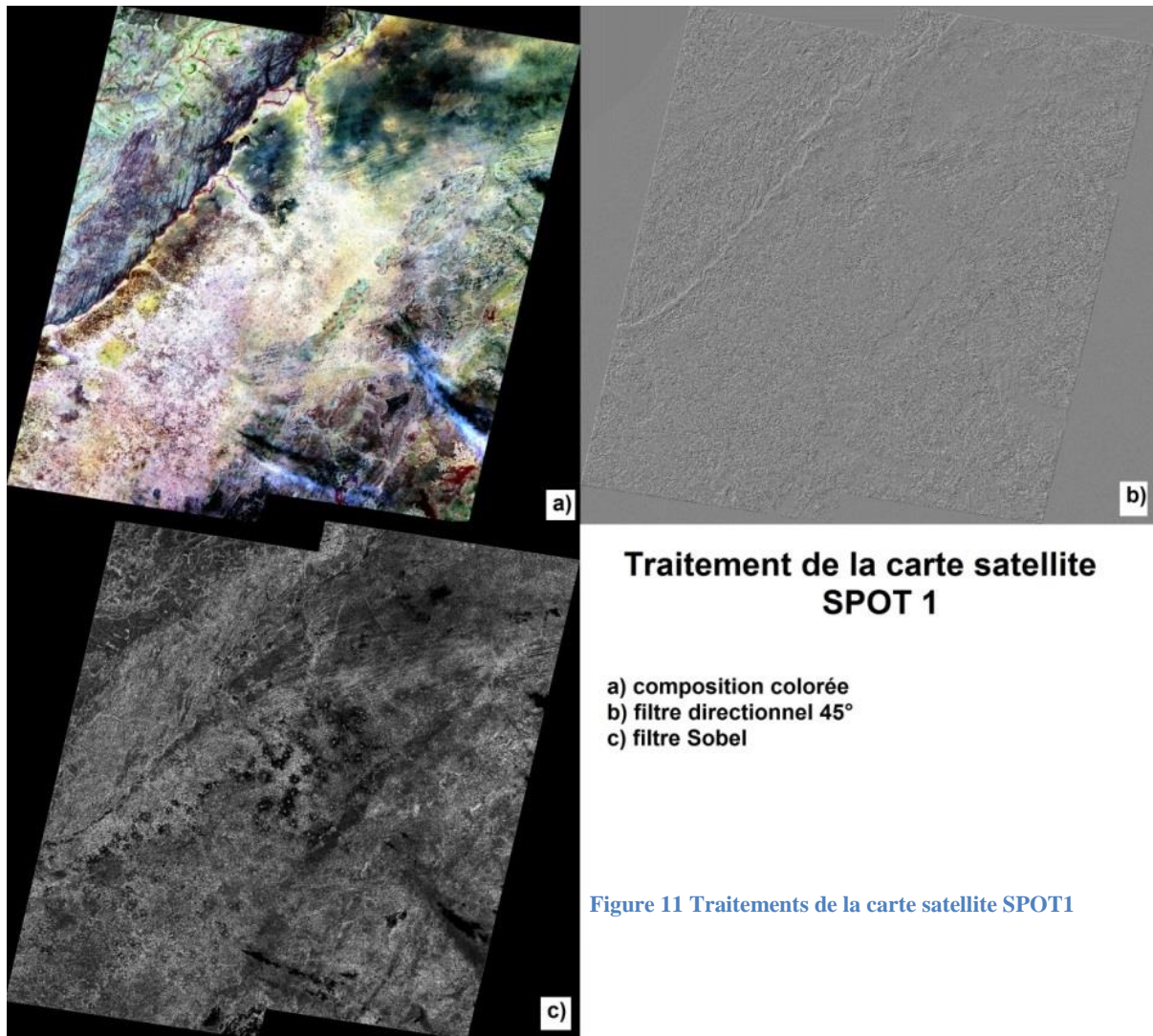
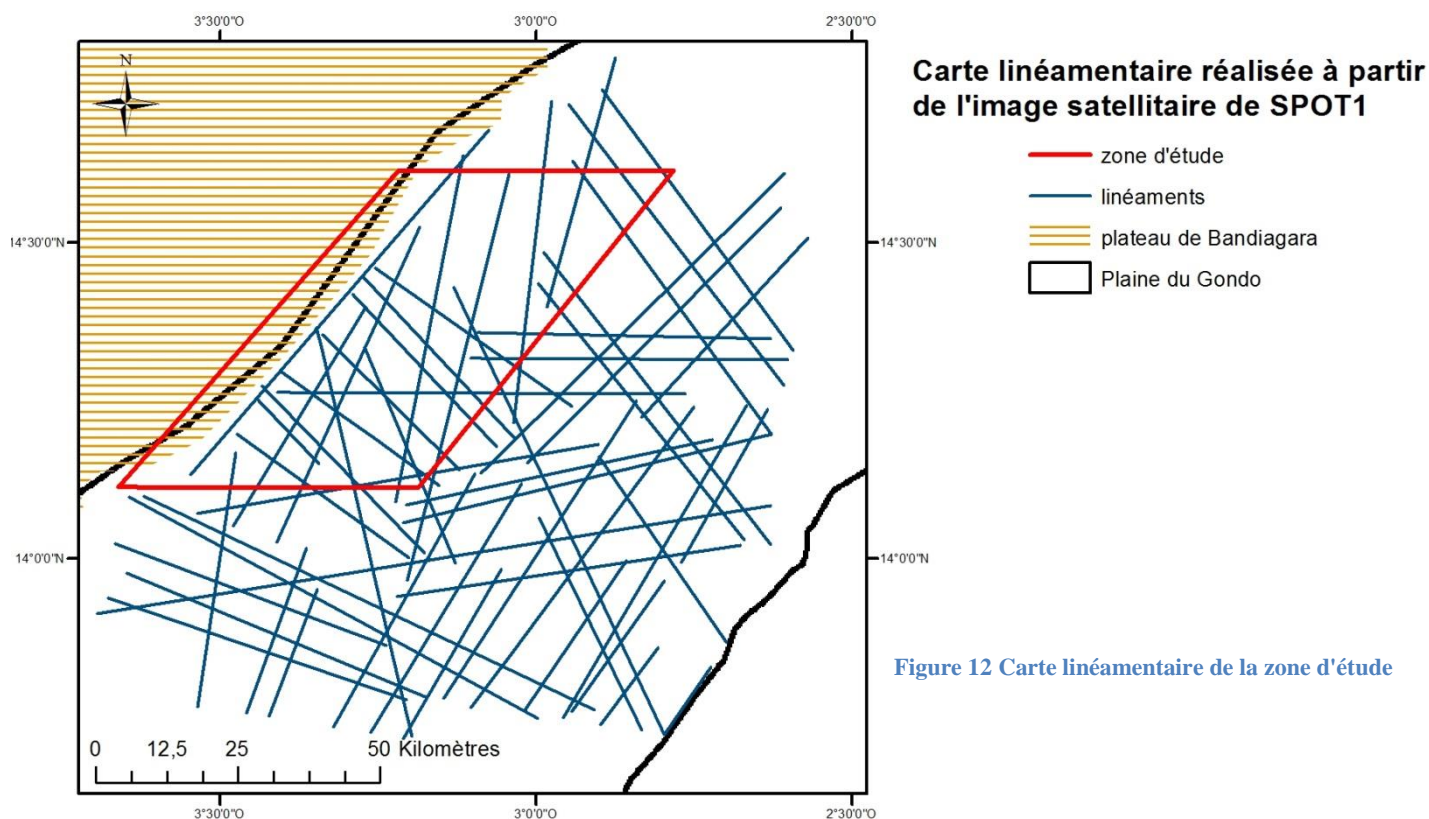


Figure 11 Traitements de la carte satellite SPOT1

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

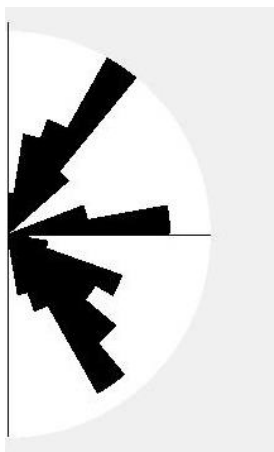


Figure 13 Diagramme polaire des orientations linéamentaires

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%.

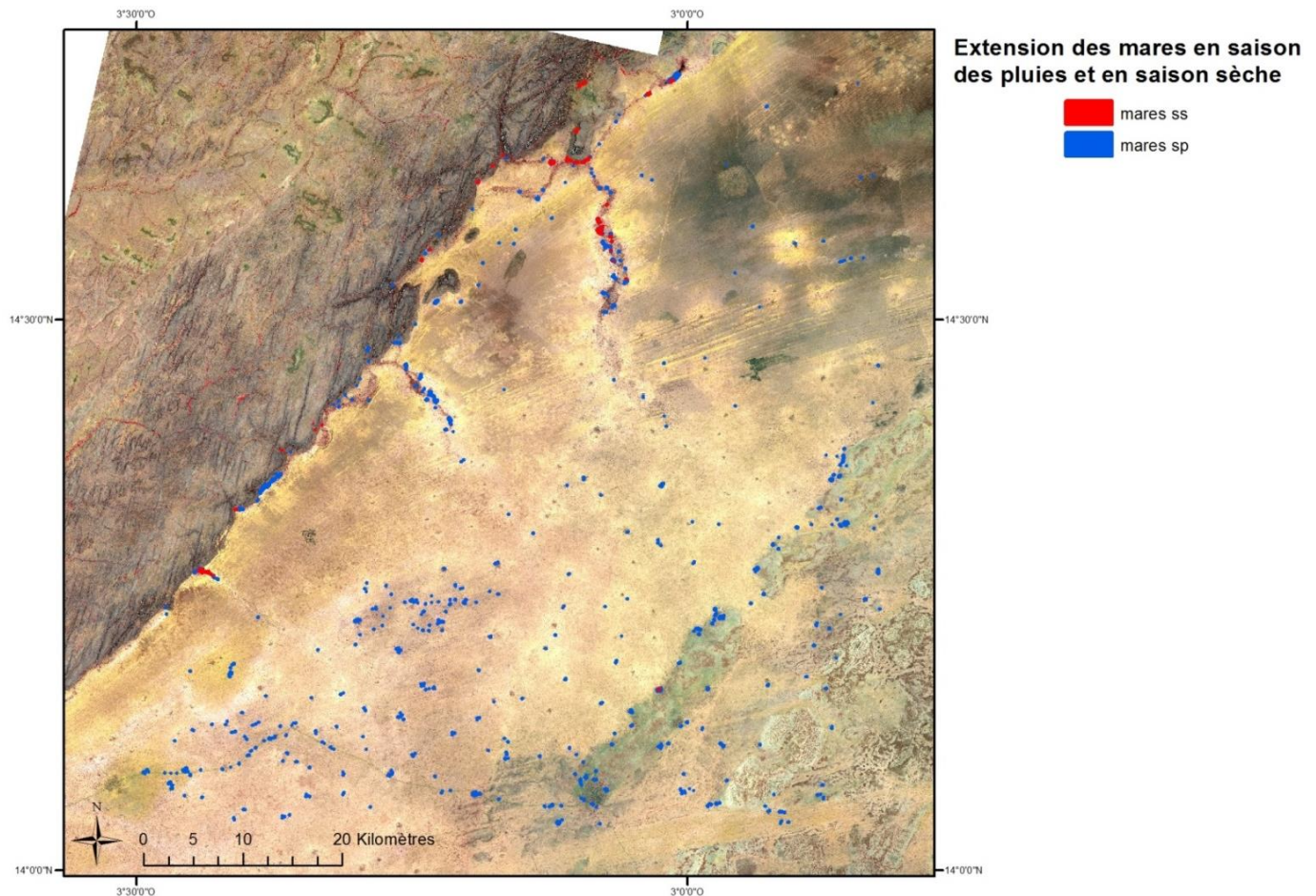


Figure 14 Carte des mares en saison sèche (ss) et en saison des pluies (sp)

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.

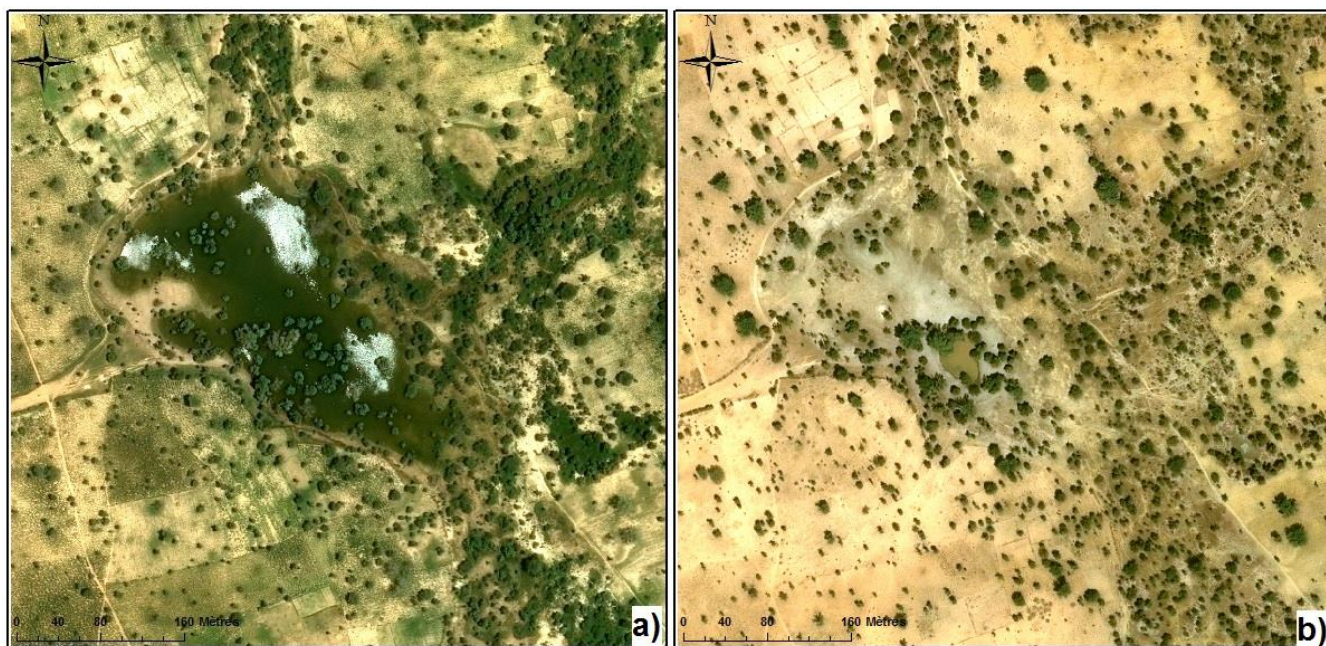


Figure 15 Comparaison saisonnière d'une mare de la paléo-vallée de Diankabou (3°4'1''Ouest et 14°33'14''Nord) d'après les images Pléiades (0,5m de résolution) ; a)septembre-octobre 2013; b) janvier-mars 2013

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.

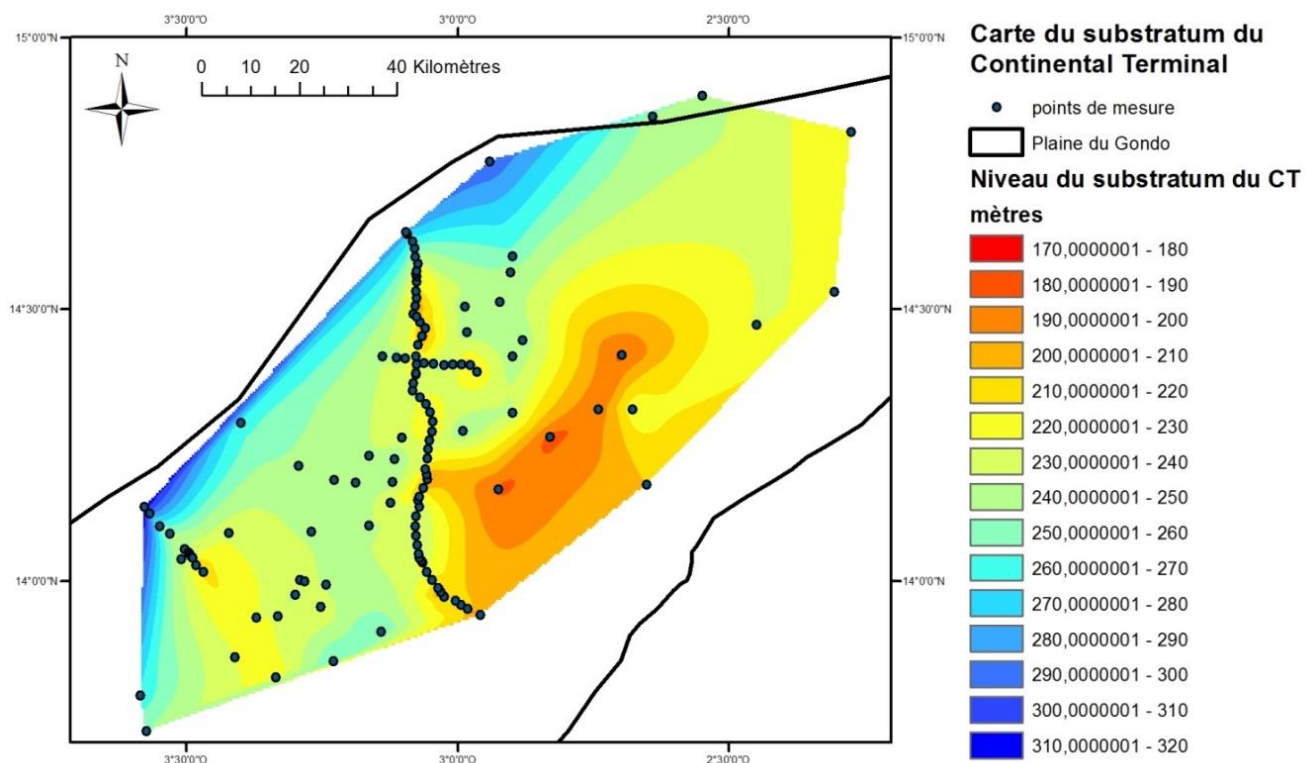


Figure 16 Carte du toit du substratum du Continental Terminal obtenue par la méthode d'interpolation par voisins naturels des données du PNUD (1975) et des données Via Sahel

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

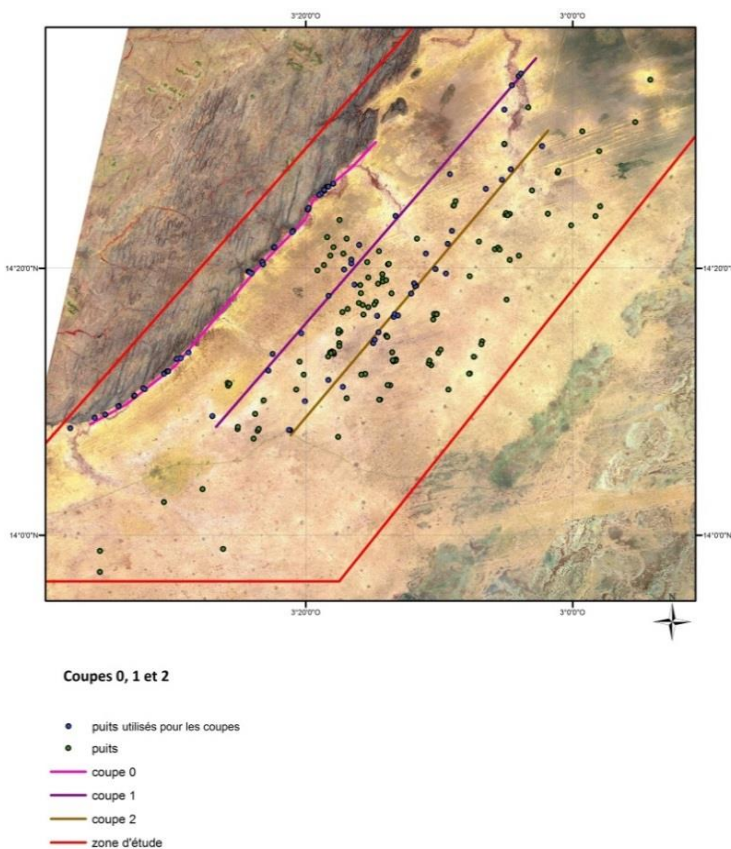


Figure 17 Localisation des coupes parallèles à la falaise

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.

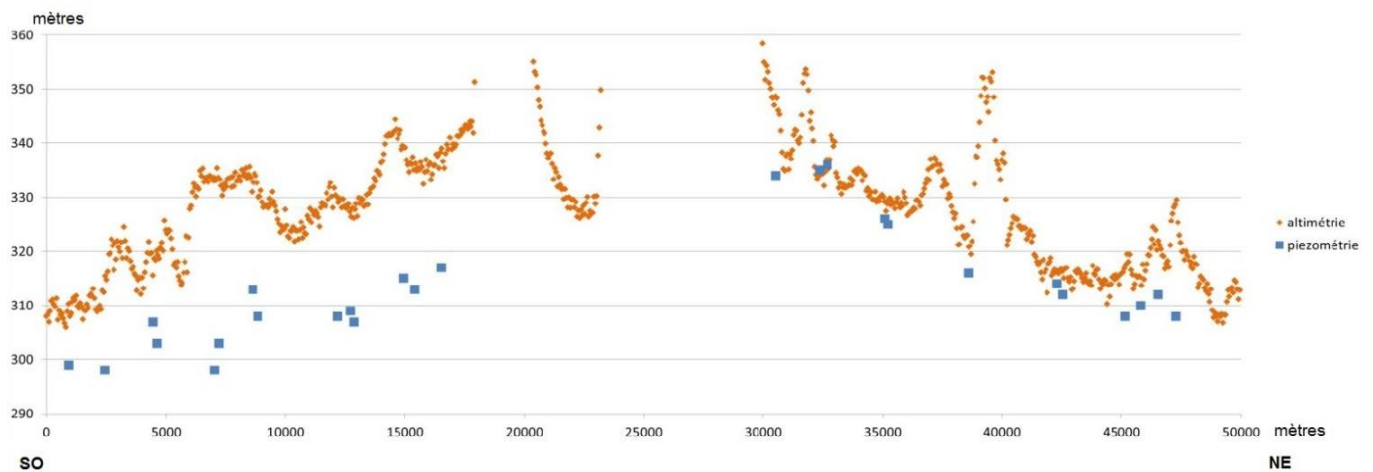


Figure 18 Coupe piézométrique 0

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.

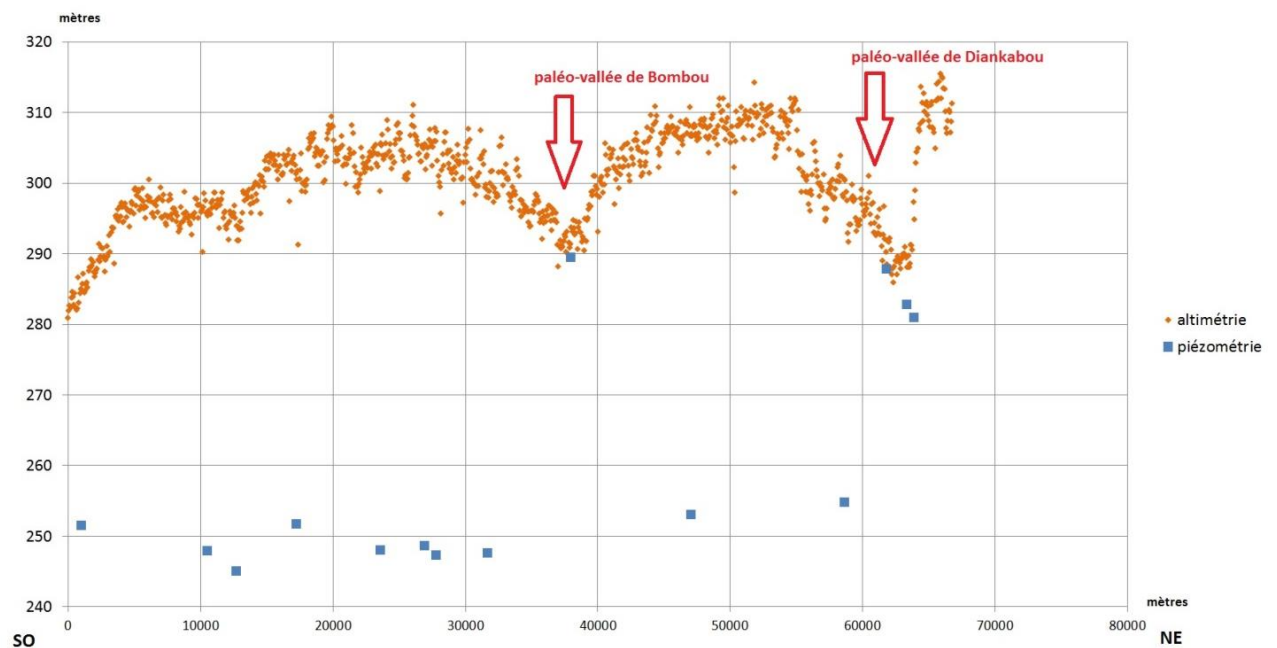


Figure 19 Coupe piézométrique 1

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.

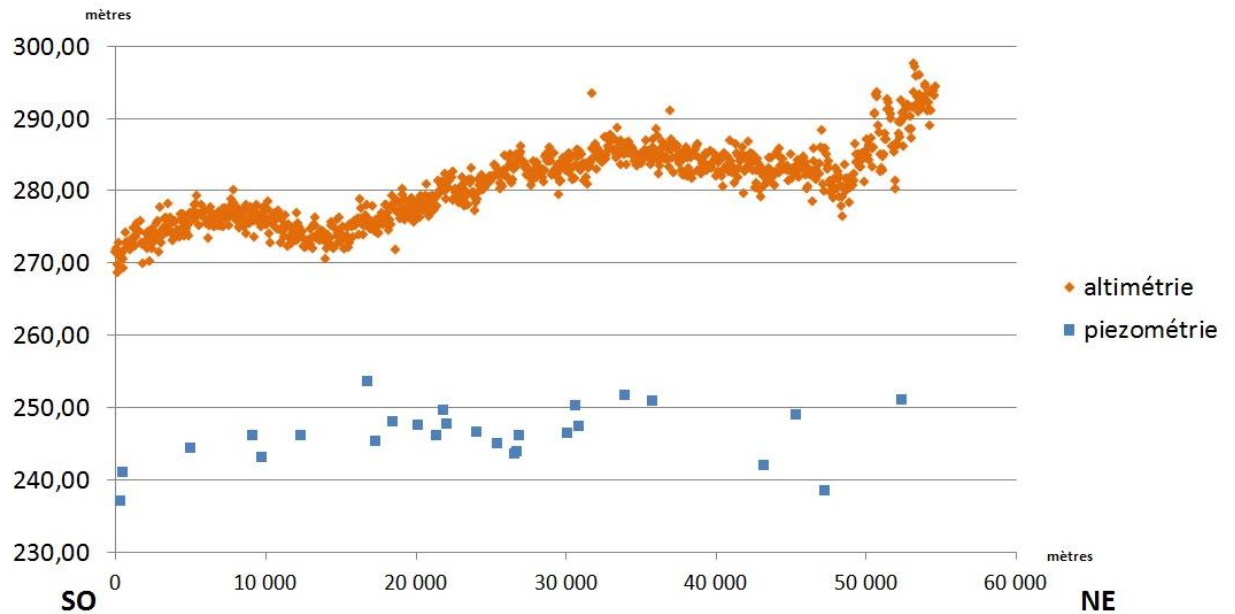


Figure 20 Coupe piézométrique 2

- Coupes perpendiculaires à la falaise

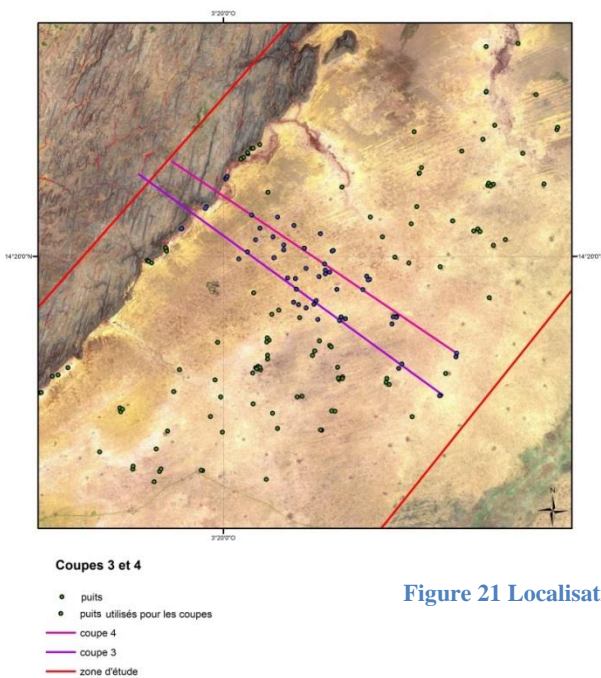


Figure 21 Localisation des coupes perpendiculaires à la falaise

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.

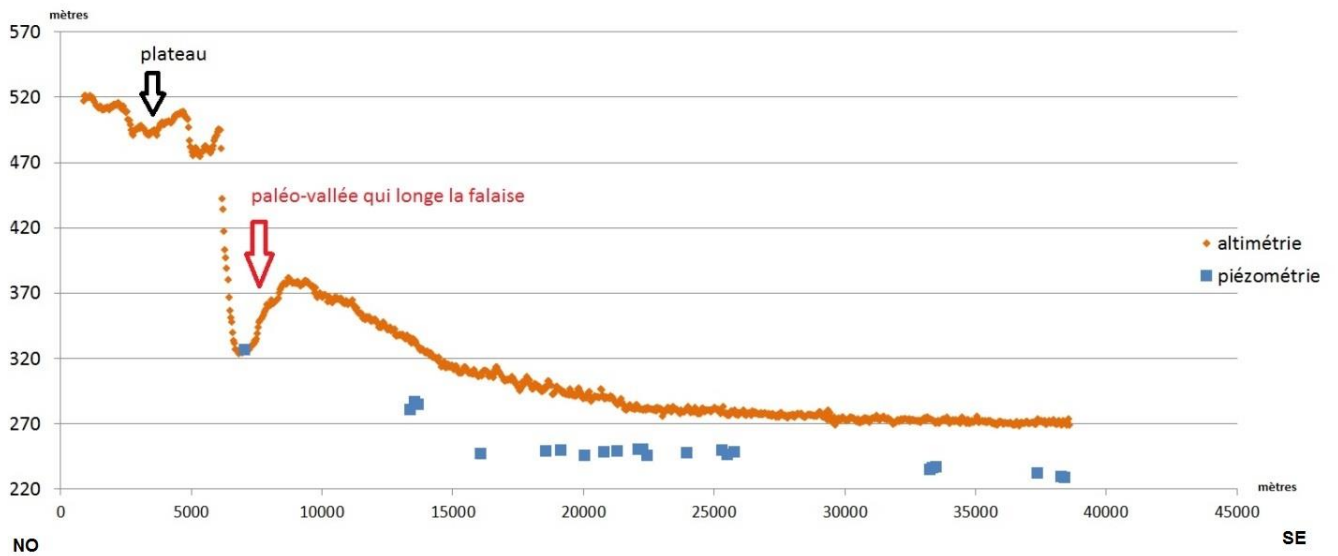


Figure 22 Coupe piézométrique 3

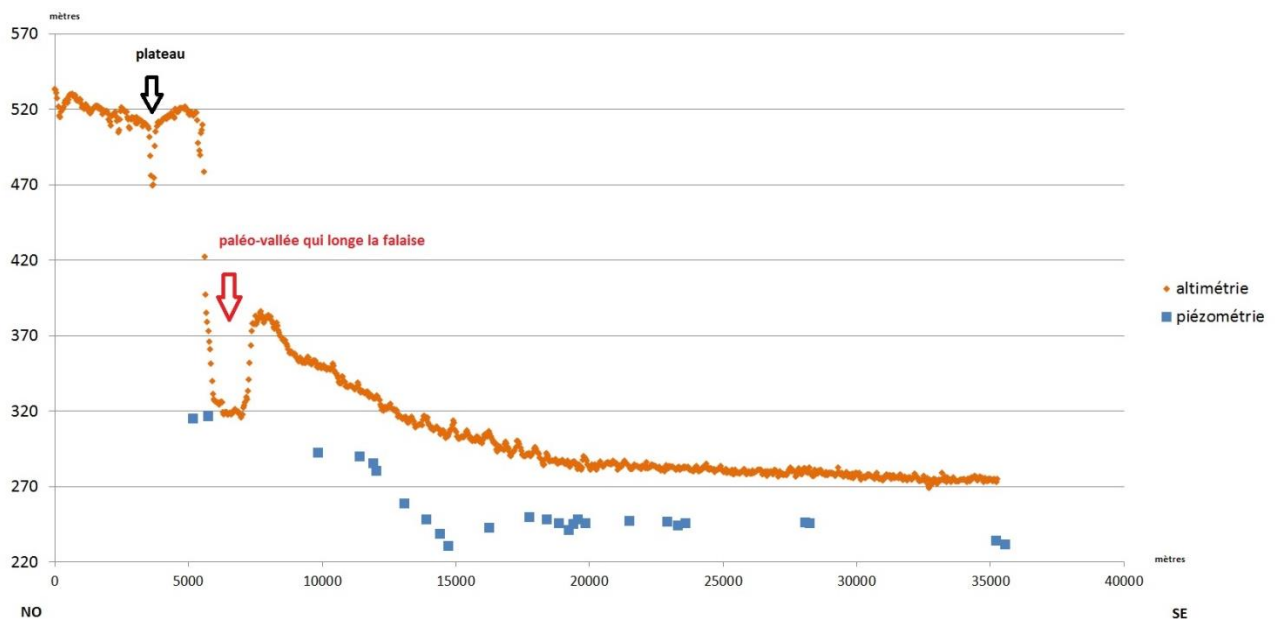


Figure 23 Coupe piézométrique 4

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.

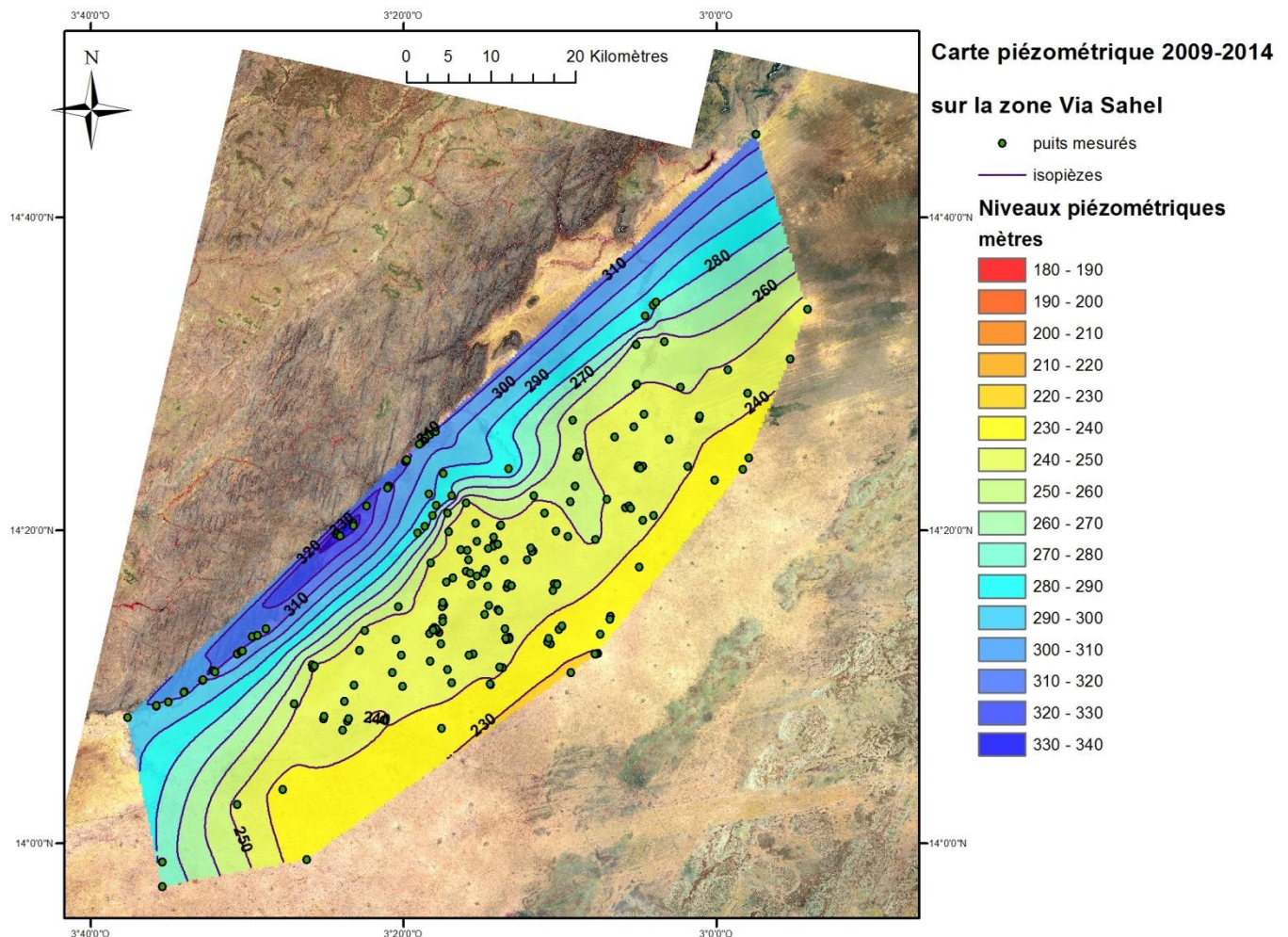


Figure 24 Carte piézométrique de la zone Via Sahel, des années 2010

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.

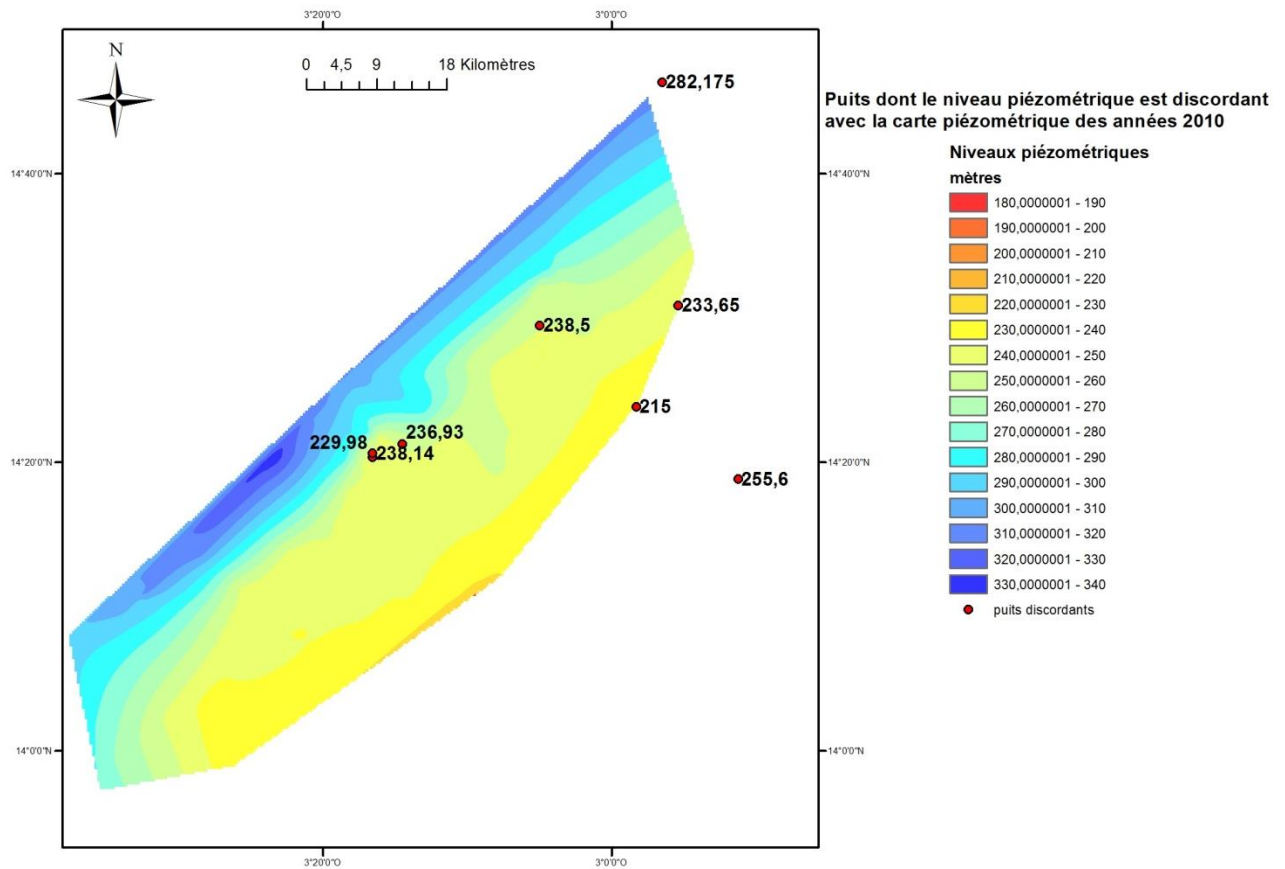


Figure 25 Carte des puits dont la piézométrie est discordante par rapport à la carte piézométrique des années 2010

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.

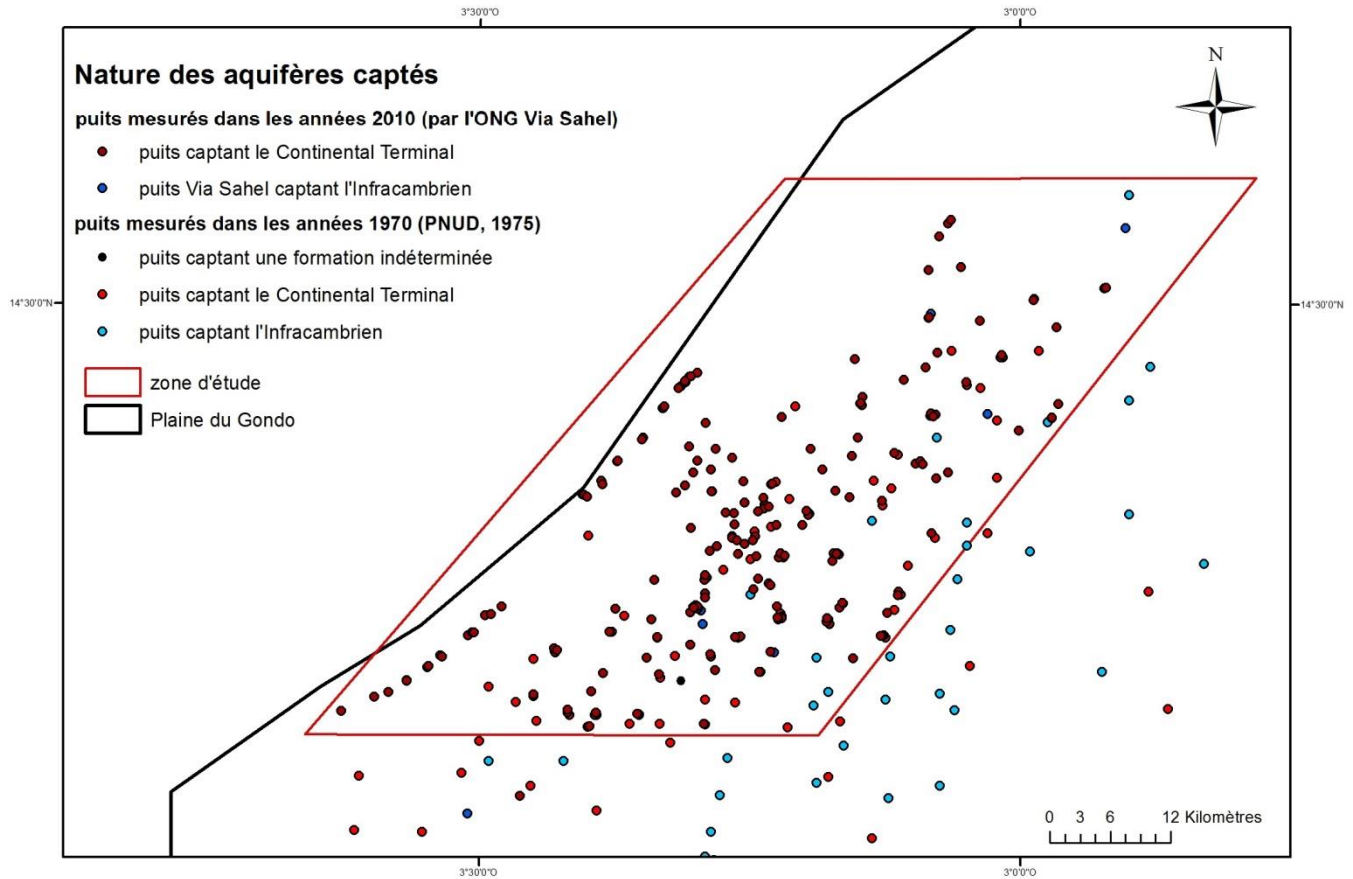


Figure 26 Carte de la nature des aquifères captés par les puits de la zone d'étude (d'après les données de l' ONG Via Sahel des années 2010 et d'après les données du PNUD des années 1970)

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 :

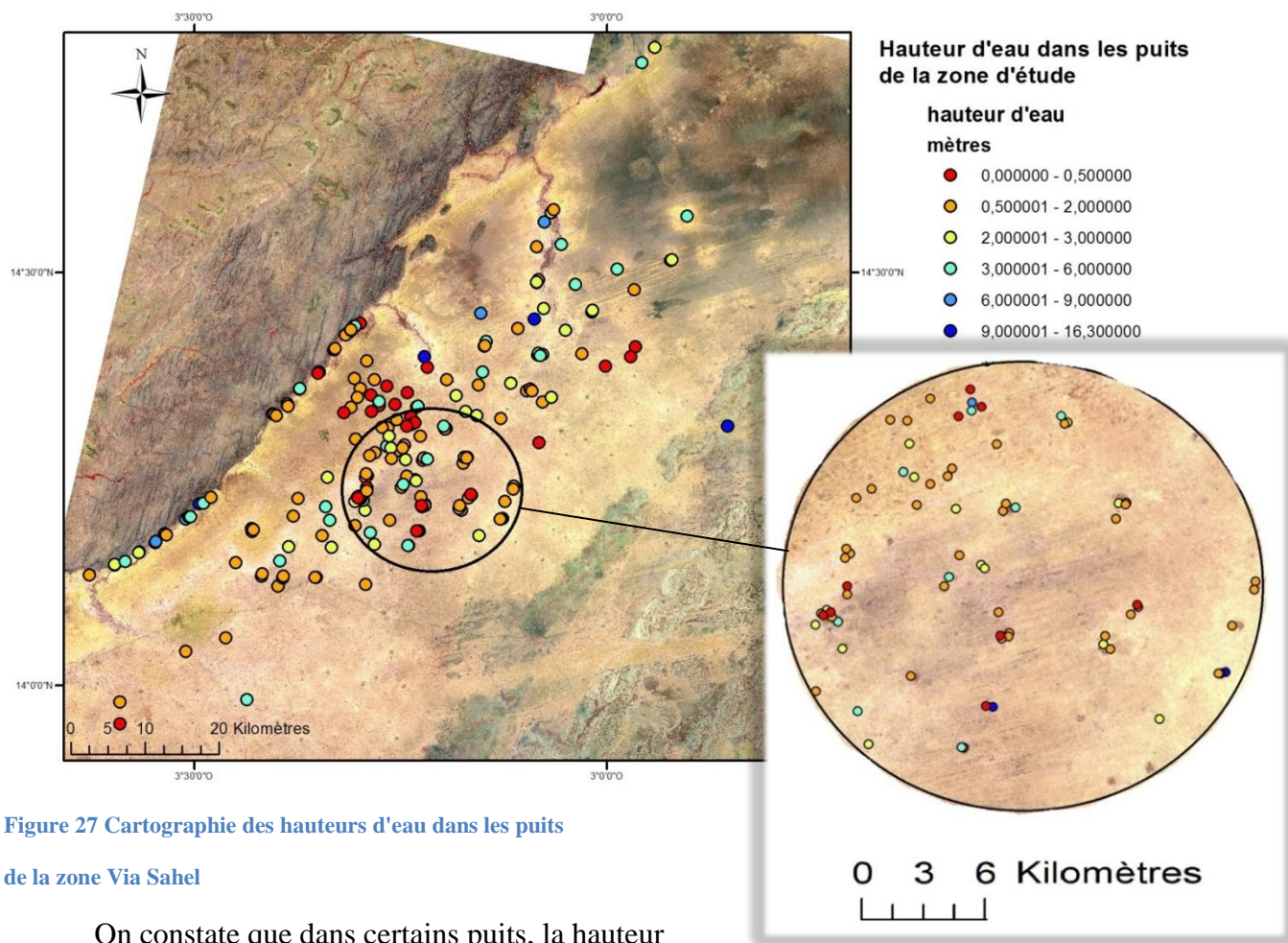


Figure 27 Cartographie des hauteurs d'eau dans les puits de la zone Via Sahel

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.

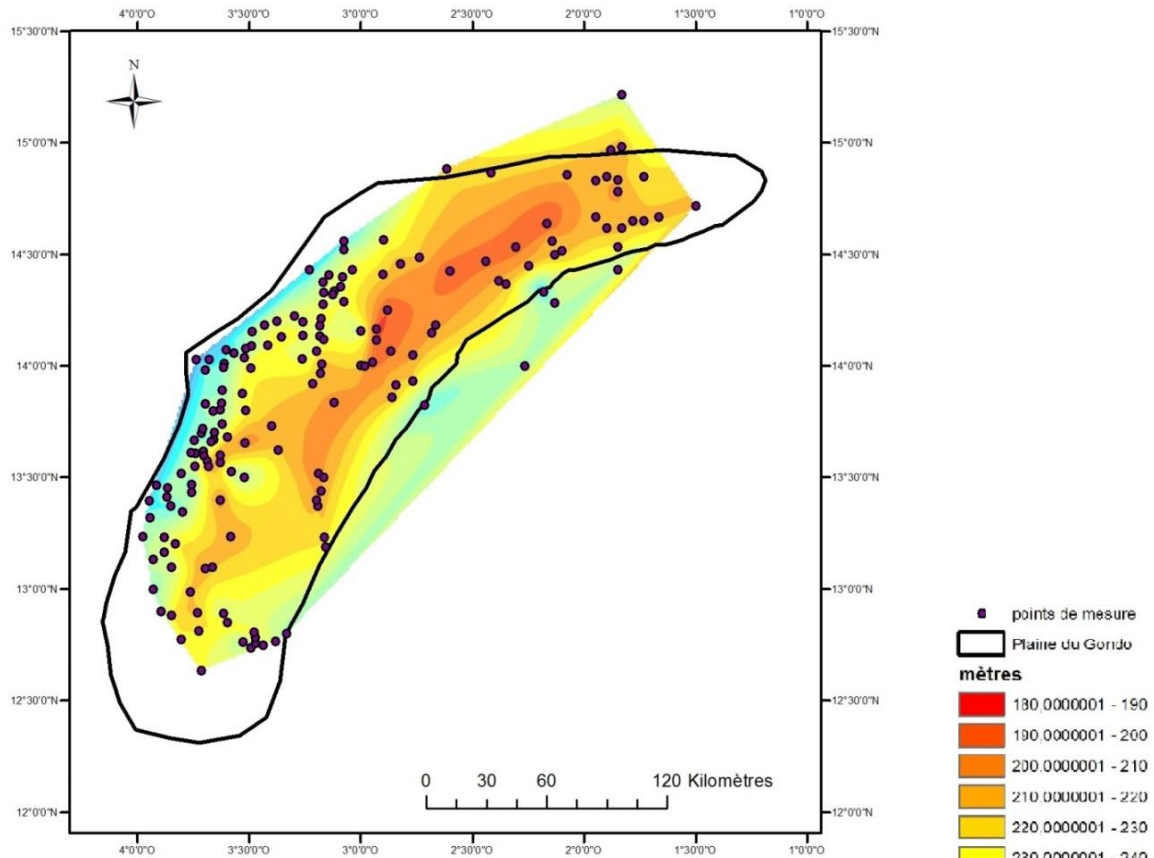
Nos échelles de travail ont varié entre la zone d'étude Via sahel, qui était notre région de travail initiale et qui est toujours notre zone de travail préférentielle, et la plaine du Gondo, qui est l'entité hydrogéologique globale dans laquelle est comprise notre zone d'étude, et qui a été plus largement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

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

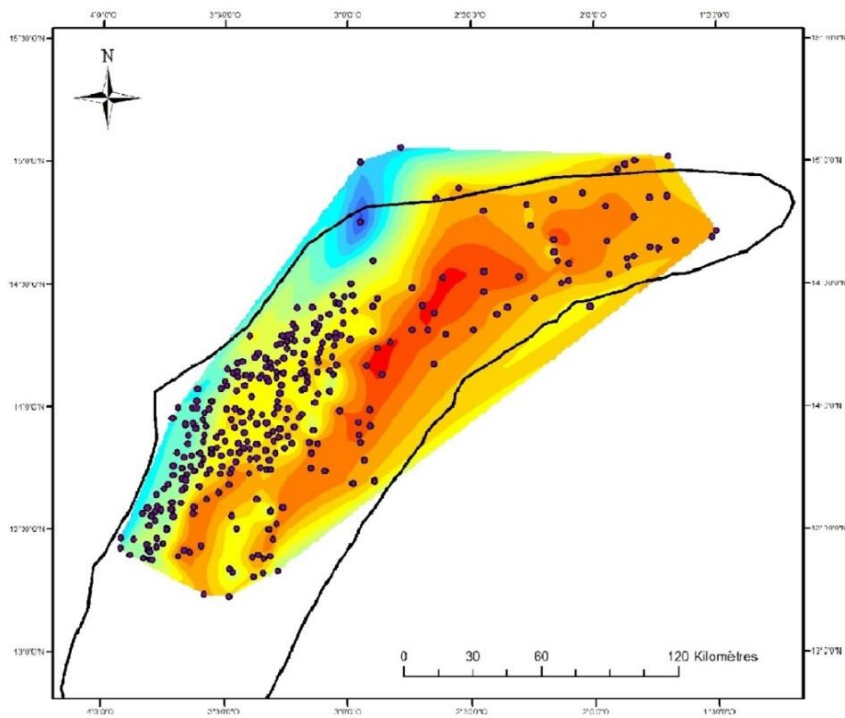
La carte piézométrique des années 1950 a été tracée à partir des données de puits d'Archambault (1951) et de Defossez (1955-1957). Son allure (voir Fig. 28) est comparable à celle de la carte topographique : elle présente des côtes plus élevées sur les bordures (environ 265m à l'est et 305m à l'Ouest) 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).

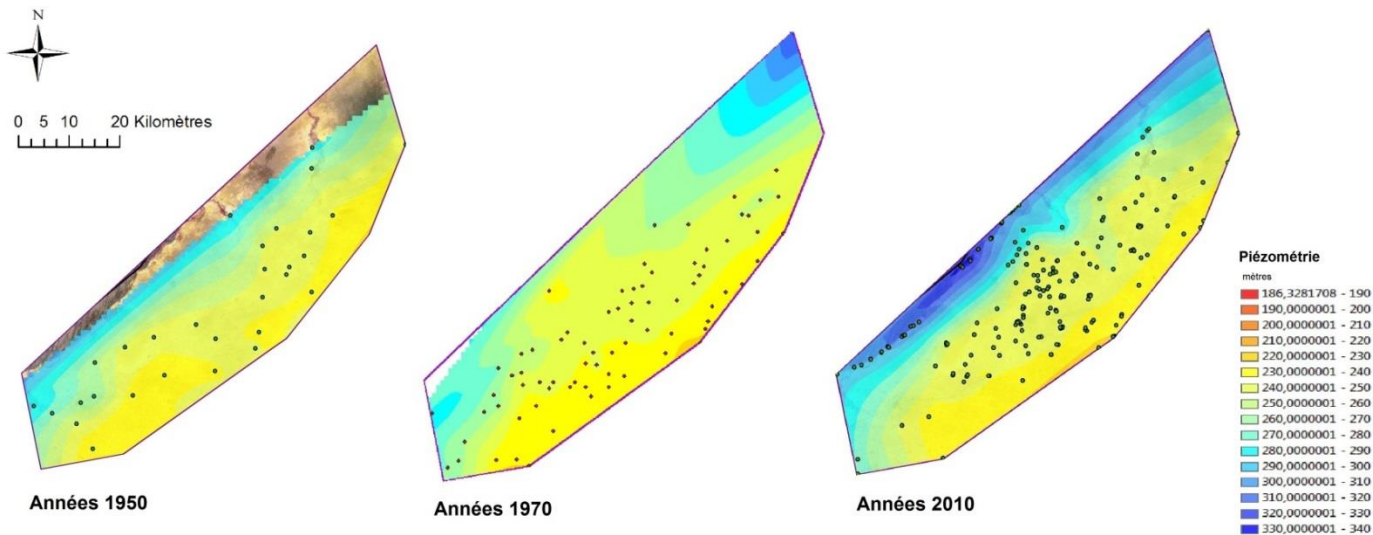


Figure 29 Comparaison de la piézométrie de la zone Via Sahel, entre les années 1950 (d'après Archambault 1951 et Defossez 1955-1957), les années 1970 (d'après le PNUD 1975) et les années 2010

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).

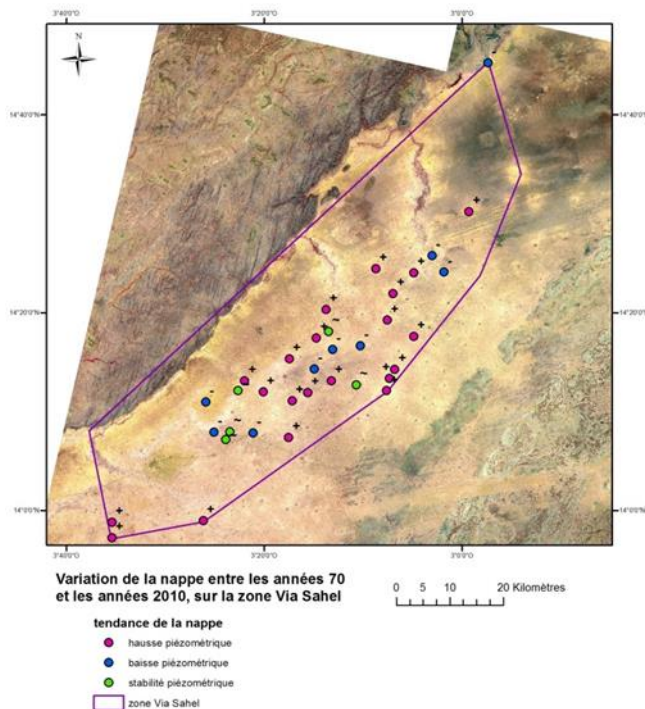


Figure 31 Variation des niveaux d'eau dans les puits entre les années 1970 et les années 2010

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.

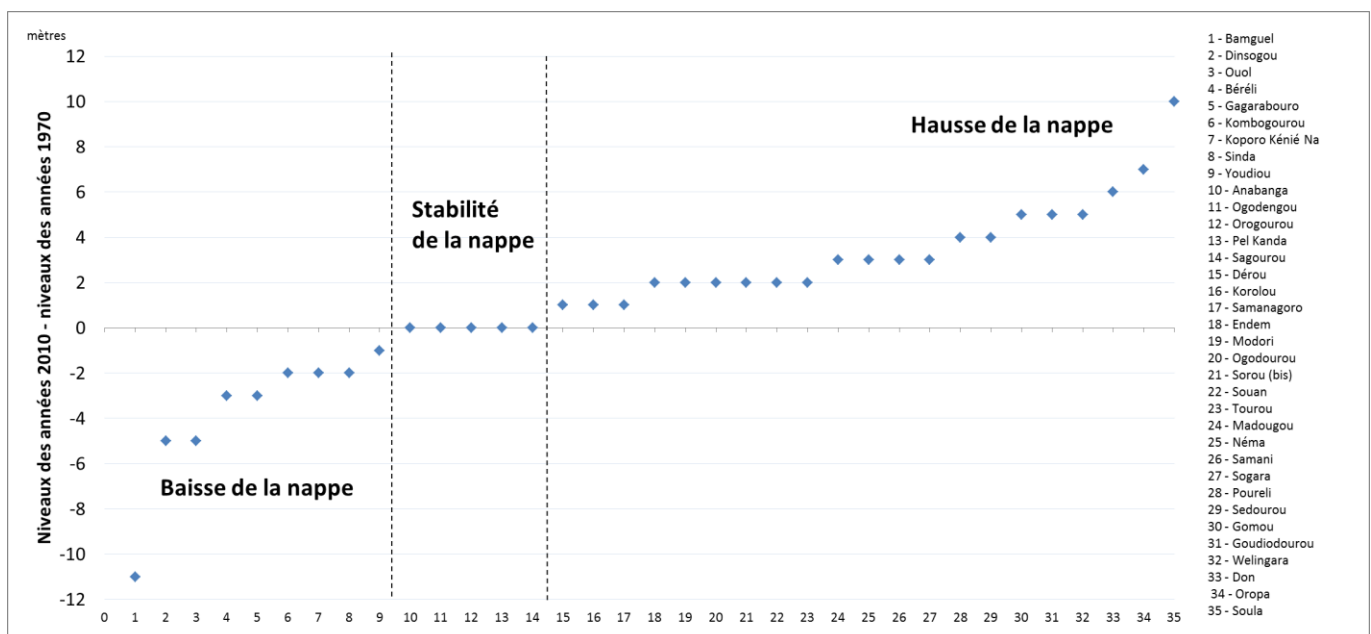


Figure 32 Ecart piézométrique classés (années 2010 - années 1970) sur la zone Via Sahel

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 (Defossez, 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) .

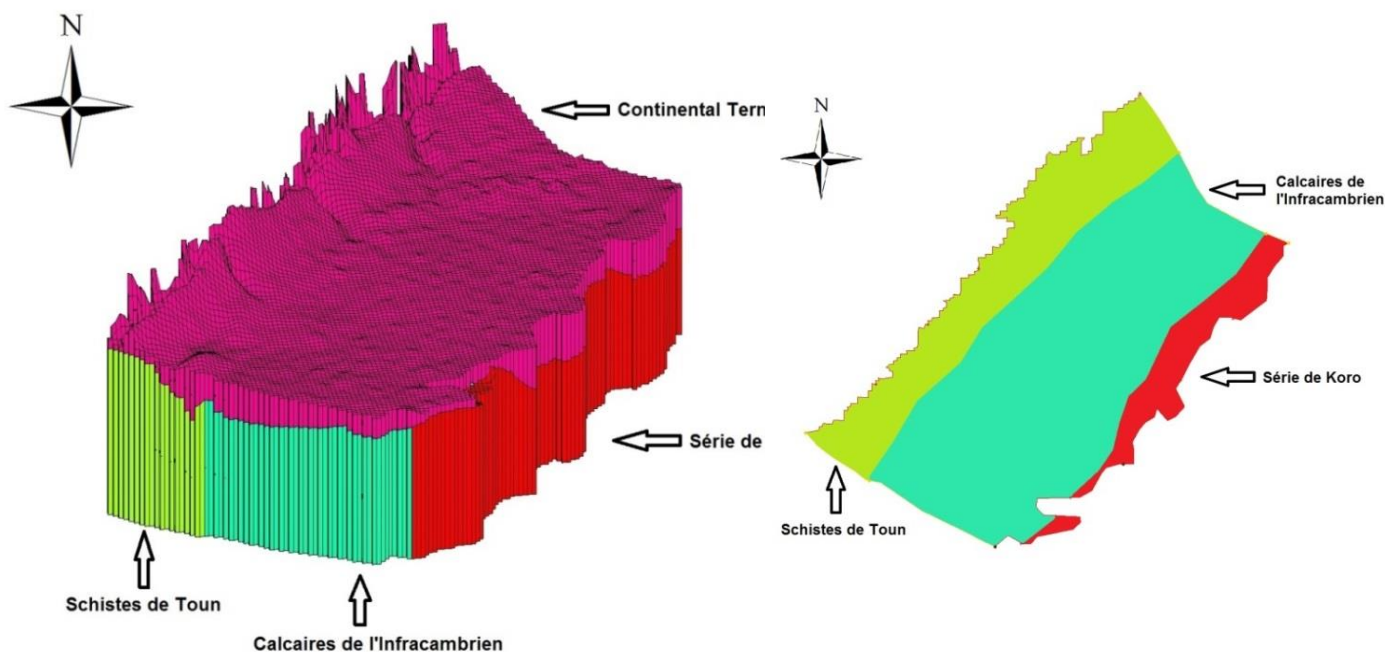


Figure 33 Modèle géologique

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.

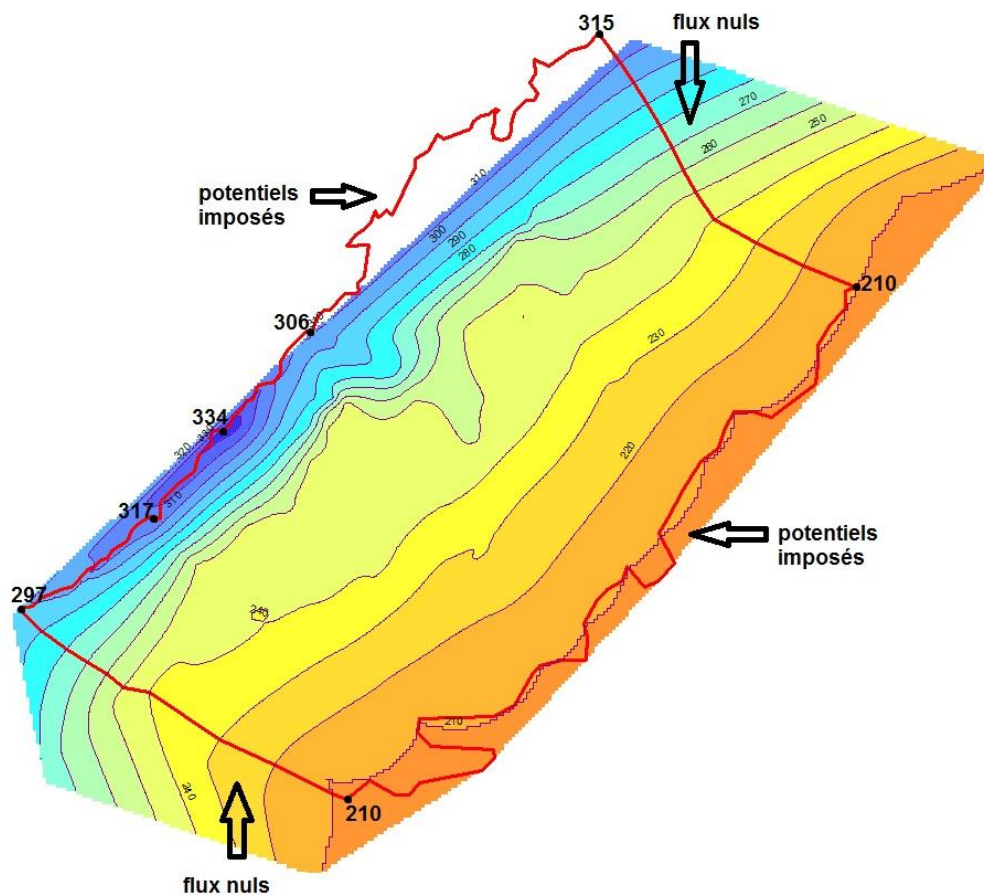


Figure 34 Conditions aux limites du modèle sur fond de carte piézométrique des années 2010

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 même conductivités hydrauliques.

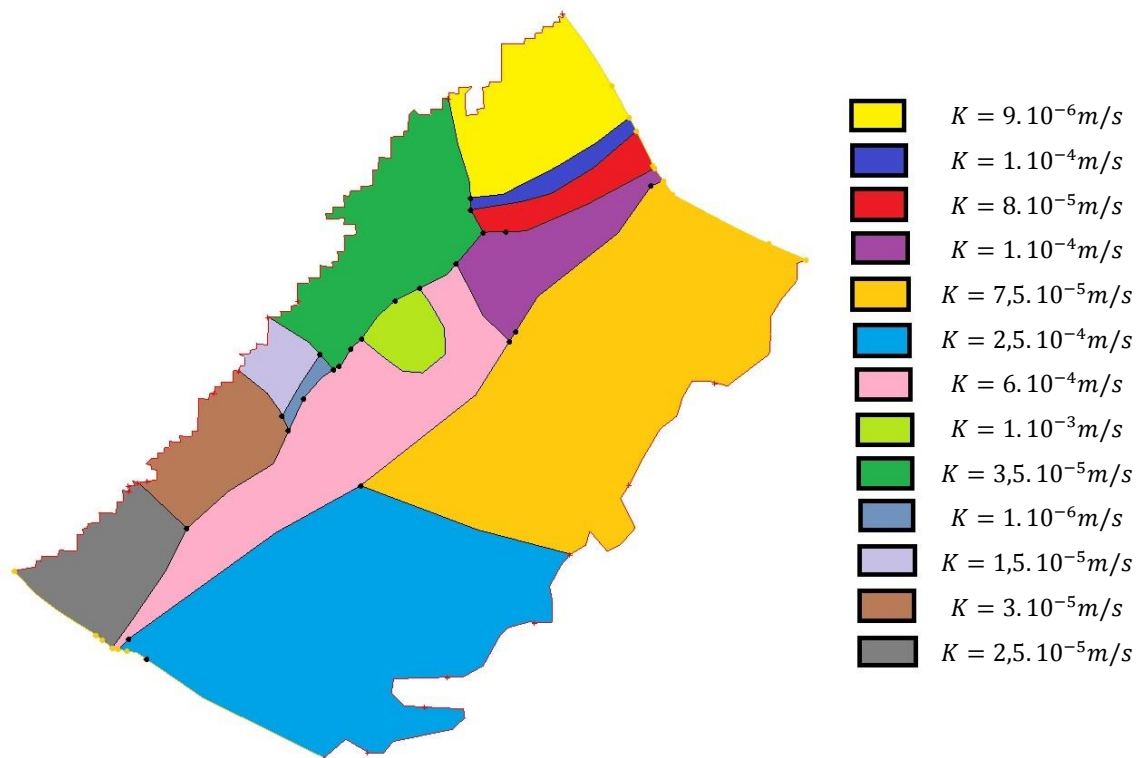


Figure 35 Calage du modèle en fonction des conductivités hydrauliques de la couche 2

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.

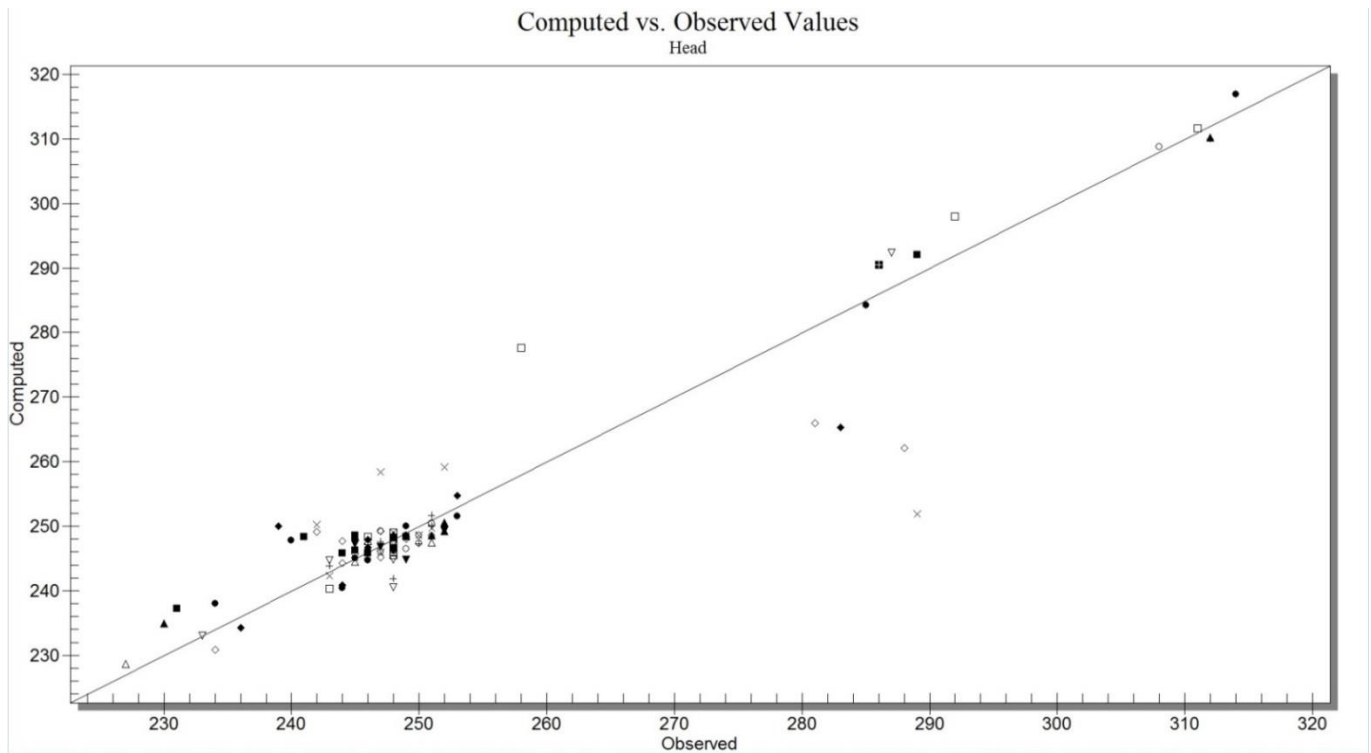


Figure 36 Corrélation entre les piézométries simulée et observée

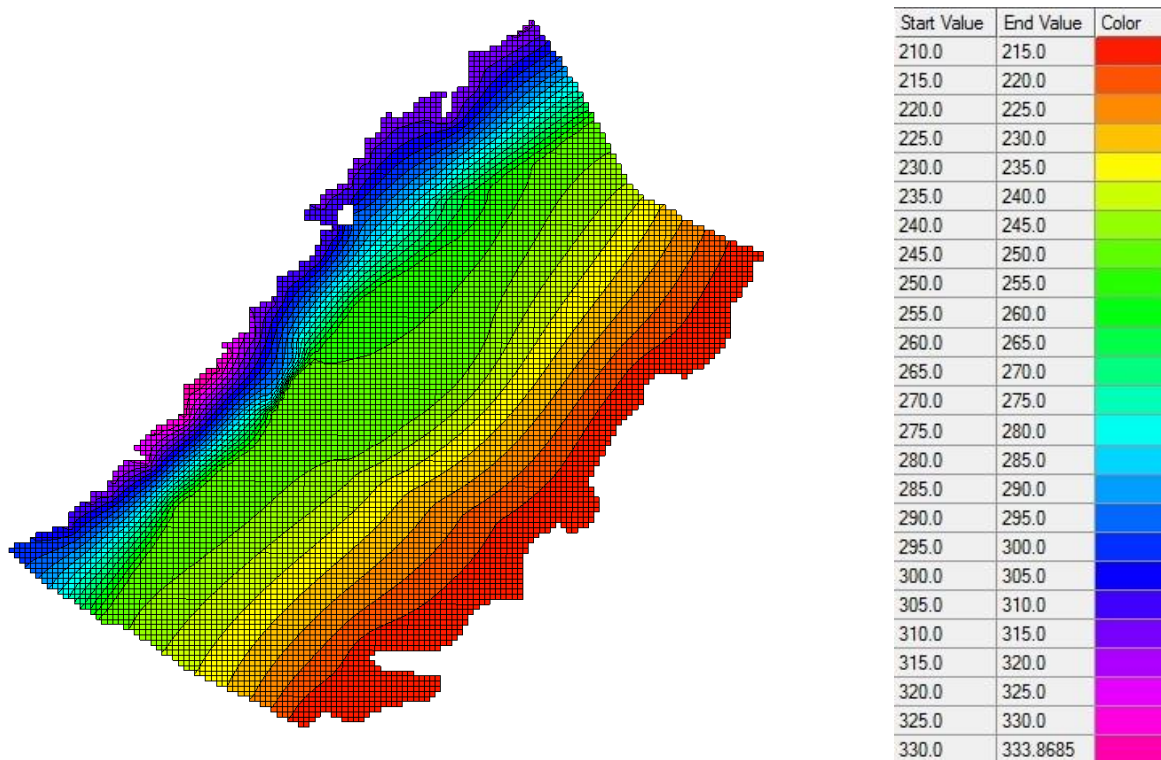


Figure 37 Piézométrie simulée

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.

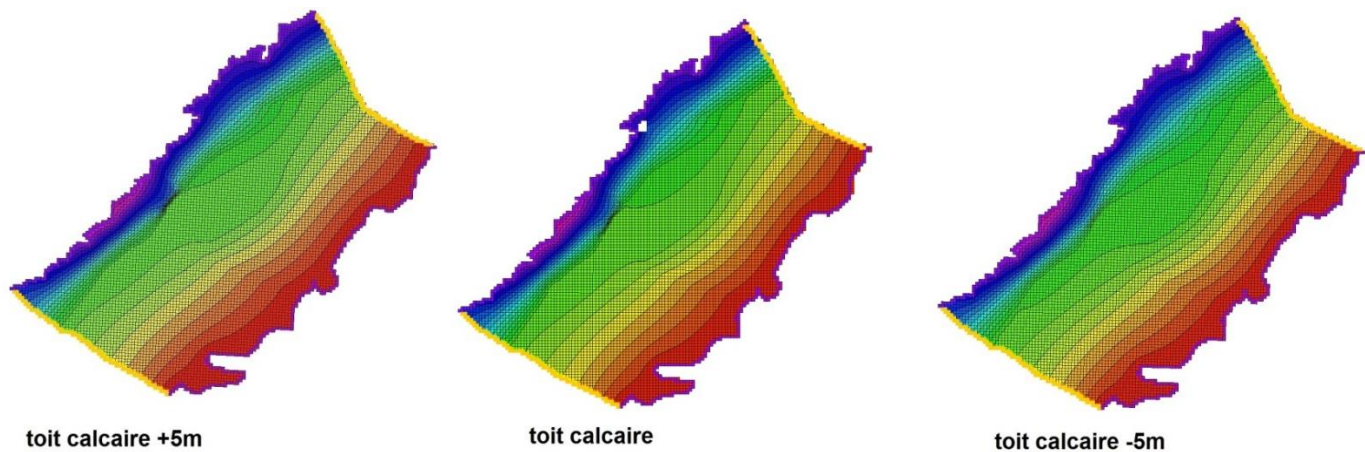


Figure 38 Sensibilité de la piézométrie par rapport au niveau du toit calcaire

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

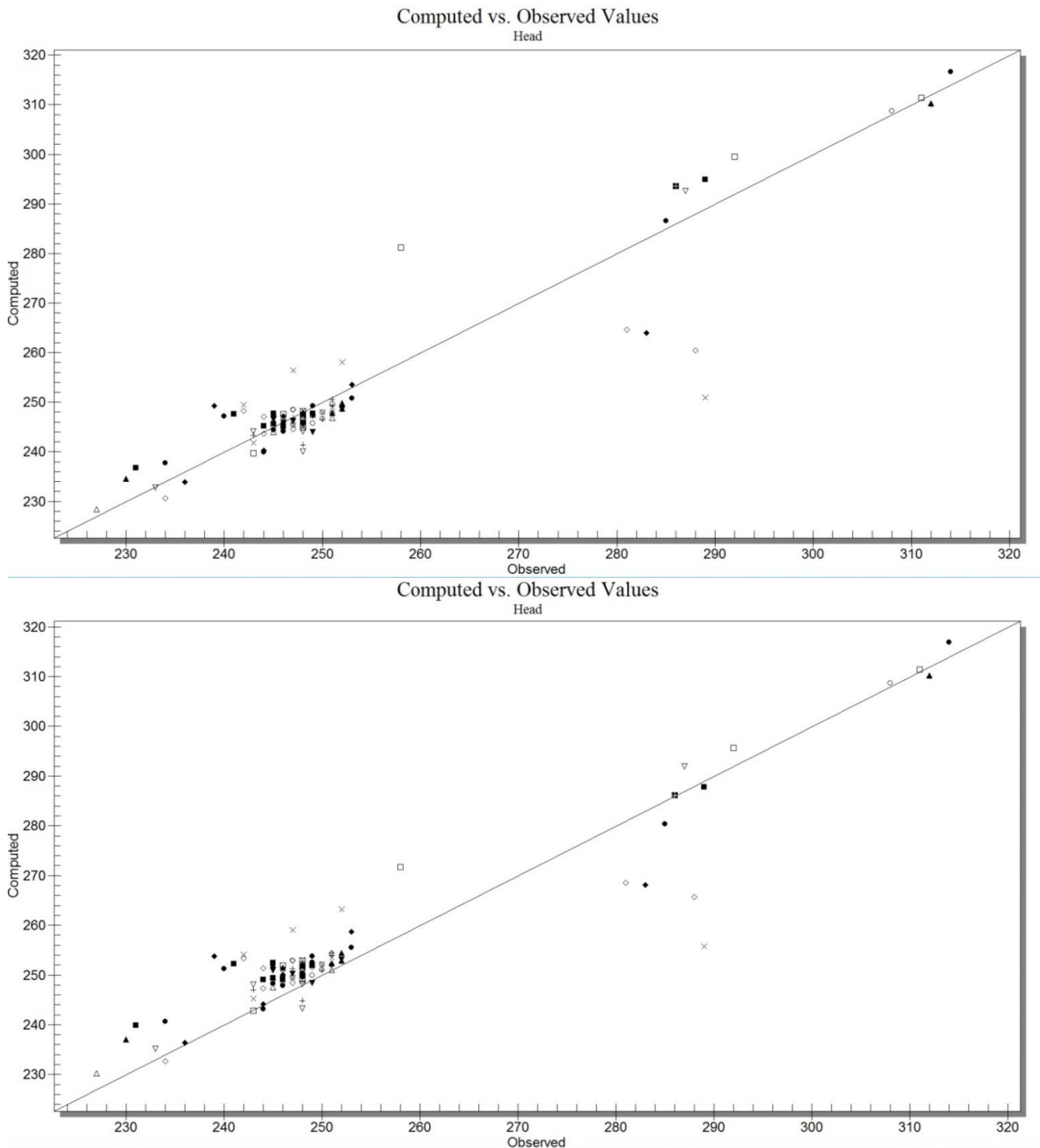


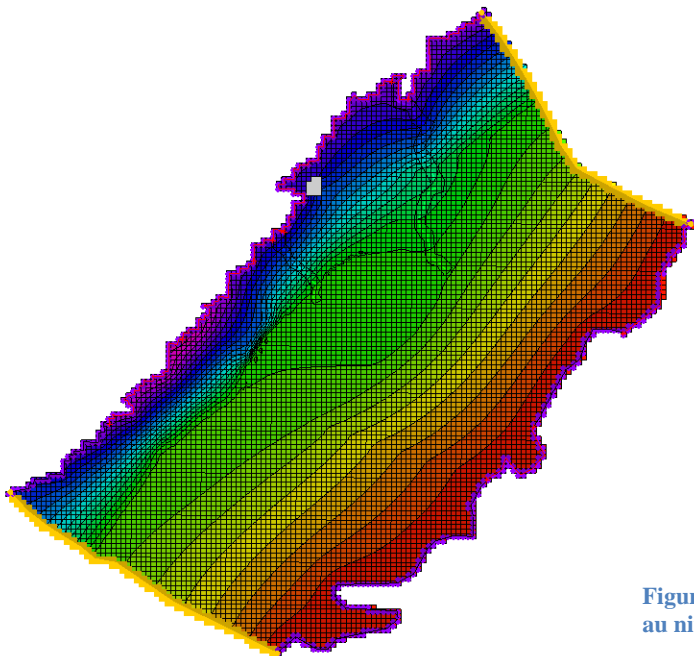
Figure 39 Corrélations entre les piézométries simulée et observée (haut : toit calcaire +5m; bas : toit calcaire -5m)

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.

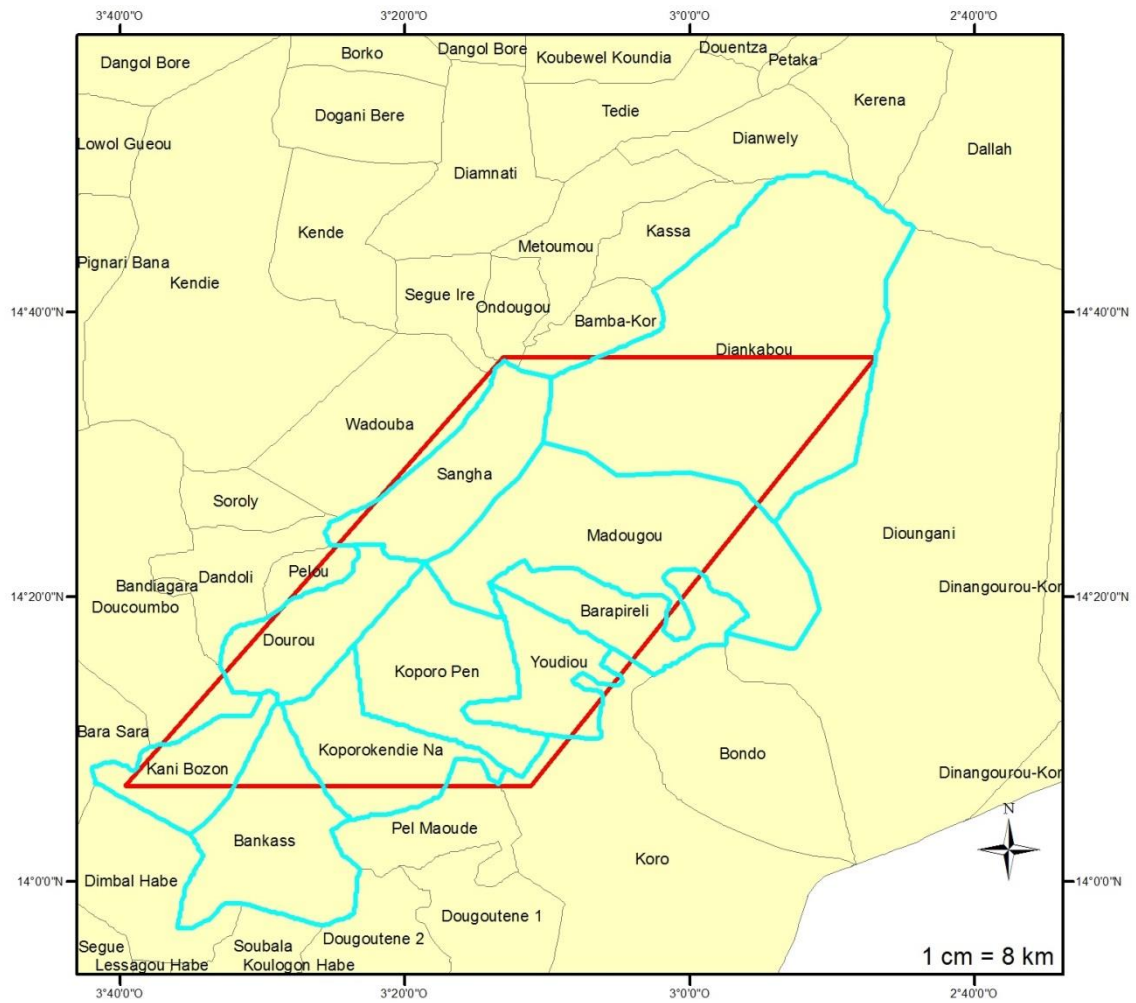
<http://www.oss-online.org/fr/projet-gicresait> [16/05/2014] source : Projet De Gestion Intégré et Concerté des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du fleuve Niger (GICRESAIT), Observatoire du Sahara et du Sahel

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

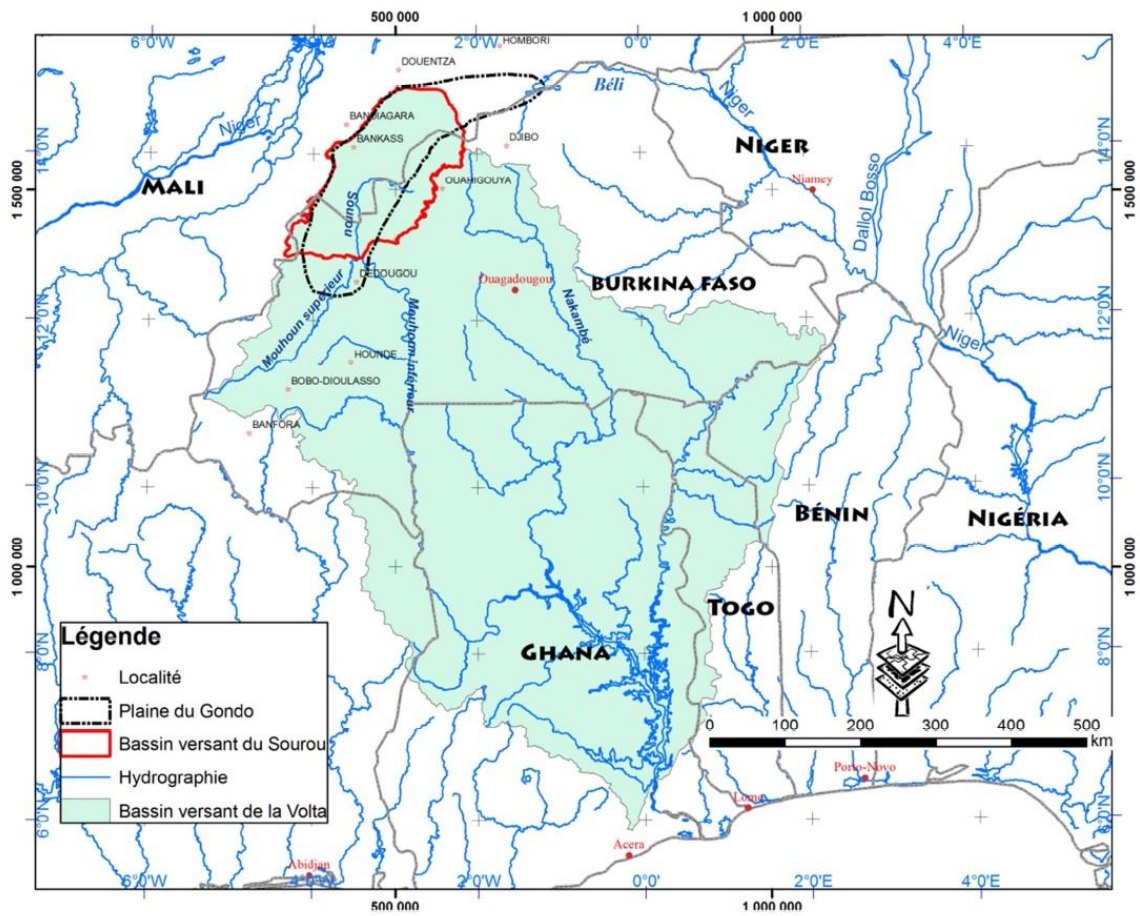
Annexe 2 Pluviométrie à Sangha

Pluviometrie Sangha (en mm)

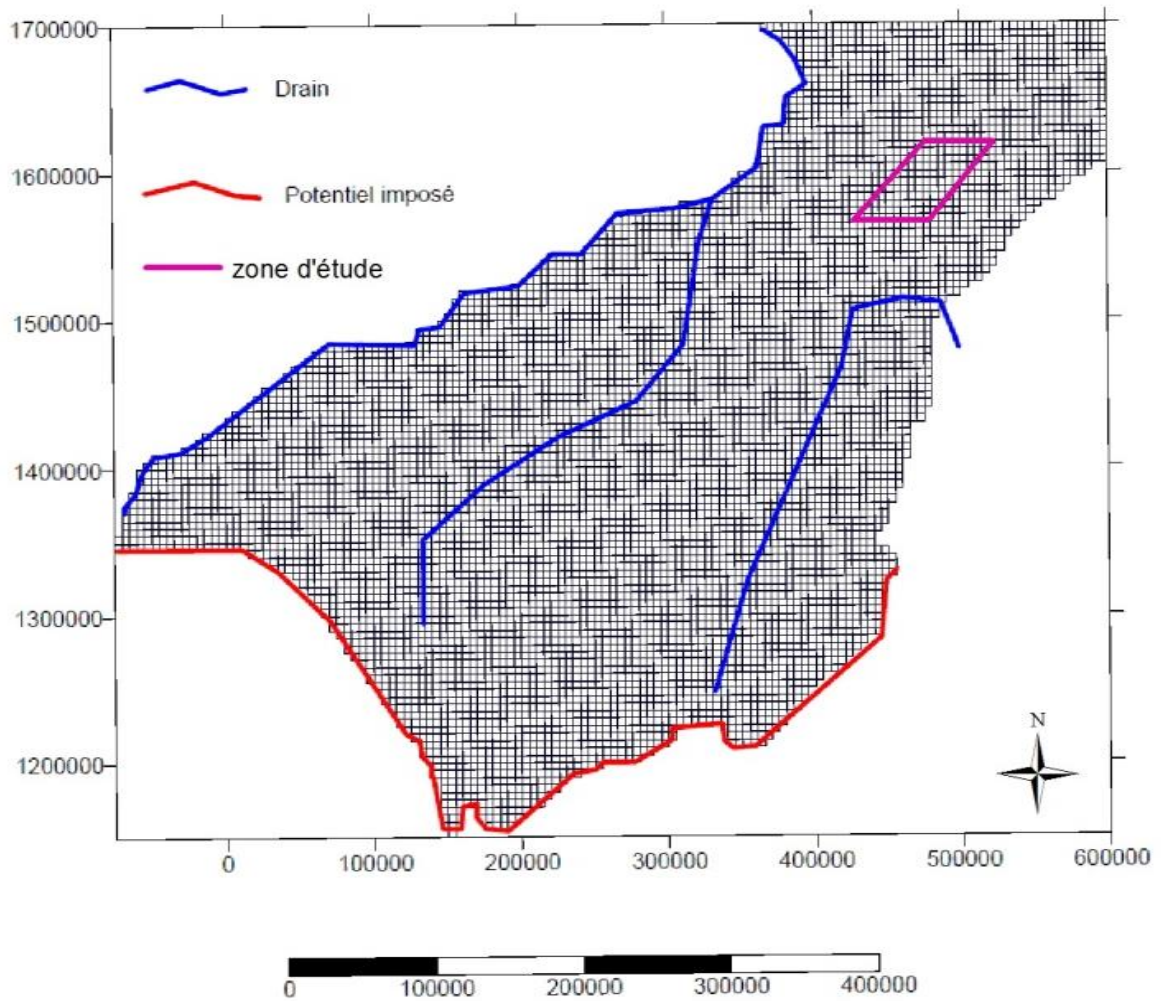
	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPT	OCT	TOTAL
2001	0	70	67	150	127	12	426
2002	62	63	102	83	31	27	368
2003	23	174	123	237	112	80	749
2004	0	86	137	223	68	0	514
2005	0	120	180	175	78	0	553
2006	0	106	98	171	75	0	450
2007	22	16	327	199	82	0	646
2008	16	36	166	209	47	24	498
2009	22	75	141	180	57	15	490
2010	20	124	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)

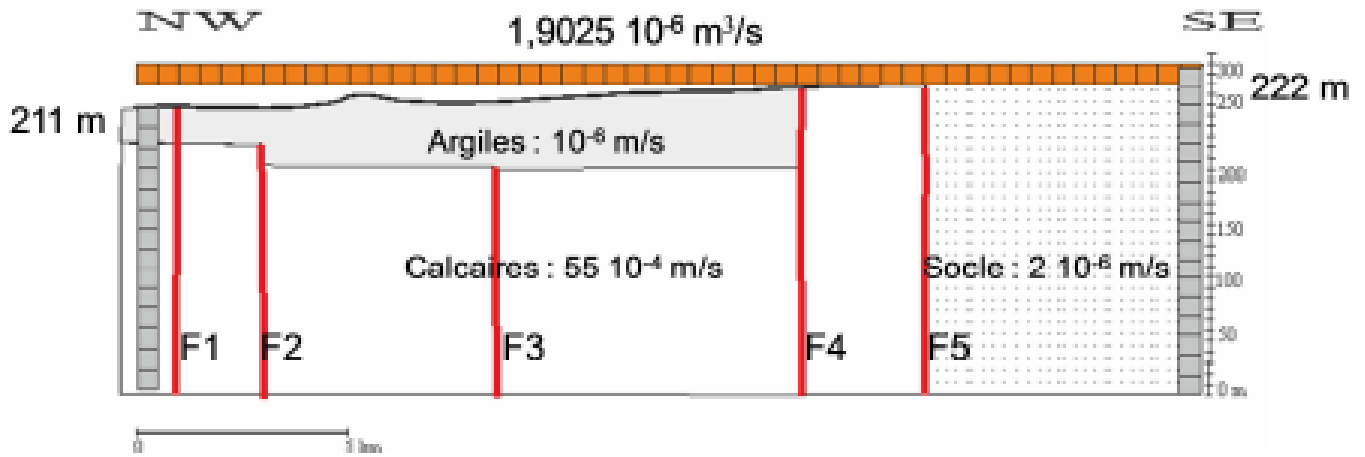


Annexe 4 Situation géographique de la modélisation de Dakouré (2003) (d'après Dakouré, 2003)



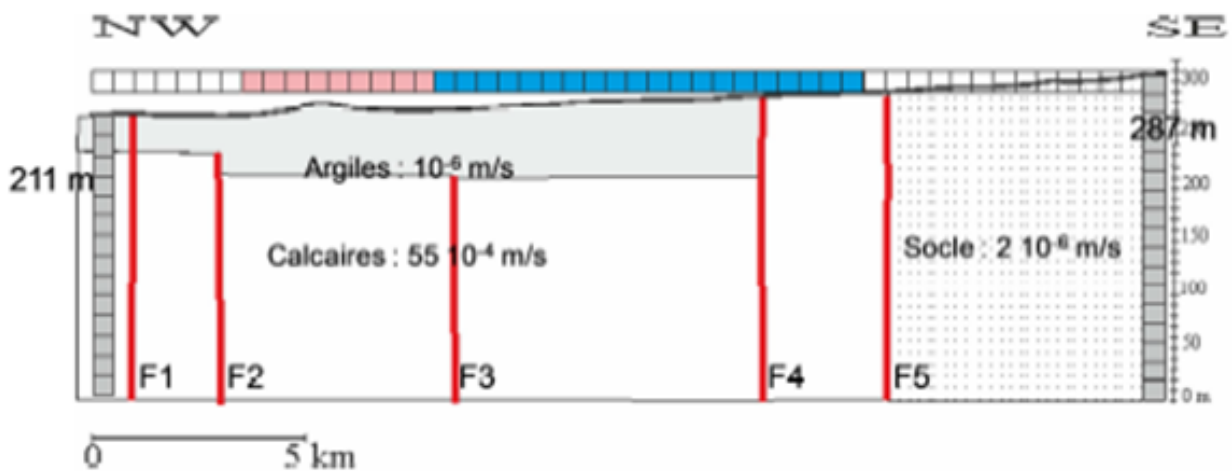
Annexe 5 Modélisation de la zone de Sanga Nomou – a) Années 1960 ; b) Années 2010 (d’après Koussoubé, 2010)

a) Années 1960



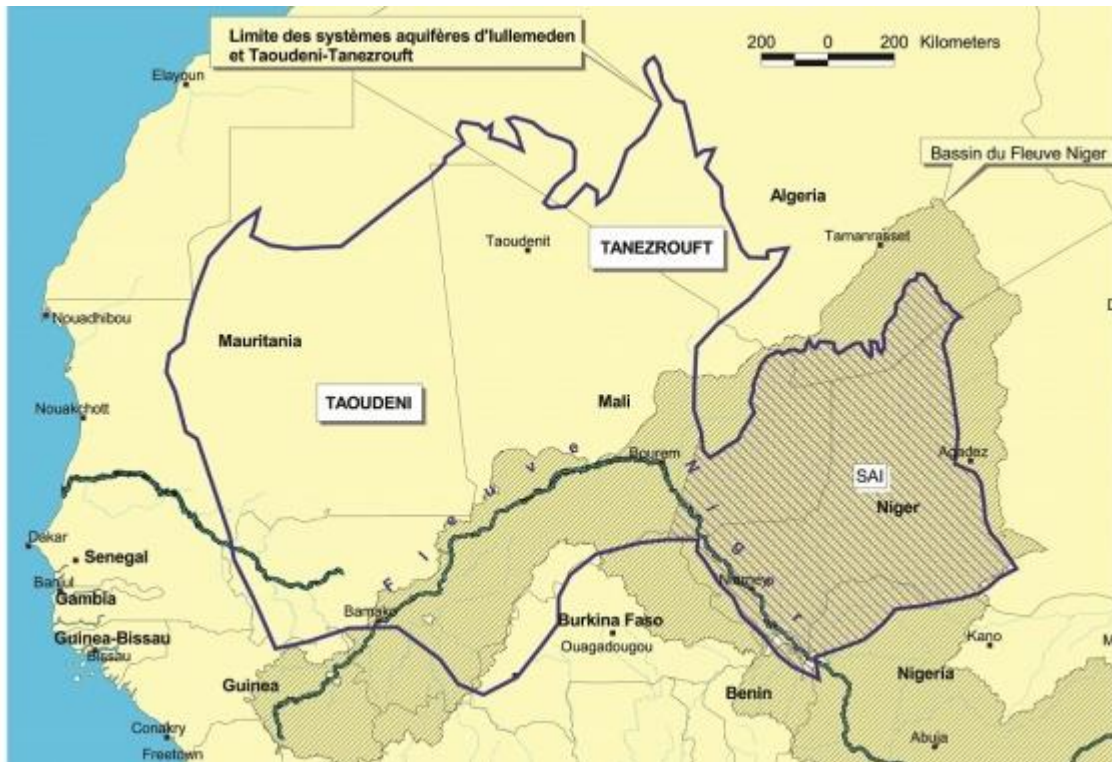
en rouge : failles subverticales

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 :

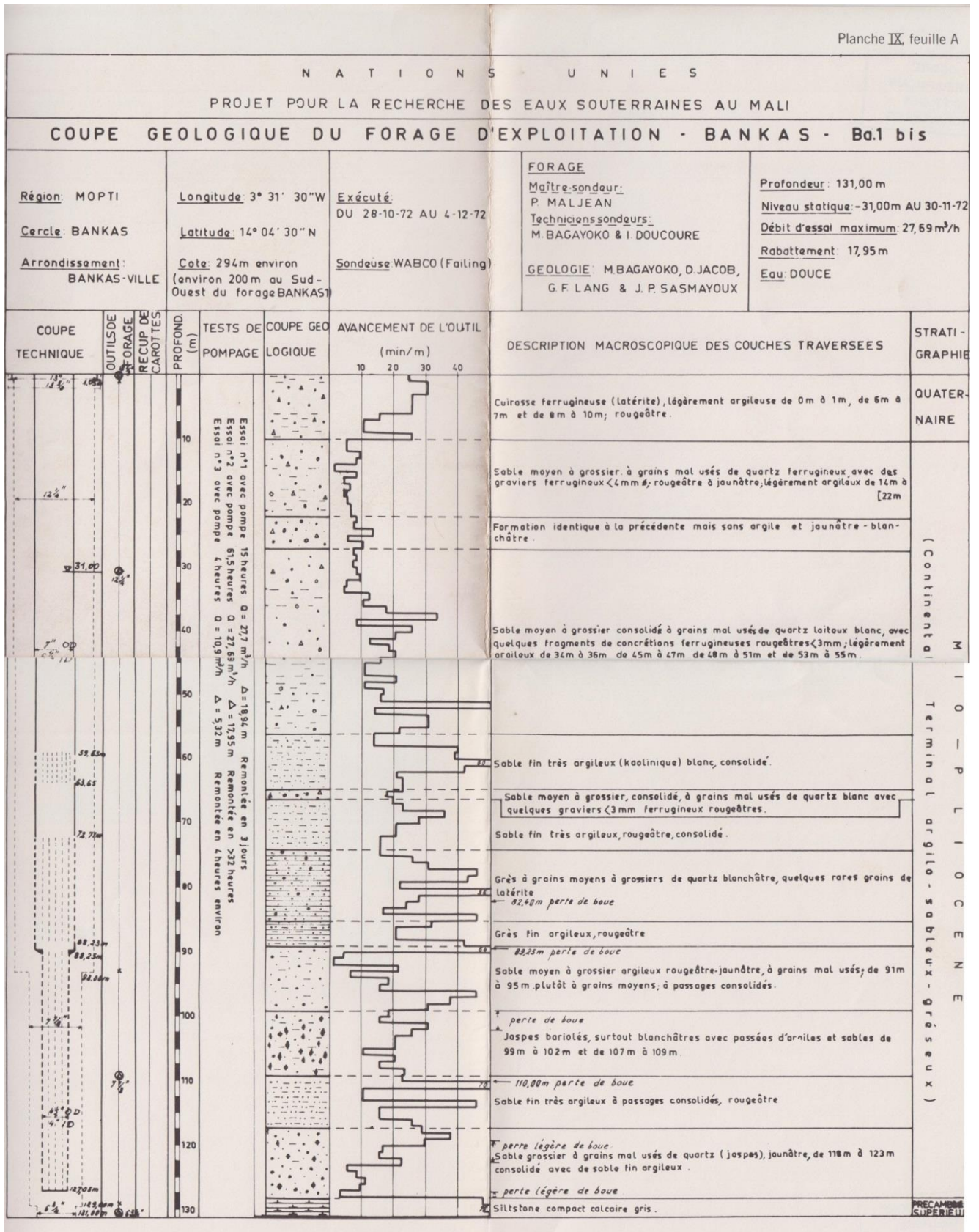
$$V2 = V1 \times \text{taux d'évaporation}$$

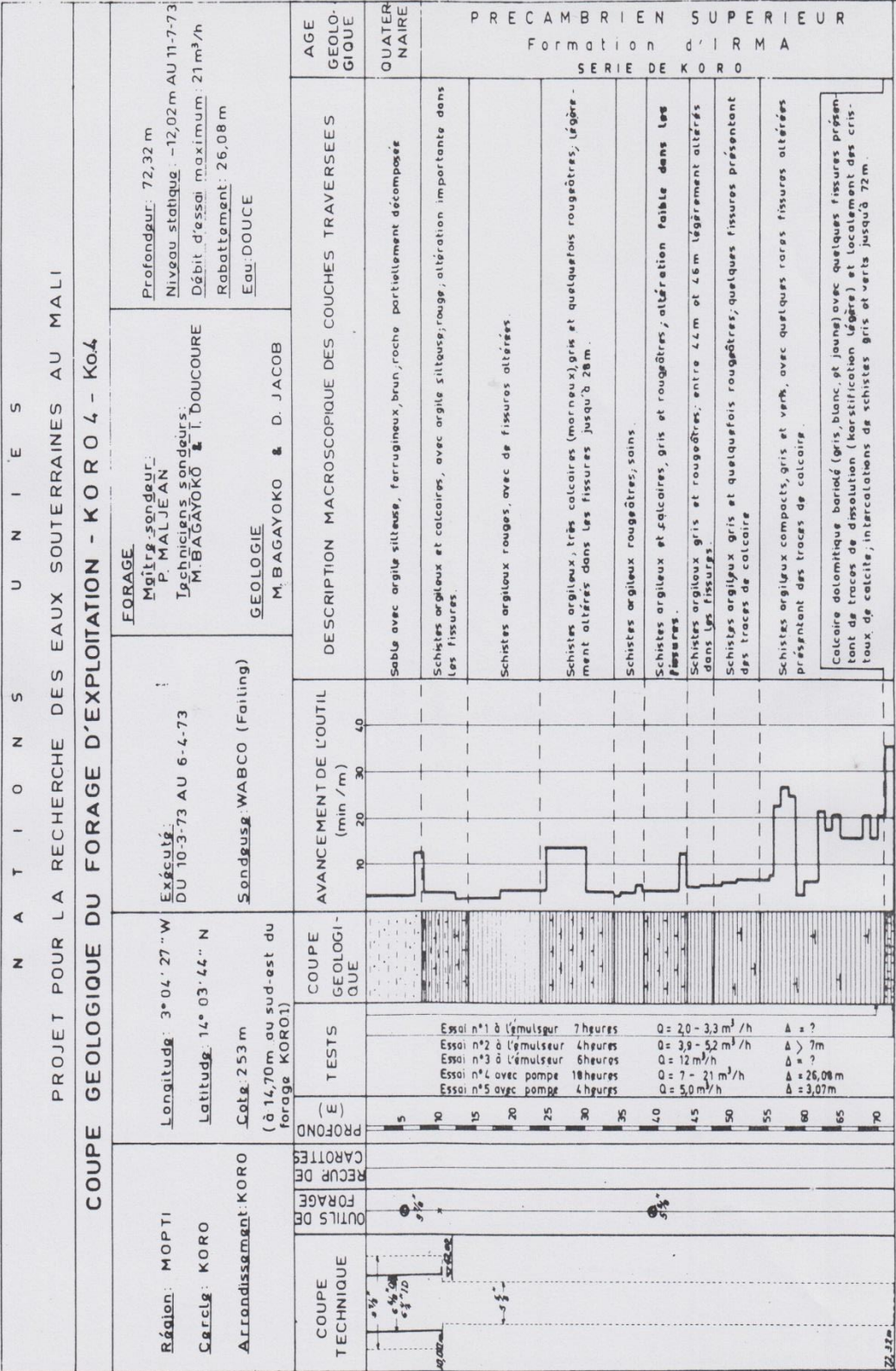
- Calcul de la recharge annuelle de la nappe, R :

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

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

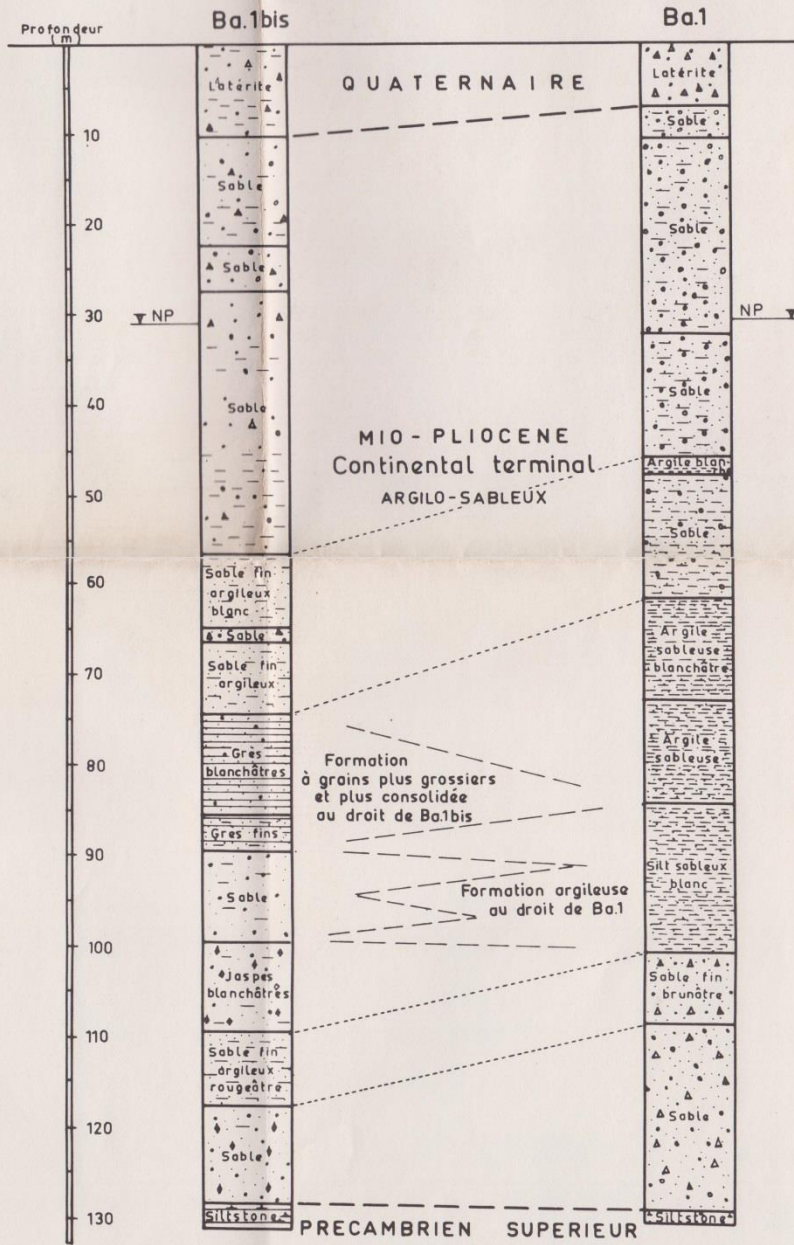
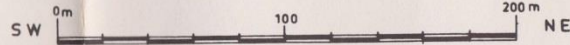
CORRELATION DES FORAGES BANKAS 1 ET 1bis

COUPE SCHEMATIQUE N45°E

700 m → BANKAS VILLE

COMITÉ
INTERAFRICAIN
D'ÉTUDES
HYDRAULIQUES

5701



Annexe 9 Mesures de l'épaisseur du Continental Terminal

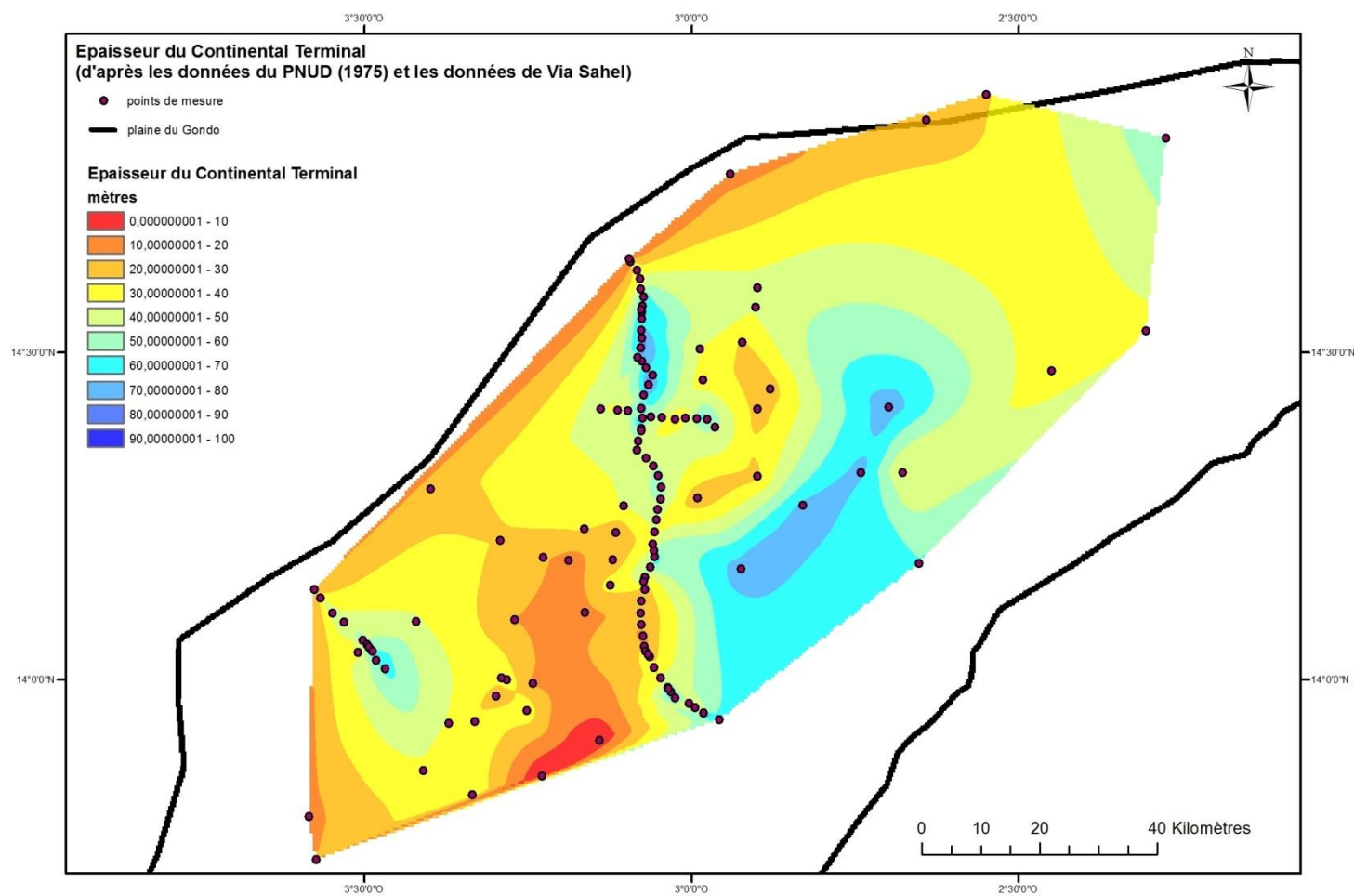
points de mesures	coordonnées géographiques		épaisseur du Continental Terminal (m)	niveau du substratum du Continental Terminal (m)	Source
	long DD	lat DD			
1	-3,078	14,084	35	224	PNUD (1975)
2	-3,079	14,102	20	240	PNUD (1975)
3	-3,078	14,12	22	240	PNUD (1975)
4	-3,072	14,138	20	244	PNUD (1975)
5	-3,072	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

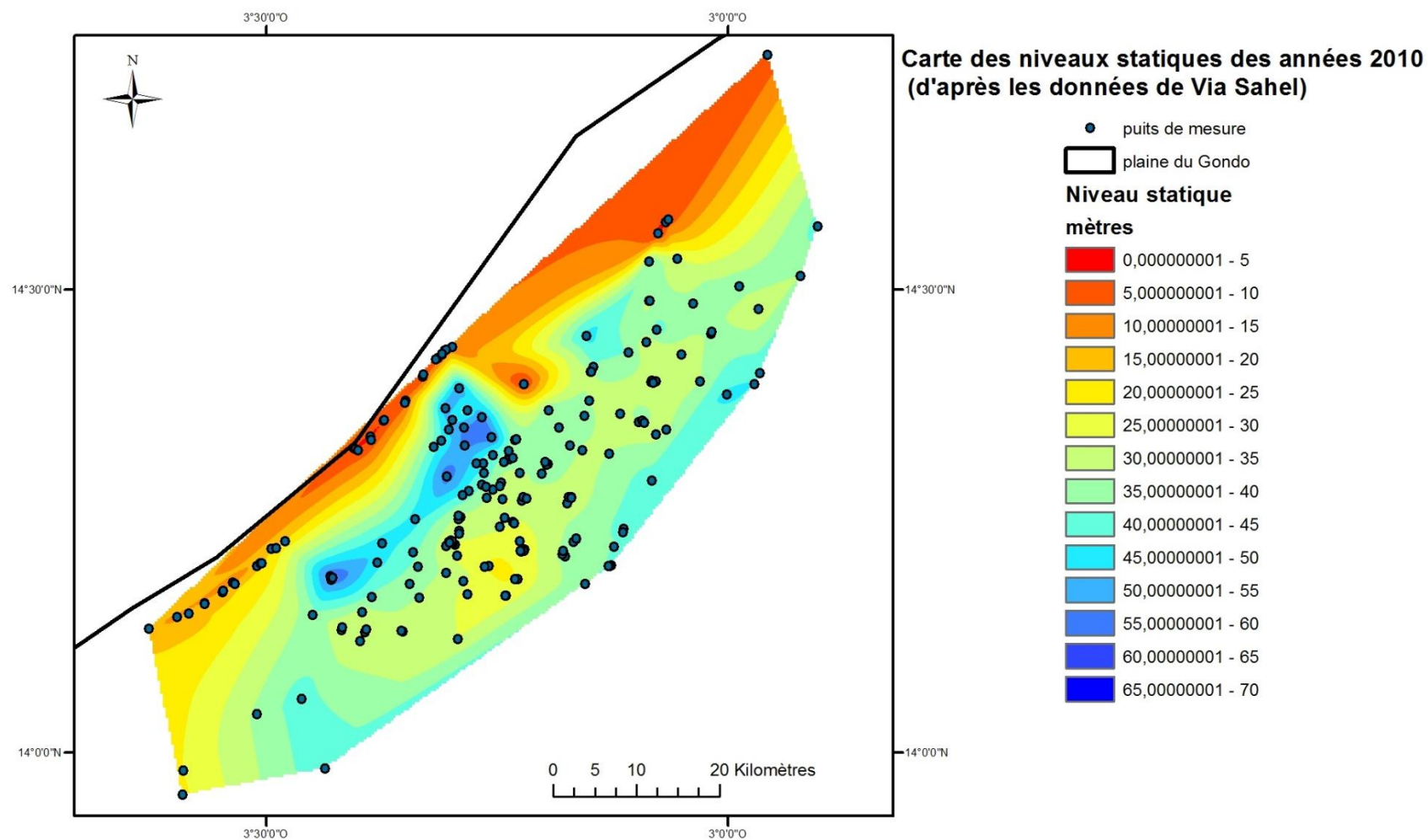
Identifiant	Coordonnées Géographiques		Altitude REF 3D (m)	Niveau statique moyen (m)	Piézométrie moyenne (m)
	Long DD	Lat DD			
113-Gangarabouro	-3,03069	14,40162	276	34	242
114-Kengue-2	-3,01774	14,45495	284	36	248
115--Sorou-2	-3,14627	14,41702	292	40	252
117-Ogodengou-Kana	-3,15513	14,18178	266	39	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

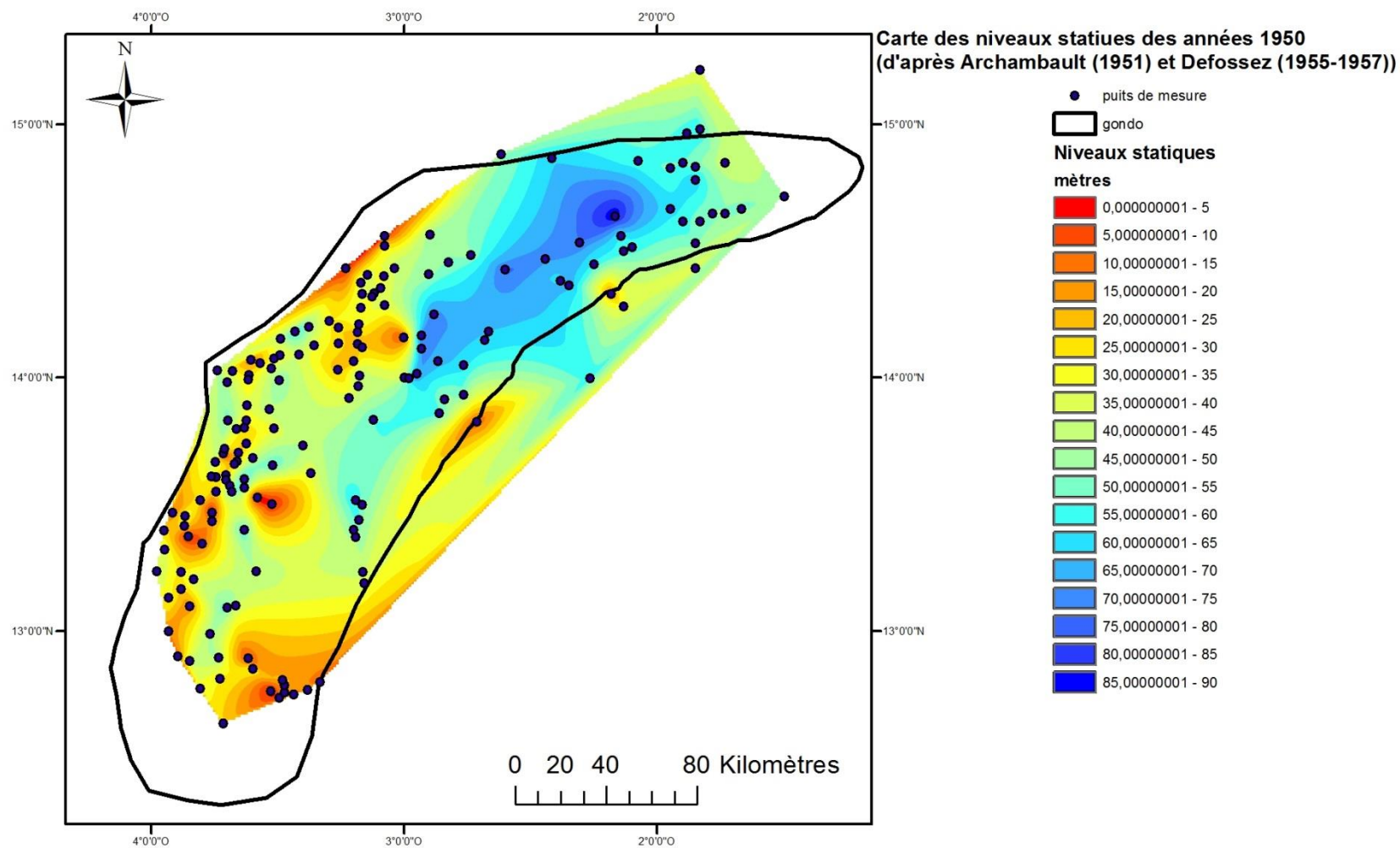
Villages	Coordonnées géographiques		Niveau statique d'après Archambault 1951(m)	Niveau statique d'après Defossez 1955-1957 (m)	Niveau statique moyen (m)	Altitude REF 3D (m)	Altitude SRTM (m)	Niveau piézométrique (m)
	Long DD	Lat DD						
Ardiema	-3,689	13,575	35	42	39		269	230
Koumbouriba	-3,745	13,551	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
Dama	-3,622	13,893		35,5	36	307		271
Yelema	-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 - Orotougna	-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

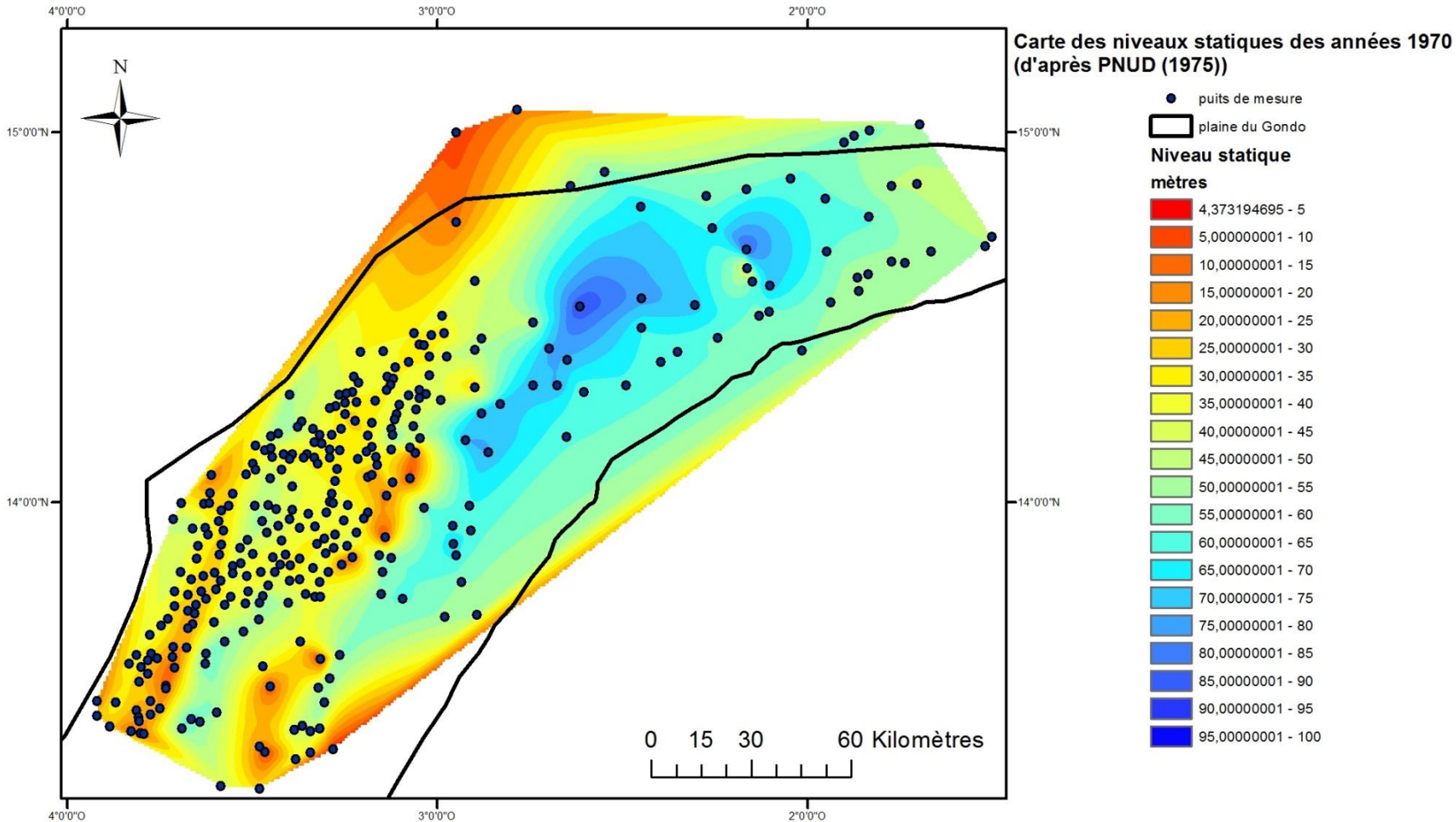
Identifiant	Coordonnées géographiques		Altitude REF 3D (m)	Altitude SRTM (m)	Niveau statique (m)	Niveau piézométrique (m)
	Long DD	Lat DD				
162 - Foulamdama	-3,6278	13,9333	312		39	273
163 - Soulakanda	-3,5778	13,9250	297		27,8	269
164 - Sardina bis	-3,6194	13,9153	306		35	271
165 - Forodou	-3,5139	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 - Yogoubénéme	-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

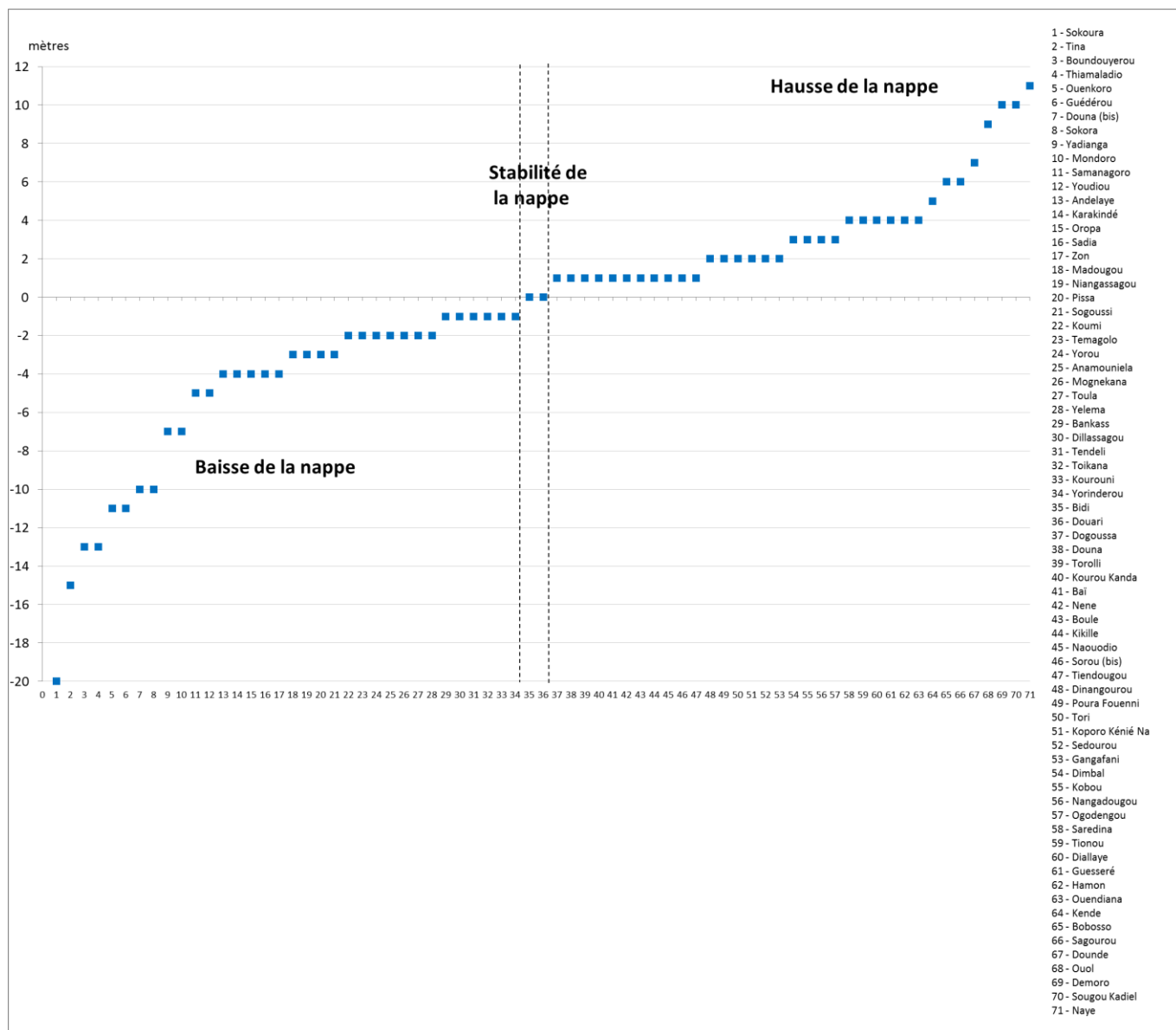
Planar Areas

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

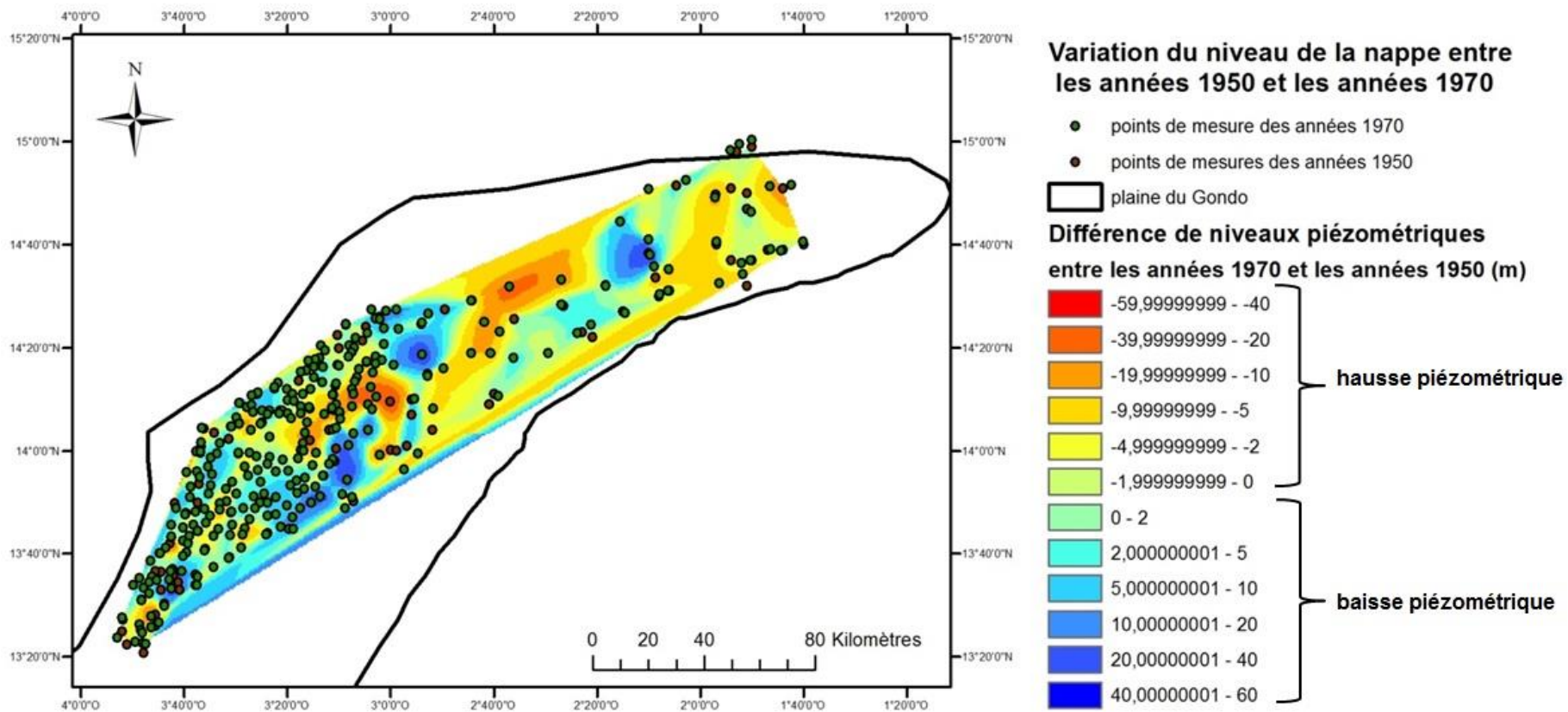
Surface Areas

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

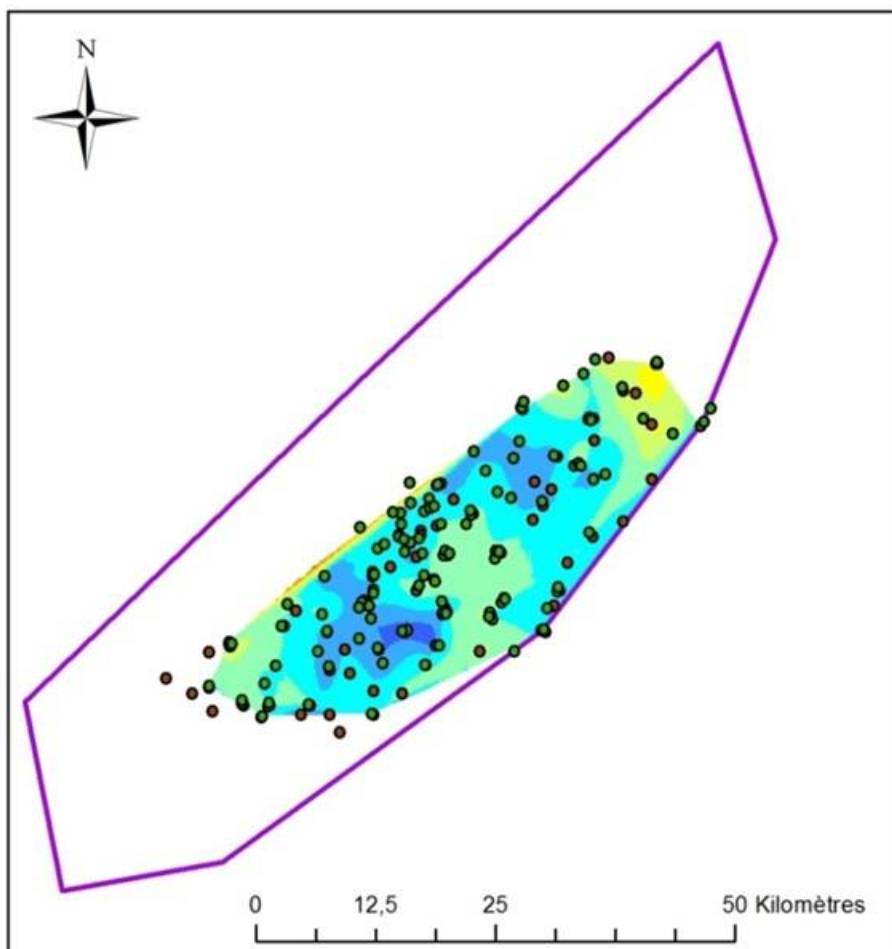
Planar Areas

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

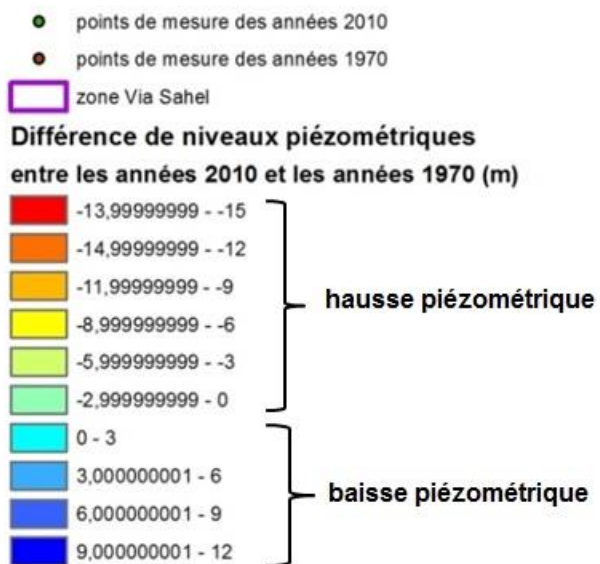
Surface Areas

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