



HAL
open science

Etude hydrogéophysique des échanges entre le fleuve Niger et les aquifères sédimentaire et de socle au Niger

Oumou Kaltoum Hama Garba

► **To cite this version:**

Oumou Kaltoum Hama Garba. Etude hydrogéophysique des échanges entre le fleuve Niger et les aquifères sédimentaire et de socle au Niger. Hydrologie. Université Grenoble Alpes [2020-..]; Université Abdou Moumouni, 2022. Français. NNT : 2022GRALU033 . tel-04064636

HAL Id: tel-04064636

<https://theses.hal.science/tel-04064636v1>

Submitted on 11 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE en cotutelle

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES
et DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ ABDOU MOUMOUNI**

Écoles doctorales : Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes (STEP) à l'UGA
Sciences de la Vie et de la Terre (SVT) à l'UAM

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'Environnement

Unités de recherche : Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) à l'UGA
Laboratoire des Eaux Souterraines et Géo-ressources à l'UAM

**Etude hydrogéophysique des échanges entre le fleuve Niger et
les aquifères sédimentaires et de socle au Niger**

**Hydrogeophysical study of exchanges between the Niger River
and sedimentary and basement aquifers in Niger**

Présentée par :

HAMA GARBA Oumou Kaltoum

Direction de thèse :

Guillaume FAVREAU Chargé de Recherche HDR, IRD/IGE	Co-Directeur de thèse
Yahaya NAZOU MOU Maître de Conférence, UAM/FAST	Co-Directeur de thèse
Marie BOUCHER Chargée de Recherche, IRD/IGE	Co-encadrante

Rapporteurs :

Valérie PLAGNES Professeur des Universités, Sorbonne Université (Paris, France)
Nicaise YALO Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Thèse soutenue publiquement à Grenoble le **6 décembre 2022**, devant le jury composé de :

Stéphane GARAMBOIS Professeur des Universités, Univ. Grenoble Alpes (France)	Président du jury
Nicaise YALO Professeur Titulaire, Univ. d'Abomey-Calavi (Bénin)	Rapporteur
Hervé JOURDE Professeur des Universités, Univ. de Montpellier (France)	Examinateur
Mamane Sani ABDOU BABAYE Maître de Conférence, Univ. Dan Dicko Dankoulodo de Maradi (Niger)	Examinateur
Fadji ZAOUNA MAINA Associate Research Scientist, NASA (USA)	Examinatrice
Yahaya NAZOU MOU Maître de Conférence, Univ. Abdou Moumouni (Niamey, Niger)	Co-Directeur de thèse
Guillaume FAVREAU Chargé de Recherche HDR, IRD au Niger	Co-Directeur de thèse

Invitée :

Marie BOUCHER Chargée de Recherche, IRD au Niger
--

UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Institut des Géosciences de
l'Environnement (IGE)

UNIVERSITE ABDOU MOUMOUNI

Faculté des Sciences et Techniques
Département de Géologie

THÈSE EN COTUTELLE

Pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes de l'Université Grenoble Alpes et le grade de Docteur en Sciences de la Vie et de la Terre de l'Université Abdou Moumouni de Niamey

Spécialité de doctorat : Sciences de la Terre et de l'Environnement

Présentée par :

Oumou Kaltoum HAMA GARBA

Soutenue publiquement le **6 décembre 2022 à Grenoble**

Etude hydrogéophysique des échanges entre le fleuve Niger et les aquifères sédimentaires et de socle au Niger

Jury :

Valérie PLAGNES

Professeur des Universités, Sorbonne Université (Paris, France), Rapporteur

Nicaise YALO

Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), Rapporteur

Fadji ZAOUNA MAINA

Associate Research Scientist, NASA, University of Maryland Baltimore County (USA), Examinatrice

Hervé JOURDE

Professeur Titulaire, Université de Montpellier (France), Examineur

Maman Sani ABDOU BABAYE

Maître de Conférence, Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi (Niger), Examineur

Stéphane GARAMBOIS

Professeur des Universités, Université de Grenoble Alpes (France), Président du jury

Yahaya NAZOU MOU

Maître de Conférence, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), Co-directeur de thèse

Guillaume FAVREAU

Chargé de recherche, HDR, Institut de Recherche pour le Développement (IRD au Niger ; France), Co-directeur de thèse

Marie BOUCHER

Chargée de recherche, Institut de Recherche pour le Développement (IRD au Niger ; France), Co-encadrante, Invitée

Dédicace

A la mémoire de mon frère Moctar HAMA GARBA

A la mémoire de ma sœur Mouniratou HAMA GARBA

A mes très chers parents

A mes enfants Zeinab et Zayd

A mon cher mari

A mes frères et sœurs,

A mes très chers Mme et Mr Idrissa BOUREIMA sans

oublier mes neveux et nièces.

Je dédie avec fierté et reconnaissance à tous ceux, de près ou de loin qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Table des matières

RESUMÉ	VIII
ABSTRACT	IX
Chapitre 1 : Contexte et questions de recherche	1
1.1 Enjeux sociétaux et contexte scientifique.....	2
1.2 Objectifs et éléments méthodologiques	5
1.2.1 Questions scientifiques et objectifs	5
1.2.2 Hypothèses	6
1.2.3 Méthodes utilisées	6
1.3 Financements et collaborations scientifiques	7
1.4 Difficultés rencontrées au cours de la thèse	7
1.5 Etiage 2018 et crue 2020 à Niamey.....	10
1.6 Organisation du document.....	13
Chapitre 2 : Zone d'étude	15
2.1 Localisation et morphologie de la zone d'étude	16
2.2 Hydroclimatologie et végétation	19
2.2.1 Pluviométrie	19
2.2.1 Température	22
2.2.2 Hydrographie.....	23
2.2.3 Végétation	25
2.3 Usage des eaux fluviales.....	26
2.4 Géologie.....	29
2.4.1 Le socle du Liptako nigérien	29
2.4.2 Le Continental Terminal : CT	32
2.4.3 Formations géologiques rencontrées au cours des missions de terrain	34
2.5 Hydrogéologie	36

2.5.1	Les aquifères de socle du Liptako Nigérien	36
2.5.2	L'aquifère sédimentaire du CT3	37
2.5.3	Les aquifères alluviaux.....	37
2.5.4	Les aquifères à Niamey	38
Chapitre 3 : Approche méthodologique.....		41
3.1	Choix des sites	42
3.2	Méthodes hydrologiques.....	52
3.2.1	Mesures piézométriques	52
3.2.2	Données disponibles.....	54
3.2.3	Nivellement	54
3.2.4	Calcul des flux souterrains : Loi de Darcy	55
3.3	Méthodes géophysiques.....	57
3.3.1	La géophysique appliquée à la subsurface	57
3.3.2	Choix des méthodes géophysiques.....	57
3.3.3	Les méthodes utilisées.....	58
3.3.3.1	Méthodes électriques	59
3.3.3.2	Prospections électromagnétiques	62
3.3.4	Récapitulatif des mesures géophysiques effectuées.....	77
3.4	Sondages à la tarière	80
Chapitre 4 : Caractérisation des aquifères		83
4.1	Identification et fonctionnement général des aquifères	84
4.1.1	Analyse géologique	84
4.1.1.1	Coupe géologique à l'amont de la zone d'étude	84
4.1.1.2	Coupe géologique à l'aval de la zone d'étude	88
4.1.2	Analyse piézométrique et direction des flux sur chaque site	92
4.1.2.1	Site du jardin botanique	92
4.1.2.2	Site de Gongga Zougou	96

4.1.2.3	Site de Gorou Tchirey	99
4.1.2.4	Synthèse sur le sens des échanges entre la nappe et le fleuve	100
4.2	Géométrie et propriétés hydrodynamiques des aquifères	102
4.2.1	Spatialisation des structures hydrogéologiques.....	102
4.2.1.1	Vers une représentation 2D des sondages TDEM	102
4.2.1.2	Etude comparative de l'ERT, du TDEM et des logs lithologiques des forages 104	
4.2.2	Analyse hydrogéophysique de chaque site.....	106
4.2.2.1	Jardin botanique	106
4.2.2.2	Gonga Zougou	109
4.2.2.1	Ouama - Dargol.....	114
4.2.2.2	Gorou Tchirey	121
4.3	Synthèse.....	124
Chapitre 5 : Echanges fleuve-aquifères et Impacts		127
5.1	Fonctionnement de l'hydrosystème fleuve – aquifères	128
5.1.1	Fonctionnement du site amont	128
5.1.2	Fonctionnement du site aval.....	130
5.1.3	Cas des affluents.....	132
5.1.4	Schéma conceptuel général	133
5.2	Quantification des flux	134
5.2.1	Flux d'eau entre le fleuve et son aquifère alluvial	135
5.2.2	Flux d'eau souterrain des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial du fleuve 136	
5.2.3	Inféro-flux des affluents vers le fleuve	137
5.2.4	Inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve	139
5.3	Impact des eaux souterraines sur le débit du fleuve et sur la gestion intégrée des ressources en eau	140
5.3.1	Influence des aquifères sur le débit du fleuve	140

5.3.2	Comparaison des flux souterrains avec les besoins en eau dans la vallée	141
5.4	Synthèse.....	142
Conclusion générale.....		143
6.1.	Synthèse des résultats	144
6.1.1	Direction des flux entre le fleuve et les aquifères	144
6.1.2	Géométrie et caractéristiques hydrogéologiques des aquifères.....	145
6.1.3	Modèle conceptuel de fonctionnement de l’hydrosystème fleuve-aquifères ...	145
6.1.4	Quantité d’eau impliquée dans les échanges fleuve-aquifères.....	146
6.2	Valorisation des résultats.....	147
6.3	Perspectives	147
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		149
Sites internet consultés.....		160
LISTE DES PLANCHES PHOTO.....		161
LISTE DES FIGURES.....		162
LISTE DES TABLEAUX.....		166
ANNEXES.....		167
	Annexe 1 : Sondages électromagnétique (CMD-Explorer).....	168
	Annexe 2 : Sondages électriques verticaux	169
	Annexe 3 : Tomographie électrique	170
	Annexe 4 : Méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP).....	176

RESUMÉ

Dans le sud-ouest semi-aride du Niger, dans les régions de Tillabéry et de Niamey (capitale du pays), le fleuve Niger a connu des effets emblématiques du changement climatique. Les conséquences des sécheresses sévères endurées dans les années 1970 - 1980 ont modifié la couverture du sol et le cycle de l'eau. Ces bouleversements ainsi que l'intensification observée des événements pluvieux ont pour conséquence (1) la dégradation de l'environnement (déforestation et encroûtement des sols) qui a conduit à une augmentation du taux de ruissellement ; (2) une remontée durable de la nappe phréatique ; et par la suite, (3) une modification du régime hydrologique du fleuve Niger. En conséquence, on observe d'une part, une augmentation de la fréquence des inondations pendant la saison des pluies dans la ville de Niamey (ex., 2012, 2020) et, d'autre part, une récurrence de faibles débits d'étiage en fin de saison sèche, menaçant l'approvisionnement en eau domestique de la capitale (ex., 2018). Pour mieux prévoir les débits du fleuve dans la perspective (1) d'une gestion durable de la ressource en eau et (2) de la maîtrise des risques d'inondation, cette étude vise à quantifier la contribution des eaux souterraines au débit du fleuve. Cette contribution des eaux souterraines est souvent difficile à estimer en raison des flux saisonniers très variables.

Combinant les approches quantitatives hydrogéologiques et géophysiques, l'étude a permis de caractériser les différentes structures aquifères et leurs fonctionnements hydrogéologiques en bordure du fleuve Niger. Les suivis piézométriques ont permis de dresser une typologie des échanges en fonction de la géomorphologie et de la géologie. A large échelle (~ 1 km) ces suivis ont confirmé que les flux d'eau souterrains sont en direction du fleuve, quel que soit le contexte géologique et la saison. A plus fine échelle, le fonctionnement du système devient plus complexe et dépend à la fois de la géologie, de la géomorphologie et de la saison. L'ensemble des résultats a permis de mettre en évidence le rôle tampon de l'aquifère alluvial qui (1) échange avec le fleuve et (2) est rechargé par les aquifères régionaux adjacents (altérites de socle et formation sédimentaire du Continental Terminal). La comparaison des flux souterrains avec les seuils d'alerte à la station de Niamey ($1760 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'alerte orange aux crues ; $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour l'alerte sécheresse) montre que la capacité de l'aquifère alluvial à amortir les crues (max. $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et à soutenir les étiages (max. $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) reste limitée. Le flux des aquifères régionaux vers le fleuve Niger représente toutefois un flux environnemental significatif ($\sim 4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur une section de 530 km de long), comparé à la consommation actuelle liée aux principaux besoins en eau de la population (eau domestique, irrigation, pastoralisme).

Mots clés : échange nappe - rivière, piézométrie, méthodes géophysiques électriques et électromagnétiques (ERT, TDEM), Résonance magnétique des protons (RMP), Sahel.

ABSTRACT

In the semi-arid southwestern Niger, in the Tillabéry and Niamey (capital of Niger Republic) regions, the Niger River has experienced emblematic effects of climate change. The consequences of the 1970s - 1980s severe droughts have altered the land cover and the water cycle. These disruptions and the observed intensification of rainfall events have resulted in (1) environmental degradation (deforestation and soil crusting) which has led to an increase in the runoff rate; (2) a long-term rise in the water table; and subsequently, (3) a modification of the hydrological regime of the Niger River. As a result, we observe on the one hand, an increase in the frequency of flooding during the rainy season in Niamey (e.g., 2012, 2020) and, on the other hand, a recurrence of low water flows at the end of the dry season, threatening domestic water supplies in the capital city (e.g., 2018). To better forecast river flows in the perspective of (1) sustainable water resource management and (2) flood risk control, this study aims to quantify the contribution of groundwater to the Niger River. This groundwater contribution is often difficult to estimate due to highly variable seasonal flows.

By combining quantitative hydrogeological and geophysical approaches, the study made it possible to characterize the different aquifer structures and their hydrogeological functioning along the Niger River. The piezometric monitoring allow drawing up a typology of exchanges according to geomorphology and geology. At a large scale (~ 1 km), these monitoring have confirmed that groundwater flows are towards Niger River regardless of the geological context and the season. At a finer scale, the functioning of the system becomes more complex and depends on the geology, the geomorphology, and the season. All the results highlighted the buffer role of the alluvial aquifer which (1) exchanges with the river and (2) is recharged by the adjacent regional aquifers (weathered basement and sedimentary formation of the Continental Terminal). The comparison of groundwater fluxes with river warning levels at the Niamey station ($1760 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for flood alert; $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for drought alert) shows that the capacity of the alluvial aquifer to dampen floods (maximum $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) and to support low water levels ($\sim 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) remains limited. However, the flux from regional aquifers towards the Niger River valley represents a significant environmental flux ($\sim 4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ over a 530-km-long section) compared to current consumption in link with the main water needs of the population (domestic use, irrigation, pastoralism).

Keywords: aquifer-river interaction, piezometry, electrical and electromagnetic geophysical methods (ERT, TDEM), Magnetic Resonance Sounding (MRS), Sahel.

« L'eau est une source vitale.

Pour la gérer comme il le faut,

il est nécessaire de la connaître»

Béatrice Ketchemen Tandia (thèse de doctorat)

Chapitre 1 : Contexte et questions de recherche

Chapitre 1 : Contexte et questions de recherche

1.1 Enjeux sociétaux et contexte scientifique

Le Sahel est une région de l'Afrique sub-saharienne caractérisée par un climat semi-aride à aride. Ce climat a la particularité de présenter une très grande variabilité saisonnière et interannuelle. Ainsi, la région sahélienne a connu une période de lourdes sécheresses entre les années 1970 et 1990. Ces sécheresses ne sont pas restées sans répercussion. La région s'est vue confrontée à une diminution des débits des cours d'eau, voire à leur disparition (Guéro, 2003). Cette diminution des ressources en eau de surface provoque des problèmes de pénurie d'eau pour une population qui ne cesse de croître. Face à cette situation, l'accès à l'eau en quantité et en qualité ne peut pas être garanti par les eaux de surface uniquement. Les eaux souterraines constituent alors une ressource complémentaire et alternative pour l'approvisionnement en eau de la population sahélienne dont les Nigériens font partie.

Le Niger est un pays sahélien caractérisé par un très fort taux de croissance démographique (3,9% par an ; RGP/H 2012). Le réseau hydrographique du pays procure de faible quantité d'eau de surface. Le principal cours d'eau est le fleuve Niger qui traverse la partie sud-ouest du pays dans les régions de Tillabéry et de Dosso en passant par Niamey la capitale du pays. Dans ces régions, le débit du fleuve a diminué (Amogu, 2009) notamment pendant les années des grandes sécheresses (1970-1990) jusqu'à atteindre des niveaux inférieurs au niveau critique ($\leq 10 \text{ m}^3/\text{s}$). Le fleuve s'est même complètement asséché à Niamey pendant l'étiage de 1985 (Bechler-Carmaux et al., 1999). Depuis la réalisation du barrage de Sélingué au Mali mis en service en 1981 (cf. localisation en Figure 1), la situation d'étiage du fleuve semble s'améliorer. Toutefois, le fleuve Niger a encore connu un étiage sévère à Niamey en 2018.

Par ailleurs, une modification du régime hydrologique du fleuve a été remarquée. Cette modification est causée par les changements d'états de surface (Leblanc et al., 2008; Loireau, 1998) et par l'augmentation des extrêmes pluviométriques (Panthou, 2013). A la station de Niamey, cette modification du régime hydrologique montre une accentuation de la crue locale sur l'hydrogramme qui comprend deux pics de crue (Leblanc et al., 2008 ; Descroix et al., 2012, 2013 ; Sighomnou et al., 2013) :

- La crue locale dite « crue rouge » se produit au milieu de la saison pluvieuse (dans la période d'août à septembre). Elle est plus ou moins prononcée selon les années. On note toutefois que les maximums observés depuis l'installation de la station de mesure

à Niamey en 1929 se sont produits dans les années récentes (2012, 2019 et 2020). Cette crue locale est caractérisée par une remontée rapide du niveau d'eau qui engendre une recrudescence des inondations avec pertes matérielles et humaines.

- La crue guinéenne dite « crue noire » est due à la propagation de l'onde de crue issue de la pluie tombée sur les montagnes de Guinée. Cette crue arrive lentement après avoir traversé le delta intérieur du fleuve Niger. A Niamey elle est observée de novembre à mars, c'est-à-dire au cœur de la saison sèche. Son amplitude et sa durée varient fortement selon les années.

Les couleurs « rouge » et « noire » attribuées aux noms des crues est liée à la couleur du fleuve : pendant la crue locale l'eau qui est fortement chargée de matière en suspension venant des sols latéritiques a une coloration rougeâtre tandis que pendant la crue guinéenne l'eau qui n'est pas chargée est transparente ce qui confère au fleuve un aspect sombre.



Figure 1: Localisation de la zone d'étude sur le bassin du Fleuve Niger
(fond de carte : Wikipedia)

Pour réguler les débits (soutien à l'étiage et écrêtement des crues) un barrage est actuellement en construction sur le site de Kandadji situé à 187 km en amont de Niamey (Figure 1). Ce barrage est une infrastructure à usage multiple : en plus de la régulation des débits, il servira à la production hydroélectrique et à l'irrigation des cultures. Sa mise en fonction est prévue pour 2025 (Rapport de synthèse général du programme de Kandadji, novembre 2006).

La gestion intégrée de la ressource en eau qui prend en compte les différents usages (besoins domestiques, irrigation, production hydroélectrique, pêche etc.) sera particulièrement cruciale

au moment de la mise en eau du barrage de Kandadji, tant pour Niamey que pour l'aval. Cette gestion intégrée requiert une bonne connaissance des processus qui influencent les débits du fleuve. Parmi ces processus, il est nécessaire de connaître les échanges entre le fleuve et les aquifères qui l'entourent. Si le fleuve alimente l'aquifère ou l'inverse, l'aquifère peut, en période d'étiage, contribuer à soutenir le débit du fleuve ou au contraire constituer une perte. En période de crue, l'aquifère peut jouer un rôle tampon ou au contraire amplifier la crue.

D'après les études antérieures, le fleuve Niger présente un niveau plus bas que les niveaux d'eau mesurés dans l'aquifère sédimentaire du Continental Terminal dans la ville de Niamey (Boubakar Hassane et al. 2016) et en rive droite à l'aval de Niamey (Figure 2). Cela indique que le fleuve ne peut que recevoir de l'eau de l'aquifère du Continental Terminal (Leduc et al. 1997). Toutefois, les interactions avec les autres aquifères autour du fleuve n'ont pas été documentées dans ces études. De plus, les flux d'eau de l'aquifère du Continental Terminal vers le fleuve n'ont pas été quantifiés. Or la hausse récente des niveaux d'eau dans la nappe du Continental Terminal (Favreau et al., 2009; 2012) induit probablement une augmentation de ces flux. Ainsi, on observe depuis plusieurs années la transformation de certains cours d'eau temporaires en cours d'eau permanents alimentés par la nappe dans les vallées.

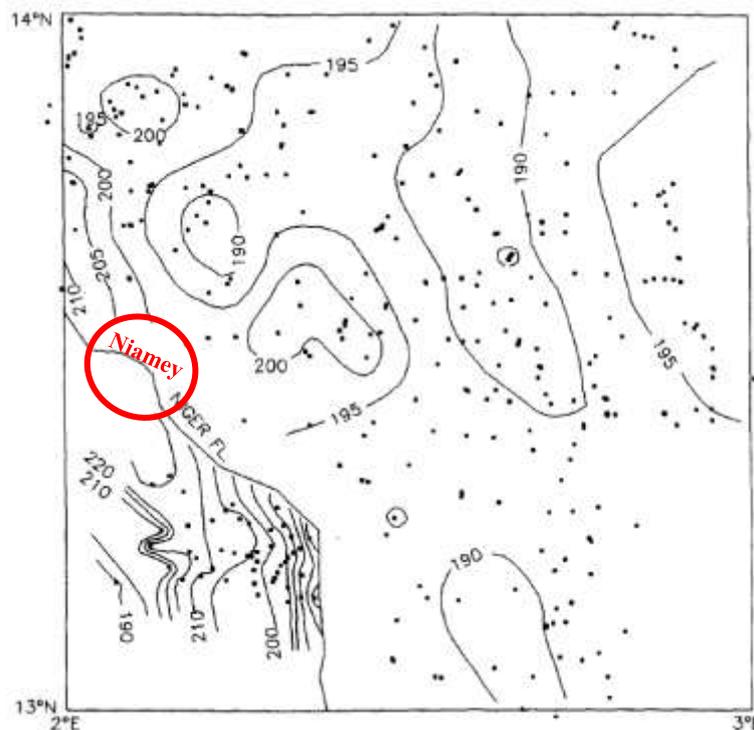


Figure 2: Carte des niveaux piézométriques dans l'aquifère du Continental Terminal autour de Niamey en septembre 1993 (Leduc et al. 1997)

Afin d'affiner les connaissances sur la relation qu'il existe entre le fleuve Niger et les eaux souterraines, nous étudions dans cette thèse le système fleuve – aquifères à fine échelle spatiale et en fonction des saisons. Parmi les différentes contributions actuelles des aquifères sédimentaires et de socle au débit du Niger Moyen, nous nous intéressons plus particulièrement à la capacité de ces aquifères à soutenir le débit d'étiage du fleuve, ceci dans la perspective d'améliorer la gestion intégrée des ressources en eaux dans le sud-ouest du Niger en tenant compte du débit réservé pour le barrage de Kandadji. Dans notre étude, nous utilisons la piézométrie, la loi de Darcy et la géophysique pour estimer l'impact des flux entre eaux souterraines et eaux de surface dans un contexte de changement global et d'accroissement démographique fort.

1.2 Objectifs et éléments méthodologiques

1.2.1 Questions scientifiques et objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de déterminer la ou les relation(s) existante(s) entre les aquifères et le fleuve Niger dans la partie sud-ouest du Niger, selon le contexte géologique (sédimentaire et socle). Pour atteindre ces objectifs, nous nous sommes posés les questions suivantes :

1. Quel est le fonctionnement des aquifères en bordure du fleuve Niger ? Notamment :
 - a. Dans quel sens ont lieu les échanges avec le fleuve Niger selon la géologie et les saisons ?
 - b. Comment les différents compartiments des aquifères sont-ils agencés ?
2. Quels sont les flux échangés entre les aquifères et le fleuve à l'échelle de la zone d'étude, et à l'échelle régionale ?
3. Ces flux sont-ils significatifs et dans quelle mesure permettent-ils de soutenir le débit d'étiage du fleuve Niger ?

Les réponses à ces questions nécessitent de compléter nos connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique des aquifères dans la région de Niamey. Ainsi les objectifs spécifiques de la thèse sont les suivants :

- a. Préciser les sens des échanges entre les aquifères et le fleuve en fonction des saisons et du contexte géologique ;
- b. Préciser la géométrie et la structure géologique des aquifères présents dans la zone d'étude au contact entre le sédimentaire et le socle ;

- c. Élaborer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique des systèmes d'aquifère en bordure du fleuve Niger dans la région de Niamey.
- d. Quantifier les flux souterrains échangés avec le fleuve à petite échelle et à l'échelle régionale.

1.2.2 Hypothèses

Pour répondre à nos questions scientifiques, nous avons formulés trois hypothèses qui sont :

1. Les échanges entre les nappes et le fleuve pourraient être plus complexes que ce qui est documenté dans la littérature.
2. La contribution des aquifères au débit du fleuve est fonction de la nature de l'aquifère (socle/sédimentaire) et varie d'amont à l'aval
3. Les aquifères contribuent au débit du fleuve et représentent une part significative du régime du fleuve en période d'étiage.

1.2.3 Méthodes utilisées

Pour atteindre nos objectifs, nous avons procédé en quatre étapes :

1. La première étape a consisté à identifier les aquifères par une analyse géologique et à définir les directions générales des flux d'eau souterrains en utilisant la piézométrie. Cela a permis d'avoir une première idée des échanges entre les différentes nappes et le fleuve Niger en fonction des saisons. Pour la réalisation de cette première étape, nous avons utilisé des outils comme les levés topographiques et les suivis piézométriques.
2. La seconde étape a consisté à caractériser les aquifères en déterminant leur géométrie et leur structure géologique. Pour cela nous avons utilisé des outils géophysiques (sondage électromagnétique en domaine temporel TDEM, tomographie de résistivité électrique ERT, sondage par Résonance Magnétique de Proton RMP), les données géologiques et hydrogéologique de la littérature, les sondages à la tarière et les observations de terrain.
3. La troisième étape a consisté à consolider le schéma conceptuel de fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-aquifères et à préciser les flux d'eau souterrains. Pour quantifier ces flux nous avons utilisé l'équation de Darcy dont les paramètres ont été contraints avec les résultats géophysiques et les propriétés hydrodynamiques décrites dans la littérature grise (rapports de forage).
4. La quatrième étape a consisté à analyser la significativité des résultats. Pour cela les flux d'eau souterrains ont été estimés à une échelle régionale et comparés avec les débits

naturels du fleuve (à l'étiage, pendant les crues), le débit réservé prévu après le barrage de Kandadji et avec certains usages de l'eau dans la vallée du fleuve.

1.3 Financements et collaborations scientifiques

Cette thèse a été financée par l'Etat Nigérien qui nous a octroyé une bourse de troisième cycle sur toute la durée de la thèse, par le SCAC (Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'ambassade de France au Niger) qui nous a accordé une bourse de mobilité de 6 mois, et par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) qui a complété la bourse pour une durée de 37 mois avec son dispositif ARTS (Allocation de Recherche pour une Thèse au Sud). Les travaux de terrain ont été réalisés grâce à des crédits du projet Labex OSUG@2020 et à un prêt d'équipement de la structure CRITEX. D'autres structures comme l'ABN (Autorité du Bassin du fleuve Niger), AMMA-CATCH (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), AGRHYMET, WASCAL (UAM) nous ont fourni des données (les niveaux d'eau du fleuve Niger à Niamey pour l'ABN, précipitation sur la zone d'étude pour AMMA-CATCH), ou accordé l'accès à leur site pour les mesures de terrain.

La thèse a été élaborée selon une alternance de séjour à Grenoble en France, à l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et à Niamey au Niger, au laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources. Durant mes séjours à l'IGE, j'ai travaillé au sein de l'équipe PHyREV (Processus Hydrologiques et Ressources en Eau Vulnérables). L'équipe intervient dans beaucoup de pays sur les continents africain, asiatique et européen avec un focus particulier sur l'Afrique de l'Ouest, dont le Sahel. Les travaux que l'équipe PHYREV mène en Afrique de l'Ouest rentrent dans le cadre de plusieurs projets terminés (NOEVA, Projet européen GRIBA, GROFUTURE, etc.) et en cours (PEA 3EC-Sahel, CECC, LMI REZOC, SNO AMMA-CATCH, ANR EQUIPEX CRITEX, etc). Au Niger, le laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources du Département de Géologie a pour thématiques : 1) Evaluation des Ressources en eau et 2) Qualité et pollution des nappes. Pendant mes séjours à Niamey, j'ai été hébergée dans les locaux de la Représentation de l'IRD au Niger.

1.4 Difficultés rencontrées au cours de la thèse

Dans la réalisation des travaux de terrain nous avons rencontré des difficultés de plusieurs types. Elles nous ont permis de relever plusieurs défis et d'avoir une certaine maturité que ce soit dans le domaine de la recherche ou de la vie professionnelle et sociale. Les difficultés sont résumées dans les points suivants :

- Les zones d'étude ont été classées en « rouge » par l'ambassade de France en août 2020. Mais les conditions sécuritaires étaient déjà dégradées avant cela dans la zone dite des 3 frontières (Niger, Mali, Burkina Faso). Cela s'est traduit par un état d'urgence sécuritaire mis en place par les autorités nigériennes notamment dans le département de Gotheye où se situe un de nos sites : le bassin de Ouama. Le département est alors passé sous contrôle militaire (à la place du contrôle policier habituel). Pour éviter les risques liés aux conditions sécuritaires, il a été choisi d'arrêter les mesures de terrain sur le bassin versant du Ouama fin 2019.
- De mai à septembre 2019, j'ai rencontré des difficultés dans la recherche de logement pour mon séjour en France avec ma fille. Durant cette période, j'ai été obligée de mettre en pause mes travaux pour consacrer tout mon temps à la recherche d'un appartement. C'était une période de stress car j'avais la pression de trouver un appartement avant la date du rendez-vous pour l'inscription de ma fille à la crèche. Mais c'était surtout une période difficile car certaines visites étaient tout simplement cauchemardesques. Il a fallu le 7 septembre pour qu'une dame charitable accepte de me louer son appartement de 25 m² mais à une somme colossale. Vu toutes les difficultés rencontrées j'ai signé un contrat d'un an sachant que je ne serai pas en France de décembre 2019 à mars 2020. J'ai donc gardé mon appartement pendant ces 4 mois sans y loger. Sachant que ma bourse en étant au Niger ne me permet pas de couvrir les charges liées à mon appartement en France, j'ai fait quelques économies et j'ai demandé qu'on me verse ma bourse de cette période sur mon compte bancaire français. De cette façon, chaque mois je puise dans mes économies pour compléter ma bourse et payer mon loyer. Avec la pandémie, je n'ai pas pu retourner en France en début d'avril comme prévu. Ayant déjà puisé mes économies et ne sachant pas quand est-ce que j'aurais la chance de retourner en France, je ne pouvais pas supporter les charges au-delà du mois d'avril 2020. Malgré tous ces sacrifices et efforts, j'étais contrainte de résilier mon contrat de bail surtout n'ayant pas trouvé de solution de la part de l'administration de l'IRD. Quoiqu'il en soit, cela ne m'a pas empêché de poursuivre mes travaux de recherche. Au contraire, sortir de cette expérience m'a donné plus de force et courage pour montrer mes capacités et ma volonté d'aller jusqu'au bout de mes travaux et surtout de montrer que le fait d'avoir un enfant ne constitue aucun frein pour les femmes désirant poursuivre une carrière dans la recherche.

- En août 2019 et juillet 2020, nous avons fait face à des nouveaux défis liés aux intempéries saisonnières de la zone d'étude. Etant donné que la grande partie des missions de terrains ont été effectuées pendant la saison pluvieuse, nous avons été dans l'incapacité de réaliser des mesures géophysiques dans le lit des cours d'eau et sur les berges les jours où il pleuvait et/ou le ciel était menaçant (c'est-à-dire quand le ciel annonce l'arrivée de la pluie avec formation des nuages ou présence de la poussière). Il était également impossible sur les berges par crainte d'être emporté (nous et nos équipements) par les eaux de ruissellement dans les koris (i.e. oued ou cours d'eau temporaire). Ces eaux sont drainées vers l'exutoire avec une certaine force sur plusieurs kilomètres pouvant emporter tout objet non fixé. Les écoulements dans les koris peuvent durer plusieurs heures selon l'importance des précipitations enregistrées. Par exemple lors de notre mission de sondages RMP faite le lundi 07 août 2019 sur le bassin de Ouama, nous avons été pris au piège par la pluie. Au cours de cette mission, toute la pluie est tombée sur nous par manque de parasol. Le seul qui était à notre disposition était utilisé pour mettre les appareils à l'abri. En plus nous ne pouvions pas nous abriter dans le véhicule car nous devons sécuriser les appareils de peur qu'ils soient emportés par les eaux ou la population. Notre véhicule s'est également embourbé après la pluie à cause de la saturation du sol qui est composé de sable dunaire fin (Planche photo 1a). Il a fallu 17 h passé pour que nous puissions surmonter l'obstacle avec l'aide des villageois qui ont réclamé de l'argent, un montant colossal que nous n'avons pas à notre disposition.

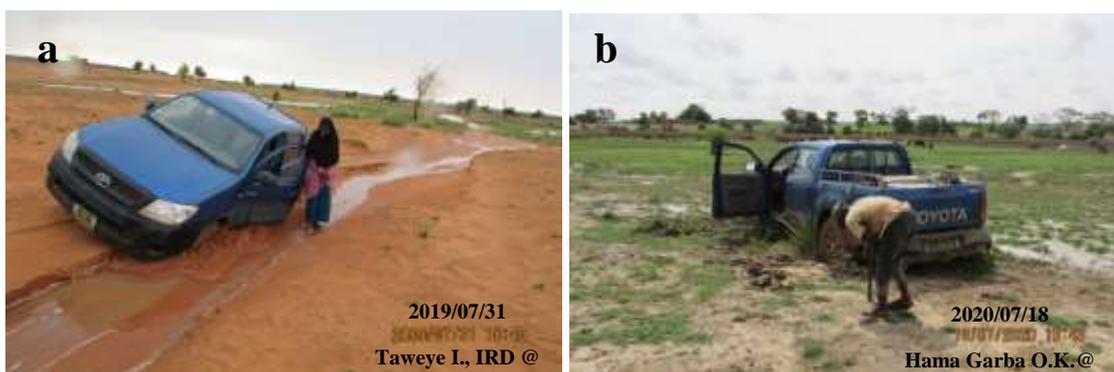


Planche photo 1: Véhicules embourbés

*a- après la pluie dans le sable dunaire du bassin de Ouama (zone de Dargol, X : 308963 ; Y : 1545908) et
 b- dans une couche d'argile glissante d'un bas fond au bord du fleuve (village de Werkéré,
 X : 430901 ; Y : 1462071)*

Quelques minutes après cet obstacle, nous étions bloqués plus de 2 heures de temps sur l'autre rive de la rivière Ouama qui drainait l'eau de la pluie vers le Dargol, un affluent du fleuve

Niger. Cela nous a fait perdre encore plus de temps alors que nous aurions dû être à Niamey avant 17h30 à cause de l'insécurité de la zone. Ces difficultés rencontrées sont à l'image des difficultés surmontées au cours de certaines missions sur d'autres sites (Planche photo 1b).

Nous avons aussi rencontré parfois des difficultés d'avoir accès à certains sites par manque de consentement avec les chefs des villages. D'une part, nous n'avons pas pu obtenir l'autorisation des chefs ; les propos des villageois auprès de ces derniers nous traitaient de coupeurs de tête à cause des grosses cantines de protection de nos appareils. Et d'autre part, notre site se localise sur un terrain à litige entre les deux villages (Dagari et Gongga Zougou Zarma). Ceci a quasiment empêché les mesures sur ce site. Ce qui fait que sur le plateau de Gongga Zougou nous avons des données manquantes.

A la fin, j'ai compris que tous ces éléments de difficultés font partie de la vie réelle de la recherche.

1.5 Etiage 2018 et crue 2020 à Niamey

Au cours de l'année 2018 et 2020, deux événements exceptionnels se sont produits autour du fleuve Niger dans la région de Niamey. Dans ces travaux, il est important de faire ressortir ces événements marquant la zone d'étude pendant la durée de la thèse.

Pour mieux comprendre et jauger l'étiage et la crue qui se sont passés respectivement en 2018 et 2020 à Niamey dans le bassin du Niger moyen, nous allons rappeler la situation de la ville de Niamey et le fonctionnement du système hydrologique du fleuve Niger à la station de Niamey. La ville de Niamey, située à l'ouest du Niger, s'est construite sur les terrasses d'un plateau d'altitude variant de 180 à 250 m. Au cours de ces dernières décennies, elle connaît une croissance urbaine abrupte. Cette croissance combinée aux changements climatiques augmente les risques de sécheresse et d'inondation. En effet, la communauté urbaine de Niamey est traversée par le fleuve Niger sur une distance de ~35 km. Le fleuve à Niamey présente un régime hydrologique caractérisé par deux périodes de crue (Figure 3). La première crue correspond à la crue locale, se produisant en saison des pluies, généralement entre août et septembre. Elle se produit grâce aux importants apports des affluents de la rive droite : Dargol, Sirba et Gorouol situés en amont de la ville de Niamey (Malam Abdou, 2014; Descroix et al., 2013). La seconde crue est la crue guinéenne qui survient postérieurement à la crue locale. Elle a lieu le plus souvent dans la période de novembre à mars et correspond aux apports en provenance des sommets guinéens qui ont transité par le delta intérieur au Mali.

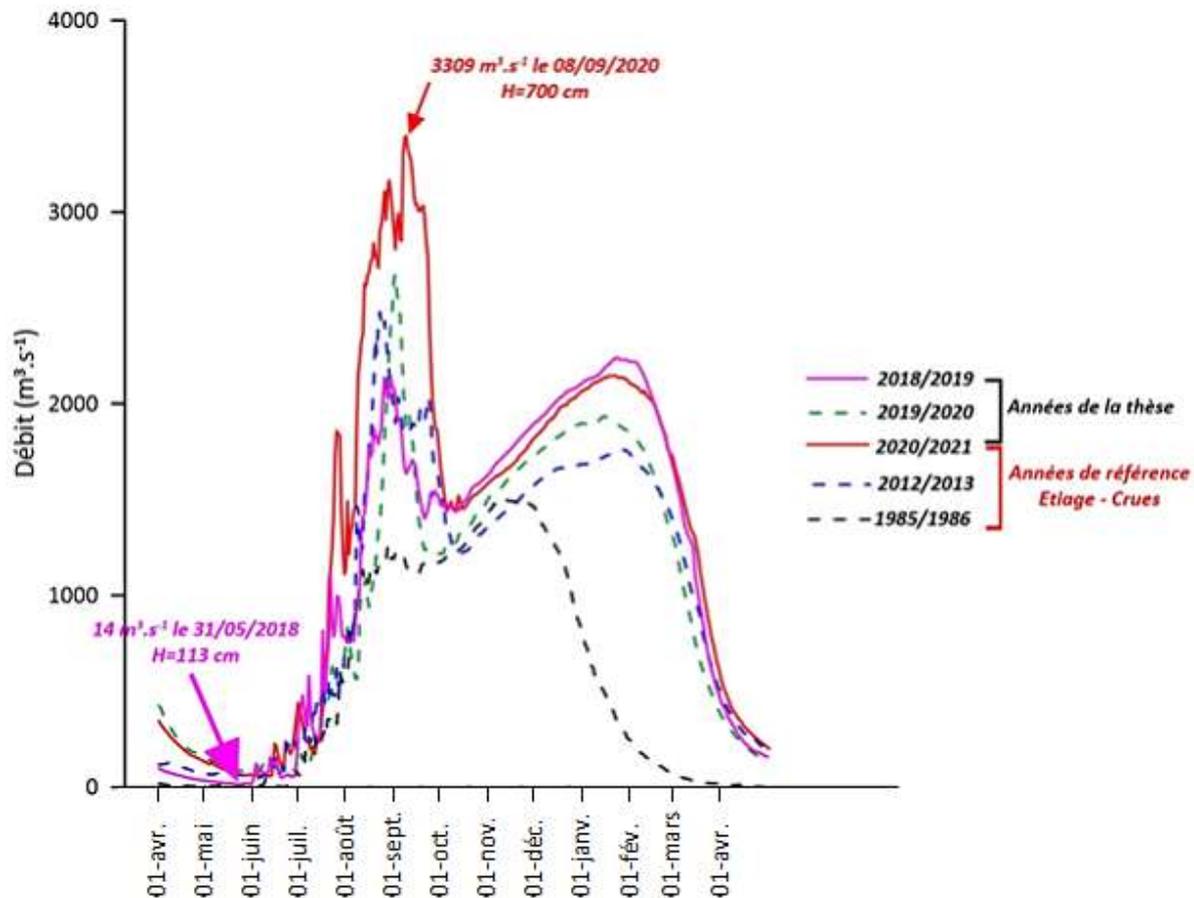


Figure 3: L'hydrogramme du fleuve Niger à la station de Niamey au cours des années hydrologiques 2018 à 2021 et pour les années de références (crue 2012 et étiage 1985)

En 2018, les suivis hydrologiques du fleuve Niger témoignent d'un déficit de son débit à la station de Niamey qui est représentative du Niger moyen. Ce déficit marque l'étiage le plus bas de ces trente dernières années. Il est lié aux faibles précipitations enregistrées dans le haut bassin du fleuve et aux prélèvements pour les activités industrielles et agricoles supposées être intenses. Cette année-là, la période d'étiage a été précocement annoncée. En effet, la décrue a commencé dès le mois de décembre 2017. Les Autorités du Bassin du Fleuve Niger ont remarqué de jour en jour une baisse progressive du niveau d'eau dans le fleuve (ABN, bulletin mars 2018). En mars 2018, le fleuve continue de baisser et, le 31 du mois, il enregistre un débit de $102 \text{ m}^3/\text{s}$ qui laisse voir des bancs de sable et les formations rocheuses dans le lit du fleuve (Planche photo 2a). L'étiage de 2018 atteint une valeur extrême de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ à la date du 20 mai. Cette valeur extrême n'a jamais été enregistrée dans l'histoire du fleuve depuis les grandes sécheresses du début des années 1980 où le fleuve s'était totalement tari en 1985 à la station hydrologique de Niamey (et était descendu à $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1983, et à $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1984). Toute la population et les autorités ont été alertées car le débit de l'étiage était en train de tendre vers la côte d'alerte sécheresse fixée à 107 cm de hauteur d'eau et correspondant à un débit de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.



Planche photo 2: Fleuve Niger à des niveaux extrêmes

a- Désensablement du fleuve à Niamey pendant l'été 2018 (Droit libre TV, 2018); b- Le campus universitaire et le Centre Régional AGRHYMET touchés par la crue locale du fleuve à Niamey (le 06 septembre 2020)

En 2020, la région de l'Afrique de l'Ouest a connu un phénomène d'inondation qui a touché pratiquement tous les pays du Sahel. A Niamey, les inondations (Planche photo 2b) ont surtout été causées par les apports des affluents en rive droite : les rivières Sirba et Dargol qui ont été alimentées par les pluies particulièrement abondantes au Burkina Faso. Ces apports ont augmenté le débit du fleuve jusqu'à atteindre le niveau de vigilance orange à la station de Niamey dès le 27 juillet 2020 à 10 heures selon les informations données par le projet ANADIA 2 Niger (SLAPIS : Système Local d'Alerte Précoce pour les Inondations de la Sirba). Les autorités nigériennes ont été informées de la situation de la Sirba et des prévisions sur la montée du niveau du fleuve à la station de Niamey. Des mesures de prévention et protection ont été prises par ces autorités pour les populations riveraines. Mais les fortes pluies qui ont continué à s'abattre sur presque tout le pays pendant plusieurs jours ont continué à faire augmenter le niveau du fleuve. Face à cette montée des eaux du fleuve, les digues construites pour protéger la population suite aux inondations de 2012 ont commencé à céder. En 2012 le débit maximal observé à la station de Niamey avait dépassé 2500 m³/s pour la première fois de son histoire (Lebel et al., 2020). A la date du 24 août 2020, certains quartiers riverains sont complètement inondés et le bilan officiel fait état de 25 834 ménages sinistrés (soit 226 563 personnes), et 45 morts ou disparus (journal Le monde, du 27 août). Les digues qui ont été rehaussées en urgence finissent par être complètement submergées le 06 septembre 2020 suite à un événement pluviométrique qui a duré près de 9 heures (entre 3h du matin et 12h selon la Direction de l'Hydrologie du Niger). Le niveau d'eau à la station hydrologique de Niamey atteint ce jour-là 692 cm, dépassant largement tous les records enregistrés depuis la création de la station de mesure hydrologique à Niamey en 1929 (cf. site internet: La chronique dramatique de l'inondation de Niamey, Niger le 6 septembre 2020). Tous les quartiers de la rive droite et quelques-uns de la rive gauche sont alors touchés par les inondations. La population riveraine

est obligée d'évacuer ces quartiers en toute urgence pour limiter les dégâts. Le lendemain, le 7 septembre, le niveau de l'eau a atteint 698 cm à la station hydrométrique de Niamey et est donc à la limite de l'échelle limnimétrique existante. Les agents du ministère de l'Hydraulique ajoutent en urgence l'élément 700 à 800 cm à cette échelle limnimétrique (Planche photo 3). Cette année, la crue a atteint son maximum le 08 septembre avec un débit de 3309 m³/s soit une hauteur de 700 cm. Ce malheureux record a alourdi le bilan des inondations à Niamey de 2020 à 71 morts, 90 blessés, 350 915 sinistrés, ainsi que des pertes matérielles selon le ministère des Affaires Humanitaires et de la Gestion des Catastrophes.



Planche photo 3: Nouvel élément de l'échelle à la station de Niamey deux jours après son installation (le 09/09/2020 à 13h13) sur le fleuve Niger

Pour mieux comprendre l'enchaînement causal de telles inondations, il faudra que les autorités s'associent avec les chercheurs. Certains travaux récents ont montré que la remontée des eaux souterraines et le comblement du lit par l'ensablement du fleuve sont des facteurs d'accentuation des inondations. Face à la vulnérabilité de la région aux séries d'inondations une meilleure compréhension des facteurs influençant le régime du fleuve permettra de proposer des solutions durables pour se protéger de cet aléa.

1.6 Organisation du document

Le manuscrit de la thèse est structuré en six chapitres :

- Le présent chapitre est dédié au contexte scientifique, à la formulation des questions de recherche, des objectifs spécifiques, des hypothèses et de la méthodologie. Il énonce également les financements obtenus pour la réalisation des travaux ainsi que les collaborations scientifiques, les difficultés rencontrées au cours de la thèse, et enfin les événements de crue et d'étiage exceptionnels du fleuve Niger qui ont marqué la zone d'étude durant la thèse.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude. Dans cette partie, la localisation de la zone d'étude, sa morphologie, le climat (pluviométrie et température), l'hydrographie, et la végétation du milieu d'étude sont présentés. Un focus est fait sur le contexte géologique et hydrogéologique. Les activités socio-économiques liées au fleuve sont également décrites.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons l'approche méthodologique basée sur les disciplines de la géologie, hydrogéologie et la géophysique. Nous y expliquons la stratégie pour choisir nos sites expérimentaux. Nous décrivons la mise en place des suivis piézométriques et leur utilisation pour le calcul des flux d'eau souterrain avec la loi de Darcy. Enfin, les techniques géophysiques utilisées, les mesures effectuées et leurs utilités pour répondre aux objectifs sont détaillées.
- Le quatrième chapitre expose les résultats concernant la caractérisation des systèmes aquifère. D'une part les différents aquifères de la zone d'étude sont identifiés par une étude géologique et une première analyse de leur fonctionnement en lien avec le fleuve est effectuée à l'aide d'une analyse piézométrique. D'autre part, la géométrie des aquifères est précisée notamment par l'interprétation des mesures géophysiques.
- Le cinquième chapitre traite de l'impact des eaux souterraines sur le débit du fleuve. Il présente les schémas conceptuels des échanges fleuve-aquifères en fonction du contexte géologique et des saisons. Les flux d'eau souterrains en direction ou venant du fleuve sont quantifiés et comparés aux besoins en eaux pour les différents usages. Après vient la conclusion qui synthétise les résultats et donne les perspectives.

Chapitre 2 : Zone d'étude

Chapitre 2 : Zone d'étude

Dans cette partie nous parlerons du cadre général de la zone d'étude. Nous présenterons ainsi la localisation de la zone puis le cadre physique tel que : les traits climatiques, hydrographiques, la température, la végétation ainsi que la géologie et l'hydrogéologie qui constituent la base de cette étude. Puis nous parlerons des activités socio-économiques de la population liées au fleuve.

2.1 Localisation et morphologie de la zone d'étude

La région de l'étude (Figure 4) est située dans la partie sud-ouest du Niger entre 13°00' et 14°05' de latitude Nord et 1°00' et 3°00' de longitude Est. Les sites de mesure se localisent précisément dans deux zones : 1) à proximité de Niamey en bordure du fleuve Niger sur un tronçon de 45 km et de 2) dans le bassin du Dargol sur le sous bassin de Ouama. La rivière Ouama est l'un des plus grands affluents de la rivière Dargol, elle-même affluent rive droite du fleuve Niger (2^{ème} plus important dans l'origine des crues locales à Niamey après la rivière Sirba).

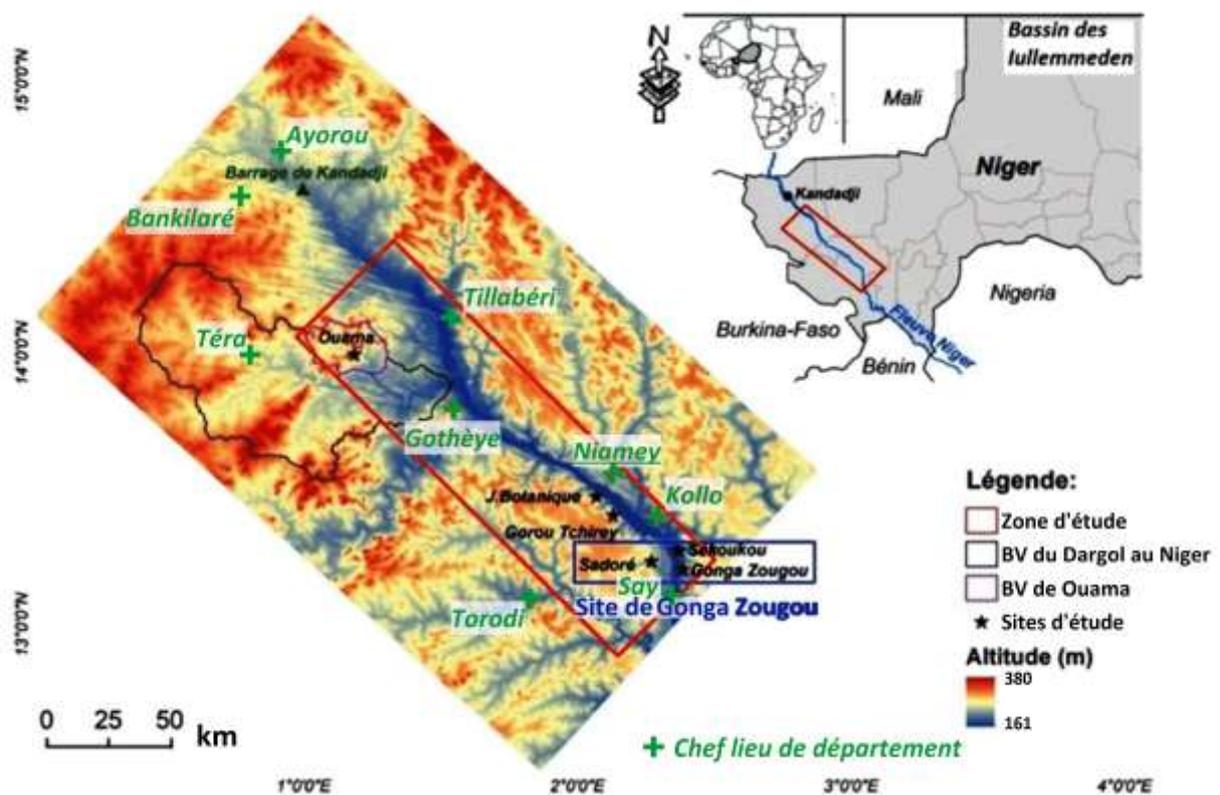


Figure 4: Localisation de la zone d'étude et modèle numérique de terrain issu des données SRTM du Niger (Données téléchargées sur le site de l'USGS avec une résolution de 30 m)

La zone d'étude est topographiquement simple. Elle est caractérisée par des zones de basse altitude (min. 161 m) qu'on retrouve dans la vallée du fleuve Niger et dans les vallées creusées par les cours d'eau temporaires appelés koris. Les sommets topographiques se trouvent au Nord-Ouest de la zone d'étude, c'est-à-dire dans la partie amont du bassin au moyen Niger dans la région du Liptako. Le Sud de la zone d'étude est formé de plateau gréseux entaillés par les koris. Au Nord des dunes sableuses orientées Est-Ouest viennent modifier le relief.

- Les plateaux

Dans la région de Niamey, les points les plus élevés se situent sur les hauts plateaux plats (Bechler-Carmaux, 1998) qui se décomposent en bandes et en buttes résiduelles de tailles variables avec des pentes de 2 à 3% (ABN, 2012). Leurs sommets sont recouverts par des cuirasses ferrugineuses (Planche photo 4a) contenant quelquefois des formations oolithiques (Planche photo 4d) qui évoluent vers une surface gravillonnée. De part et d'autre du fleuve on retrouve des plateaux d'environ 260 m d'altitude, que ce soit en rive droite, dans le bassin versant de Ouama (Planche photo 4c) ou en rive gauche (Planche photo 4b). Ces plateaux sont occupés naturellement par la végétation dite de brousse tigrée qui se compose d'arbustes mais ceux-ci ont beaucoup été coupés ces dernières décennies. Actuellement le tiers des surfaces des plateaux est mis en valeur pour des cultures vivrières comme le mil, le sorgho, le haricot, etc.



Planche photo 4: Plateaux et terrasse

a- Plateau de Sadoré (X : 4293309 ; Y : 1462843) ; b- Plateau à l'ouest de Gonga Zougou (X : 433424 ; Y : 1460694) ; c- Plateau dans bassin de Ouama (Laouel Cherif et Zakari, 2017) ; et d- Terrasse / formation oolithique entre Gonga Zougou et Sekoukou (X : 432350 ; Y : 1462258)

- Morphologie de la vallée du fleuve

Dans la vallée du Niger moyen, dans le village de Karma (Figure 5a), on distingue différents niveaux de terrasse qui varient de T₁ à T₅ (Ousseini et Morel, 1989) (Figure 5b)

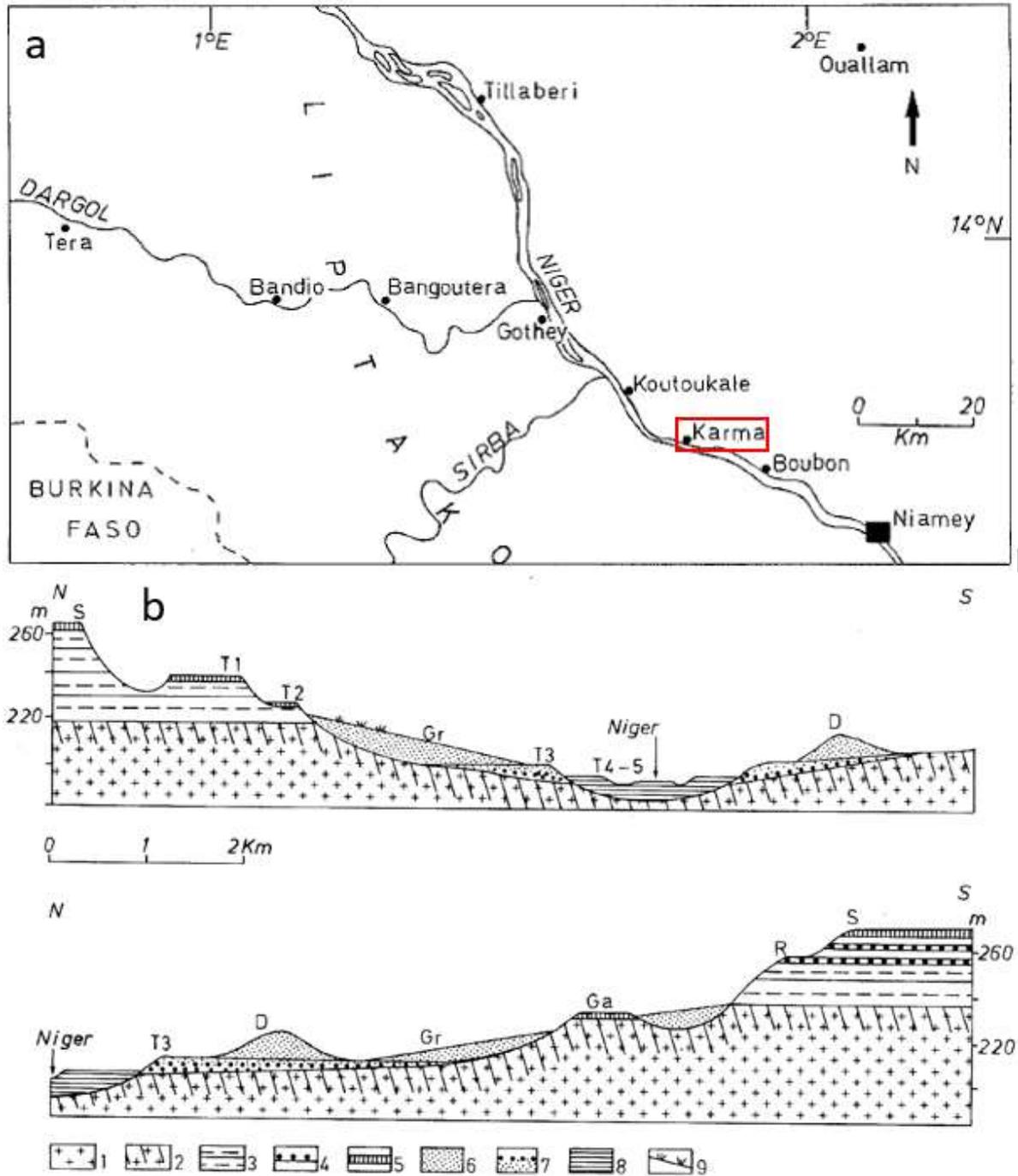


Figure 5: Terrasse de la vallée du fleuve Niger proche de Niamey (Ousseini et Morel, 1989)

a- localisation des coupes présentées en b-

1 - Socle ; 2- Socle altéré ; 3- Continental Terminal ; 4- Bancs ferrugineux ; 5- Cuirasse ferrugineuse ; 6- Sable ; 7- Gravier ; 8- Argile ; 9- Encroustement à tubulures ; S- Surface du CT ; R- Replat structural ; D- Dune fossile ; Ga : Glacis anciens ; Gr : Glacis récent ; T1 et T2- Terrasses anciennes ; T3- Terrasses moyennes ; T4 et T5- Terrasses récentes.

Selon la description d'Ousseini et al., (1989) les terrasses sont classées en fonction de leurs positions topographiques l'une par rapport à l'autre. Les terrasses anciennes sont celles qui ont leurs altitudes plus élevées. Elles sont étagées et appelées hautes terrasses (T1 et T2). Ce sont des terrasses d'érosion. Ensuite les terrasses moyennes T3 sont formées de dépôts graveleux souvent visibles dans les entailles de la vallée. Les terrasses T4 et T5 sont récentes et de basses altitudes. Elles sont formées d'alluvions à dominance limono-sableuse et limono-argileuse hydromorphe parfois.

- Autres bas-fonds topographiques

Les bas-fonds de forme allongée sont marqués par une végétation souvent luxuriante et des matériaux de formations argileuses ou limono-argileuses. Ils se présentent sur des vastes zones déprimées qui constituent les principaux axes hydrologiques (Malam Abdou, 2014). Ils sont généralement caractérisés par des mares. Les bas-fonds sont souvent cultivés. Ils sont parfois partiellement ensablés et leurs rives peuvent être fortement ravinées. Les caractéristiques physiques des bas-fonds varient selon la géologie et la morphologie du milieu.

2.2 Hydroclimatologie et végétation

2.2.1 Pluviométrie

De manière générale le climat de la zone d'étude est de type sahélien. Il est caractérisé par la mousson ouest-africaine qui guide le régime pluviométrique. La mousson ouest-africaine présente des caractères spécifiques parmi lesquels nous avons un fort cycle saisonnier. A Niamey, le cycle saisonnier des précipitations est unimodal avec une seule saison des pluies par année, alternant avec une longue saison sèche. La moyenne pluriannuelle des précipitations à la station de l'IRI localisée sur le campus l'Université Abdou Moumouni (Figure 6) montre une durée de la saison des pluies d'environ 3 mois (de mi-juin à mi-septembre) (Figure 7). Les mois de novembre, décembre et janvier sont des mois complètement secs. A l'échelle régionale, nous avons un gradient nord-sud dans les caractéristiques des précipitations. Les précipitations de la mousson ouest-africaine émanent exclusivement de mécanismes convectifs. La plupart des événements de pluie sont induits par des processus convectifs de méso-échelle produisant des pluies très intenses mais qui durent peu, généralement quelques heures. L'une des caractéristiques majeures des systèmes convectifs de méso-échelle est la très grande variabilité spatio-temporelle des précipitations.



Figure 6: Localisation des stations hydrologique et météorologique dans la ville de Niamey

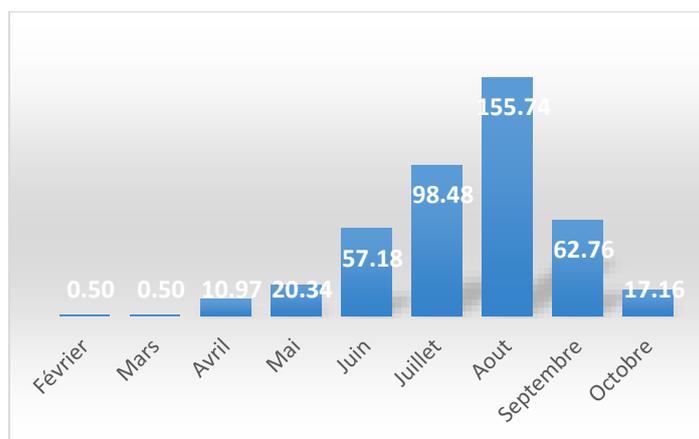


Figure 7: Moyennes mensuelles des précipitations (en mm) sur la période 2009 à 2020 à la station de Niamey IRI. Le cumul annuel moyen est de 457 mm (cf. localisation en Figure 6 ; Données AMMA-CATCH).

Depuis les années 1950, le régime pluviométrique du Sahel a connu trois périodes dont une première phase humide dans les années 1950 – 1970, suivie d’une grande période de sécheresse dans les années 1970 à 1990. Cette succession est attribuée à la variabilité interne du système de mousson (Nicholson et al., 2012). La période la plus récente correspond à une phase d’intensification. Le sujet d’intensification hydro-climatique et son éventuelle accentuation future dans le Sahel sont des questions de recherche en cours. Les travaux de Taylor et al., (2017) offrent des premiers indices permettant d’attribuer cette intensification au réchauffement climatique. Il est aussi suggéré que cette nouvelle ère devrait se poursuivre dans les prochaines décennies.

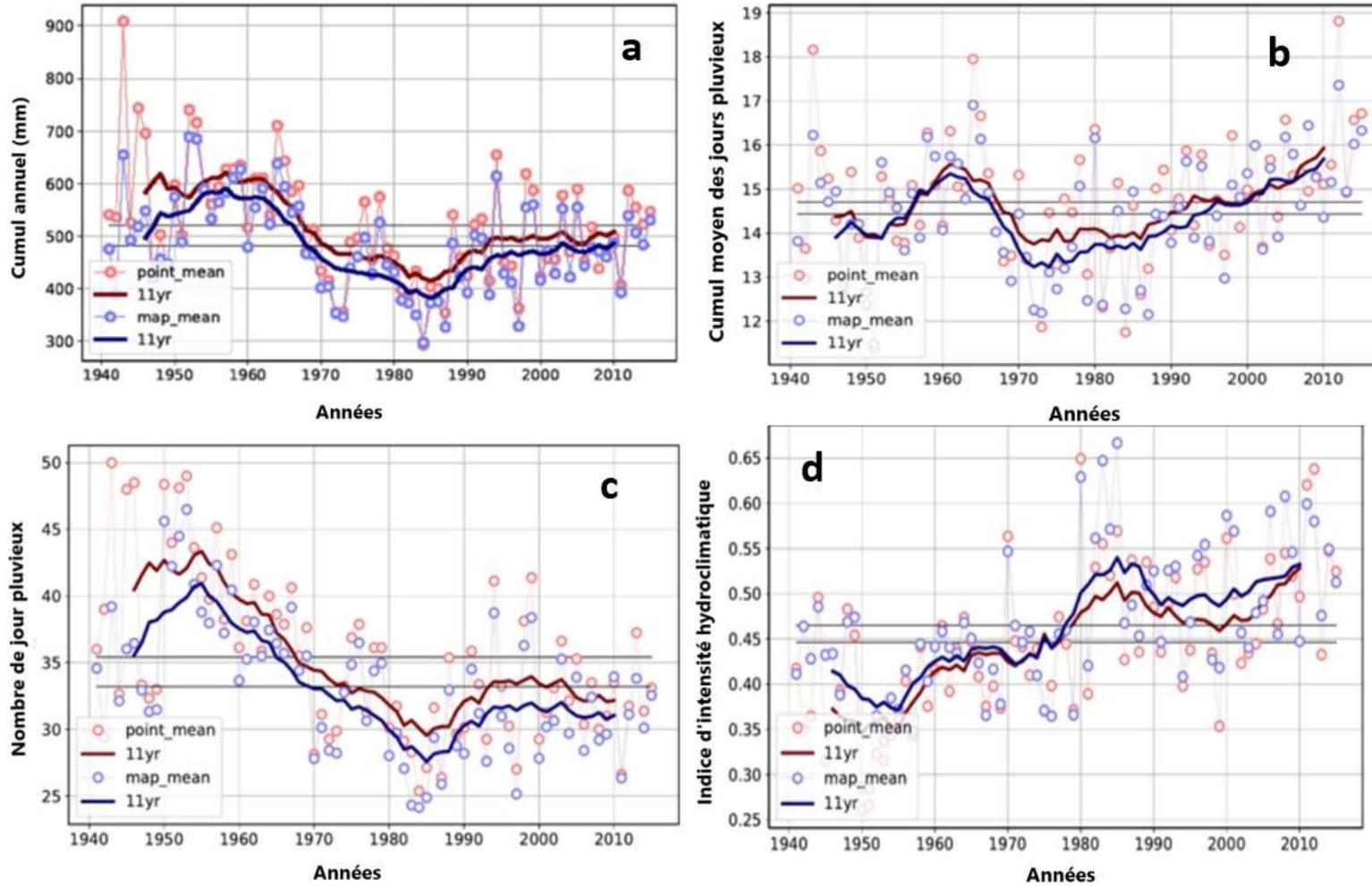


Figure 8: Evolution de la pluviométrie depuis 1940 dans le Sud-Ouest du Niger enregistrée sur plusieurs pluviographes : a- Cumul annuel de précipitation ; b- Cumul moyen pour les jours pluvieux ; c- Nombre de jours pluvieux ; d- Indice d'intensité hydro climatique (Panthou, inédit)

L'intensification hydro-climatique actuelle et future joue un rôle dans l'augmentation du risque d'inondation. L'évolution du régime pluviométrique de la zone d'étude peut s'illustrer (Figure 8) en termes de : cumul annuel de précipitation (a), cumul moyen des jours pluvieux (b), nombre moyen de jours pluvieux (c), indice d'intensité hydro-climatique (d). Par rapport à la moyenne à long terme, les cumuls de précipitations des décennies 50-60 sont excédentaires (Nicholson et al. 2012). Le déficit pluviométrique absolu entre la période des années 50-60 et la grande sécheresse des années 70-80 est d'environ 200 mm (a). Il est principalement associé à une diminution du nombre de jours de pluie (c). Au tournant du millénaire, une nouvelle période apparaît ; elle a rapidement été appelée « période de récupération » car les quantités de pluie annuelles augmentent (a). Mais ce terme ne tenait pas compte de ce qui se passe à l'échelle quotidienne : par rapport à la grande sécheresse, l'augmentation des précipitations annuelles n'est pas due à des précipitations quotidiennes plus fréquentes (b), mais à des précipitations quotidiennes plus intenses (b). Cette nouvelle ère est donc typique d'une intensification hydro-climatique (d).

2.2.1 Température

La température observée à la station de la représentation de l'IRD à Niamey au cours de l'année 2020 laisse voir des variations similaires aux années précédentes permettant de considérer l'année 2020 comme représentative des années antérieures. Il est observé sur la courbe d'évolution de la température journalière deux maximas en avril – mai et en octobre (Figure 9a). Ainsi les valeurs maximales des températures moyennes journalières enregistrées pendant l'année 2020 sont de 37,5°C pour les mois d'avril et mai caractérisant la période la plus chaude de l'année et 32,5°C pour septembre et octobre qui marquent la fin de la saison pluvieuse (Figure 9b). Les valeurs minimales des températures journalières sont quant à elles observées aux mois de décembre-janvier et août, où elles atteignent respectivement 19,1°C et 25,4°C. La période de décembre à janvier correspond à la saison froide et le mois d'août correspond à la période au cœur de la saison pluvieuse d'où les faibles valeurs enregistrées.

Les variations de la température journalière moyenne à Niamey montrent ainsi une alternance de cycle froid avec des faibles valeurs (exemple 24,7°C en moyenne en janvier) et de cycle chaud avec des fortes valeurs de température (exemple 35,7°C en moyenne en avril). En comparant ces valeurs avec les valeurs moyennes mensuelles observées à la station de Gaya (Guéro, 2003) située au sud de la région de Niamey en aval du fleuve Niger proche de la frontière triple Niger-Nigéria-Bénin il semble que les températures soient plus contrastées à

Niamey qu'à Gaya où les températures varient entre 25,9°C et 33,8°C sur la période 1970 - 1980. A contrario, dans le cadre des travaux de Hassane Saley (2018) les variations saisonnières de la température de la ville de Tahoua montrent des moyennes mensuelles qui varient entre 22,8°C et 36,3°C sur la période de 1951 à 2000. La région de Tahoua est située au Nord-Est de Niamey. La valeur maximale est plus élevée, et la valeur minimale est plus faible que celles observées à Niamey. En conclusion, la région de Niamey est située dans une zone de transition à l'échelle du pays. Cependant au niveau du Sahel, le Niger fait partie des pays les plus chauds selon quelques données de température des pays sahéliens utilisées dans les travaux de Ousmane (1988) (par exemple Dakar 25°C ; N'Djamena 29°C ; Niamey 29°C etc.).

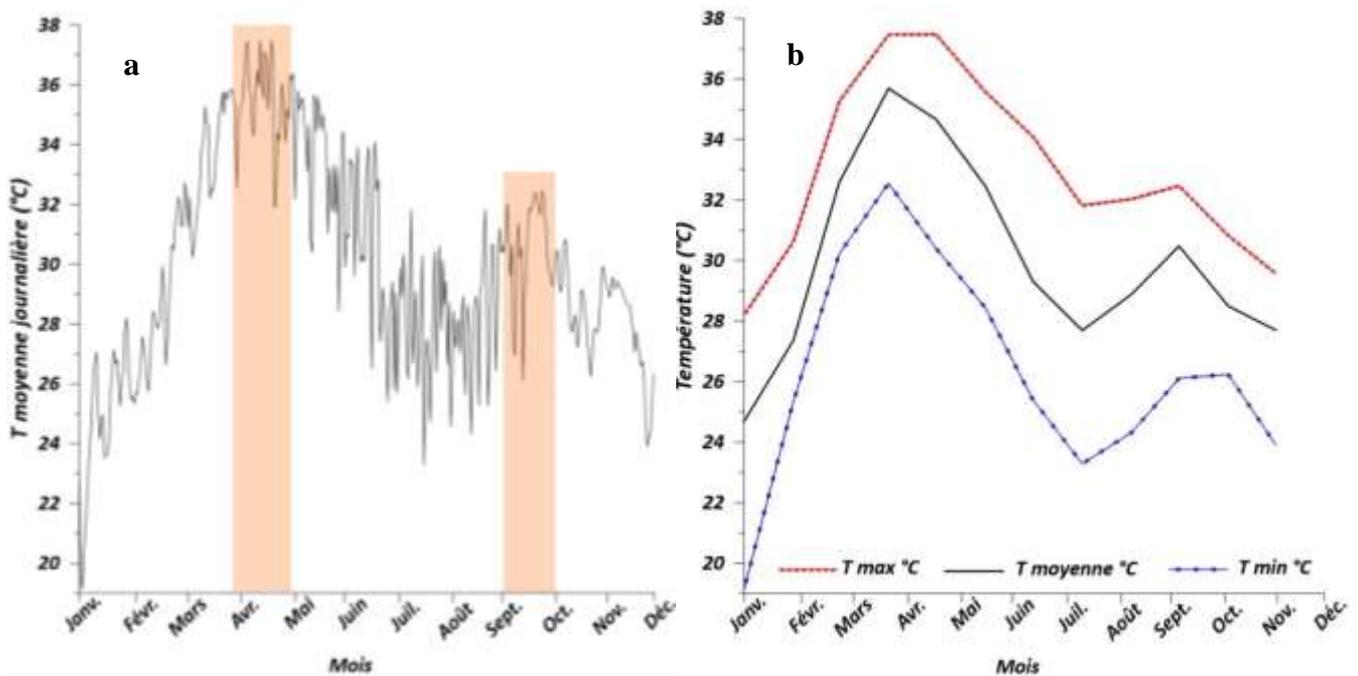


Figure 9: Températures observées à la station de de l'IRD en 2020 (cf. localisation en Figure 6). (a) Température moyenne journalière et (b) Moyennes, minimales et maximales mensuelles des températures journalières.

2.2.2 Hydrographie

Le réseau hydrologique de la zone d'étude est caractéristique du réseau hydrologique du Niger Moyen. Il est composé d'un seul cours d'eau permanent : le fleuve Niger. Le fleuve est fortement influencé par les apports en débit de ses affluents en amont de Niamey à savoir : le Goroual, le Dargol et la Sirba. Il traverse toute la partie sud-ouest du Niger sur une distance de 550 km. Malgré les fluctuations de son débit qui deviennent de plus en plus complexes à cause de la variabilité et l'hétérogénéité du climat, le fleuve assure en grande partie l'approvisionnement en eau de la population.

Les petits cours d'eau sont appelés « koris » et ont des écoulements intermittents et saisonniers. Les affluents rive droite du fleuve ont aussi des écoulements saisonniers (écoulement permanent sur une partie de l'année uniquement : pendant la saison des pluies). Une partie importante des bassins versants des affluents Goroual, Dargol et Sirba contributifs sont situés au Burkina Faso, ce qui explique que la pluviométrie au Burkina impacte directement les écoulements du fleuve à la saison des pluies. L'ensemble des apports des koris entraîne une forme bimodale de l'hydrogramme du fleuve à Niamey (Figure 3) avec deux pics de crues. Le premier pic observé sur l'hydrogramme correspond à la crue locale ou crue "rouge" qui survient pendant la saison des pluies entre le mois d'août et septembre et qui est due en majeure partie aux apports provenant des koris qui alimentent les affluents. Le deuxième pic est la crue guinéenne ou crue "noire" qui est due aux apports en amont, en provenance des montagnes de Guinée. Ce pic est observée entre novembre et mars suivant le temps de propagation dans le delta intérieur du Niger (Millot, 1913; Sighomnou et al., 2013). De par la durée et le débit, la crue guinéenne est qualifiée de crue principale (Malam Abdou, 2014). Les crues sont qualifiées de rouge et noire en lien avec la couleur de l'eau qui dépend de la nature et de la quantité des sédiments charriés. En saison pluvieuse l'eau du fleuve a une coloration rouge. Cette eau est chargée en sédiments riches en fer parce qu'elle provient des eaux qui ruissellent sur des formations géologiques contenant du fer.

Le réseau hydrologique du sud-ouest du Niger est composé de deux types de systèmes hydrologiques détaillés dans les travaux de (Malam Abdou, 2014):

- Les **systèmes endoréiques** qui sont des systèmes dans lesquels les écoulements des eaux n'atteignent pas la mer. Dans la zone d'étude on retrouve dans les formations sédimentaires du bassin des Iullemmeden. On appelle système endoréique.
- Les **systèmes exoréiques** sont des systèmes hydrologiques où les cours d'eaux s'écoulent jusqu'à l'océan. Les écoulements qui sont exoréiques dans le sud-ouest du Niger sont le fleuve Niger et les affluents en zone de socle (rive droite).

Ces systèmes évoluent dans le temps si bien qu'actuellement certains koris qui étaient formés de chapelets de mares endoréiques, ont vu leur écoulement devenir exoréique par jonction des mares jusqu'au fleuve (y compris dans les formations sédimentaires). Ce phénomène est attribué à l'augmentation des ruissellements causés à la fois par le changement d'occupation des sols et l'intensification des pluies ces dernières décennies.

2.2.3 Végétation

La végétation naturelle de la région est principalement composée de savane arbustives avec des herbacées qui ne poussent qu'en saison pluvieuse (Planche photo 5a). Cette végétation permet surtout de pratiquer le pastoralisme. Sur les plateaux latéritiques, on retrouve la brousse tigrée composée d'une alternance de bandes nues et de bandes de végétation. Les bandes de végétations sont constituées d'une strate ligneuse (principalement *Combretaceae*) et d'une strate herbacée (principalement *Graminae* et *Commelinoceae*). Sur les versants les espèces ligneuses majoritaires sont : *Guiera Senegalensis*, *Combretum miranthum*, *Combretum glutinosum*, *Faidherbia albida*, *Balanites aegyptiaca* et *Piliostigma reticulatum*. Dans les régions des Dallols, qui sont des anciennes vallées fluviales on retrouve également les palmiers doum (*Hyphaene thebaica*) et le baobab (*Adansonia*).

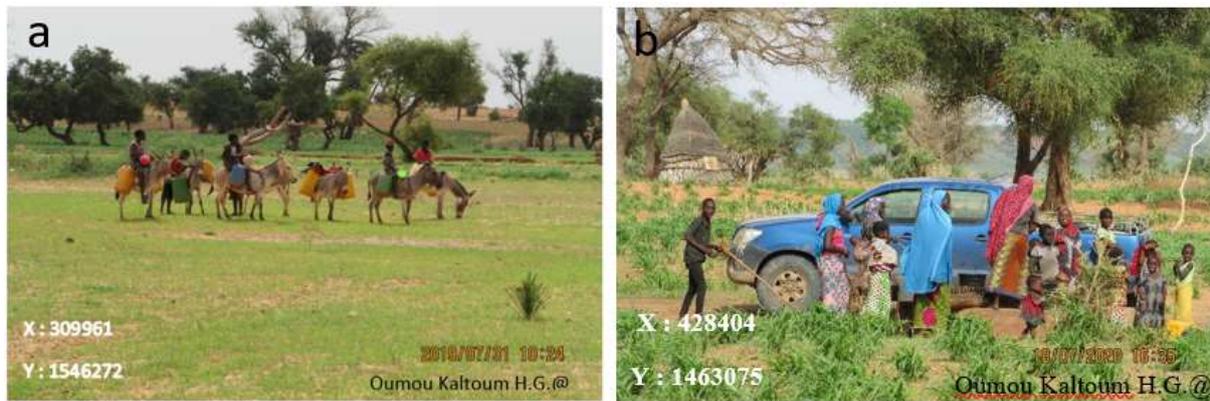


Planche photo 5: Exemple de végétation
a- végétation herbacée et arborée dans le lit de la rivière Ouama ; b- champ de mil en début de saison
(coordonnées en UTM : 31P)

L'évolution dans le temps de la végétation est impactée par l'augmentation des surfaces cultivées (Figure 10). La végétation est transformée en mosaïque de jachères et de champs de culture (Planche photo 5b) avec l'anthropisation des milieux. Les *Faidherbia albida* sont les arbres les moins touchés du fait de leur propriété de fertilisant de sol et à cause de certains mythes traditionnels. Dans la région de Niamey, la plantation d'eucalyptus est couramment utilisée pour la réhabilitation des sols et aussi à des fins commerciales (le bois d'eucalyptus est utilisé dans la construction des toitures des hangars et des maisons en banco ou en pailles).

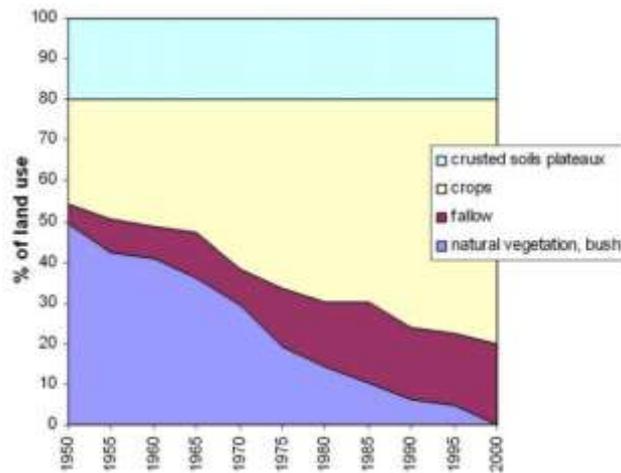


Figure 10: Evolution de l'occupation des sols sur une partie du sud-ouest Niger à brousse tigrée (Site HAPEX-Sahel, dans Descroix et al., 2009 d'après les résultats de Loireau, 1998)

2.3 Usage des eaux fluviales

Quelques activités domestiques sont pratiquées au bord du fleuve. Les activités économiques liées au fleuve dans la zone d'étude sont principalement basées sur l'agriculture irriguée, la pêche, le transport et le commerce. On rencontre aussi dans certaines zones des activités industrielles liées au fleuve dans le sens où elles utilisent l'eau du fleuve (ex. usine de transformation alimentaire du riz du Niger).

- Usage domestique

Dans les villes et villages situés au bord du fleuve, l'eau est utilisée pour l'arrosage des espaces verts qui existent et des jardins des maisons environnantes en saison sèche. Elle est aussi utilisée pour les piscines et les jets d'eau dans les hôtels et les piscines privées dans certaines propriétés dans la ville de Niamey. En cas d'incendie, dans les quartiers proches du fleuve, cette eau est utilisée par la population dans l'exercice de leur mission d'éteindre le feu avant l'arrivée des pompiers qui sont rarement avisés. En dehors de ces usages, il est aussi pratiqué des usages domestiques quotidiens comme la vaisselle, et la lessive. Ces activités se pratiquent au bord du fleuve par les riverains (Planche photo 6a). Certains transforment le fleuve en piscine publique pour se laver et profiter pour raconter les nouvelles du village. Quant aux enfants, ils transforment le fleuve en centre de loisir.

- Usage agricole/irrigation

Sur la zone d'étude, les riverains effectuent des activités agricoles. Ces activités reposent sur la petite irrigation (maraîchage, Planche photo 6b) et la riziculture faites dans la vallée du fleuve Niger et au niveau des affluents. Au Niger, la petite irrigation est définie en fonction de la

superficie des terres d'exploitation, de la nature de l'aménagement et aussi des techniques utilisées. Généralement, les aménagements sont faits de façon individuelle et/ou par groupe (surtout de femmes). Les différents types d'aménagements utilisés au Niger sont au nombre de trois :

- Les petits périmètres d'irrigation privés (PIP) ;
- La moyenne et grande irrigation commerciale (GMIC) et AHA (aménagements hydro-agricoles) ;
- Les périmètres de contre-saison (PCS).

Le plus souvent, en milieu rural, la petite irrigation est pratiquée par les femmes pour leur autoconsommation ou pour leur autonomisation. Elles échangent les produits de leur récolte contre des céréales ou des produits industriels : tissus etc. Parfois elles les vendent sur les marchés locaux. La petite irrigation concerne surtout les légumes et quelques rares fois le maïs. Les travaux de Nazoumou et al., (2016) expliquent que l'irrigation pratiquée sur la vallée du fleuve est techniquement ancienne et les superficies irriguées sont de 107 000 ha en 2012.

Mis à part l'irrigation des légumes, il est aussi pratiqué la riziculture. La culture du riz occupe la troisième place en terme de production céréalière du Niger avec en moyenne 2,3 % du volume céréalier produit par an (Sido, 2010).

- Navigation et commerce

En dehors de ces usages, il y a aussi la navigation fluviale qui est surtout pratiquée sur le Niger dans cette région en saison des crues. Tout le réseau de la navigation fluviale dans le moyen Niger se centralise uniquement sur le fleuve Niger. Cette navigation se fait de manière traditionnelle ou artisanale avec plusieurs pirogues. Son objectif principal est le transport de marchandises et des personnes (Champaud, 1961). De tout temps, elle a permis de faciliter le commerce, les voyages et les échanges entre les riverains. La durée d'une navigation dépend de l'appareillage, du poids des marchandises, de la distance et du nombre d'escales prévues pour l'écoulement des marchandises ou la destination des voyageurs. Les nouveaux moyens piroguiers sont capables de transporter plusieurs tonnes de marchandise en peu de temps sur une grande distance et restent compétitifs même comparés aux transports routiers.

La Planche photo 6c montre des marchandises (courges) transportées par des pirogues à des fins commerciales pendant la crue guinéenne. Plusieurs types de marchandises sont exportées

d'une ville à une autre, d'un pays à un autre dans un but commercial. Parmi les marchandises nous avons entre autres : les légumes, les patates, les céréales, le poisson et quelques textiles.

- Pêche

Dans la partie sud-ouest du Niger, un rôle important du fleuve Niger est l'approvisionnement de la population en quantité de poisson, source de protéines. Les fluctuations du niveau du fleuve forment des plaines inondables où l'eau se retire après la crue guinéenne pour former des mares qui contiennent énormément de poissons piégés dans les bas-fonds. Ces poissons sont pêchés (Planche photo 6d) par les populations locales soit pour leur propre consommation ou pour la vente dans les marchés du village ou des grandes villes. En 2017, la pêche est pratiquée par plus de 70 000 personnes avec une production annuelle d'environ 36 000 tonnes sur le fleuve (forum du 07/04/2018, studio Kalangou). Cela signifie que l'approvisionnement de la communauté locale en poisson repose essentiellement sur la capacité du fleuve.

Il existe trois catégories de pêcheurs à savoir :

- Les pêcheurs professionnels pour lesquels la pêche constitue une activité régénératrice de revenu et aussi un moyen de subsistance ;
- Les semi-pêcheurs qui pratiquent une autre activité comme du jardinage ou de l'agriculture parallèlement à la pêche ;
- Les pêcheurs occasionnels qui pratiquent la pêche occasionnellement. Ils le font le plus souvent pour leur propre consommation ou bien pour le loisir.

Les pêcheurs professionnels vivent en campement de plusieurs familles près des cours d'eau. Ils travaillent le plus souvent en groupe avec un chef qui doit être le plus âgé et le plus expérimenté (Planche photo 6d). Dans le temps, la population qui pratiquait le métier de pêcheurs en bordure du fleuve Niger dans la zone d'étude était constituée uniquement de Sorko qui est une ethnie autochtone de la zone. Mais de nos jours, on remarque de plus en plus l'arrivée d'autres ethnies dans la pratique de la pêche, ce qui a rendu le secteur saturé (RECA filière pêche, février 2013). Au regard du grand nombre de personnes qui pratiquent la pêche, et de la variabilité climatique qui joue sur le débit du fleuve à l'image de l'étiage de mai 2018, il y a un risque de surexploitation, et de conflit entre les pêcheurs et les autorités. Les pêcheurs vont avoir tendance à capturer des petits poissons qui empêchera la reproduction et conduit à une baisse de la production halieutique nationale. La pêche des petits poissons causera la disparition de certaines races de poisson (d'après un agent des eaux et forêts de la ville de Niamey que nous avons interviewé).



Planche photo 6: *Quelques exemples d'activités faites au bord et/ou sur le fleuve Niger*
 a- Les femmes font la lessive et vaisselle au bord du fleuve Niger au Mali (source : BBC) ; b- Développement de la petite irrigation au bord du fleuve Niger à Niamey (rive droite ; coordonnées en UTM : 31P ; X : 402549 ; Y : 1493096) ; c- A Niamey sur la rive droite le fleuve est utilisé comme un moyen de transport de marchandise et de commerce. Crue guinéenne (source : Mondafrique / date inconnue) et d- Des pêcheurs jettent leur filet dans le fleuve Niger à Niamey. Crue locale (source Charles O. Cecil / Alamy Banque d'Image / date inconnue)

2.4 Géologie

La zone d'étude se situe dans la partie Sud-Ouest du Niger où la géologie est composée par les formations du socle précambrien du Liptako nigérien à l'Ouest et, à l'Est, par les formations sédimentaires du bassin des Iullemeden (Figure 11). Ces deux grands ensembles forment la géologie de l'Ouest du pays.

2.4.1 Le socle du Liptako nigérien

Limité au Nord et au Nord-Ouest par le bassin de Taoudenni (Mali) et à l'Est par le bassin sédimentaire des Iullemeden, le Liptako nigérien est situé entre 0° et 3° Est et entre les parallèles 13° et 15° Nord. Il appartient à l'extrême nord-est de la dorsale de Man dans le domaine de Baoulé-Mossi. Le Liptako est caractérisé par des formations précambriennes d'âge protérozoïque couvrant plus de 75 % de la superficie du Liptako (Malam Abdou, 2014; Abdou Babaye, 2012; Cappelaere et al., 2009; Guéro, 2003; Boubakar Hassane, 2010; Ousmane et al., 2010; Soumaïla et Konaté, 2005).

Plusieurs études ont été réalisées sur le Liptako pour améliorer les connaissances des formations géologiques et le fonctionnement du système d'aquifère discontinu. Tous ces travaux viennent en appui des premiers travaux de Machens, (1973). Les résultats obtenus ont permis de

distinguer deux principaux ensembles de formations d'âge précambrien moyen (2300 à 1900 Ma) : les formations des roches volcano-sédimentaires (ceintures des roches vertes) et les formations des granitoïdes (ou plutoniques) orientées suivant la direction générale NE-SW (Machens, 1973). Ainsi, la carte géologique de la zone d'étude (Figure 11) décrit des formations composées de massifs de granite et des formations volcano-sédimentaires (sédiments, méta-sédiments, méta-volcano-sédiments et méta-volcano-plutoniques) qui se présentent sous forme de bandes séparées par des intrusions granitiques (Ama Salah et al., 1996; Soumaila et al., 2004). Les formations volcano-sédimentaires sont composées de roches vertes : amphibolite, pyroxénites, épidotites, chloritoschistes, métabasaltes et métagabbros. On y rencontre également des formations métamorphiques : des micaschistes, schistes argileux, gneiss, etc. au contact avec les massifs granitiques composés de granites, de granodiorites et des diorites (Machens, 1973). Ces roches constituent le vaste craton qui est immobile.

Dans le Sud-Est de la zone d'étude, les formations du socle sont recouvertes par des sédiments d'âges Néo-Protérozoïques (Infracambrien-Voltaïen), Eocène à Pliocène (le Continental Terminal dit CT) et Quaternaire (cordons dunaires, alluvions, cuirasses latéritiques) (Abdou Babaye, 2012).

Dans la partie de la zone d'étude où le socle n'est pas recouvert par les sédiments, son altération est structurée comme dans le modèle conceptuel de Lachassagne et Wyns (2005) qui est reproduit sur la (Figure 12). En Côte d'Ivoire au centre du bouclier de Man dont le Liptako nigérien représente la bordure Nord-Est, Koïta (2010) a montré que les profils d'altérations ont toujours la même structuration mais la nature et l'épaisseur des différents horizons dépendent de la géologie (granite, méta-sédiment et méta-volcanite). De même dans le Liptako nigérien la zone transmissive ne dépasse pas 50 m dans les granites mais peut atteindre 60 m voire un peu plus dans les schistes (Abdou Babaye et al. 2019).

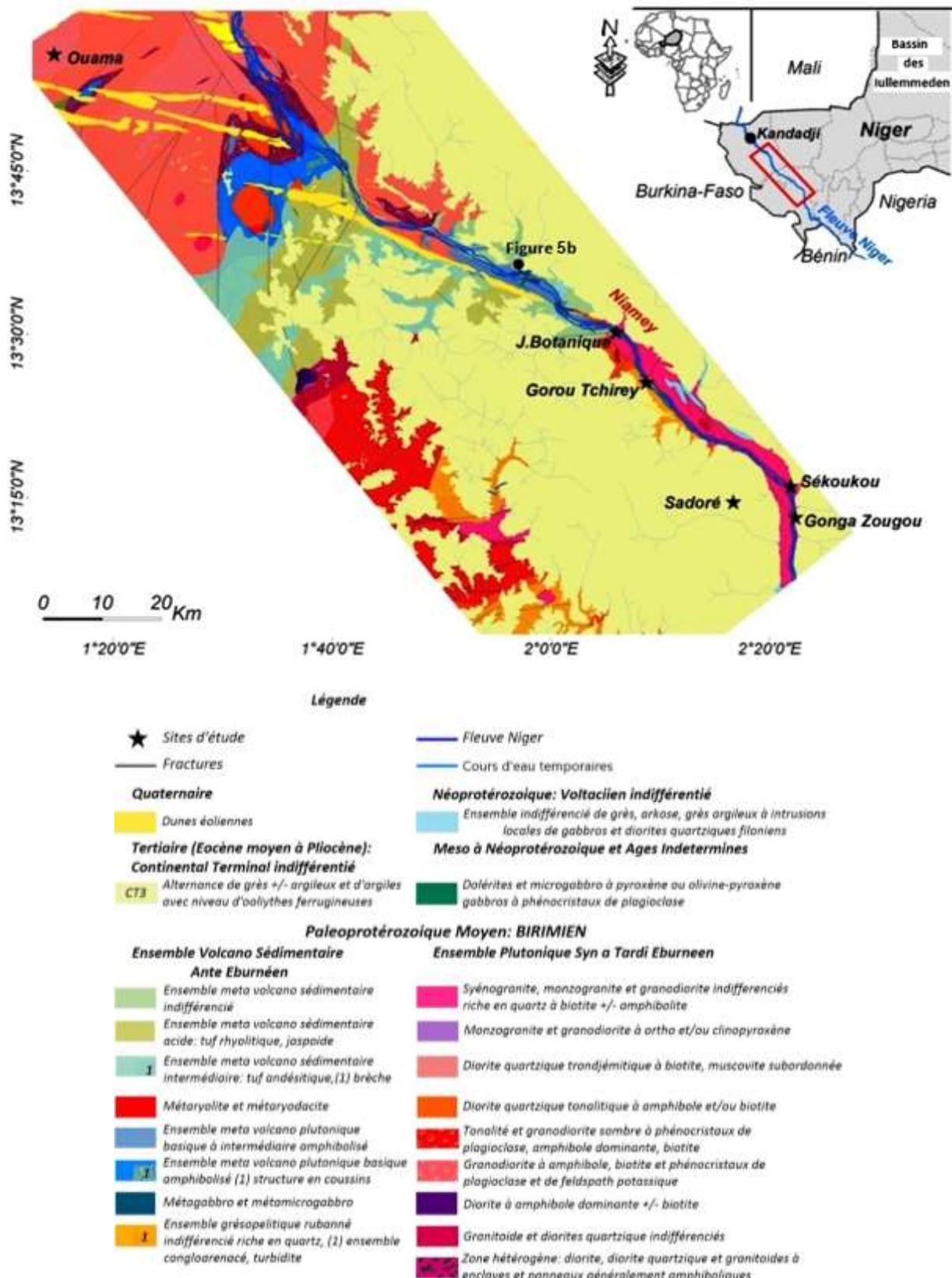


Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude (d'après Greigert 1966) et réseau hydrographique

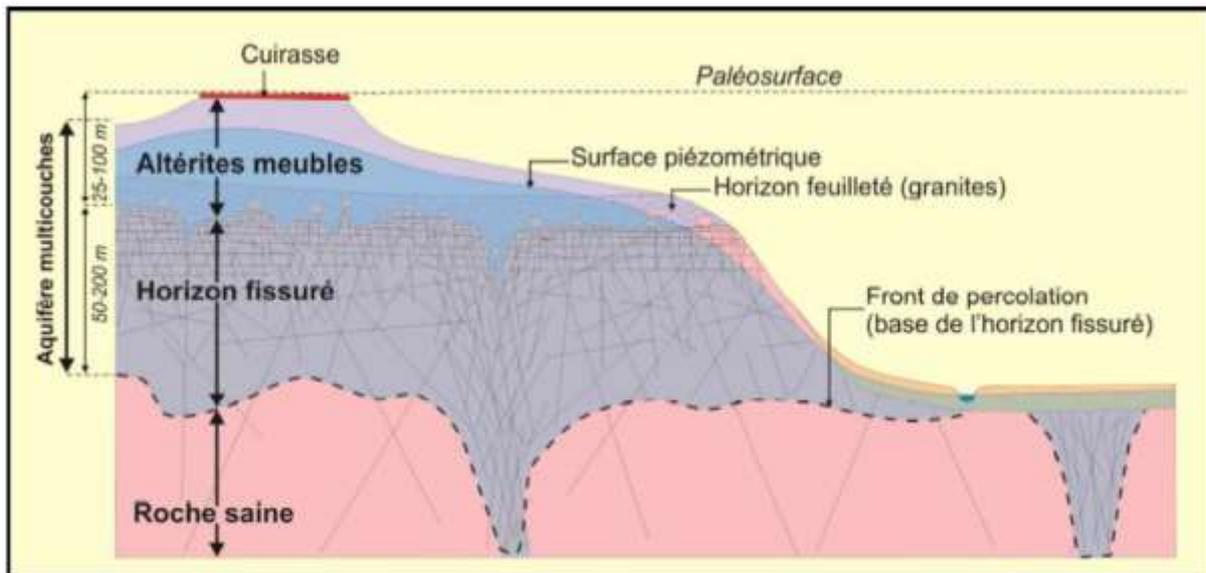


Figure 12: Modèle conceptuel d'aquifère de socle (Lachassagne et Wyns, 2005)

2.4.2 Le Continental Terminal : CT

Le concept de Continental Terminal (CT) créé par Kilian en 1931 désigne des séries continentales correspondant à de vastes épandages détritiques à faciès sidérolithique d'âge Tertiaire. Les formations du CT d'environ 450 m d'épaisseur près de Dogondoutchi (Greigert et Pougnet, 1967) affleurent sur plus de 150 000 km² dans le Sud-Ouest du Niger (Favreau, 2000). Dans la zone d'étude les formations du CT sont déposées en discordance sur les formations de socle antécambrien (Figure 13a). Ces formations du CT (grès, argiles plus ou moins sableuses et oolithes) sont les plus récentes parmi les formations du bassin des Iullemeden. Les dépôts sont généralement indurés en surface en couches latéritiques qui forment des plateaux de part et d'autre du fleuve Niger (Boubakar Hassane, 2010) et/ou sont couverts par des dépôt de sable Quaternaire.

Trois séries ont été définies par Greigert (1966) et Greigert et Pougnet (1965) dans l'ensemble du CT (Figure 13a). De bas en haut elles sont constituées de (Figure 13a) :

1) La **série sidérolithique de l'Ader Douthi ou CT1** a une épaisseur qui varie de 50 m à 90 m de l'affleurement jusqu'au centre du bassin un peu à l'ouest de Dogondoutchi (Guéro, 2003). La géologie du CT1 est constituée de sables moyens à grossiers avec des intercalations de sables fins, des niveaux argileux, de niveaux gréseux ou d'oolithes ferrugineuses, selon les secteurs. Selon les travaux de Greigert (1966) et d'autres études antérieures, la série possède des oolithes en quantité variable qui peuvent former des amas séparés par des grès (argileux, cimenté et ferrugineux).

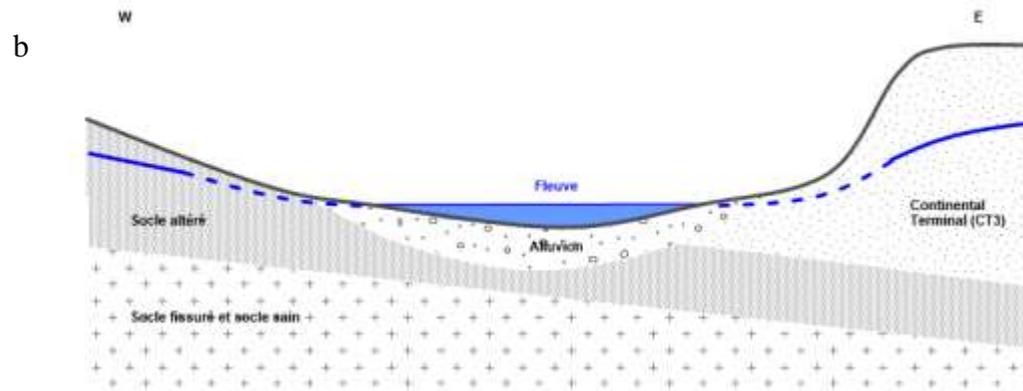
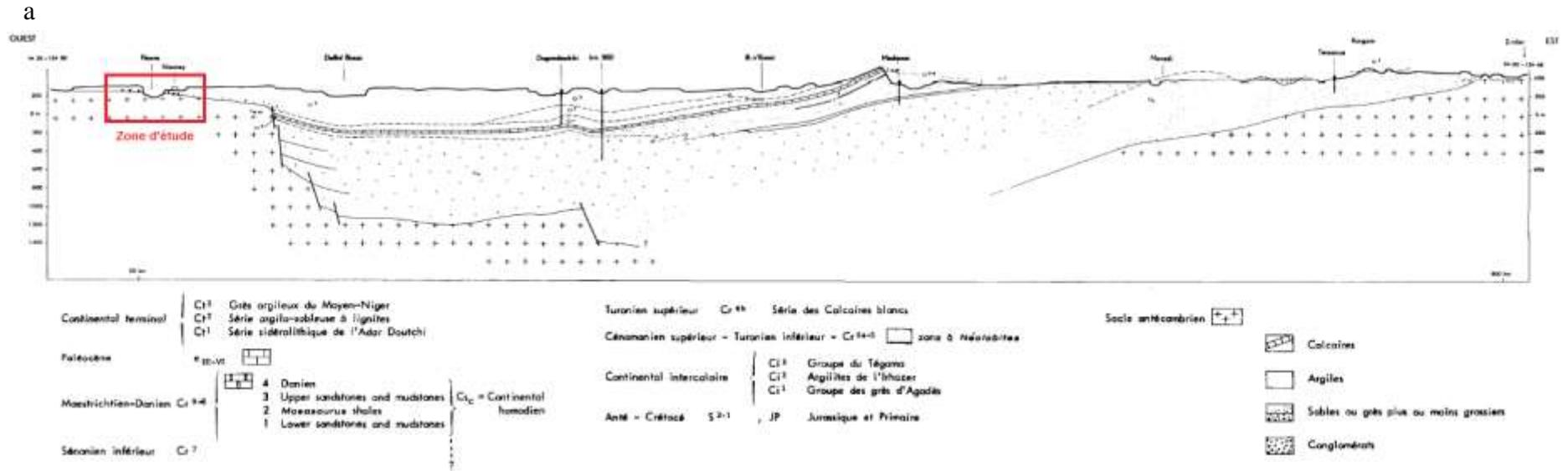


Figure 13: a- Coupe géologique schématique Ouest-Est du bassin des Iullemeden (Greigert 1966), b- Coupe schématique conceptuelle zoomée sur la zone d'étude

2) La série **argilo-sableuse à lignites ou CT2** est composée d'une alternance de séries sableuses et argileuses contenant des débris végétaux qui se terminent respectivement par des grès grossiers et des niveaux ferrugineux à oolithes (Greigert 1966). Cette série à lignite affleure dans la partie nord du bassin des Iullemmeden et son épaisseur varie ~60 m à ~180 m ;

3) La troisième série du CT dans le bassin est la formation la plus récente. C'est **la série des grès argileux du moyen Niger ou le CT3**. Elle occupe la moitié méridionale du CT en affleurant dans le sud du Niger occidental. Selon les études de Greigert (1966), le CT3 est caractérisé par des grès et des argiles avec tous les facies intermédiaires. Dans la région du fleuve Niger, les facies sont particulièrement variés avec la présence de quartz grossier, de gravier et de galets. Dans cette série on note aussi la présence d'oolithes et de grès ferrugineux qui affleurent sous forme de cuirasse latéritique (Hassane Saley, 2018). La puissance maximale du CT3 est de l'ordre de 200m dans le secteur de Dogondoutchi.

La seule série du CT qui concerne notre zone d'étude (Figure 13b) se trouve l'affleurement et correspond à la troisième série du Continental Terminal : les grès argileux ou grès du CT3.

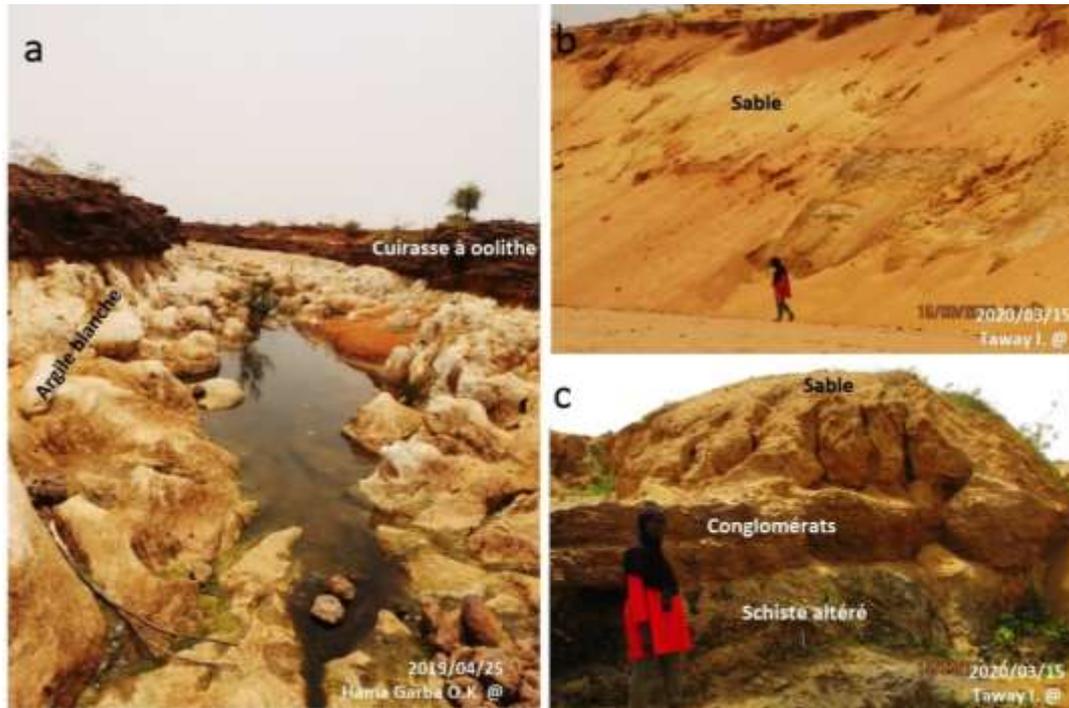
2.4.3 Formations géologiques rencontrées au cours des missions de terrain

Au cours de nos missions de prospection de terrain nous avons observé les affleurements visibles dans les cours d'eau comme exemples de formations rencontrées en profondeur. A Niamey et dans les zones environnantes, nous avons rencontré l'affleurement des roches granitiques dans le lit mineur du fleuve Niger (Planche photo 2a) et au niveau des corniches. Les granites affleurant sont recouverts localement par des sables alluvionnaires d'épaisseur variant de 1 à 7 m (Boubakar Hassane, 2010).

A Gonga Zougou (à 45 km de Niamey, au sud-est), nous avons rencontré un kori avec une frange argileuse blanchâtre à ocre (Planche photo 7a). C'est de la kaolinite, elle se localise entre la couche de cuirasse ferrugineuse à oolithe et le niveau de l'eau dans la nappe. La couche argileuse est affleurante et prédominante dans la ravine.

A Gorou Tchirey (à 15 km au sud-ouest de Niamey), nous avons rencontré des formations composées de haut en bas de : 1) sable rougeâtre à jaunâtre (Planche photo 7b et c) plus ou moins argileux pouvant atteindre ~6 mètres d'épaisseur (Planche photo 7b) ; 2) une série conglomératique du CT3 (Planche photo 7c) caractérisée par un niveau de conglomérat de 0,5 m d'épaisseur avec des éléments de taille moyenne (30 à 50 mm), puis 1 m de bande de sablo-argileuse (0,5 m d'épaisseur) et un autre niveau de conglomérat avec des éléments de plus

grande taille (30 à 150 mm) et de 0,5 m d'épaisseur ; enfin 3) du socle schisteux altéré affleurant sur 1 m d'épaisseur avec une direction de schistosité de N150° (Planche photo 7c).



*Planche photo 7: Formations géologiques rencontrées dans des koris au sud de Niamey
a- Rive gauche (X : 432806 ; Y : 1463538) ; b- et c- Rive droite (respectivement X : 406001 ; Y : 1483743 et
X : 407274 ; Y : 1484268) (coordonnées en UTM : 31P)*

Par ailleurs, à la fin d'une mission de terrain sur le site de Gorou Tchirey en rentrant, nous avons eu la chance de tomber sur une équipe de foreurs en train de réaliser un forage privé sur l'une des berges du kori dans un jardin. Avec l'autorisation de l'équipe composée de techniciens et manœuvres, nous avons pu assister à la réalisation du forage dans le but de connaître la profondeur de la nappe et la nature des différentes structures géologiques. Ces observations nous permettront de réaliser des logs lithologiques de la zone et de valider nos données géophysiques. Elles nous permettront surtout de valider notre hypothèse sur la nature de la formation schisteuse.

Dans le bassin de Ouama, les formations rencontrées sont généralement constituées de blocs de granite et gneiss sub-affleurants qui se présentent sous forme de dômes, de chaos rocheux ou d'altérites à kaolinite (Planche photo 8a). On observe parfois sous les couches d'altérites des filons de quartz qui affleurent (Laouel Cherif et Zakari, 2017). Les altérites peuvent être recouvertes par des dépôts éoliens (Planche photo 8b) comme décrit par les travaux d'Ousseini (1986). La zone est connue pour ses cordons dunaires de largeur variable atteignant 5 km sur plusieurs dizaines de kilomètres de long et qui semblent être fixes (Machens, 1973). On

remarque également dans les dépressions des cours d'eau appelés « koris » des dépôts alluvionnaires (sable, argile, limon) transportés par l'érosion hydrique (Planche photo 8b).

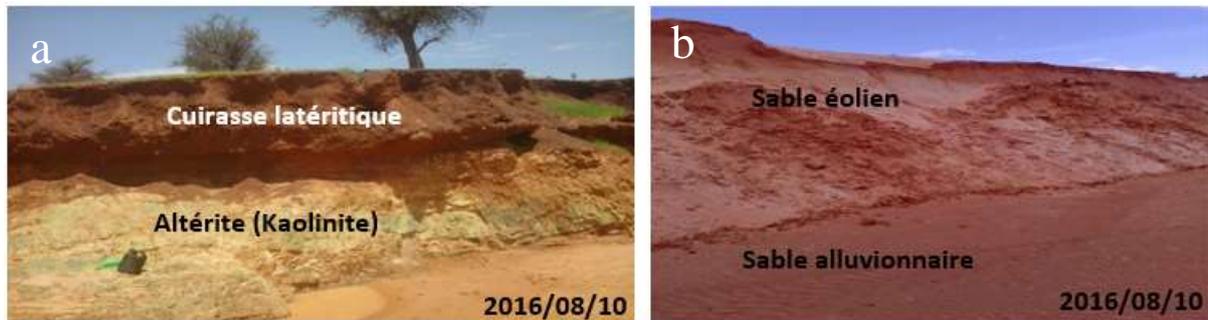


Planche photo 8: Exemples d'affleurement dans le bassin de Ouama
a- Affleurement du socle et b- recouvrements sableux (d'après Laouel Cherif et Zakari, 2017)

2.5 Hydrogéologie

L'hydrogéologie de la zone d'étude se compose de trois types d'aquifères : les aquifères du socle ou aquifères discontinus qu'on retrouve dans le Liptako-Gourma ; l'aquifère continu de la série des grès argileux du Continental Terminal (CT3) observés dans le bassin du Niger Moyen ; et les aquifères alluviaux présents dans le lit du fleuve Niger et dans ses affluents.

2.5.1 Les aquifères de socle du Liptako Nigérien

Les réservoirs du Liptako sont constitués par les horizons fracturés, fissurés et/ou altérés des formations granitoïdes et métamorphiques du socle précambrien, et des quartzites de l'infrcambrien. L'épaisseur des aquifères d'altérites varie selon la nature de la roche altérée. Cette épaisseur est souvent comprise entre 10 à 20 m pour les produits d'altération des granitoïdes composés d'arènes sableuses à argileuses, tandis qu'au niveau des schistes et des roches vertes, elle est généralement comprise entre 15 et 40 m. Dans les travaux de Ousmane (1988), il a été démontré que la puissance d'altération du socle granitique est comprise entre 2,5 et 29 m avec un taux de réussite des forages qui varie de 63 à 84 %. La profondeur moyenne des forages dans ce contexte s'élève à 50 m (la profondeur des ouvrages varie entre 27 et 104 m). Dans les roches vertes, le taux de réussite est compris entre 91 et 98 % et la profondeur des ouvrages varie de 26 à 80 m avec une moyenne de 60 m. L'épaisseur d'altération dans les roches vertes varie de 7,5 à 60 m.

Selon le modèle conceptuel admis par Maréchal et al., (2003), les aquifères des zones de socle sont à caractère multicouche : la couche superficielle d'altérite alimentée en surface par les eaux

de pluie, l'horizon fissurée à forte perméabilité (Lachassagne et al., 2005) et enfin le substratum qui peut être affecté par des failles. La couche intermédiaire et le substratum constituent des aquifères semi-captifs (Ousmane, 1988). Les travaux de Abdou Babaye (2012) ont mis en évidence que la recharge de la nappe phréatique dans le Liptako est le plus souvent récente, indiquant un renouvellement régulier, ce qui permet d'en déduire qu'il s'agit d'une ressource en eau durable

D'après Hassane Saley (2018), les principaux paramètres hydrodynamiques des aquifères du Liptako se résument en fonction des formations géologiques comme suit :

- Les aquifères dans le Liptako se caractérisent par un niveau piézométrique très variable compris entre 1,8 et 30,7 m de profondeur dans les granitoïdes et 4,4 et 20,7 m dans les schistes. Les arrivées d'eau sont entre 10 et 60 m, quelle que soit la formation (roches vertes ou granites).
- Le débit des forages varie en moyenne entre 2,6 et 4,1 m³/h pour les formations granitoïdes ; le débit maximal observé est de 20 m³/h. Pour les roches vertes, le débit varie en général entre 1,7 et 3,6 m³/h et le débit maximal est de 9 m³/h.

2.5.2 L'aquifère sédimentaire du CT3

Les formations de grès sablo-argileux forment la nappe libre du CT3 qui est l'objet de notre étude dans la partie sédimentaire. Le niveau piézométrique varie de 10 m à plus de 150 m de profondeur avec une amplitude moyenne de fluctuation saisonnière de 65 cm qui peut atteindre 4 m par an localement. Le niveau de la nappe est très proche de la surface dans les bas Dallols.

Dans la zone d'étude, une hausse pluri-décennale du niveau piézométrique dans l'aquifère du CT3 été mise en évidence (Favreau, 2000). En conséquence, de nombreuses mares sont devenues permanentes grâce à la surface piézométrique qui devient affleurant. Les forages qui exploitent la nappe du CT3 se caractérisent par des débits assez variables dont les fortes valeurs peuvent atteindre 40 m³/h. Les débits spécifiques varient entre 6 et 16.2 m³/h/m et la transmissivité (T) entre $1,2 \cdot 10^{-2}$ et $9 \cdot 10^{-2}$ m²/s (informations tirées des fiches des essais de pompage de plusieurs forages réalisés dans la zone et du rapport du projet AGES : Appui à l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger pour la Gestion des Eaux Souterraines).

2.5.3 Les aquifères alluviaux

Les aquifères alluviaux sont des aquifères d'âge quaternaire formés par les alluvions du fleuve Niger et de ses affluents (notamment en zone de socle). Ils sont continus et constitués de

formations sableuses alluvionnaires qui se déposent directement sur le socle ou sur un terrain argileux parfois compact ou peu compact. Ils contiennent aussi parfois des gravillons tels qu'observés sur les logs lithologiques de forages réalisés en 2009 par l'Université Abdou Moumouni au bord du fleuve. Les aquifères alluviaux sont peu profonds, poreux et se limitent à la vallée du fleuve Niger et ses affluents. Les aquifères alluviaux sont exposés à la pollution. Ils ont une conductivité électrique qui peut atteindre jusqu'à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Kehren, 1995).

2.5.4 Les aquifères à Niamey

Les travaux de (Boubakar Hassane, 2010) ont permis d'avoir un aperçu détaillé sur les aquifères de socle en bordure du fleuve Niger à Niamey. Ces travaux ont été complétés par l'étude du projet AGES (Vassolo et al. 2015 ; Abdoulahi et al. 2019 ; Bosch et Heckmann 2019). A partir de ces travaux, nous allons faire une petite synthèse de l'hydrodynamique de ces aquifères à Niamey.

- A Niamey, les aquifères de socle bicouches ou monocouches sont captés par beaucoup de forages réalisés dans les années 1980 dans la Communauté Urbaine de Niamey pour pallier à l'assèchement du fleuve (Dehays et al., 1986 ; Bernert et al., 1985). On retrouve ces aquifères sous le plateau du CT3 en rive gauche et sous les alluvions peu épaisses des terrasses du fleuve en rive droite. Le débit moyen des forages varie de 2,3 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ à 4,1 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ dans les formations granitoïdes et de 3,7 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ à 7,6 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ dans les formations volcano-sédimentaires. Les transmissivités varient entre $3.10^{-5} \text{ m}^2. \text{ s}^{-1}$ et $1.10^{-2} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et les débits spécifiques entre 0,1 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et 20 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-1}$ en fonction de la lithologie, de l'épaisseur de la nappe captée, du degré de fracturation et de l'intensité de l'altération.
- La nappe phréatique du CT3 est rechargée par les eaux de pluie. On y observe une hausse piézométrique sur la période récente. Cette nappe libre du CT3 est caractérisée par des axes de drainage orientés nord-ouest / sud-est et nord-est / sud-ouest avec respectivement des gradients hydrauliques 2.10^{-4} à $3,2.10^{-4}$ (Bosch et Heckmann, 2019).

La Figure 14 présente les isopièzes et le sens des écoulements des eaux souterraines dans la ville de Niamey. Sur la carte, les isopièzes montrent de manière générale deux grands types d'écoulement souterrain :

a) Des **flux convergeant vers le fleuve**. Sur la rive droite, nous avons les eaux souterraines qui convergent vers le fleuve suivent une direction Sud-Ouest / Nord-Est avec un gradient hydraulique qui varie de 7‰ sous le plateau à 3‰ à proximité du fleuve.

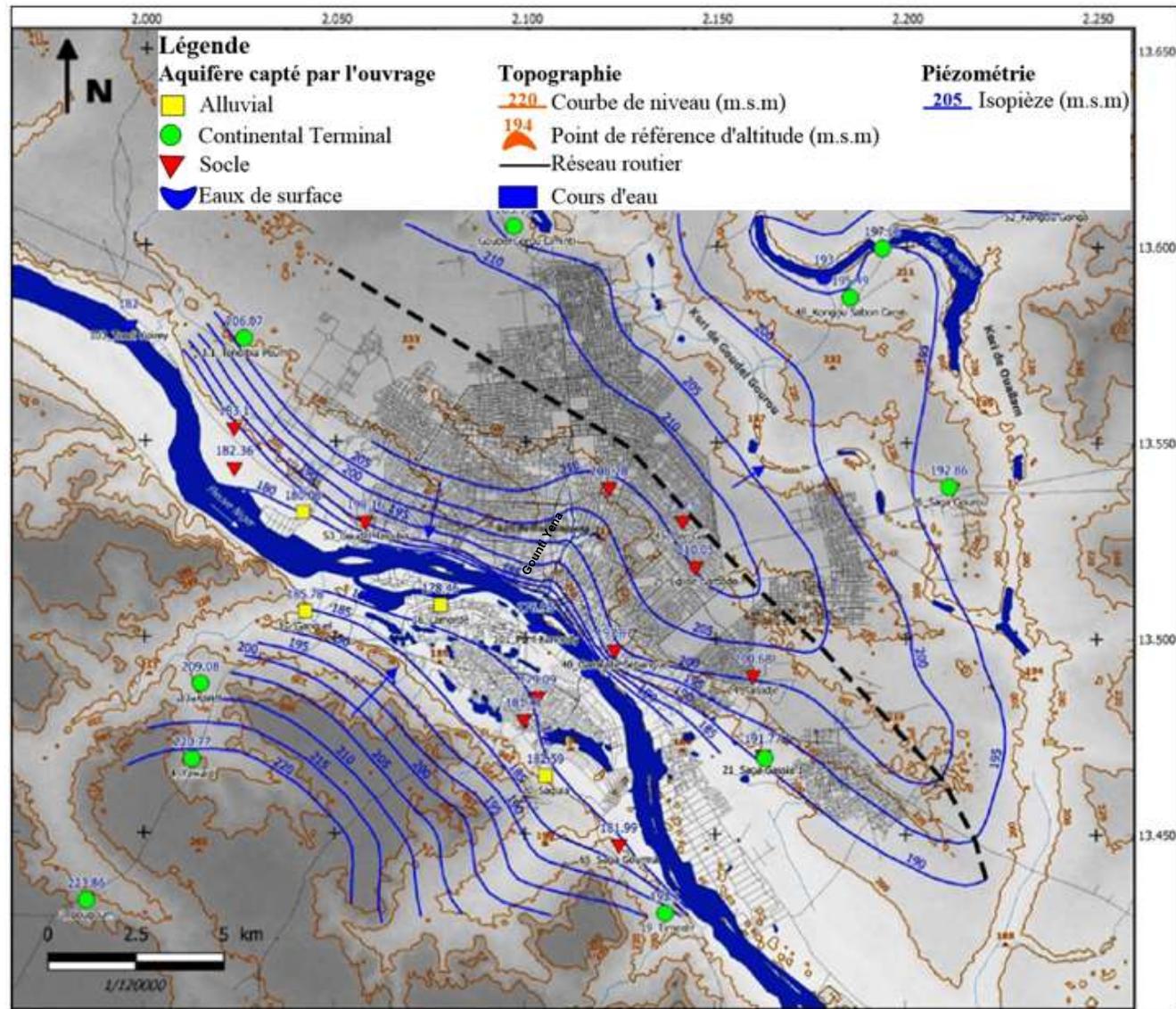


Figure 14: Carte piézométrique de Niamey, avril 2017 (modifiée d'après Bosch and Heckmann, 2019)

Les charges hydrauliques extrêmes estimées sur cette carte sont : pour le maximum dans la localité de Bougoum dans le Sud-Ouest avec une charge hydraulique de 223,86 m mesurée sur un ouvrage qui capte le CT ; et pour le minimum dans les environs de Lamordé à l'approche du fleuve où la charge hydraulique baisse jusqu'à 179,09 m sur un ouvrage qui capte le socle. Sur la rive gauche on remarque une ligne de partage qui divise le plateau de la ville de Niamey en deux. Au Sud-Ouest de la ligne de partage, les écoulements souterrains se font en direction du fleuve avec un gradient hydraulique moyen de 4,6‰ calculé dans les travaux de Aboulahi et al. (2019). Dans cette partie plus de la moitié des ouvrages captent le socle. La valeur de la charge hydraulique varie de 210.6 m à 180 m du Nord-Est vers le Sud-Ouest.

b) Des **flux qui convergent vers le kori de Goudel Gorou et le kori de Oualam**. Sur la partie Nord-Est de la ligne de partage, les écoulements des eaux souterraines prennent la direction Sud-Ouest / Nord-Est vers la marre de Kongou. Le gradient hydraulique calculé est très faible avec une valeur de 1‰. Ces flux souterrains permettent d'alimenter les points les plus bas des koris où se forment des mares permanentes dont la marre de Kongou. D'autres koris tel que le Gounti Yena où l'on observe un écoulement permanent draine l'aquifère au point de modifié localement l'allure des isopièzes.

Chapitre 3 : Approche méthodologique

Chapitre 3 : Approche méthodologique

Le présent chapitre synthétise d'abord les différents facteurs pris en compte pour le choix des sites de mesure. Ensuite suivra la description de la méthodologie utilisée, basée sur l'utilisation de 1) la piézométrie pour établir les relations nappes – rivière en bordure du fleuve Niger ; 2) la loi de Darcy pour quantifier les valeurs des flux d'eau souterraine ; 3) les méthodes de prospection géophysique pour contraindre les paramètres de l'équation de la loi de Darcy.

3.1 *Choix des sites*

Mener une étude de caractérisation de sub-surface, d'hydrodynamique et d'hydrologie des écoulements (de surface et souterrains) dans un contexte de variabilité géologique, nécessite un échantillonnage représentatif des sites suivant leurs fonctionnements hydrogéologiques. Pour ce faire, quatre sites ont été sélectionnés sur les différentes formations géologiques de la zone d'étude.

Le choix de ces quatre sites de mesure a tenu compte des critères suivants : 1) représentativité géomorphologique et géologique ; 2) disponibilité des données issues d'études antérieures ; 3) position géographique des sites par rapport au fleuve et accessibilité ; 4) dynamique des apports de surface notamment par les affluents du fleuve. Les sites ainsi choisis se présentent comme suit :

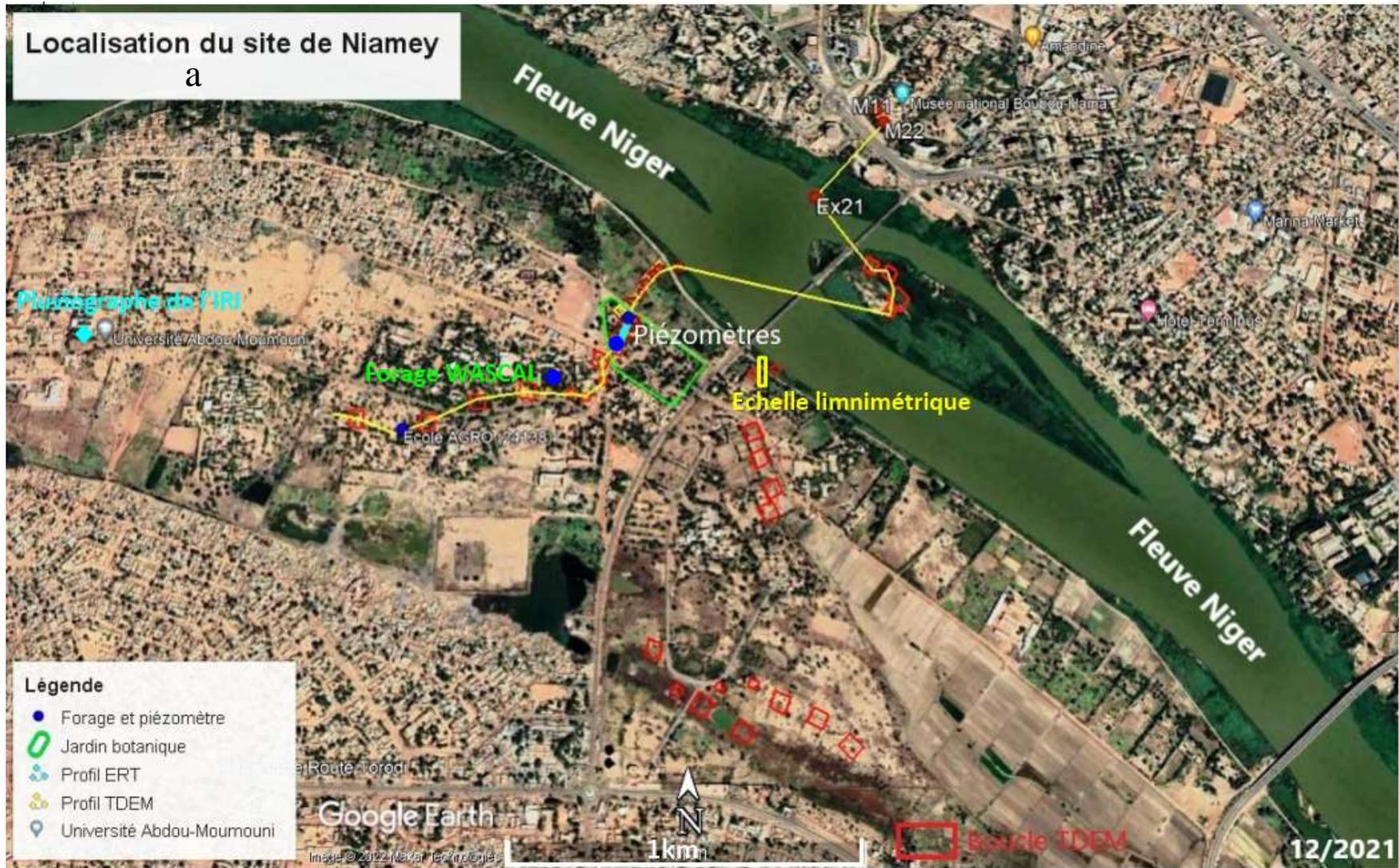
- **Le site du jardin Botanique de l'Université Abdou Moumouni (UAM) à Niamey** (Figure 15). Le site est situé dans le lit majeur du fleuve à Niamey sur la rive droite (Figure 15a). Sa particularité est la présence de deux piézomètres forés en 2009 dans le cadre d'une collaboration entre le Département de Géologie de l'UAM et l'Institut de Recherche pour le Développement au Niger (IRD). L'un des piézomètres est doté d'un enregistreur automatique ce qui permet de suivre finement l'évolution du niveau d'eau dans la nappe. Le site est situé sur des alluvions anciennes du fleuve qui reposent directement sur les formations du socle à un endroit où la vallée du fleuve est relativement large. Les formations du CT sont affleurantes en bordure de la rive gauche (Figure 15b).
- **Le site de Gongga Zougou** (Figure 16) situé à 60 km à l'aval de Niamey. Il est situé sur la rive gauche (Figure 16a). Ce site a la particularité d'être à un endroit où la vallée du fleuve est étroite (~2,3 km de large) avec un plateau situé à moins de 500 m du fleuve en rive gauche. Cette proximité du plateau indique la présence de formations

sédimentaires du CT (figure 16b) et a été un critère de choix important. De plus ce site possède 2 puits dans un alignement perpendiculaire au fleuve, permettant un suivi du gradient hydraulique en direction du fleuve. Nos investigations ont été réalisées dans le lit majeur du fleuve et sur le versant en bordure. Après la première campagne de mesure, s'est présentée la nécessité d'avoir des informations sur la rive droite pour compléter les travaux réalisés à Gongga Zougou de telle sorte à avoir une vue de la section complète rive droite – rive gauche du fleuve. Ainsi un profil géophysique a été réalisé sur la rive droite de manière à être perpendiculaire au fleuve sur une distance de 8 km en partant de la bordure du fleuve (village de Werkéré) jusqu'au site de l'ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics ; village de Sadoré). Quelques mesures ont également été réalisées sur l'un des sites de l'observatoire WASCAL (Climat Change and Energy) de l'UAM de Niamey situé dans le village de Sékoukou à environ 5 km en amont de Gongga Zougou sur la rive gauche (Figure 16a).

- **Le bassin de Ouama** (Figure 17). Ce site est situé en rive droite du fleuve dans le Liptako Gourma au Niger qui constitue la région de socle localisée dans le Sud-Ouest du Niger. Le bassin se localise entre les latitudes 14°00'' et 14°05'' Nord et les longitudes 1°05'' et 1°10'' Est. Le Ouama est situé en rive gauche de la rivière Dargol et son bassin a une superficie de 380 km². Dans ce bassin, les écoulements de surface se font du nord au sud. C'est un sous bassin de la rivière Dargol, qui constitue l'un des plus grands affluents du fleuve dans la zone d'étude (Mahé et al., 2003 ; Amogu et al., 2010 ; Malam Abdou et al., 2016). Ce site a été choisi pour évaluer la contribution des nappes alluviales des cours d'eau secondaires au régime du fleuve. En effet, des études antérieures (Malam-Abdou et al., 2016 ; Abdou Babaye, 2012) ont montré que les lits des koris du réseau hydrographique du Dargol sont des lieux d'infiltration privilégiée. En conséquence, il est probable que les alluvions de cet affluent apportent un surplus d'eau souterraines et nous avons voulu quantifier ce phénomène. Le site de Ouama a été choisi spécifiquement car des investigations sur la profondeur des alluvions avaient déjà été entreprises dans le cadre d'un master (rapport de master 2, Laouel Cherif M. et Zakari I., 2017). La confluence entre le Dargol et le fleuve Niger a aussi été explorée. Toutefois les investigations sur le bassin du Dargol ont dû être interrompues suite à des problèmes de sécurité.

Localisation du site de Niamey

a



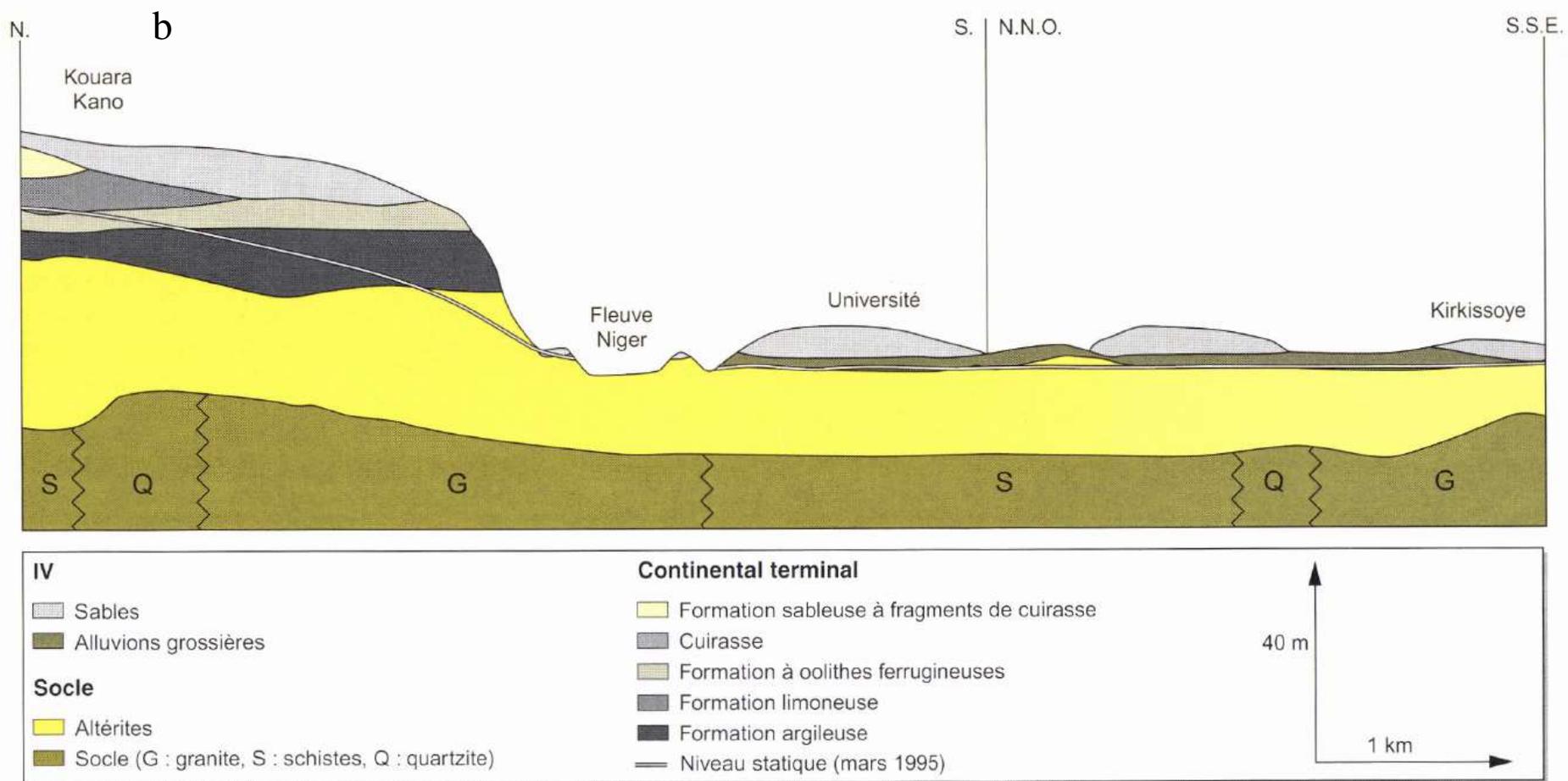
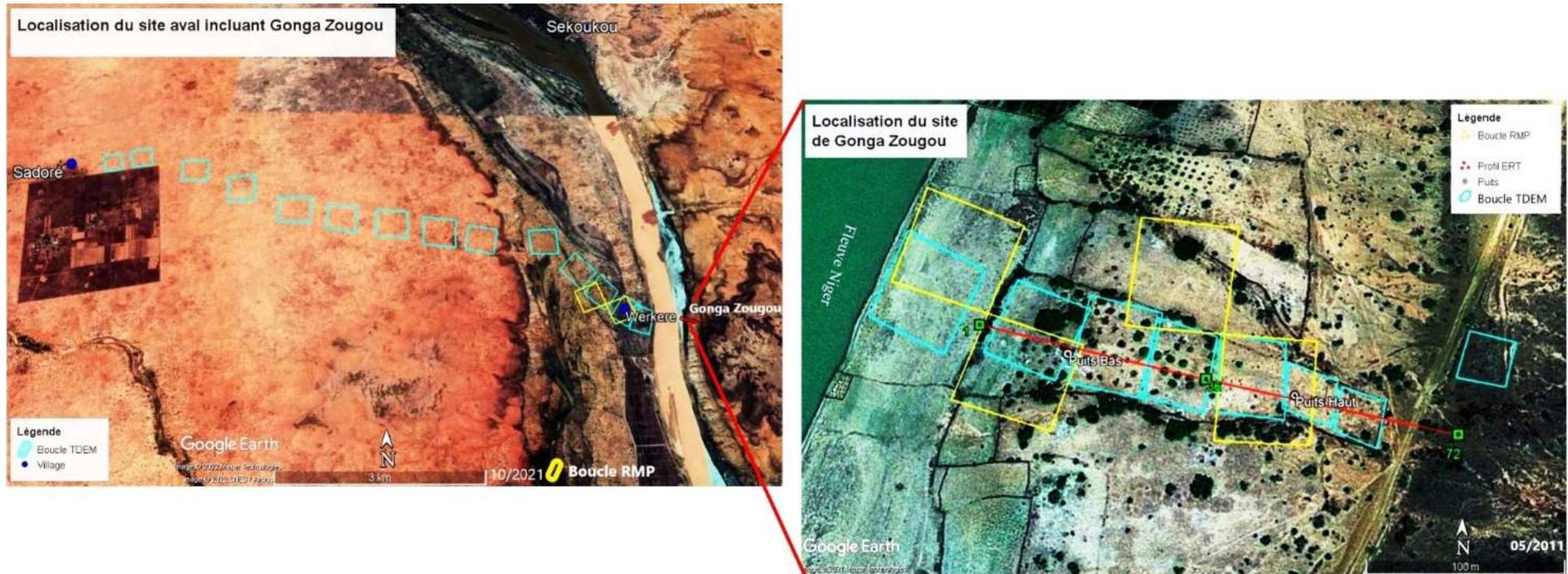


Figure 15: a- Site du Jardin Botanique avec la position des forages et des différents sondages géophysiques, b- Coupe géologique schématique traversant le fleuve au niveau de l'Université Abdou Moumouni à Niamey (Bechler-Carmaux et al. 1999)

a



b

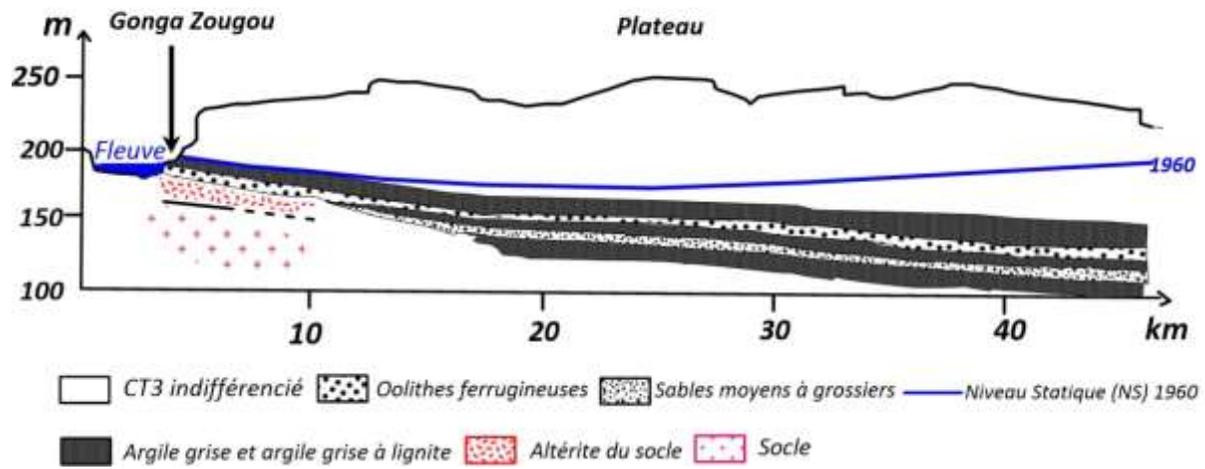


Figure 16: a- Site de Gongga Zougou avec la position des puits et des sondages géophysiques, b- Coupe géologique schématique dans la zone de Gongga Zougou (modifiée d'après Monfort, 1996)

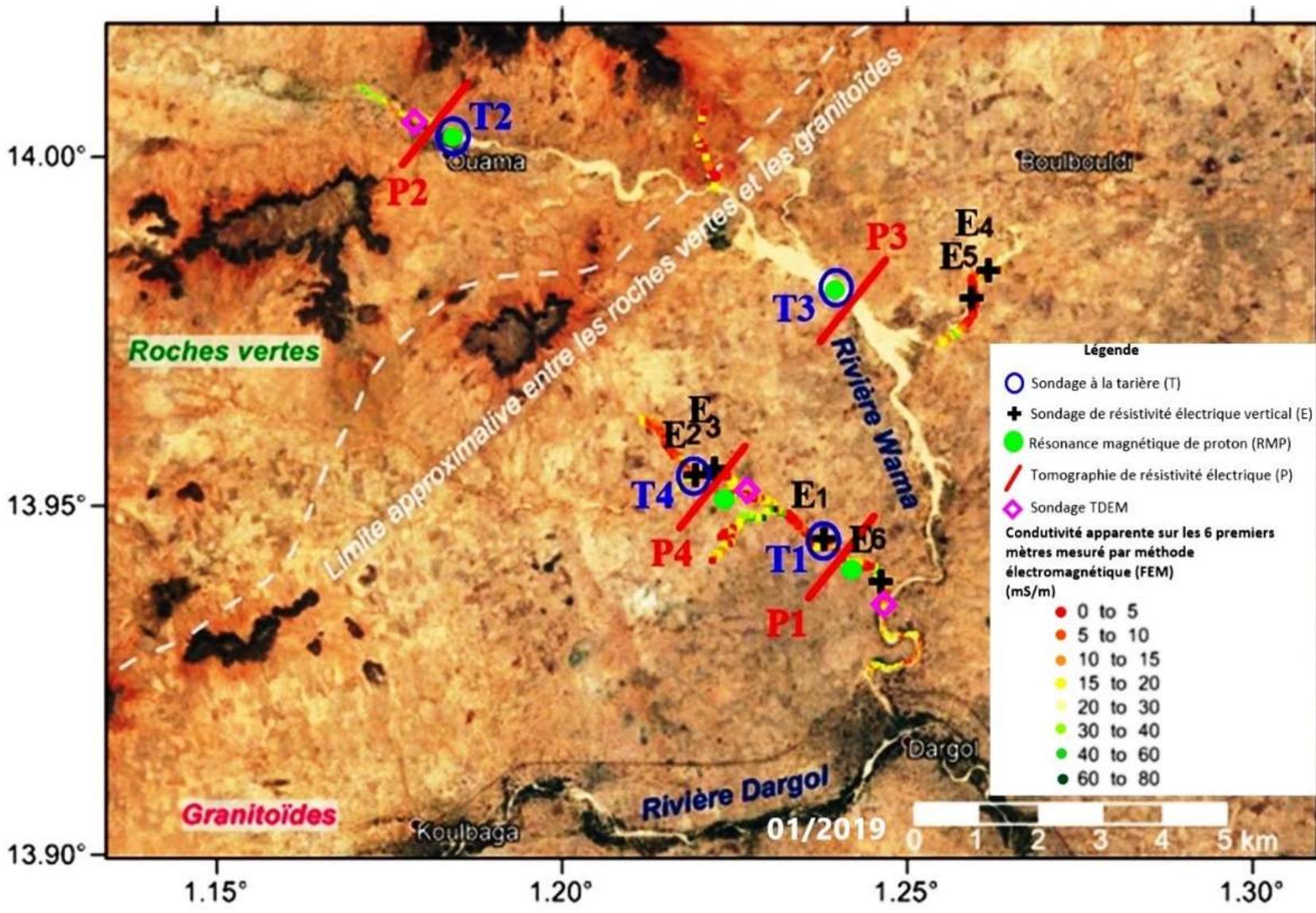


Figure 17: Site de Ouama avec la position des mesures géophysiques

- **Le site de Gorou Tchirey** (Figure 18). Ce site a été choisi notamment pour sa facilité d'accès suite à l'impossibilité de continuer sur le bassin du Ouama en raison de la dégradation des conditions sécuritaires. Le site de Gorou Tchirey est situé dans un petit kori à la périphérie sud de la ville de Niamey au bord du fleuve (Figure 18a). Tout comme le bassin de Ouama, ce site a pour vocation à estimer la contribution des nappes alluviales des cours d'eau temporaires. Il se distingue de par la petite taille de son bassin versant et par une nappe alluviale qui affleure jusqu'à constituer des sources d'eau qui s'écoulent vers le fleuve tout au long de l'année. Les affleurements sur les berges du kori de Gourou Tchirey (Planche photo 7c) indiquent que les alluvions reposent sur les altérites du socle (Figure 18b).

L'ensemble de ces choix nous a permis de caractériser trois types de contacts en fonction de la géomorphologie et de la géologie. Les caractéristiques des types de contact sont résumées dans le Tableau 1 :

Tableau 1: Caractéristiques des sites d'études

<i>Site</i>	<i>Géomorphologie</i>	<i>Géologie</i>
<i>J.botanique / Niamey</i>	<i>Lit majeur</i>	<i>Alluvion Quaternaire/Socle</i>
<i>Gonga Zougou</i>	<i>Lit majeur et Versant</i>	<i>Alluvion Quaternaire/Socle/ Continental Terminal</i>
<i>Ouama - Dargol</i>	<i>Affluent d'ordre 2 avec un bassin de 380,17 km²</i>	<i>Alluvion Quaternaire/Socle</i>
<i>Gorou Tchirey</i>	<i>Affluent d'ordre 1 avec un bassin de 18,41 km²</i>	<i>Alluvion Quaternaire/Socle</i>

a



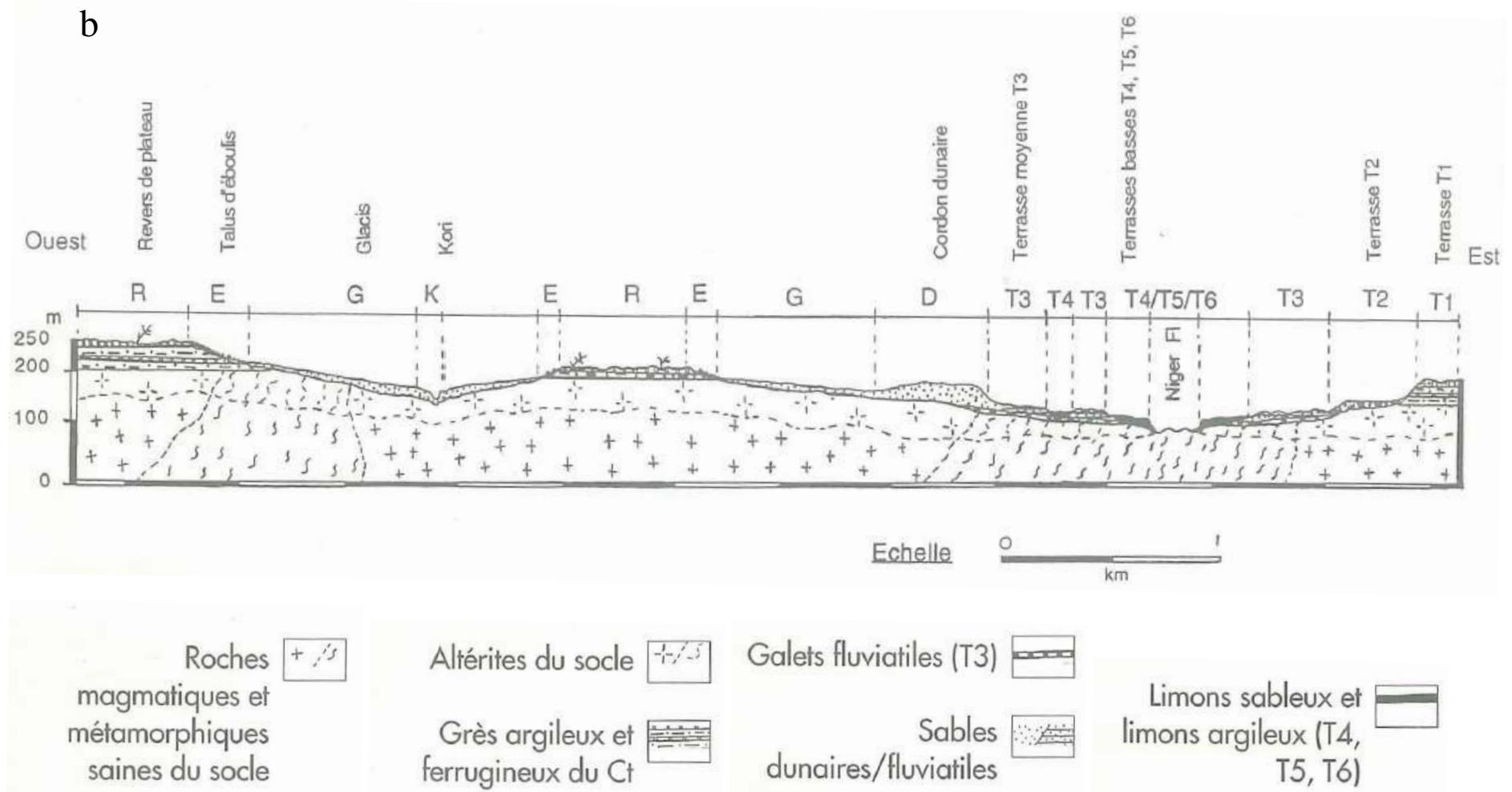


Figure 18: a- Site de Gorou Tchirey avec la localisation des sondages géophysiques, des sources et du piézomètre, b- Coupe schématique Est-Ouest de la vallée du fleuve Niger dans le secteur de Gorou Tchirey (Thevoz et al. 1994)

3.2 Méthodes hydrologiques

Pour mieux appréhender les échanges qu'il pourrait y avoir entre les nappes et le fleuve Niger, nous allons analyser les chroniques du niveau d'eau dans la nappe, comparativement au niveau du fleuve. Ces chroniques sont issues des suivis piézométriques réalisés sur différents types d'ouvrages hydrogéologiques que nous avons nivelés. Ainsi nous verrons dans la partie suivis piézométriques les méthodes et matériels utilisés pour répondre à notre première question scientifique. Nous allons aussi rappeler la loi de Darcy qui permet de calculer les flux d'eau souterrains et qui servira pour répondre à la 2^{ème} question scientifique.

3.2.1 Mesures piézométriques

Les suivis piézométriques ont été entrepris sur un ensemble de puits et de piézomètres sur la zone d'étude (Tableau 2). Cinq ouvrages ont été sélectionnés sur le terrain au cours de l'année 2019 et 2020 dont 2 puits profonds et 3 piézomètres qui ont tous été nivelés et suivis.

Sur le site du jardin botanique à Niamey, deux sondes Diver© qui mesurent la pression atmosphérique et la pression de l'eau dans l'ouvrage ont été installées dans le piézomètre Pz₁ le plus proche du fleuve. La différence de pression permet d'évaluer l'évolution du niveau d'eau dans la nappe. Les sondes ont été réglées pour effectuer des mesures toutes les 20 minutes. Les données obtenues ont été traitées sous tableur Excel© et le logiciel de graphisme Grapher©. Des mesures manuelles ont été réalisées dans les deux piézomètres car cela permet de vérifier la qualité des données des sondes de pression et aussi d'avoir des données dans le deuxième piézomètre (celui situé plus en altitude).

En juin 2020 nous avons également lancé des suivis quotidiens dans les 2 puits sur le site de Gongga Zougou (en bordure du plateau de formation CT). Les mesures de niveau d'eau dans ces puits ont été faites manuellement et par des lecteurs présents sur place et que nous avons formés. Les mesures ont été faites deux fois par jour : le matin et le soir à heure régulière. En plus de ces suivis nous avons des mesures ponctuelles depuis 2019 réalisées par nous-même lors de nos passages sur le site. Les suivis dans les puits ont été interrompus de septembre 2020 à novembre 2020 par manque de lecteur, mais ils ont été repris ensuite. D'autres facteurs comme les intempéries, les inondations pendant la saison pluvieuse, la panne de la sonde lumineuse et l'absence de lecteur par moment expliquent aussi la présence de lacunes dans les données. En outre, la qualité des mesures dépend fortement du sérieux du lecteur et certaines mesures aberrantes ont dû être retirées du jeu de données.

Tableau 2: Piézomètres (Pz) et puits (Pt) suivis

Sites	Ouvrages	Mesures	Profondeur totale / sol (m)	Hauteur margelle (cm)	Diamètre (cm)	Coordonnées UTM (31P)		Altitude (m)
						Latitude	Longitude	
Jardin Botanique	Pz1	Enregistreur (20 min)	18	45	6.3	1493025	402466	183.14
	Pz2		22	51		1492990	402451	182.00
Gonga Zougou	Pt bas	Manuelle (2fois / jour)	9.2	40	183	1461499	432076	174.74*
	Pt haut		14	70	134	1461477	432208	178.84*
Gorou Tchirey	Pz		5.1	50	5	1484409	407633	~181

* l'altitude absolue de ces deux ouvrages est connue avec une précision métrique mais la différence d'altitude est connue avec une précision centimétrique (cf. §3.2.3).

Sur le site de Gorou Tchirey (petit kori en aval de Niamey, affluent du fleuve Niger) nous avons installé un piézomètre pour le suivi hydrogéologique au bord du fleuve en juillet 2020. Ce piézomètre a été réalisé le 1^{er} juillet 2020 par nous même dans le cadre de nos travaux de cette thèse avec la tarière motorisée. Dans ce piézomètre, nous avons lancé les suivis deux jours après la foration. Sur ce piézomètre les mesures sont effectuées manuellement par des personnes (les lecteurs) que nous rémunérons de façon mensuelle. Ces mesures sont effectuées deux fois par jours (une mesure le matin et une le soir). Les mesures sont faites à heure fixe d'un jour à l'autre dans la mesure du possible (maximum 15 minutes de différence). Pour que ce travail de mesure manuelle soit bien mené à bien, nous avons dû former les lecteurs pendant plusieurs jours avec des séances de travaux pratiques et même de vérification pendant nos passages de contrôle.

3.2.2 Données disponibles

En plus des données obtenues dans le cadre de cette étude, des données déjà existantes ont été utilisées. Parmi ces données, nous avons les descriptions géologiques des forages et de quelques puits. Ces données sont issues soit d'études scientifiques spécifiques récentes ou anciennes (ex. programme WASCAL, forages du jardin botanique ; Plote 1961 ; Greigert 1957), soit des fiches de forage de grands programmes d'alimentation en eau potable. Parmi ces programmes nous pouvons citer notamment le programme d'urgence pour l'alimentation en eau de la ville de Niamey pendant la sècheresse de 1984 – 1985 avec au total 120 forages répertoriés dans Bernet et al. (1985) et Dehays et al. (1986) ; le programme d'hydraulique villageoise du Conseil de l'Entente ; le projet d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement (PAEPA) ; le projet « ALG » financé par la Banque Islamique de Développement. En plus des descriptions géologiques, les fiches de forages nous communiquent des informations sur les transmissivités de l'aquifère et sur les niveaux statiques au moment de la foration. Les informations sur la piézométrie ont été complétées dans la vallée de Niamey par des données de la littérature grise (Vassolo et al., 2015 ; Kehren 1995). Nous avons aussi recueilli les données de précipitation de la station pluviométrique d'AMMA-CATCH située sur le site de l'Institut des Radio Isotopes (IRI) et le site de l'aéroport international Diori Hamani de Niamey (Figure 6). Les hauteurs d'eau du fleuve Niger à la station hydrométrique de Niamey ont été obtenues auprès de l'ABN (Autorité du Bassin du fleuve Niger).

3.2.3 Nivellement

Pour évaluer les directions des flux d'eau souterrains dans la zone d'étude et pour comparer les niveaux piézométriques avec le niveau du fleuve Niger mesuré à la station de Niamey, il est

nécessaire de convertir les profondeurs piézométriques en charges hydrauliques. Pour calculer ces charges hydrauliques, nous avons nivelé tous nos ouvrages avec un équipement de topographie de précision composé d'un niveau optique, une mire et un trépied. Nous avons d'abord effectué le nivellement avec un niveau ancien de l'IRD. Cependant pour vérifier la qualité des données, nous avons repris le nivellement avec un niveau récent de la faculté d'agronomie de l'Université Abdou Moumouni de Niamey. Nous avons employé la méthode d'itinéraire par cheminement qui nous a permis de mesurer une différence d'altitude, ou une succession de différences par rapport à un point connu. Les nivellements ont été fait en aller et retour sur tous les trajets de telle sorte à minimiser les erreurs et avoir des niveaux relatifs précis sur chaque site. Les levés topographiques des points d'eau ont permis de calculer les altitudes des ouvrages. Ces altitudes sont ensuite utilisées pour calculer la charge hydraulique à l'aide des mesures de la profondeur de l'eau dans les ouvrages.

Sur le site du jardin botanique, les mesures des profondeurs des niveaux d'eau dans les nappes ont été traduites en charge hydraulique en utilisant comme référentiel la côte IGNN (Institut Géographique National du Niger) de l'échelle limnimétrique se trouvant au niveau du pont Kennedy située sur le fleuve Niger dans la ville Niamey (à la station hydrométrique de Niamey). La côte IGNN utilise le niveau moyen de la mer comme référentiel. Sur les autres sites, comme aucune borne n'a été trouvée à proximité, les côtes SRTM ont été utilisées comme référentiel pour déterminer la côte du fleuve et des ouvrages suivis. En conséquence, les altitudes relatives sur chaque site sont précises (centimétrique) mais les altitudes absolues sont approximatives en dehors du site de Niamey.

3.2.4 Calcul des flux souterrains : Loi de Darcy

Pour atteindre notre 3^{ème} objectif spécifique et répondre à notre question scientifique qui concerne la quantification des flux, nous avons employé la loi de Darcy. La loi de Darcy dit que toute circulation de l'eau passant dans un milieu poreux dépend de sa perméabilité et du gradient de charge ou gradient hydraulique (Castany, 1982). La loi de Darcy s'applique selon l'équation suivante :

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Avec :

- Q : le débit de l'eau qui circule à travers le milieu poreux (m³. s⁻¹)
- K : la perméabilité du milieu poreux (m . s⁻¹)
- A : la section du massif poreux par laquelle passe le flux (m²)

- Δh : la différence de charge entre deux points du massif poreux (m)
- L : la distance entre les deux points du massif poreux utilisés pour calculer la différence de charge (m)
- Le rapport $i = \frac{\Delta h}{L}$ (sans unité) : est le gradient hydraulique ou gradient de charge.

Pour utiliser l'équation de Darcy, les propriétés de l'aquifère doivent être précisées, dont en particulier le paramètre de perméabilité K et la section du milieu poreux A. Or pour calculer la section du massif poreux A, il faut connaître la géométrie de l'aquifère. Pour connaître cette géométrie on peut utiliser les logs géologiques des forages mais les logs n'apportent qu'une information ponctuelle assujettie à une variabilité locale. Pour obtenir la perméabilité, on peut utiliser des essais de pompage. Mais les essais de pompage nécessitent la présence d'un forage ou d'un puits avec une colonne d'eau suffisante. Leur réalisation peut perturber les suivis du cycle naturel des variations piézométriques (méthode invasive). Pour obtenir des résultats de bonne qualité les essais de pompage nécessitent d'être réalisés sur une longue période (typiquement 72h).

Pour compléter les informations des logs géologiques et des essais de pompages, il est possible d'utiliser des méthodes géophysiques qui bien qu'indirectes ont l'avantage d'être :

- Rapides dans leur mise en œuvre (permettant d'augmenter le nombre de mesures pour une meilleure spatialisation) ;
- Relativement peu coûteuses (cf. analyse de coût dans Vouillamoz et al., 2002) ;
- Intégratives sur un volume d'intérêt hydrogéologique (hectométrique) ;
- Non-invasive.

3.3 Méthodes géophysiques

Pour contraindre l'équation de Darcy et construire un modèle conceptuel de fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-nappes, nous avons utilisé les méthodes géophysiques afin de préciser la géométrie des aquifères et déterminer localement la perméabilité du milieu.

3.3.1 La géophysique appliquée à la subsurface

De toutes les lectures faites, la géophysique appliquée est définie comme étant l'ensemble des techniques d'une discipline des sciences de la terre qui utilise les concepts, instruments et grandeurs pour mesurer les différentes propriétés physiques de la terre. Lorsqu'elle est appliquée au souterrain, la géophysique utilise des appareils de mesures de grandeurs capables de traverser le sol et sensibles à la variation du champ électrique, champ magnétique et des ondes sismiques terrestres pour connaître les structures du sous-sol.

Elle s'applique en surface du sol et permet d'effectuer des mesures sur une profondeur qui varie de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres dans le sous-sol. Elle est utilisée dans le souci de déterminer les caractéristiques, la nature et la géométrie du sous-sol. Mieux, elle permet de localiser et de caractériser les aquifères, d'identifier l'existence et l'emplacement des failles et l'épaisseur des couches argileuses grâce à des informations complémentaires existantes tel que la géologie (à travers les coupes lithologiques des forages, les cartes géologiques et l'exploration géologique faite sur place), et les relevés piézométriques. En plus des études hydrogéologiques, la géophysique de sub-surface est notamment utilisée dans le domaine de la dépollution (pour une délimitation des zones polluées), dans l'archéologie (pour retrouver des objets surtout métalliques ou des structures non métalliques enfouis), dans le bâtiment et le génie civil (pour une localisation des canalisations, conduite de gaz, câbles électriques ou pour l'inspection et l'analyse de dommage et de suivi non destructif des constructions).

3.3.2 Choix des méthodes géophysiques

La géophysique a un large éventail de méthodes. Les études antérieures ont démontré qu'il y a un paramètre intéressant pour caractériser indirectement la géométrie des aquifères : c'est la résistivité électrique des terrains. La résistivité électrique dépend de la porosité, de la saturation, de la minéralisation de l'eau et de la teneur en argile du terrain. Elle permet à l'hydrogéologue de déterminer la nature lithologique des différentes strates (l'hétérogénéité du sous-sol) et parfois la présence d'eau.

Pour le choix des méthodes géophysiques dans notre étude nous nous sommes basés sur les travaux réalisés dans le même contexte ou dans un contexte similaire. Selon nos objectifs la résistivité électrique est un paramètre adapté pour déterminer la géométrie des aquifères et des aquicludes argileux. Les études de Descloitres et al., (2013) réalisées dans le bassin semi-aride du lac Tchad (Niger) et celles de Guérin et al. (2001) dans l'Altiplano semi-aride (Bolivie) ont démontré l'utilité de la méthode électromagnétique en domaine temporel (TDEM) pour l'étude des eaux souterraines dans les zones arides et semi-arides. Nous avons aussi les travaux de Wubda et al., (2017) qui ont montré l'efficacité du monitoring de la résistivité par tomographie de résistivité électrique (ERT) et par cartographie Electromagnétique en Fréquentiel (FEM) pour suivre les processus de recharge (directe ou indirect) en contexte sahélien. Ensuite Alle et al., (2018) proposent de remplacer l'utilisation du trainé électrique et du sondage de résistivité électrique par la technique ERT, pour choisir les sites d'implantation des forages dans les roches dures altérées d'Afrique de l'Ouest. L'ensemble de ces travaux montre l'intérêt et l'avantage de l'application des méthodes électriques et électromagnétiques.

Outre ces études, d'autres ont montré l'intérêt de l'utilisation des méthodes ERT, TDEM et de Résonance Magnétique des Protons (RMP) pour une meilleure connaissance des flux d'eau souterrains et pour la paramétrisation des modèles hydrogéologiques numériques dans le sud-ouest du Niger (Boucher et al., 2009a) et dans le sud-est du Niger (Descloitres et al., 2013). Au vu de toutes ces études démontrant l'adéquation de ces méthodes par rapport à la caractérisation des systèmes aquifères en contexte sahélien particulièrement au Niger, le choix de nos méthodes s'est porté sur : les sondages TDEM combinés aux sondages RMP, à la méthode FEM et à la tomographie de résistivité électrique (ERT). Une tentative de sondages électriques verticaux (VES) n'a malheureusement pas abouti à des résultats d'intérêt. Cette méthode n'a donc pas été retenue après les premiers tests.

3.3.3 Les méthodes utilisées

Dans le cadre de la réalisation de notre étude hydrogéophysique, nous avons mis en œuvre les méthodes de prospection électriques (ERT et VES) et électromagnétiques (TDEM et FEM). Ce sont des méthodes permettant de déterminer la distribution verticale et horizontale des résistivités électriques dans le sous-sol. Elles sont faciles à mettre en œuvre. La méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP) qui a l'avantage d'être directement liée à la quantité d'eau souterraine a également été employée. Enfin pour valider certains résultats géophysiques, des forations à la tarière motorisée ont été réalisées.

3.3.3.1 Méthodes électriques

Les mesures sur le terrain avec les méthodes électriques permettent de calculer la résistivité électrique des terrains. Il y a plusieurs façons de mettre en œuvre ces mesures sur le terrain. Nous avons utilisé deux de ces façons, la technique du Sondage Electrique Verticale (VES) qui est une mesure en une dimension (1D) en fonction de la profondeur et la tomographie de résistivité électrique (ERT) qui est une mesure en deux dimensions (2D).

3.3.3.1.1 Principe commun du VES et ERT

Le principe commun des deux méthodes c'est la mesure sur le terrain de grandeurs opérationnelles qui vont permettre de calculer la résistivité électrique des terrains. Ces grandeurs opérationnelles sont : la différence de potentiel entre deux électrodes de réception (MN) en Volt et l'intensité du courant injecté dans les électrodes d'émission (AB) en Ampère (Figure 19). A partir de ces grandeurs opérationnelles et de l'écartement des électrodes, on calcule le paramètre d'intérêt : la résistivité en $\Omega.m$.

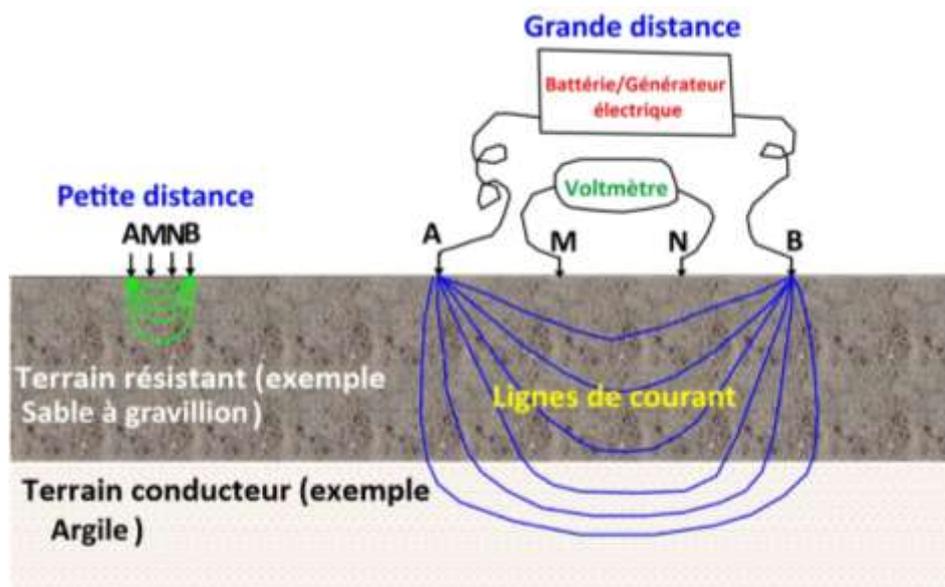


Figure 19: Principe de mesure de la résistivité électrique (d'après Florsch et Muhlach, 2018)

Pour les deux méthodes, la profondeur d'investigation dépend de la position des électrodes d'injection par rapport à celles de réception et de la géométrie des dispositifs. Elle dépend également de la nature des terrains superficiels et notamment des résistivités (Florsch et Muhlach, 2018; Loke, 2001; Loke et al., 2003).

3.3.3.1.2 Sondage électrique vertical (VES)

Le sondage électrique vertical (VES) est un sondage en courant continu. Le dispositif employé correspond à celui de la Figure 19. Sur le bassin de Ouama, des sondages électriques verticaux

ont été réalisés en 2018 sur six sites dans le but de calibrer nos données électromagnétiques FEM obtenues avec le CMD-explorer (cf § 3.3.3.2.2). Les sites ont été sélectionnés en fonction des valeurs de conductivités issues des premiers résultats des mesures FEM. Le choix porte sur trois zones résistantes (sites 1 ; 3 et 5) et trois autres sites dans des zones conductrices (sites 2 ; 4 et 6) visible sur la Figure 17. Les sondages VES ont été réalisés avec le Syscal Kid fabriqué par IRIS Instrument, et un dispositif Schlumberger avec un écartement d'électrode maximal de 10 m.

Les données de résistivités électriques apparentes obtenues par VES ont été inversées par les logiciels IX1D et IPI2WIN afin de mieux analyser et interpréter ces données. Ce sont des logiciels de traitement de données géophysiques. IPI2WIN est un logiciel libre tandis que l'utilisation du logiciel IX1D nécessite une licence payante.

A titre d'exemple nous avons sur la Figure 20 le résultat du sondage fait sur le site 1 inversé avec le logiciel IPI2WIN. Les résultats des autres sondages électriques figurent en Annexe 2. L'analyse de ces résultats (Figure 20) montre en général la même succession de terrain avec un conducteur intercalé dans 2 résistants. Toutefois les inversions des courbes de VES sont mal contraintes et ne permettent pas de donner des valeurs précises d'épaisseur des couches et de résistivité. Elles répondent au principe d'équivalence type H (i.e. intercalation d'un terrain conducteur entre deux résistants). A cette difficulté s'ajoute un manque d'information en profondeur à cause du choix de l'écartement entre électrodes qui s'est avéré trop petit. Ainsi les sondages électriques ne nous ont pas permis d'atteindre les objectifs fixés. Pour la suite de nos investigations nous avons choisi d'utiliser l'ERT dont l'inversion est mieux contrainte (Alle et al. 2018). En fin de compte nos sondages électriques verticaux n'ont pas servi.



Figure 20: Exemple de résultat d'inversion des sondages électriques sur le bassin de Ouama site 1 avec IPI2WIN

3.3.3.1.3 Tomographie de résistivité électrique (ERT)

3.3.3.1.3.1 Mesures ERT réalisées sur le terrain

Les tomographies de résistivité électrique (ERT) ont été réalisées en juillet 2019 sur le site du jardin Botanique à Niamey, sur site de Gongga Zougou à l'aval et sur le bassin de Ouama (Figure 17). Le site de Gorou Tchirey (petit affluent du fleuve) n'a pas bénéficié d'ERT, parce que le site a été choisi tardivement au cours de la thèse. Pour optimiser nos profils ERT, nous avons réalisé une modélisation numérique au bureau préalablement à la mise en œuvre sur le terrain. Au cours de la modélisation, nous avons tenu compte des paramètres géologiques et géomorphologiques des sites dans la conceptualisation du modèle. Le premier objectif de cette modélisation était le choix du dispositif géométrique (Wenner Alpha ou Beta, Pole-Dipôle, etc) et l'écart inter-électrodes (3 m, 4 m ou 5 m) à utiliser sur le terrain. Puis nous avons joué sur plusieurs paramètres de calcul tel que le Lambda, Z-Weight, blocky, Robust pour le choix d'un meilleur jeu de paramètres qui nous permettra de bien contraindre les résultats d'inversion de minimiser les erreurs (le RMS et le CHi-2). Au cours de la simulation de l'inversion, les données ont été bruitées à 3%. Les valeurs de résistivité ont été appliquées en fonction de la nature de chaque terrain attendu. Toutes les informations, les modèles et les résultats de la modélisation numérique se trouvent en annexe 3.

Pour la mise en œuvre sur le terrain, les panneaux ERT ont été réalisés avec l'équipement Syscal Pro Switch comportant 72 électrodes (Planche photo 9).



Planche photo 9: Equipement Syscal Pro Switch pour la réalisation de tomographie électrique sur le bassin de Ouama

Les dispositifs Wenner-Alpha et Beta choisis après la modélisation synthétique ont été utilisés. Par manque d'espace suffisant, l'espacement inter-électrode utilisé sur le site de Niamey est de 2 m. En revanche sur le site de Gongga Zougou et le bassin versant de Ouama, l'espacement de

4 m a été utilisé comme dans la modélisation pour obtenir une profondeur d'investigation de 30 m environ. Pour s'assurer de la qualité des mesures et du raccordement des électrodes aux flûtes, nous avons pris soin de vérifier que le RS Check soit inférieur à 3.

3.3.3.1.3.2 Traitement des données de terrain

Pour inverser les sondages ERT, plusieurs logiciels peuvent être utilisés dont certaines versions sont des versions de démonstration et d'autres sont payantes. Les versions de démonstration sont généralement des versions qui permettent de s'initier à l'inversion des données de tomographie et d'avoir des résultats pour une première expérience d'interprétation. Ces versions de démonstration permettent de faire et/ou de reproduire des modèles conceptuels et de prévoir des pseudo-sections par des calculs directs, mais elles sont limitées au niveau de la sauvegarde des résultats d'inversion, du nombre d'itérations de calcul et ne permettent pas d'insérer la topographie du lieu si elle n'est pas plane.

Pour le traitement de nos données recueillies sur le terrain, nous avons utilisé RES2DINV, un logiciel d'inversion. Ce logiciel nécessite une licence qui coûte environ 3 000 dollars. Actuellement c'est le logiciel le plus utilisé (Florsch and Muhlach, 2018). Il contient beaucoup de possibilités de paramétrisation pour de meilleures itérations de calcul et donc de meilleurs résultats d'inversion. Dans la procédure d'inversion de nos panneaux électriques, nous avons combiné les données du Wenner Alpha et Wenner Beta pour une meilleure représentativité verticale et horizontale de la variation de la résistivité. Les valeurs de Lambda et Z-Weight qui ont été prises en compte sont respectivement 1 et 30.

3.3.3.2 Prospections électromagnétiques

3.3.3.2.1 Sondage électromagnétique en domaine temporel (TDEM)

Le TDEM est une méthode géophysique qui permet de mesurer les variations verticales des résistivités électriques des roches. Son application dans les domaines de l'hydrogéologie est relativement récente à travers les travaux de Fitterman et Stewart, (1986). Par rapport aux méthodes électriques, cette méthode a pour avantage de mesurer la valeur des résistivités des terrains conducteurs avec précision (Descloitres et Ritz, 1994) et d'avoir une mise en œuvre rapide sur les terrains dégagés. Elle est principalement adaptée pour détecter les variations verticales de la conductivité électrique liées aux eaux souterraines minéralisées ou aux formations argileuses.

Comme nous l'avons écrit précédemment, plusieurs travaux de recherche ont démontré l'efficacité de l'utilisation du TDEM en particulier au Niger et plus généralement en Afrique et

dans d'autres pays du globe terrestre. Par exemple en Afrique, les travaux menés par Descloitres et al., (2000) dans les îles du Cap – Vert (la Caldeira du volcan Fogo) avaient pour objectif de détecter les formations de faible résistivité pouvant être liées aux eaux souterraines ; la contribution des sondages TDEM et RMP pour évaluer des eaux souterraines a été étudiée par Kemgang et al., 2019 dans le bassin du Lac Tchad au Cameroun. En dehors de l'Afrique, cette approche se montre utile en Europe par exemple à travers les travaux de Danielsen et al., (2003) au Danemark qui utilisent la méthode électromagnétique transitoire (TEM) pour les prospections hydrogéophysiques ; en Amérique du Sud Flores Avilés et al., (2020) passent par une méthodologie multidisciplinaire incluant des mesures TDEM pour fournir de l'information sur la structure hydrogéologique et la dynamique des eaux souterraines de l'aquifère du bassin de Katari – Lago dans le bassin du Lac Titicaca en Bolivie. Au Niger, Boucher et al., (2009a) ont utilisé des sondages électromagnétiques, pour améliorer la modélisation hydrogéologique.

3.3.3.2.1.1 Principe général du TDEM

Fondamentalement, le principe général du TDEM consiste à créer un courant électrique dans une boucle d'émission carrée (Tx, typiquement $25 \times 25 \text{ m}^2$ ou $50 \times 50 \text{ m}^2$) qui induit un champ magnétique primaire dans le sol. Le courant circulant dans la boucle Tx est brusquement interrompu ce qui provoque une force électromotrice. Des courants de Foucault sont alors induits dans le sous-sol produisant un champ magnétique secondaire décroissant dans le temps. Ce champ est enregistré par la bobine réceptrice (Rx). Les deux bobines Tx et Rx sont positionnées à la surface du sol. Le Rx peut être une petite bobine placée soit au centre du Tx (dispositif central, Figure 21), soit à l'extérieure du Tx (dispositif offset), soit être la même boucle que Tx (dispositif coïncidant, tel qu'utilisé dans notre étude).

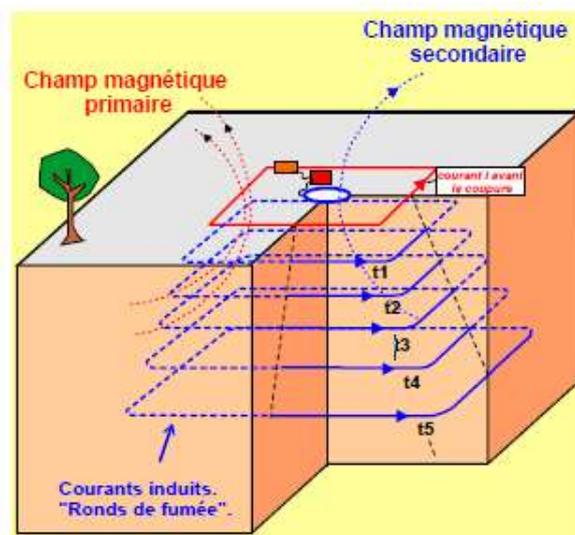


Figure 21: Principe général du TDEM (Descloitres et al., 2007)

3.3.3.2.1.2 Mesures TDEM réalisées sur le terrain

La localisation des sondages TDEM a été choisie pour étudier toutes les formations géologiques et hydrogéologiques qui composent la zone d'étude en fonction des sites expérimentaux choisis (cf. localisation des sites sur les Figure 4 et Figure 11). Les mesures ont été effectuées avec l'équipement TEMFAST 48HPC (Planche photo 10). C'est un appareil de mesure géophysique portable de petite taille de haute résolution qui utilise un mini-ordinateur appelé Nomade. L'appareil est connecté à l'ordinateur via une interface RS232 ou USB. Le TEMFAST (Planche photo 10) contient d'autres connecteurs utilisés pour raccorder les boucles d'injection et de réception à l'appareil. Il peut être utilisé dans différentes zones de prospection (urbaine, industrielle, etc.) pour plusieurs objectifs. Nous l'avons utilisé dans le cadre d'une étude hydrogéologique de caractérisation des systèmes aquifères.



Planche photo 10: Equipement TEM-FAST

Le TEM-FAST comprend : 1- un boîtier contenant un bloc de génération du courant et de mesure avec une batterie interne ; 2- un ordinateur appelé Nomad avec son chargeur (3) et un câble de connexion RS232 ; 4- un câble pour les mesures avec une antenne unique de réception-émission ; 5- un chargeur pour le bloc de mesure. Il comprend aussi d'autres éléments qui ne figurent pas sur l'image : 6- des connecteurs ; 7- une bobine de test ; 8- différents câbles supplémentaires pour réaliser des antennes de réception et d'émission variées ; 9- un manuel d'emploi.

Sur chacun des trois sites en bordure du fleuve, les sondages TDEM ont été réalisés selon des profils à peu près perpendiculaires au fleuve :

- Le profil localisé sur le site du jardin botanique (Figure 15) est long de 2,5 km et composé de 20 sondages TDEM. Les sondages de ce profil ont été effectués suivant la direction Sud-Ouest (SW) et Nord-Est (NE). Le profil s'étend de la rive droite (sur le

site de l'Université) à la rive gauche en traversant le fleuve avec des mesures sur une île du fleuve. Le profil a permis d'investiguer les formations du Quaternaires déposées sur le socle. Des sondages ont été également effectués sur les formations granitoïdes affleurantes sur l'île.

- Le profil du site de Gongga Zougou (Figure 16) a une longueur de 400 m et est positionné à la limite du CT en rive gauche du fleuve. Les sondages effectués sont au nombre de 8 et traversent les formations du Quaternaire, du CT et du socle et les dépôts tertiaires. Ce profil a été prolongé en rive droite sur 8 km entre le village de Werkere et Sadoré avec 14 sondages.
- Le profil de Gorou Tchirey (Figure 18) est situé dans le lit d'un petit affluent en rive droite du fleuve. Il est long de 2,3 km et est dans la même direction (SW – NE) que celui du jardin botanique situé 10 km en amont. Ce profil a été conçu pour traverser les dépôts alluvionnaires du Quaternaire qui se sont déposés dans le kori sur le socle là où les formations du CT ont été érodés. Il a été réalisé avec 17 sondages TDEM dont 1 au niveau du piézomètre installé en juillet 2020 à la proximité du fleuve.

Sur les différents profils, l'intervalle d'échantillonnage a été adapté avec un espacement variable entre les sondages. Nous nous sommes adaptés aux conditions de terrain ainsi qu'à la distance totale du profil recherché. Les distances entre les sondages ne sont donc pas les mêmes du fait que la longueur des profils n'est pas la même sur tous les sites. La procédure de mesure adoptée sur le terrain est l'utilisation de boucles coïncidentes. C'est-à-dire une seule boucle a été utilisée pour l'émission et la réception du signal ($T_x = R_x$), et les boucles sont de taille de $50 \times 50 \text{ m}^2$ ou de $25 \times 25 \text{ m}^2$. L'intensité du courant utilisé pour les mesures était de 2,4 ampères au maximum avec un temps d'acquisition qui varie de quelques microsecondes à 4000 μs sur presque tous les sondages sauf sur une dizaine qui vont jusqu'à 15 400 μs . Cette variabilité du temps d'acquisition est fonction de bruit électromagnétique ambiant et aussi de la réponse TDEM des formations de sub-surface (Flores Avilés et al., 2020). L'option de filtrage a été gardée en mode automatique sur 50 Hz.

Dans leurs travaux au Niger Descloitres et al., en 2007 ont employé sur le terrain une méthode de mise en œuvre utilisant trois dispositifs. Des boucles de 25×25 et $100 \times 100 \text{ m}^2$ en dispositif coïncident (signal plus fort) et un dispositif central combinant les 2 boucles. A un temps court les mesures réalisées avec une boucle de $25 \times 25 \text{ m}^2$ permettent d'avoir les informations sur les premières couches. Les informations des terrains les plus profonds sont déduites à travers le dispositif central et le dispositif coïncident utilisant la boucle de $100 \times 100 \text{ m}^2$. L'utilisation du

dispositif coïncident et central avait permis de détecter les effets de viscosités magnétiques (effet SPM) et de Polarisation Induite (IP) ou Polarisation Provoquée (PP) au Niger qui perturbent parfois les mesures. Leur perturbation peut induire des erreurs d'interprétation des résultats (Descloitres et al., 2000). Nous avons donc pris en compte ces effets pour interpréter nos données.

3.3.3.2.1.3 Traitement des données

Les données de terrain sont inversées en utilisant un modèle de résistivité 1D avec une inversion automatique. Le modèle de résistivité initial est réalisé avec un minimum de couches. Après l'inversion, si on remarque que la valeur du RMS calculée est élevée (supérieur à 3%), on ajoute une ou deux couches supplémentaires. On ajuste les valeurs de résistivités des terrains pour une nouvelle simulation afin de diminuer le RMS et de bien ajuster le modèle par rapport aux données. Le RMS obtenu après inversion de nos données avec cette méthode est faible. Il est compris entre 0,2 et 3 %. A la fin les résultats sont interprétés sous forme d'un modèle de résistivité en fonction de la profondeur, qui peut être relié à la géologie et aux aquifères associés. Si les sondages ont été effectués suivant un profil avec plusieurs sondages, les résultats peuvent être représentés sous forme de pseudo-section comme une tomographie électrique, ce qui a été fait pour les résultats d'inversion des données TDEM dans notre étude.

Nous avons utilisé avec le logiciel TEM-RES de AEMR Technologie pour inverser nos données suivant une méthode d'inversion 1D. L'inversion 1D a été déjà utilisée au Niger par Descloitres et al. en 2007 au cours de la réalisation d'une campagne de mesure géophysique faite dans les formations du CT au Sud-Ouest du pays. Elle est considérée comme la méthode d'inversion la mieux adaptée à l'échelle d'un seul sondage. Elle permet aussi de tester la sensibilité d'un terrain conducteur au-dessus de terrains résistants. Cette méthode a été appliquée sur tous les sondages pour mieux ajuster les données aux modèles et tester les sensibilités. Elle nous permettra de corréler plus facilement les formations géologiques issues des logs lithologiques des forages à une gamme de valeurs de résistivité.

3.3.3.2.2 Méthode électromagnétique à induction (EMI) ou Slingram

3.3.3.2.2.1 Principe général de prospection Slingram

La prospection par induction électromagnétique (EMI), aussi appelé méthode Slingram, utilise un principe de mesure qui permet d'accéder à la conductivité électrique du sous-sol. Les équipements Slingram sont composés de deux bobines installées aux deux extrémités du dispositif de mesure. Les fonctions des bobines correspondent à une bobine d'émission du

courant que nous pouvons noter Tx et une bobine de réception noté Rx. Le principe de la prospection consiste à faire passer un courant alternatif à travers la bobine émettrice Tx, qui induit un champ magnétique primaire de quelques kHz dans le sol (le champ magnétique est variable). Lorsque le champ primaire parcourt le sol et rencontre des matériaux conducteurs, le courant de Foucault induit rentre en déphasage et produit un champ magnétique secondaire. Le champ magnétique secondaire repart vers l'appareil et peut être mesuré par la bobine réceptrice Rx (Figure 22). La bobine mesure le déphasage du champ magnétique secondaire caractérisant les valeurs des conductivités électriques des terrains prospectés. Les appareils mesurent les valeurs en Siemens par mètre ou par centimètre (S/m ou S/cm), c'est-à-dire l'inverse de la résistivité. La profondeur d'investigation de l'appareil dépend de la distance d'écartement entre les bobines.

La méthode a pour avantage de permettre de réaliser des cartes de conductivité électrique apparente (Benech et Marmet, 1999; Tabbagh, 2007, 1986). Elle a aussi l'avantage de sonder une grande surface en peu de temps, c'est une méthode rapide qui permet d'avoir de l'information chaque seconde et donc à chaque largeur de pas. La carte de conductivité apparente nous a servi à positionner nos profils ERT et nos sondages RMP ainsi que les explorations à la tarière sur le bassin de Ouama (Figure 17).

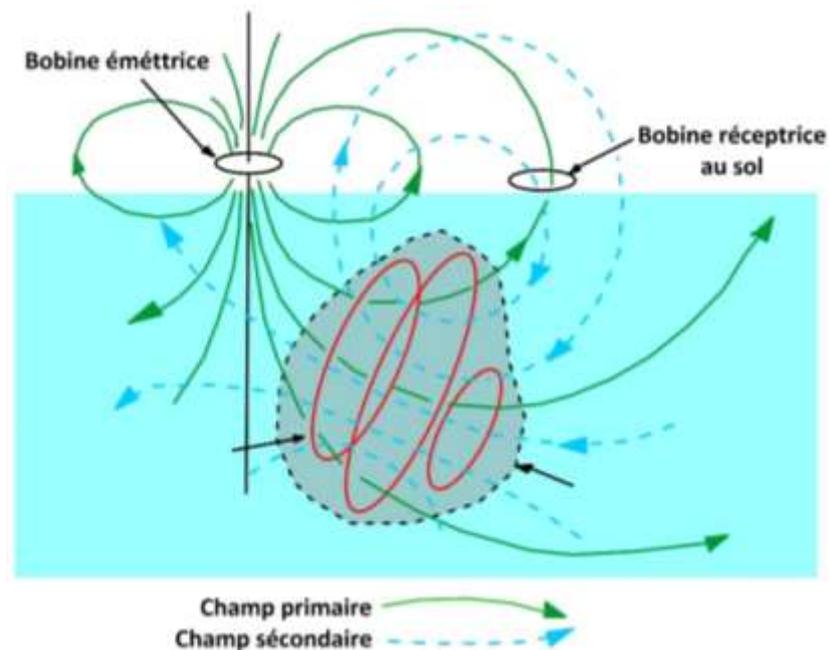


Figure 22: Principe du Slingram pour un corps conducteur (Florsch et Muhlach, 2018)

3.3.3.2.2 Mesures EMI réalisées avec l'appareil CMD-explorer et traitement des données

Au cours de la toute première mission de reconnaissance géophysique sur le site de Ouama, nous avons opté pour une stratégie de prospection qui tient compte des premiers sondages à la tarière faite par Laouel Cherif et Zakari (2017) dans le cadre de leur mémoire de master. Ces sondages à la tarière avaient pour objectif de déterminer l'épaisseur de sable alluvionnaire dans la rivière Ouama et ses affluents. La stratégie de mesure de Laouel Cherif et Zakari (2017) était de faire une succession de petits profils perpendiculaires aux écoulements dans les koris avec trois points sondés : un sur chacune des deux rives (gauche et droite) ainsi qu'un au centre du kori. Les profils sont espacés de 120 m les uns aux autres.

Possédant ces informations, à notre tour nous avons réalisé des profils électromagnétiques au centre des ravines avec un appareil récent : le CMD-Explorer (GF Instruments ; Planche photo 11).



*Planche photo 11: Equipement CMD-Explorer pour la cartographie électromagnétique sur le bassin de Ouama
(Coordonnées en UTM : 31P ; X : 310548 ; Y : 1541390 ; 13/11/2018)*

Le CMD - Explorer est un appareil qui comporte trois bobines réceptrices notées 1, 2, 3 et distantes respectivement de 1,48 m, 2,82 m et 4,49 m de la bobine émettrice. Il est calibré à l'air libre à chaque démarrage en évitant toute interférence magnétique créée par les objets métalliques surtout en forme d'anneau (barre de fer, voiture, etc.) et/ou susceptible de créer un champ magnétique (courant électrique, téléphones portables, etc.). Le CMD - Explorer est sensible aux champs magnétiques. Il est donc conseillé de se tenir loin des lignes électriques et de la circulation urbaine, d'éteindre son téléphone portable, etc. afin d'assurer la fiabilité des résultats. L'appareil possède deux modes de configuration : mode horizontal et mode vertical. Grâce à ses 3 bobines réceptrices l'appareil est capable de mesurer de façon continue la conductivité apparente du sous-sol à trois profondeurs effectives différentes pour chaque mode

(Tableau 3). L'utilisation des deux configurations permet donc d'avoir six mesures sur chaque point échantillonné. Cela rend le traitement des données plus complexe. Pour nos mesures de terrain, nous avons utilisé la configuration verticale de l'appareil. Ceci a permis d'avoir trois données sur chaque point de mesure. Les données des sondages ont été traitées avec les logiciels IX1D et Surfer. Ces deux logiciels nécessitent une licence payante pour leur utilisation.

Tableau 3: Les modes de mesure du CMD-Explorer et les profondeurs d'investigations

Bobines réceptrices		1	2	3
Profondeur d'investigation (m)	Mode vertical	2,2	4,2	6,7
	Mode horizontal	1,1	2,1	3,3

La Figure 17 donne la répartition spatiale des sites sondés avec le CMD et la variation de la conductivité apparente enregistrée sur les sites avec la bobine 3.

3.3.3.2.3 Méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP)

Pour calculer la perméabilité K, il existe plusieurs méthodes. Parmi ces méthodes nous avons les essais de pompages. C'est la méthode la plus usuelle, largement utilisée. Mais cette méthode nécessite un ouvrage (forage ou puits) adapté à l'installation d'une pompe. Dans la littérature, il a été démontré que l'estimation de la perméabilité à partir de mesures géophysiques électrique et électromagnétique se base sur des relations empiriques qui ne fonctionnent pas toujours très bien. Pour cela nous avons opté pour une approche plus récente : la méthode de Résonance Magnétique de Proton (RMP). Les études antérieures (Boucher et al., 2009b; Vouillamoz et al., 2008; Vouillamoz et al., 2014) ont montré qu'une fois calibrée cette méthode permet d'estimer les transmissivités (intégrale de la perméabilité sur l'épaisseur de l'aquifère) avec une précision proche des essais de pompage.

3.3.3.2.3.1 Principe de la méthode RMP

La Résonance Magnétique de Proton (RMP) est une méthode qui permet de mesurer la teneur en eau et certains paramètres hydrodynamiques comme la perméabilité K dans les aquifères. Sa particularité par rapport aux autres méthodes géophysiques dites traditionnelles est qu'elle mesure directement le signal issu du noyau atomique de l'atome d'hydrogène de la molécule d'eau. Pour cela, elle a été qualifiée de méthode directe (Legchenko 2004). Le principe général, la mise en œuvre des mesures sur le terrain, l'appareil de mesure, les méthodes et logiciels de traitements des données ont été détaillés dans plusieurs travaux de recherche (Boucher, 2007;

Boucher et al., 2009a, 2009b, 2012; Legchenko et al., 2008, 2016; Legchenko et Valla, 2002; Kemgang et al., 2019; Vouillamoz, 2003; Vouillamoz et al., 2002, 2008).

Le principe de sondage RMP consiste à créer, par injection d'un courant électrique, un champ électromagnétique d'excitation à une fréquence dite fréquence de Larmor pour faire varier le moment magnétique des protons d'hydrogène $^1H^+$ contenu dans la molécule d'eau. L'injection du courant électrique se fait à travers une boucle appelée boucle d'injection ou Tx. L'installation de la boucle consiste à étaler des câbles électriques au sol selon une configuration géométrique de type cercle ou carré. Les câbles sont reliés entre eux par des vis métalliques. La taille de la boucle dépend des objectifs fixés quant à la profondeur d'investigation. Elle est choisie le plus souvent soit par une modélisation réalisée préalablement soit par l'expérience de terrain. La fréquence de Larmor est déduite du champ magnétique terrestre B_0 dont l'amplitude varie dans le temps et dans l'espace ; ce champ géomagnétique est mesuré grâce à un magnétomètre. La fréquence de Larmor peut être calculée selon la formule de l'équation 2.

$$\vartheta[Hz] = 0,0426 . B_0[nT] \quad (2)$$

La fréquence varie de 1 000 Hz à plus de 2 500 Hz selon la position par rapport à l'équateur (Boucher, 2007; Vouillamoz, 2003). Après l'arrêt du champ d'excitation, les moments magnétiques des protons $^1H^+$ retournent à l'équilibre. Ce retour à l'équilibre crée un signal de relaxation qui est caractérisée par les temps de décroissance notés T_1^* et T_2^* . Le signal est enregistré à l'aide de la même boucle qui a été utilisée pour l'émission cette fois-ci sous forme d'antenne de réception Rx. L'opération est répétée plusieurs fois pour améliorer le rapport signal sur bruit électromagnétique ambiant. Un sondage est composé de plusieurs pulses (au moins 10 pour une bonne qualité de sondage). Le nombre de pulse est programmé à l'avance.

Les phénomènes d'oscillation du champ, le comportement du noyau $^1H^+$ de l'eau, les équations de la physique quantique qui permettent de bien expliquer les principes de la méthode de sondage par Résonance Magnétique de Proton sont détaillées dans une palette de travaux antérieurs. Pour plus de précision, se référer aux travaux qui ont été cités en début de ce paragraphe.

3.3.3.2.3.2 Mesures RMP sur le terrain

L'équipement utilisé pour les sondages RMP est le Numis commercialisé en 1996 par Iris Instrument. C'est un appareil conçu grâce à une collaboration entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), la société française Iris Instrument et l'Institut de Cinétique Chimique et de Combustible de Novossibirsk (Vouillamoz, 2003).

Le Numis est composé d'un générateur de courant électrique alternatif et d'un système de réception du signal. Le courant alternatif est créé grâce à deux convertisseurs DC/DC alimentés par des batteries de 24V et qui alimentent à leur tour l'unité centrale. L'unité centrale est alimentée par une intensité de courant qui dépend des instructions de l'opérateur via le microprocesseur. Le Numis comporte aussi une antenne (ou boucle) d'émission et de réception du signal. L'antenne est reliée à l'unité centrale et est contrôlée par le commutateur lui-même piloté par le microprocesseur. Le microprocesseur est relié à un ordinateur permettant l'acquisition des données. Les données sont directement stockées au fur et à mesure de l'acquisition dans le disque dur de l'ordinateur portable de terrain et sont ensuite récupérées pour être traitées. Le microprocesseur contrôle également la génération de la fréquence de Larmor ou fréquence de résonance. L'ensemble de ces composantes permet d'établir un schéma du fonctionnement du Numis (Figure 23).

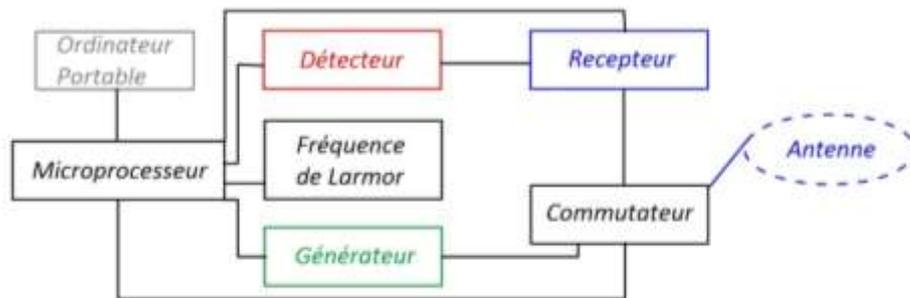


Figure 23: Schéma du fonctionnement du Numis (Boucher, 2007 ; modifié)

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les deux types de Numis : le Numis^{plus} (Planche photo 12a) et Numis^{Auto} (Planche photo 12b).

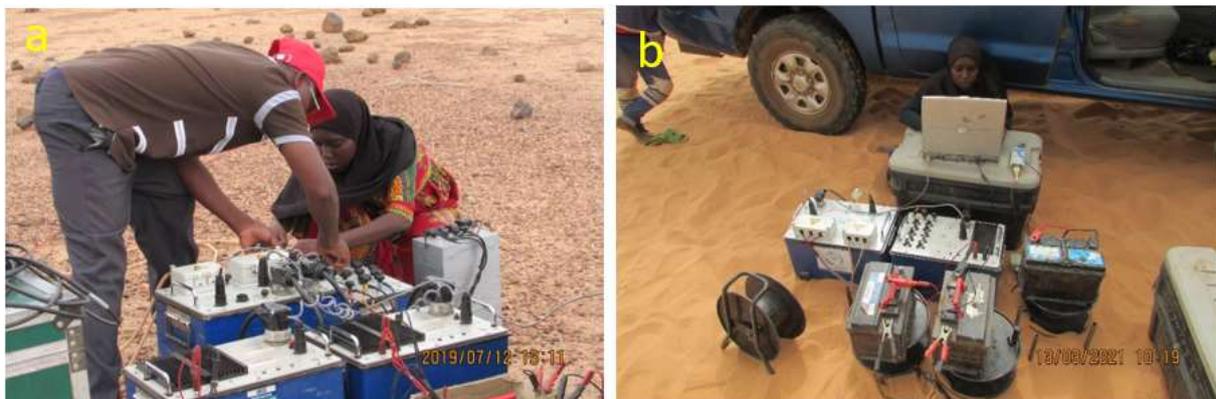


Planche photo 12: Deux appareils de sondage RMP utilisés sur le terrain.
 a- Equipement Numis^{plus} pour le sondage RMP sur le plateau de Gonga Zougou (Coordonnées en UTM : 31P ; X : 433424 ; Y : 1460694) ; b- Equipement Numis^{Auto} pour le sondage RMP sur le site de Gorou Tchirey (Coordonnées en UTM : 31 P ; X : 407705 ; Y : 1484525)

Le Numis^{Auto} est moins encombrant et plus facile à transporter que le Numis^{Plus}. Les blocs de capacité du Numis^{Plus} sont à l'extérieur dans deux boîtiers différents contrairement au Numis^{Auto} (capacités se trouvant dans un seul boîtier). C'est ce qui le rend plus difficile à transporter. La profondeur d'investigation du Numis^{Plus} est plus grande que celle du Numis^{Auto}.

Dans la réalisation des sondages RMP, sur le terrain nous avons utilisé les paramètres d'acquisition suivants :

- Les boucles de mesure ont une configuration en forme de « 8 » composée de deux carrés (voir la forme de 8 sur les Figure 16 et Figure 18 par exemple). La géométrie en « 8 » est conservée pour tous les sondages pour une comparaison entre les sites. La taille des boucles est de $50 \times 50 \text{ m}^2$ sur tous les sites à l'exception de deux sondages faits sur le site de Gongga Zougou en avril 2019. Sur ces deux sondages nous avons adopté des boucles de $75 \times 75 \text{ m}^2$ de côté. La configuration en « 8 » et la taille des boucles ont été préalablement choisies suite à la modélisation réalisée au bureau (annexe 4).
- Les sondages sont réalisés dans une fenêtre de temps comprise entre 07h00 à 16h30. Très souvent nos sondages ont été arrêtés avant même 16h30 parce que le bruit électromagnétique ambiant n'était pas idéal pour les mesures au-delà de 15h00. Comme souvent en milieu tropical (ex. Kemgang et al., 2019), le bruit électromagnétique ambiant naturel augmente le soir jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 1500 nV sur les boucles de mesures. L'heure à laquelle le bruit électromagnétique augmente, varie d'un jour à l'autre mais est en moyenne vers 15h00. Parfois le bruit est tel qu'on n'arrive même pas à faire des mesures dès 7h00 notamment les jours orageux.
- La variation de la fréquence de Larmor est prise en compte dans les paramètres de mesure. Nous réalisons un réglage de la fréquence en faisant un test sur un paramètre d'excitation où nous nous attendons à avoir le maximum de signal (en fonction de la profondeur de la nappe). Puis nous choisissons une valeur de fréquence en fonction de l'heure, sachant que la fréquence augmente jusqu'à midi solaire. Le décalage entre la fréquence injectée et la fréquence mesurée est pris en compte pendant le traitement des données.

Au total, 12 emplacements ont été prospectés par RMP : 5 sur le site de Gongga Zougou, 4 sur le bassin versant de Ouama et 3 sur le kori de Gourou Tchirey. Des tests ont été entrepris sur le site du jardin botanique, mais celui-ci étant en milieu urbain, les conditions de bruit électromagnétique ne permettent pas de réaliser des mesures utilisables. Sur certains emplacements les sondages RMP ont été répétés à plusieurs saisons.

3.3.3.2.3.3 Traitement des données RMP

- **Inversion des données de sondage**

L'inversion des données consiste à estimer à partir des mesures de terrain des signaux RMP un modèle de distribution de la teneur en eau $w(z)$ et du temps de décroissance $T_2^*(z)$. En effet, la constante de temps de décroissance et la teneur en eau sont estimées toutes deux en fonction de la profondeur à partir des courbes des signaux mesurés $E(t, q)$ par les équations en forme simplifiée suivantes :

$$E(t, q) \rightarrow E_0(q) \times T_2^*(z) \quad (3)$$

$$E_0(q) \rightarrow w(t, z) \quad (4)$$

Pour inverser les données de sondage RMP dans cette thèse, nous avons utilisé le logiciel appelé *Samovar*. L'inversion réalisée avec le logiciel *Samovar* utilise la méthode de Tikhonov. La méthode de Tikhonov est adaptée pour inverser des données bruitées (Boucher, 2007; Legchenko et al., 2016; Vouillamoz, 2003).

Le logiciel *Samovar* permet d'inverser les données soit avec plusieurs couches (modèle multicouche), soit avec une seule couche (modèle monocouche). La procédure standard consiste à faire une première inversion en subdivisant l'espace en un grand nombre de couches (maximum 40 couches ; Boucher, 2007) de plus en plus épaisses en profondeur dans le but d'obtenir un modèle lissé de la teneur en eau et du temps de relaxation en fonction de la profondeur. L'utilisation d'un modèle multicouche lissé permet d'obtenir la distribution verticale des différentes propriétés hydrodynamiques sans à priori. La seconde étape de la procédure d'inversion, consiste à chercher un modèle monocouche qui ajuste les données. Le modèle monocouche représente l'aquifère saturée en une seule strate qui intègre toutes les propriétés de la nappe. Il ne rend pas compte de l'hétérogénéité du milieu mais permet d'estimer les valeurs moyennes des paramètres qui caractérisent le stock d'eau et la capacité de l'eau à circuler dans le milieu.

Sur la Figure 24, nous avons un exemple de résultat d'inversion monocouche de sondage RMP réalisé sur le site de Gongga Zougou en mai 2019. Cette figure montre les résultats tels qu'ils sont affichés par le logiciel Somovar. Nous avons en première position un encadré qui décrit toutes les informations techniques sur le sondage et les paramètres d'inversion ; en dessous sont affichés les différentes fenêtres contenant les mesures et les résultats issus d'inversion. Nous avons :

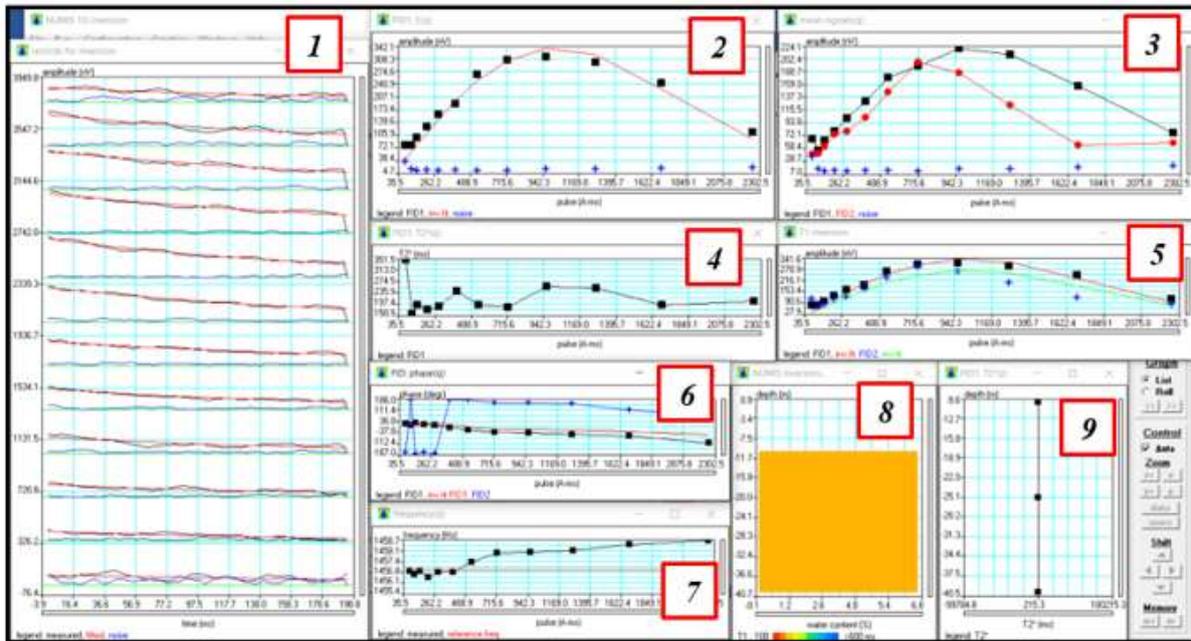


Figure 24: Exemple de résultat d'inversion des données de sondage RMP sur le site de Gonga Zougou

- 1) les signaux RMP $E(t,q)$ enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation en fonction du temps ;
- 2) l'amplitude initiale du signal RMP $E_o(q)$ et le bruit électromagnétique en fonction du paramètre d'excitation ;
- 3) les amplitudes moyennes $FID1$ et $FID2$ du signal RMP et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- 4) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;

- 5) l'amplitude initiale du signal RMP *FID1* et *FID2* en fonction du paramètre d'excitation pour l'estimation du temps de relaxation T_1^* ;
- 6) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 7) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 8) la distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$ et du temps de relaxation $T_1^*(z)$;
- 9) la distribution verticale du temps de relaxation $T_2^*(z)$.

Dans cette étude, nous présentons l'ensemble des résultats des sondages RMP après inversion dans l'annexe 4. Pour cette inversion, les calculs ont été faits avec la version 11 x 6 du logiciel Samovar (Legchenko et al., 2002) en mode 1D et prennent en compte le décalage en fréquence et le modèle de résistivité déduit des informations des prospections électromagnétiques (TDEM). Dans les chapitres suivants, seules les teneurs en eau seront présentées sur coupes hydrogéophysiques. Les autres informations seront utilisées pour calculer la perméabilité K et la transmissivité T .

- **Interprétation des données de sondage RMP en grandeur hydrogéologique**

Les paramètres calculés par les inversions des données de signaux RMP (w : teneur en eau et $T_{1,2}^*$: temps de relaxation) ne sont pas des valeurs hydrogéologiques. Il est nécessaire de convertir la teneur en eau et le temps de relaxation en grandeur hydrogéologique pour pouvoir faire une description hydrogéologique (géométrie et caractéristiques hydrodynamiques des aquifères). Des travaux ont démontré l'existence d'une relation entre la teneur en eau RMP w et la porosité de drainage des aquifères (ex. : Boucher et al., 2009b ; Vouillamoz et al., 2014). Les constantes de temps de relaxation T_1^* et T_2^* sont fonction de la taille des pores qui contiennent l'eau (Boucher, 2007; Lachassagne et al., 2005; Legchenko et al., 2002; Vouillamoz, 2003).

Les travaux de Legchenko et al., (2002) ont démontré que la conductivité hydraulique ou perméabilité K peut être calculée avec une formule empirique, en s'inspirant des exemples dans le domaine pétrolier de diagraphie RMN (ex. Kenyon W.E., 1997; in Vouillamoz, 2003). La formule pour estimer la conductivité hydraulique par la méthode de la RMP la mieux adaptée est la suivante (Boucher, 2007, Legchenko, 2004, Vouillamoz, 2003) :

$$K = C_p \cdot w \cdot T_1^2 \quad (5)$$

Avec : C_p : coefficient empirique ;

w : teneur en eau RMP ;

T_1 : temps de relaxation du signal RMP.

Au Niger, le coefficient C_p a été calibré dans les formations sédimentaires dans les travaux de Boucher et al., (2009b). La valeur utilisée dans notre étude est celle obtenue par cette calibration. Elle est égale à $1,4 \cdot 10^{-8}$. Une fois que cette valeur a été calibrée, les transmissivités obtenues par RMP ont des valeurs et des incertitudes proches de celles obtenues par essais de pompage (Figure 25).

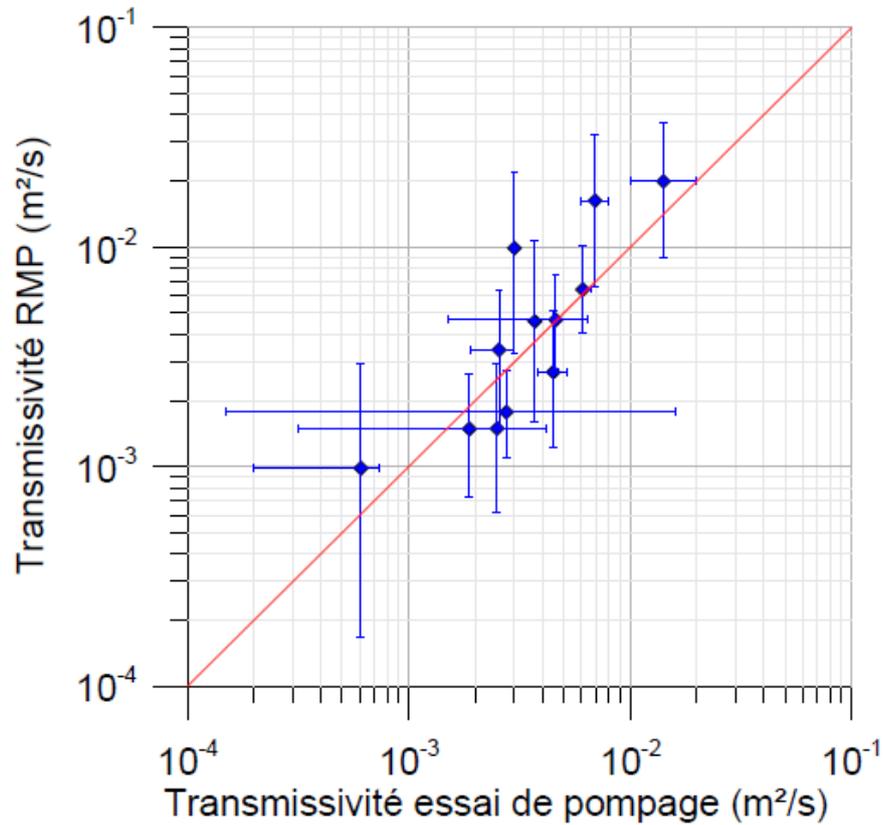


Figure 25: Comparaison des transmissivités estimées par RMP et par essai de pompage dans les aquifères du Continental Terminal et des alluvions quaternaires du sud-ouest du Niger (Boucher, 2007)

3.3.4 Récapitulatif des mesures géophysiques effectuées

Sur les différents sites d'étude nous avons réalisé des travaux de terrains en géophysique. Ces travaux concernent cinq méthodes différentes. Au total, nous avons réalisé 86 sondages TDEM, 7 tomographies ERT, 12 profils électromagnétiques FEM, 6 sondages électriques verticaux et 19 sondages RMP. Ainsi 130 sondages géophysiques repartis sur les sites ont été réalisés dans le sud-ouest du Niger (Tableau 4).

Tableau 4: Récapitulatifs des sondages géophysiques réalisés sur les différents sites

Sites	Méthodes géophysiques	Sondages	Abscisses (m)	Ordonnées (m)	
J. Botanique	TDEM	S1	401597	1492677	
		S2	401869	1492715	
		S3	402014	1492777	
		S4	402123	1492773	
		S5	402299	1492770	
		S6	402350	1492781	
		S7	402400	1492837	
		S8	402407	1492905	
		S9	402450	1493013	
		S10	402473	1493079	
		S11	402505	1493103	
		S12	402515	1493136	
		S13	402541	1493168	
		S14	402556	1493192	
		S15	402621	1493193	
		S16	403271	1493113	
		S17	403301	1493181	
		S18	403237	1493230	
		S19	403316	1493722	
				S20	403295
		ERT	ERT	402476 402426	1493051 1492922
Gonga Zougou : Gonga Zougou <i>sensu stricto</i> (GZ) ; Werkéré (W) ; Sekoukou (S)	TDEM	W1	431466	1461510	
		W2	431115	1461625	
		W3	430837	1461790	
		W4	430637	1462392	
		W5	429968	1462664	
		W6	428985	1462838	
		W7	428413	1463072	
		W8	426919	1463151	
		W9	426484	1463296	
		W10	425673	1463579	
		W11	424732	1463891	

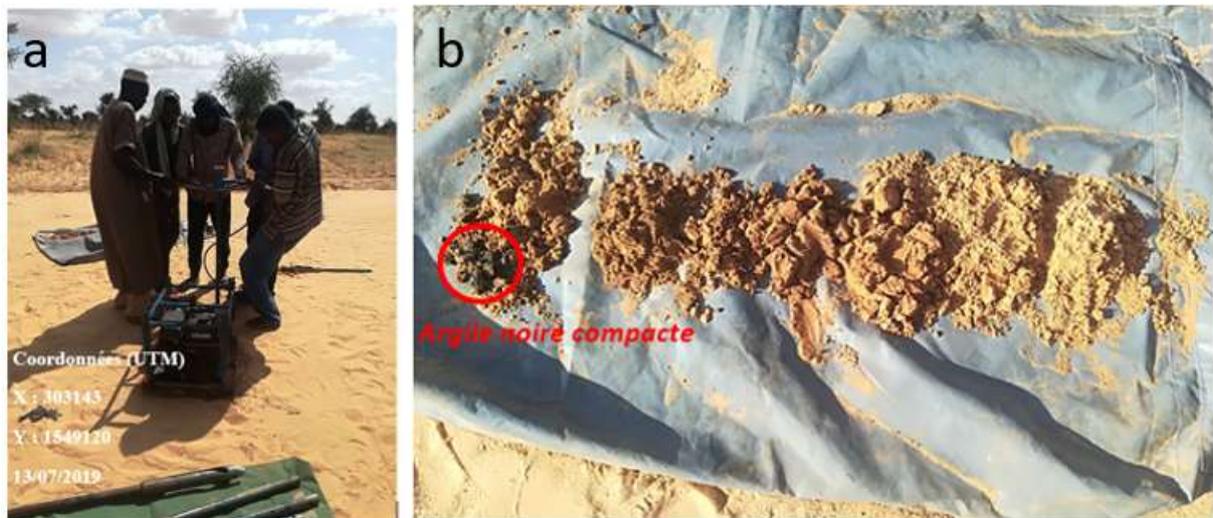
		W12	423732	1464217	
		W13	422886	1464409	
		W14	422391	1464361	
		W15	421283	1464187	
		W16	421139	1464411	
		GZ17	432001	1461526	
		GZ18	432061	1461501	
		GZ19	432136	1461492	
		GZ20	432186	1461484	
		GZ21	432216	1461474	
		GZ22	432243	1461465	
		GZ23	432280	1461452	
		GZ24	432321	1461495	
		S1	431422	1467389	
		S2	431347	1467499	
		S3	431397	1467415	
		S4	431042	1466980	
		S5	431162	1467052	
		S6	431279	1467068	
		S7	431387	1467170	
		ERT	GZ	432021	1461515
				432300	1461451
		RMP	S1	431958	1461532
			S2	403319	1493058
GZ1	431958		1461532		
GZ2	432173		1461508		
W3	430854		1461719		
Ouama	ERT	P1	303134	1548999	
			303158	1549230	
		P2	308035	1543323	
			308137	1543910	
		P3	308389	1547478	
			308622	1547639	
	P4	309789	1542090		
		309959	1542207		
	FEM	F1	307352	1543179	
		F4396	310585	1541397	
Tarière	T1	303143	1549120		
	T2	308088	1543416		
	T4	308505	1547559		
RMP	RMP	303134	1548999		
		303143	1549120		
		303158	1549230		
	RMP	308035	1543323		
		308088	1543416		
		308137	1543910		

		RMP	308389	1547478
			308505	1547559
			308622	1547639
		RMP	309789	1542090
			309959	1542207
	VES	E1	309634	1542368
		E2	307687	1543379
		E3	309378	1543380
		E4	309120	1542741
		E5	307720	1543385
		E6	307707	1543392
	Gorou Tchirey	TDEM	S17	405859
S16			405882	1483425
S12			405956	1483490
S1			405932	1483582
S13			406172	1483740
S2			406165	1483792
S3			406542	1483965
S15			406576	1484044
S14			406517	1484059
S4			406820	1484200
S7			407129	1484217
S11			407278	1484241
S10			407248	1484327
S8			407459	1484233
S9			407638	1484369
S5			407720	1484408
S6			407746	1484450
RMP		S1	407720	1484408
		S2	406472	1484038
		S3	405908	1483488

3.4 Sondages à la tarière

Dans le cadre de nos travaux, les sondages à la tarière ont été utilisés pour déterminer les différentes formations géologiques dans le bassin de Ouama. Ces sondages avaient pour objectif de valider nos résultats géophysiques d'imagerie de résistivité électrique et des propriétés hydrodynamiques des aquifères par la résonance magnétique de proton. Initialement nous avons prévu de faire quatre sondages notés P₁, P₂, P₃ et P₄ à la même position que les panneaux ERT, au centre des koris et au milieu des profils ERT. Une fois sur le terrain, nous n'avons pu réaliser que trois sondages à la tarière, le profil ERT n°3 étant dans une zone marécageuse.

Nos sondages (P₁, P₂ et P₄) ont été réalisés avec une tarière motorisée nécessitant une aide physique pour lui permettre d'enfoncer la barre en profondeur au-delà des tous premiers mètres (Planche photo 13a). La tarière est composée d'un moteur à huile nécessitant un nettoyage de temps à autre. La réalisation des sondages sur certains des sites ont demandé énormément de travaux physiques en fonction de la nature des couches traversées. Ainsi, sur P₁ nous nous sommes arrêtés à 3,5 m de profondeur, en rencontrant une couche argileuse noire, trop difficile à traverser. Cette couche argileuse demeure très compacte comme le montre la Planche photo 13b. En plus de la tarière motorisée, nous avons tenté d'utiliser la tarière manuelle pour aller plus loin mais la nature de la couche argileuse ne le permet pas. Sur le site P₂ et P₃ nous n'avons pas pu faire les sondages en profondeur non plus, cette fois-ci en raison de la nappe qui n'est pas profonde (la nappe étant superficielle, la population creuse des petits trous pour son approvisionnement en eau). Au niveau de P₂ la nappe se trouve à 1,5 m de profondeur et au niveau de P₄, elle est située à 3,5 m de profondeur. La tarière ne permet pas de creuser dans un terrain non-consolidé saturé en eau. De tous les sondages faits, le maximum de profondeur atteint est donc 3,5 m.



*Planche photo 13: Exemple de sondage à la tarière.
a-Réalisation du Sondage P1 dans le bassin de Ouama ; b- Echantillons des différentes formations traversées
par la tarière sur le site P1*

Chapitre 4 : Caractérisation des aquifères

Chapitre 4 : Caractérisation des aquifères

4.1 Identification et fonctionnement général des aquifères

4.1.1 Analyse géologique

Avant de traiter nos données piézométriques, nous avons mené une étude géologique basée sur l'analyse des logs lithologiques de forages existants autour de nos deux sites situés dans la vallée du fleuve. Cette analyse lithologique s'est faite à une échelle plus large que celle de nos sites de mesure. Elle s'est appuyée sur les logs lithologiques disponibles dans la littérature grise que nous avons complétés par l'observation des affleurements géologiques sur les sites. Cette analyse permet d'avoir une première image des différents aquifères de la zone d'étude sous forme de deux coupes traversant le fleuve, une à Niamey (coupe amont) et l'autre une cinquantaine de kilomètre à l'aval. Gardons à l'esprit que cette première analyse géologique sera complétée par la suite avec une étude hydrogéophysique (Partie 4.2) qui permettra d'affiner les coupes grâce à une meilleure spatialisation de l'information.

4.1.1.1 Coupe géologique à l'amont de la zone d'étude

En amont de la zone d'étude, la coupe géologique a été réalisée avec cinq logs lithologiques de forages implantés entre 1984 et 1985 par le BRGM dans le cadre d'un programme d'urgence pour l'alimentation en eau potable de Niamey suite à l'assèchement du fleuve (Bernert et al., 1985 ; Dehays et al, 1986). Les forages utilisés sont positionnés sur un transect est-ouest croisant le fleuve (Figure 26). Avec les données lithologiques disponibles, nous ne pouvions que faire un transect oblique par rapport au fleuve, raison pour laquelle ce transect n'est pas perpendiculaire à la vallée alluviale. Parmi les cinq forages de ce transect, trois forages sont sur la rive droite et deux sont en rive gauche.

La coupe géologique issue de la corrélation des cinq logs fait apparaître une succession de trois niveaux géologiques (Figure 27). Il s'agit de :

- Un recouvrement sédimentaire constitué par la formation du Continental Terminal (CT3) en rive gauche et par les alluvions quaternaires anciennes en rive droite. L'épaisseur des alluvions est de quelques mètres (2 à 10 m) ; celle du CT augmente de l'ouest vers l'est pour atteindre 51 m sur le forage 24122. Ces formations sont composées de sable, sable argileux, argiles, gravillons et cuirasse latéritique contenant souvent les oolites. La base du CT est argileuse.

- La formation issue de l'altération souvent argileuse du socle parfois affleurant dans le lit du fleuve. Son épaisseur varie de 15 à 44 m.
- Le socle proprement dit (sain ou fissuré) qui est constitué des roches vertes sur la quasi-totalité du profil de l'ouest vers l'est. Il est à noter qu'on observe dans le lit mineur du fleuve sur l'île par laquelle passe le transect, quelques affleurements de granite sain. La description de certains forages proches de notre profil (distants de moins de 600 m) mentionne également des arènes granitiques et des granites à biotite. Ceci permet de dire que dans la zone d'étude, le socle sain est composé de deux types de roche : les roches vertes et les granitoïdes.

Sur la coupe géologique, la position des crépines permet de remarquer que les forages captent la nappe du socle fissuré ou fracturé. Les études géochimiques et piézométriques menées dans le cadre du projet AGES (Abdouhali et al., 2019) ont montré que la nappe du socle est en continuité hydraulique avec les formations sédimentaires (alluvions et CT). Cela suggère que les altérites argileuses sont semi-perméables. Les niveaux piézométriques mesurés au moment de la mise en place des forages sont représentés sur la Figure 27 et sont comparés au niveau du fleuve en mai 1984 (date du premier forage). Le niveau du fleuve en juillet 1985 (date des forages 24122, 24130 et 24138) était proche de mai 1984, mais les pluies ayant déjà commencé les niveaux piézométriques sont difficilement comparables avec ceux de mai 1984. De plus, les forages n'ont pas été nivelés excepté le forage 24138 (Vassalo et al., 2015). Ainsi les gradients hydrauliques sont à prendre avec précaution et seront affinés par nos propres travaux. Ces gradients indiquent de manière générale un flux de la nappe vers le fleuve.

Les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et débit spécifique) ont été estimés au niveau des forages grâce à des essais de pompage réalisés en 1984 et 1985 par le BRGM quelques jours après la foration. Ces pompages ont été effectués sur une durée de 3 heures et la remontée a été suivie pendant 2 à 4 heures selon les forages. Les valeurs de transmissivité T et de débit spécifique Q_s obtenues sont résumées dans le Tableau 5. Les transmissivités sont en général de l'ordre de 10^{-4} m²/s sauf sur le forage 21670 où la transmissivité est plus élevée (10^{-2} m²/s). La description de ce forage laisse penser qu'il se situe dans une zone plus fracturée. L'ordre de grandeur des valeurs de transmissivité corrobore les valeurs issues des travaux de Boubakar Hassane (2010).



Figure 26: Localisation de la coupe géologique en amont de la zone d'étude

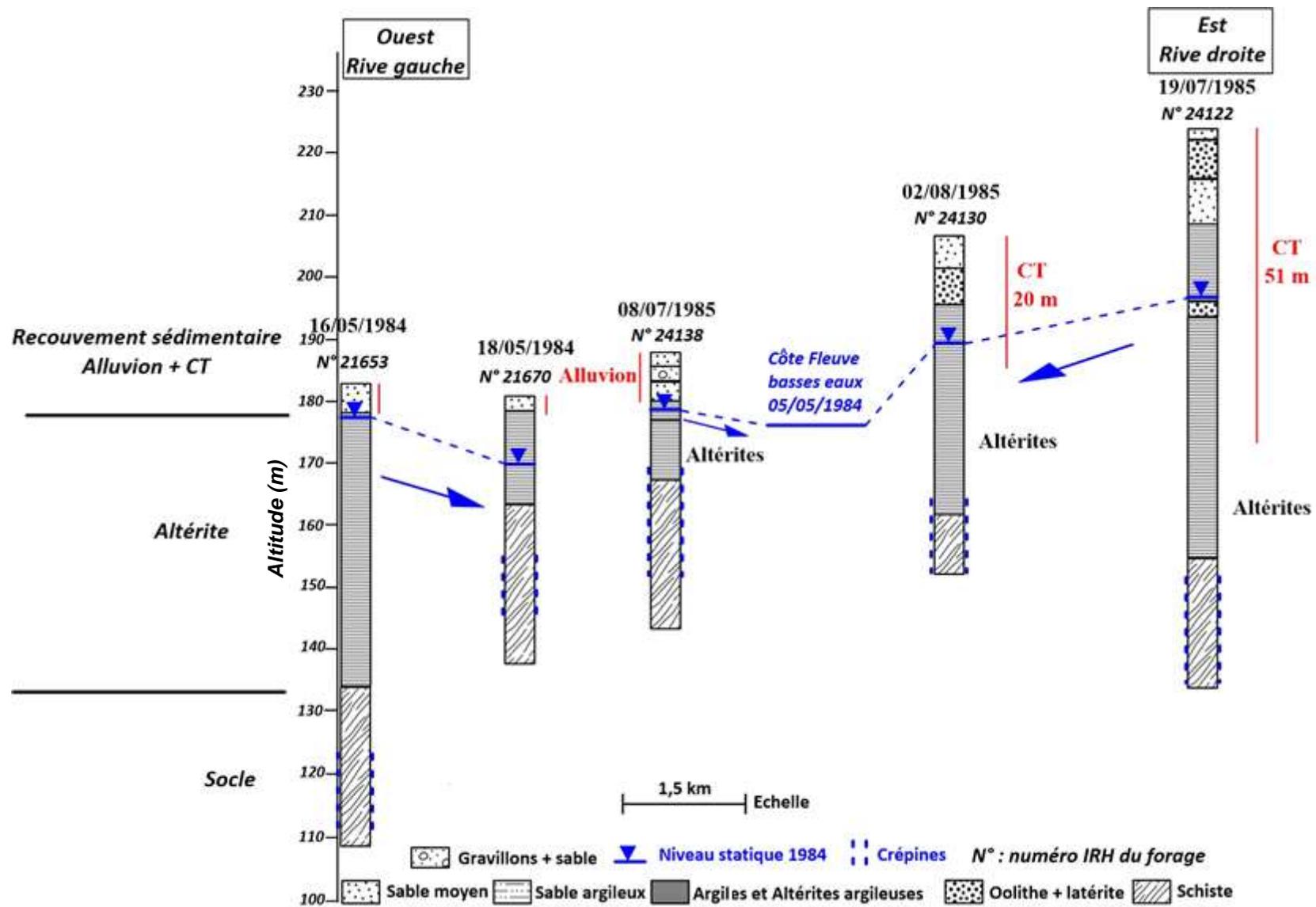


Figure 27: Coupe géologique en amont de la zone d'étude à partir des forages décrits dans Bernet et al. (1985) et Dehays et al. (1986)

Tableau 5: Caractéristiques des essais de pompage du BRGM en 1984 et 1985 et paramètres hydrodynamiques issus de leur interprétation

ID	Localisation	Transmissivité (m ² /s)	Q _s (m ³ /h)	Débit pompé (m ³ /h)	Durée de l'essai
21 653	Rive droite	2,1. 10 ⁻⁴	6,71	4,80	6 h
21 670	Rive droite	1,1. 10 ⁻²	43,00	8,64	5 h
24 138	Rive droite	2,5. 10 ⁻⁴	3,40	4,32	5 h
24 130	Rive gauche	7,3. 10 ⁻⁵	3,20	3,20	5 h
24 122	Rive gauche	1,1. 10 ⁻⁴	1,80	3,60	7 h

4.1.1.2 Coupe géologique à l'aval de la zone d'étude

Sur la partie aval de la zone d'étude, la coupe géologique a été faite à une échelle nettement plus large que la zone investiguée dans l'étude hydrogéophysique, la dépassant d'une quarantaine de kilomètres à l'Est. Les logs lithologiques de quatre puits et cinq forages sont utilisés pour réaliser la coupe. Les descriptions des quatre puits situés à l'Ouest (Damari, Sadoré, Boundou Gueledio et Boulou) sont tirées des travaux de Plote (1961). Les cinq forages ont été réalisés par l'entreprise SEFI entre 1989 et 2010 dans le cadre de projets d'alimentation en eau potable : les forages de Garba Goungou (28604) et Gongga Zougou (28607) ont été réalisés en juin 1989 dans le cadre du projet « ALG » financé par la BID (Banque Islamique de Développement) ; les forages de Sakey Koira Zeno (674580), Tioubi (674599), Tollo (674586) ont été réalisés dans le cadre du projet PAEPA financé par le BAD (Banque Africaine de Développement) respectivement en mars 2009, mars 2010 et novembre 2008. Les puits et forages utilisés permettent de construire une coupe traversant le fleuve de manière relativement perpendiculaire (Figure 28).

Sur la coupe géologique en aval de la zone d'étude, nous distinguons trois formations géologiques (Figure 29) :

- Les dépôts dunaires du Quaternaire constitués de sable parfois légèrement argileux. Ces dépôts ne sont pas présents sur tous les logs et leur épaisseur ne dépassent pas 7 m.
- La formation du Continental Terminal (CT) composée d'une alternance de banc de sable fin beige, d'argile, d'argile sableuse, de latérite et d'oolithes. La puissance totale de cette formation dans la zone d'étude aval est de l'ordre de 85 m, mais elle est très érodée dans la vallée du fleuve.

- Le socle qui est seulement visible sur les forages de Garba Goungou et Gongga Zougou dans la vallée du fleuve où il est situé à environ 37 m de profondeur. Sur ces forages, le socle se caractérise par des granites et des schistes sains non aquifère. A Garba Goungou, après un premier forage non productif dans les granites, un second forage (représenté sur la coupe) a capté l'aquifère du CT sus-jacent. Des affleurements de granite sont également visibles dans le lit mineur du fleuve à quelques centaines de mètres de la position des forages en aval.

Tout comme sur la coupe amont, les niveaux piézométriques de la Figure 29 ne sont pas concomitants et sont mesurés sur des forages non nivelés. Ils ne sont donc pas suffisamment fiables pour une estimation précise des gradients hydrauliques. Toutefois, ils indiquent clairement que ces gradients sont en direction du fleuve, que ce soit en rive droite ou en rive gauche.

Les transmissivités dans la vallée du fleuve (forage de Garba Goungou et le puits de Gongga Zougou) ont été estimées avec des essais de pompage réalisés par l'entreprise en charge des forages. Lors de ces essais, les pompages ont duré 4 heures, la remontée a été suivie pendant 2 heures. Les caractéristiques de ces pompages sont résumées dans le Tableau 6. Les deux ouvrages présentent les mêmes ordres de grandeur de transmissivité. Ces transmissivités correspondent à des valeurs faibles pour l'aquifère du CT3, vraisemblablement liées à la faible épaisseur de l'aquifère dans la vallée du fleuve.

Tableau 6: Transmissivités issues des résultats des essais de pompage de 1989 dans les ouvrages proches de Gongga Zougou

ID	Localisation	Transmissivité (m ² /s)	Débit (m ³ /h)	Durée de l'essai
Garba Goungou	Rive droite	5,5. 10 ⁻⁵	1,0	6
Gongga Zougou	Rive gauche	2,7. 10 ⁻⁵	1,0	6

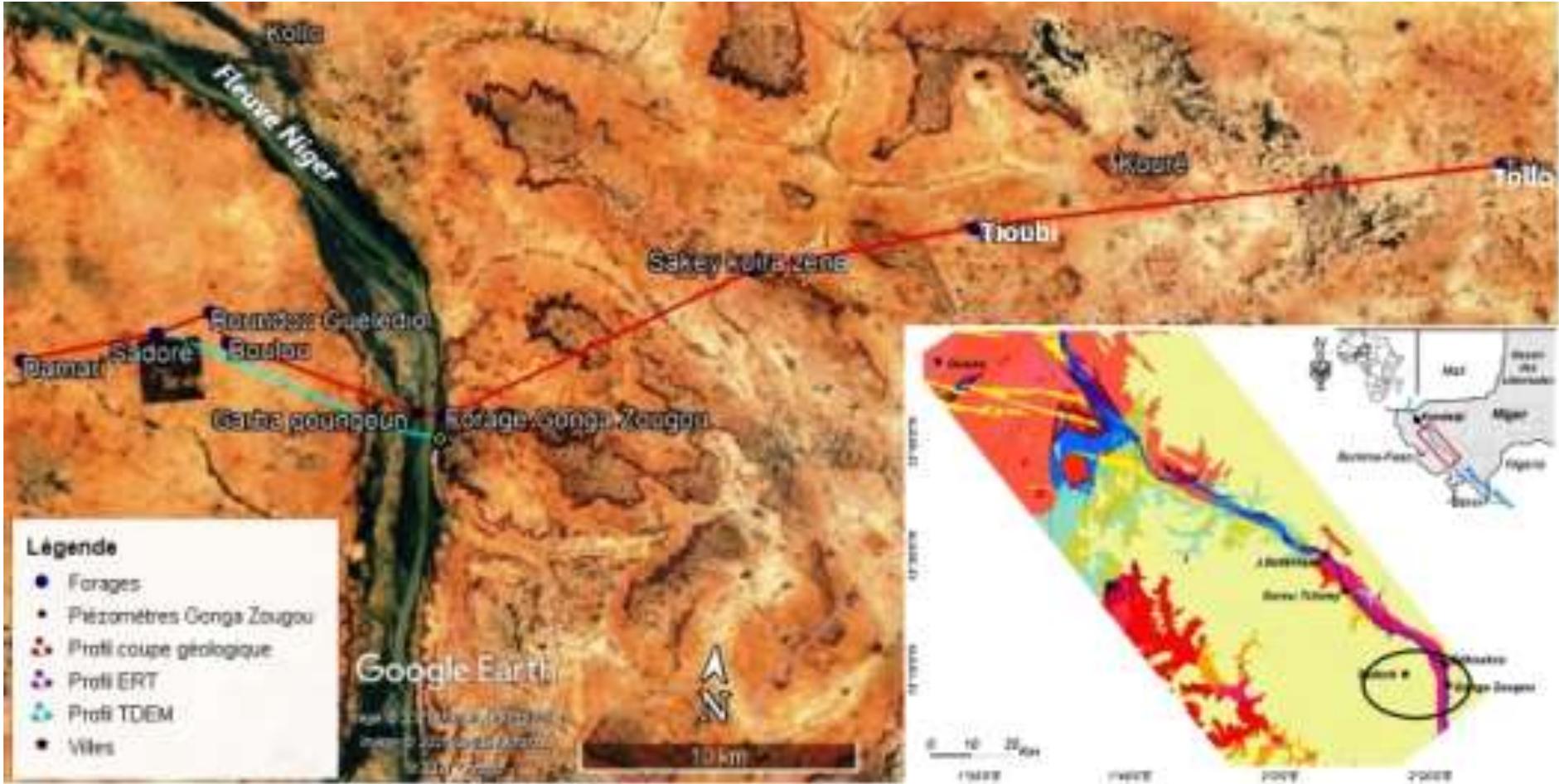


Figure 28: Localisation de la coupe géologique en aval de la zone d'étude

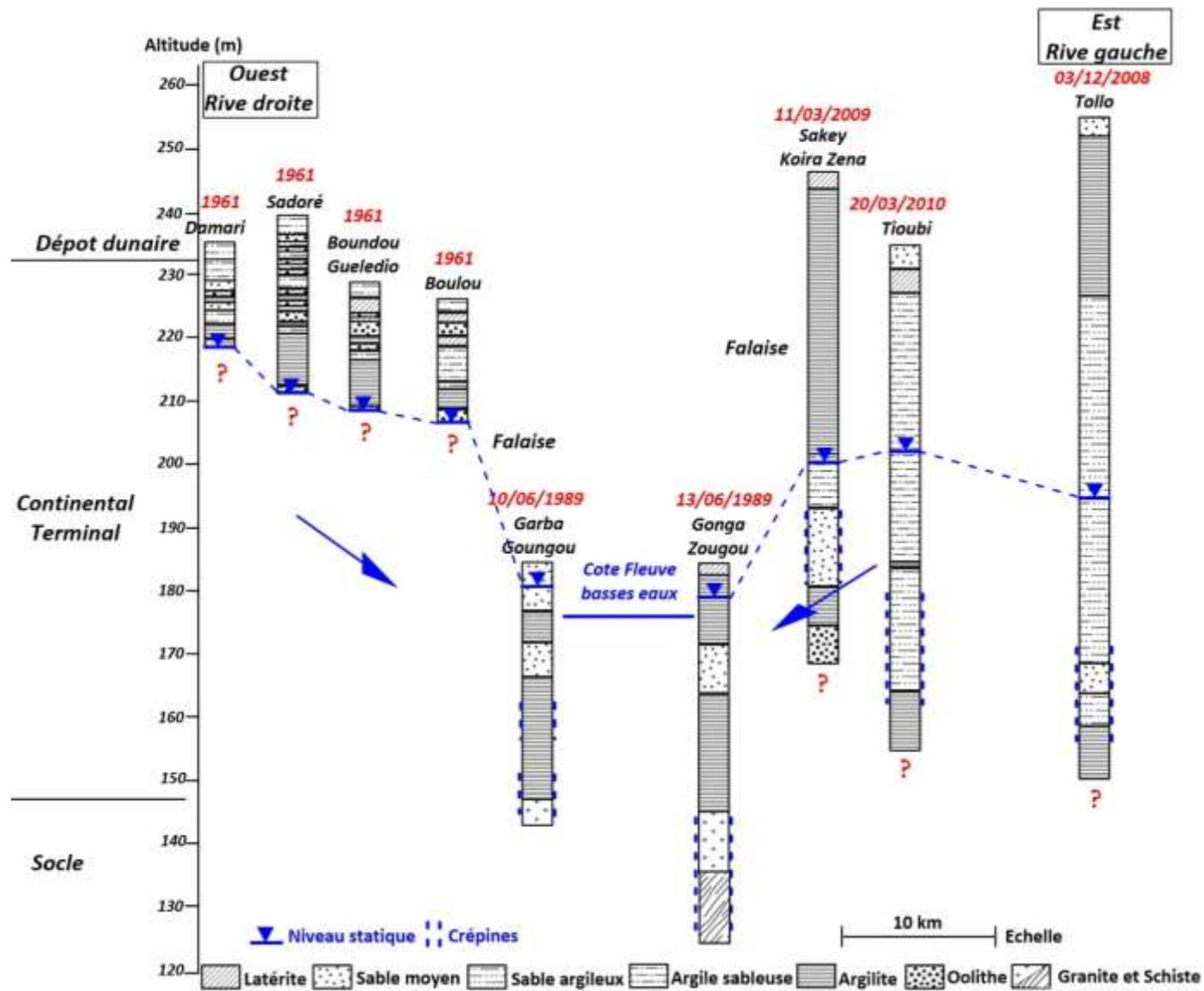


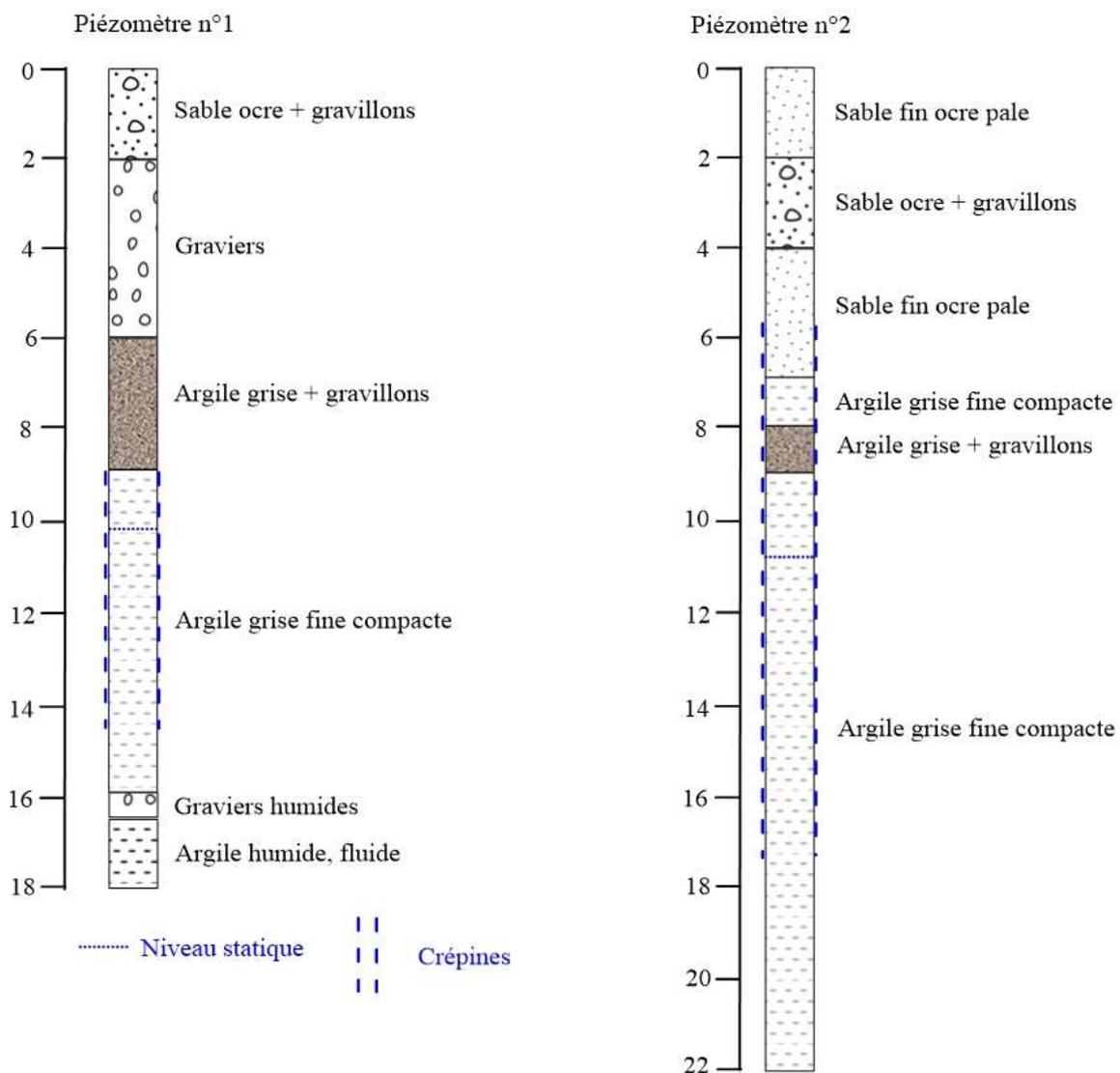
Figure 29: Coupe géologique en aval de la zone d'étude

4.1.2 Analyse piézométrique et direction des flux sur chaque site

Sur trois de nos sites, nous avons pu mettre en place un suivi piézométrique à proximité du fleuve. Dans cette partie, nous allons analyser l'évolution saisonnière de la piézométrie en regard avec le niveau du fleuve. Cela nous permettra de déterminer le sens des flux d'eau souterrains à fine échelle en fonction des saisons, de la géologie et de la géomorphologie.

4.1.2.1 Site du jardin botanique

En rive droite sur le campus de l'Université Abdou Moumouni, deux piézomètres nivelés permettent de suivre l'évolution de l'eau dans la nappe depuis 2009. Ces piézomètres se situent dans le jardin botanique à moins de 350 m du lit mineur du fleuve (Figure 6). Ils captent la nappe du socle altéré sur une épaisseur d'une dizaine de mètre (Figure 30). Un de ces piézomètres (P1) est équipé avec un enregistreur (sonde diver©).



En plus de ces piézomètres, des données sont disponibles pour le forage de la Faculté d'Agronomie. Ce forage est situé à environ 750 m des piézomètres du jardin botanique. Il a été suivi dans le cadre du projet AGES en 2014 (fin juin à décembre ; Vassolo et al. 2015). Les niveaux du fleuve sont ceux mesurés au niveau du pont Kennedy et la pluviométrie sur le site de l'IRI (Figure 6). Sur la rive gauche, une estimation du niveau de la nappe est obtenue grâce aux suivis réalisés dans le cadre des travaux de Alhassane Hado et al. (2021) où les ouvrages n'ont pas été nivelés. Ces niveaux en rive gauche sont donc approximatifs. Les résultats de Alhassane Hado et al. (2021) ont montré que le niveau de la nappe fluctue peu dans le temps en rive gauche. Cette absence de fluctuation est sans doute liée à la position des points de mesure qui sont situés dans la vallée du Gounti Yena. Dans cette vallée, la nappe affleure. Un écoulement de surface permanent existe à la confluence du Gounti Yena et du fleuve, le Gounti Yena drainant l'aquifère (Figure 14).

La fluctuation de la nappe dans le jardin botanique (Figure 31) montre une bonne corrélation entre les données manuelles et celles enregistrées par la sonde diver©. Les profondeurs d'eau mesurées dans les piézomètres P1 et P2 sont assez proches (Figure 30). La différence entre les piézomètres peut être expliquée par le léger dénivelé que présente le terrain. Ainsi, les charges hydrauliques dans les piézomètres P1 et P2 sont pratiquement les mêmes (Figure 31). Elles sont inférieures au niveau du fleuve, qui est lui-même inférieur à la charge hydraulique dans le forage de la Faculté d'Agronomie, quelle que soit la saison. Les flux d'eau souterrains se font donc de la nappe vers le fleuve à une échelle de ~ 1 km. A l'approche du fleuve donc à une distance réduite (<300 m) le sens du flux s'inverse et les écoulements se font du fleuve vers la nappe.

On ne remarque pas de tendance à long terme (2009 – 2020) sur les niveaux piézométriques. La Figure 31 montre que la côte du fleuve Niger se trouve au moins à 4 m au-dessus de la côte piézométrique pendant toutes les saisons (hautes eaux et basses eaux). Le niveau piézométrique baisse en saison sèche surtout dans la période d'avril - mai, mais à partir du mois de juillet il remonte. C'est le début de la saison pluvieuse aussi appelé saison hivernale. La nappe atteint son maximum pendant cette saison hivernale. Sur ce site, l'amplitude des variations annuelles de la nappe s'élève à ~ 4 m en moyenne mais elle est très variable d'une année à l'autre (maximum 7 m en 2020 qui a été une année exceptionnelle du point de vue précipitation, débit du fleuve et recharge souterraine).

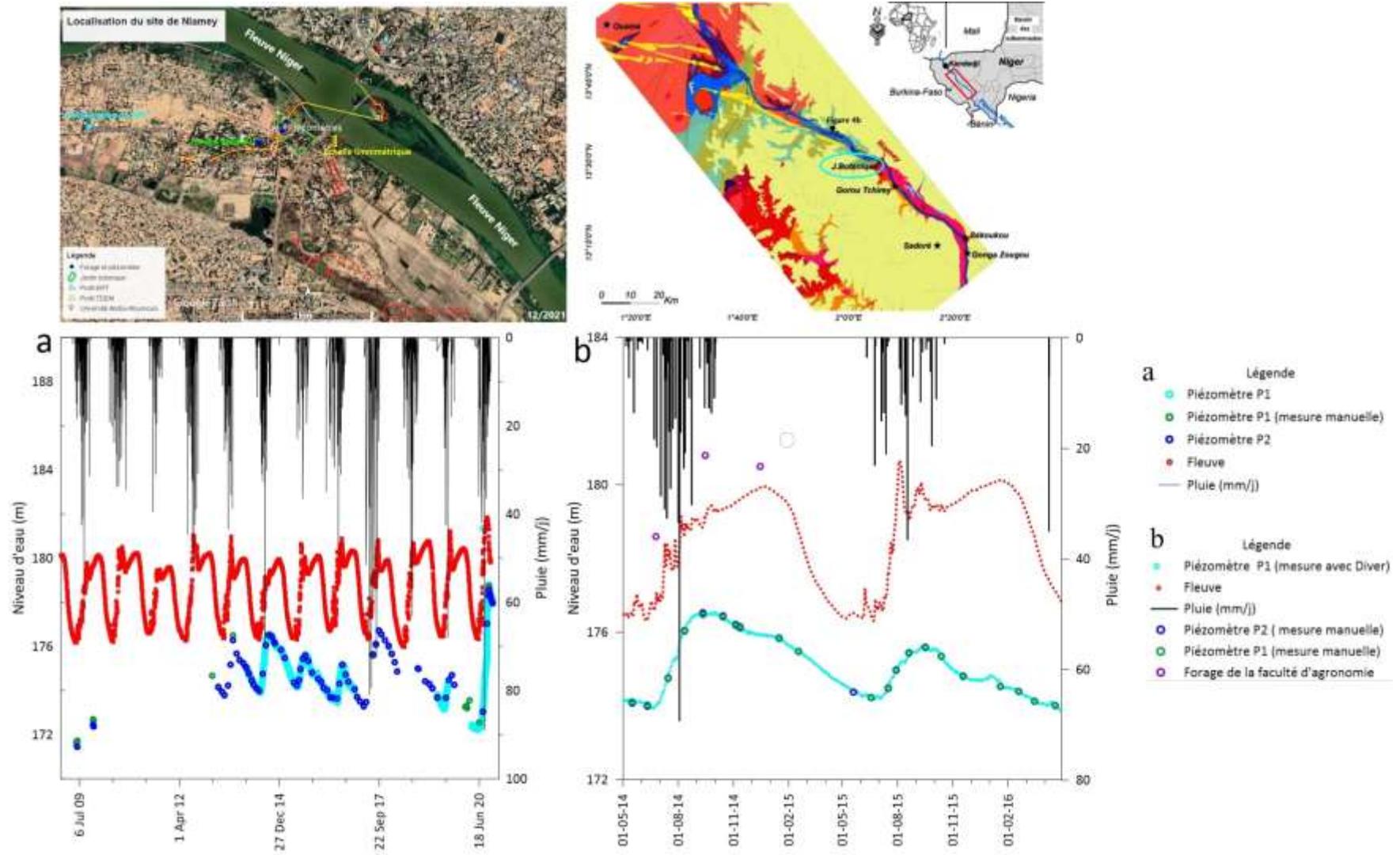


Figure 31: Chroniques piézométriques, pluviométriques et limnimétriques sur le site de Niamey. a- Sur toute la période d'observation 2009 – 2020 et b – Zoom sur 2 années hydrologiques contrastées : 2014/2015 quasi-absence de crue locale, malgré une pluviométrie annuelle 634 mm ; 2015/2016 crue locale bien marquée avec une pluviométrie annuelle de 470 mm à Niamey

La dynamique de la piézométrie et de la pluviométrie de 2009 à 2020 a montré que la pluviométrie est la principale source de recharge de l'aquifère (Figure 31a) sachant que la nappe atteint son maximum de recharge en août – septembre qui correspond à la période des fortes pluies. Les niveaux piézométriques montrent une montée rapide du niveau de la nappe à partir du mois de juillet. Cette montée est proportionnelle à l'augmentation du débit du fleuve. Cette réaction suggère une réponse de la nappe vis-à-vis de la variation du débit du fleuve et donc également une recharge de l'aquifère par le fleuve.

Une analyse détaillée de la Figure 31b permet de voir que l'année hydrologique 2015 - 2016 montre 2 pics de crues sur la courbe du débit du fleuve. Ces deux pics de crue sont aussi observables sur la courbe piézométrique. Toutefois, ils sont moins prononcés au niveau des eaux souterraines. L'aquifère ne répond pas immédiatement au début de la saison humide. Un délai par rapport aux précipitations quotidiennes et aux crues du fleuve est observable dans la réponse des eaux souterraines. Cela renforce les présomptions d'une recharge locale de la nappe via le fleuve. En particuliers, l'observation d'une hausse piézométrique pendant la crue guinéenne en l'absence de précipitation permet effectivement de vérifier l'existence d'une recharge locale de la nappe. Cette recharge par le fleuve se fait vraisemblablement au niveau des berges.

La coupe hydrogéologique du site (Figure 32), nous indique que le niveau capté par les piézomètres du jardin botanique correspondent à l'aquifère des altérites (cf. également Figure 30), tandis que le forage de la Faculté d'Agronomie capte l'aquifère de socle fissuré ou fracturé. Les études antérieures ayant montré qu'il existe une continuité hydraulique entre ces deux réservoirs, nous pouvons comparer les niveaux pour déterminer la direction des flux souterrains. La représentation en coupe (Figure 32) souligne la forme bidirectionnelle des flux d'eau entre les réservoirs des aquifères de socle (altérites et socle fissuré/fracturé) et le fleuve.

Si le flux en direction du fleuve que nous observons entre le forage de la Faculté d'Agronomie et ceux du jardin botanique était déjà documenté (ex. carte piézométrique de Niamey réalisée en 2019 et reportée sur la Figure 14), notre étude permet de mettre en évidence un comportement différent lorsqu'on se rapproche du fleuve. Ce comportement avec un flux d'eau souterrain du fleuve vers la nappe à petite échelle n'a jamais été identifié avant notre étude. Sur ce site d'étude, les échanges se font dans les deux directions que ça soit en hautes eaux et en basses eaux.

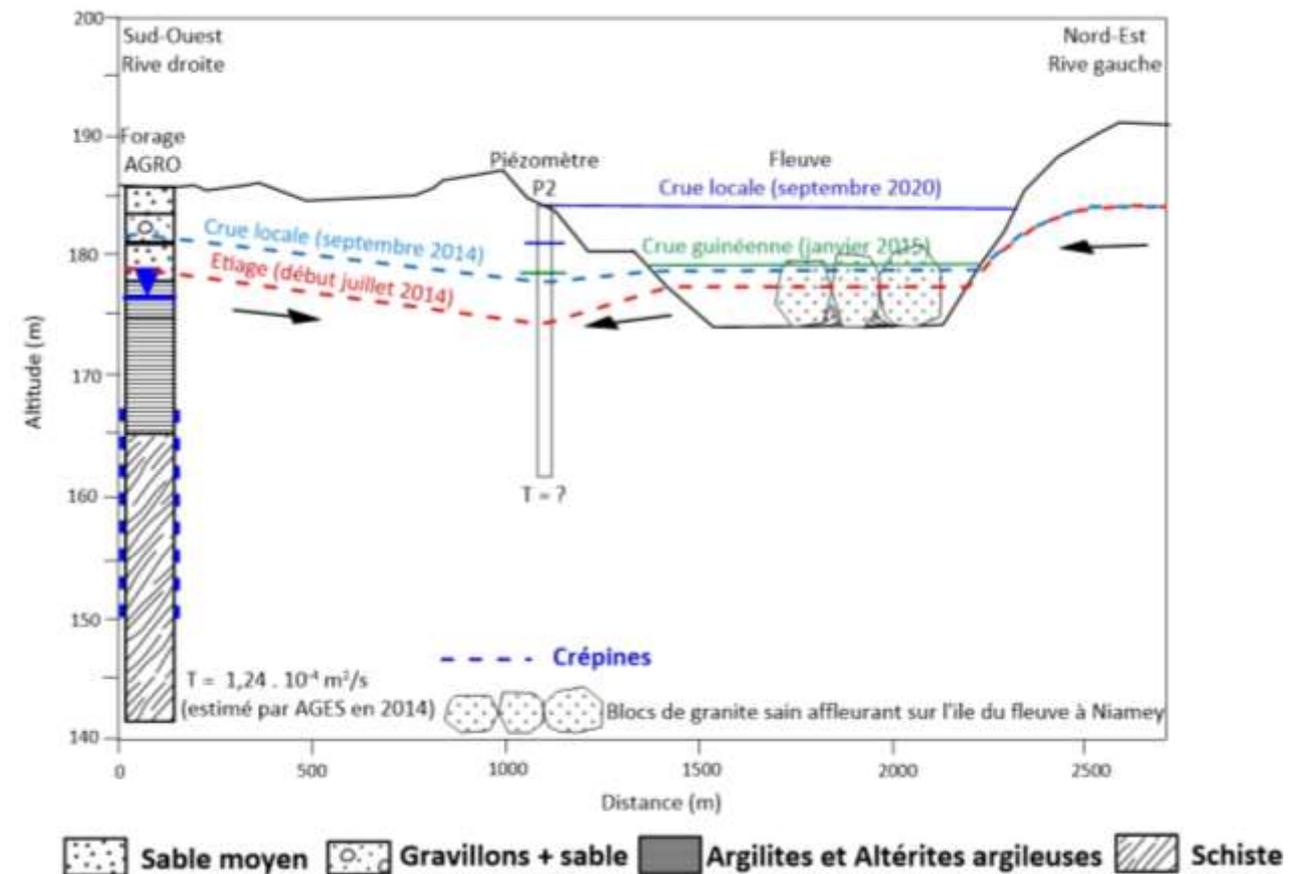


Figure 32: Coupe schématique hydrogéologique du site de Niamey présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve pendant l'étiage. Pendant la crue locale de la saison des pluies et pendant la crue guinéenne de la saison sèche.

4.1.2.2 Site de Gongga Zougou

A Gongga Zougou, les mesures ont été effectuées dans les deux puits villageois haut et bas (Figure 16) utilisés pour l'arrosage des cultures de contre saison. Nous nous permettons de dire que nous avons une certaine assurance sur la qualité des données car les niveaux sont mesurés manuellement et avant les pompages. Les niveaux piézométriques obtenus sont comparés au niveau du fleuve mesuré à Niamey. Pour comparer ces niveaux, nous avons effectué deux nivellements en juin et novembre 2020 qui, ajouté à la mesure d'altitude du délaissé de crue de septembre 2020, nous a permis d'avoir trois niveaux repères. Les niveaux du fleuve mesurés à Niamey ont ensuite été translatés de telle sorte à ce que la chronique des niveaux du fleuve passe par ces trois points repères.

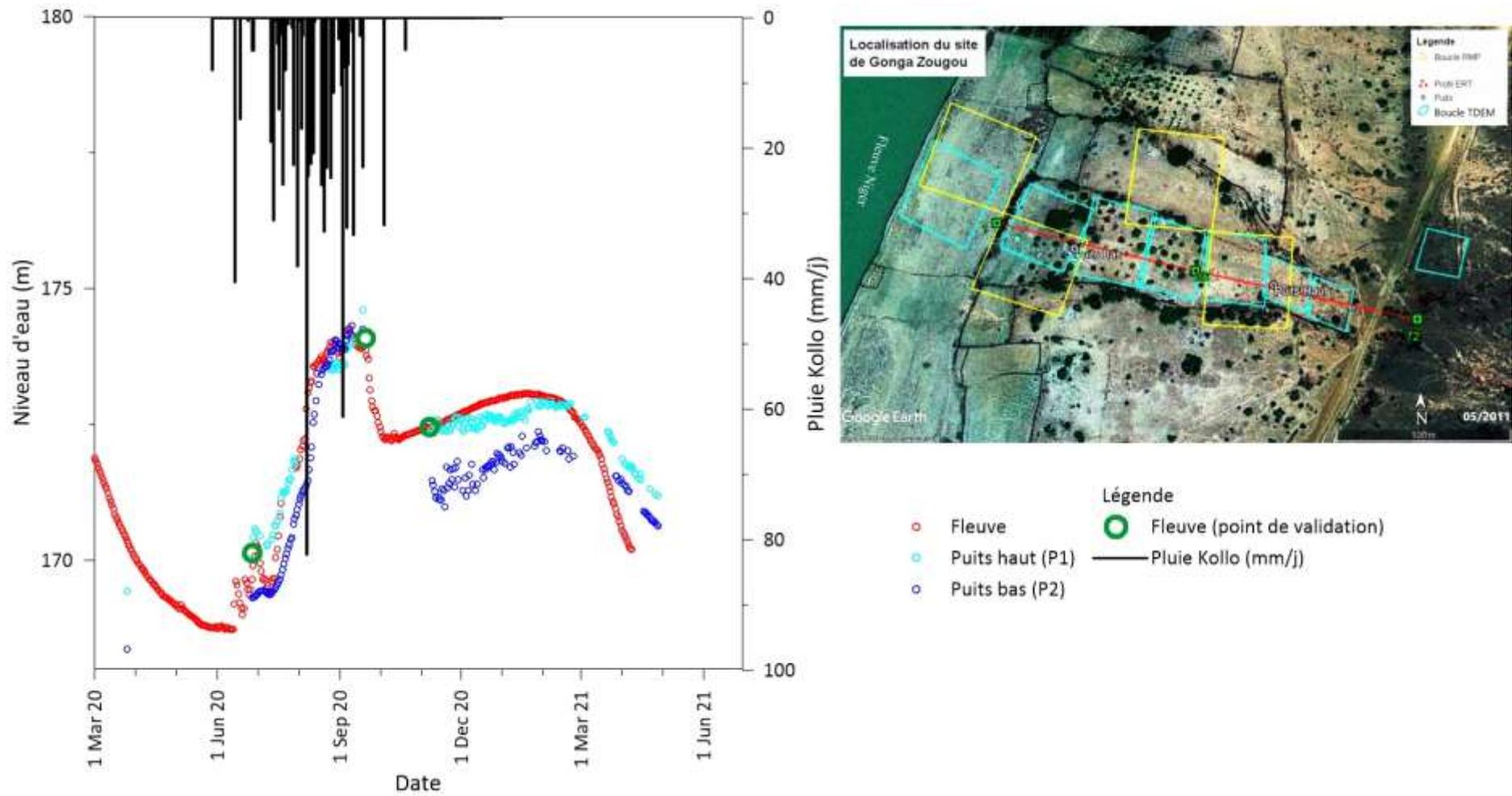


Figure 33: Chroniques piézométriques du site de Gonga Zougou compare au niveau du fleuve et à la pluviométrie. Année hydrologique 2020 - 2021

Les variations des niveaux piézométriques ont la même allure que celles du niveau du fleuve avec un pic principal à la saison des pluies pendant la crue locale du fleuve, et un pic arrondi pendant la crue guinéenne (Figure 33). Ce second pic, en dehors de la saison pluvieuse indique clairement une influence du fleuve sur le niveau d'eau dans la nappe. La nappe atteint sa cote maximale en septembre, et après une première baisse de niveau en fin de saison pluvieuse se maintient relativement haute jusqu'en mars – avril. Les niveaux piézométriques les plus bas sont enregistrés à la fin de la saison sèche.

La charge hydraulique du puits haut est toujours supérieure à celle du puits bas (Figure 33 et Figure 34) sauf pendant les plus hautes eaux de la saison des pluies où les charges s'équilibrent. La charge hydraulique dans le puits du haut est sensiblement égale à la charge hydraulique du fleuve qui est donc plus élevée que celle du puits bas, sauf au moment de décrue. La différence de charge entre le puits haut et le puits bas montre un gradient hydraulique qui indique un flux d'eau souterrain permanent en direction du fleuve jusqu'au puits bas. La Figure 33 montre qu'en mars – avril 2021, les écoulements souterrains se font de la nappe vers le fleuve sur toute la section étudiée. En dehors de cette période, les mesures de niveaux effectuées montrent un flux d'eau souterrain du fleuve vers le puits bas (Figure 34). Ainsi, à la jonction du lit majeur et du versant, les échanges surface-souterrain sont particulièrement complexes avec un sens des écoulements souterrains qui varie en fonction de l'échelle spatiale, de la saison et plus largement du contexte hydro-climatique (on note par exemple qu'une mesure ponctuelle effectuée en mars 2020 montre un comportement encore différent de ceux décrits précédemment).

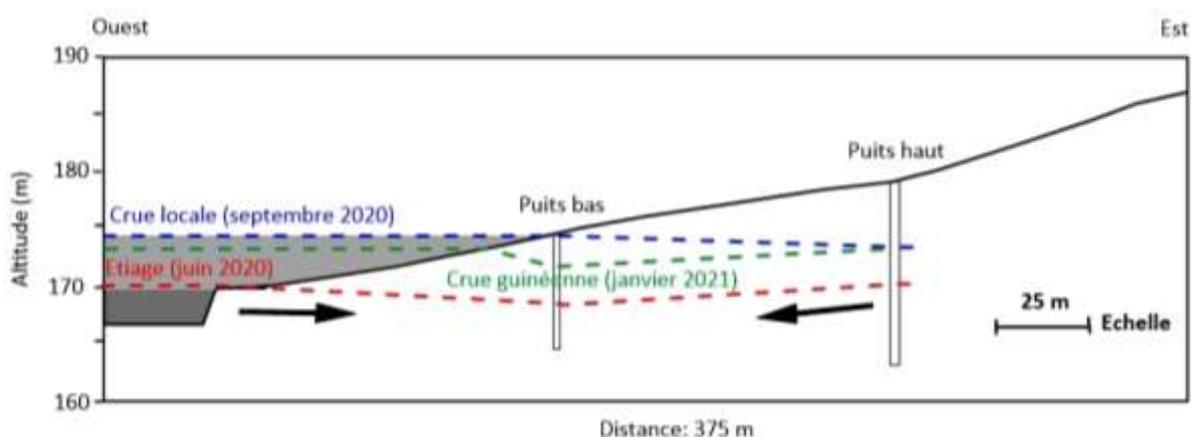


Figure 34: Coupe schématique du fonctionnement hydrologique du site de Gongga Zougou présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve en basses eaux (étiage 2020) et en hautes eaux (crue locale 2020 et crue guinéenne 2021).

4.1.2.3 Site de Gorou Tchirey

L'analyse de la fluctuation de la nappe sur le site de Gourou Tchirey concerne un piézomètre que nous avons installé début juillet 2020 à moins de 200 m du fleuve en rive droite. Comme le site de Gonga Zougou, les suivis piézométriques sont des mesures manuelles. Les données piézométriques ont été comparées au niveau du fleuve mesuré à Niamey et translaté après nivellement. Le niveau piézométrique est toujours supérieur au niveau du fleuve (Figure 35). On remarque de manière générale que la recharge de l'aquifère et la diminution du niveau piézométrique sont sous le contrôle des précipitations, de l'évapotranspiration et du drainage. En effet, la recharge se produit entre juin et septembre et correspond à la saison pluvieuse. Cette recharge est rapide tandis que la baisse du niveau piézométrique est progressive de la fin de la saison des pluies jusqu'à la période de la saison sèche, c'est-à-dire d'octobre à mai.

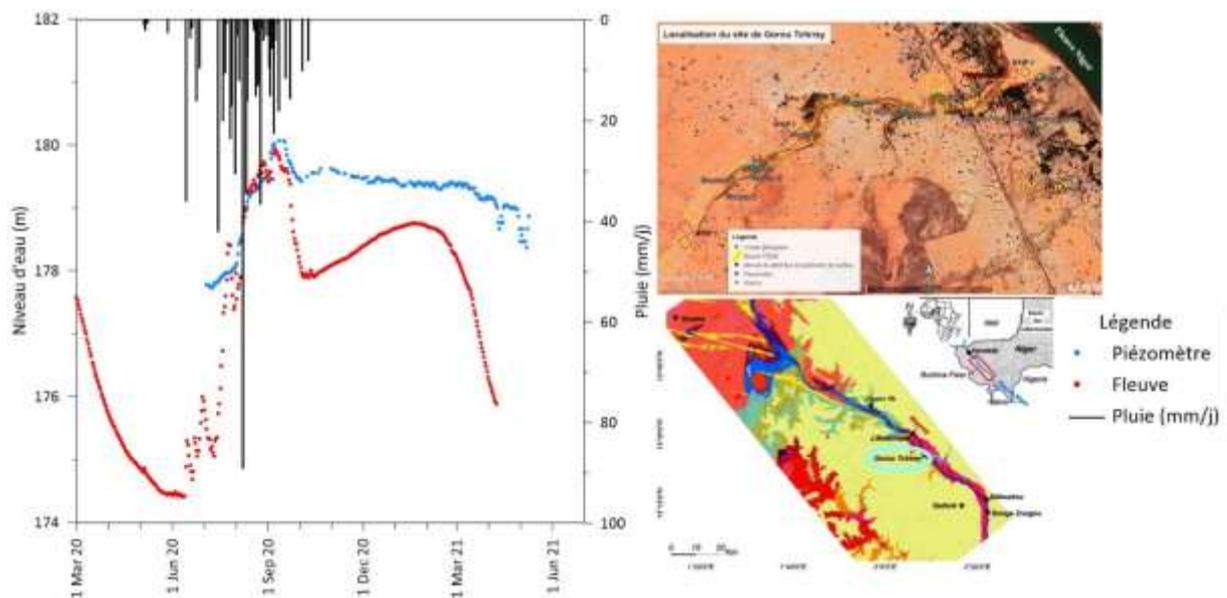


Figure 35: Chronique piézométrique du site de Gorou Tchirey comparée au niveau du fleuve et à la pluviométrie. Année hydrologique 2020 - 2021

Lorsque le fleuve est en contact avec les alluvions sableuses de l'affluent, le niveau de la nappe est toujours au-dessus du fleuve (Figure 35 et Figure 36). La nappe reste donc en position d'alimenter le fleuve toute l'année. Les flux souterrains se font en direction du fleuve. La Figure 35 montre que le fleuve atteint son maximum au même moment que la nappe, en septembre - octobre. L'augmentation du débit du fleuve se fait en même temps que la nappe se recharge. Sur la Figure 36, les mesures effectuées dans le piézomètre semble montrer une influence du niveau du fleuve sur le niveau de la nappe pendant la crue guinéenne, sans toutefois inverser le sens du gradient hydraulique. Sur ce site, il serait intéressant de continuer les mesures pour

avoir une vision globale du comportement de la nappe vis-à-vis du fleuve sur plusieurs années hydrologiques.

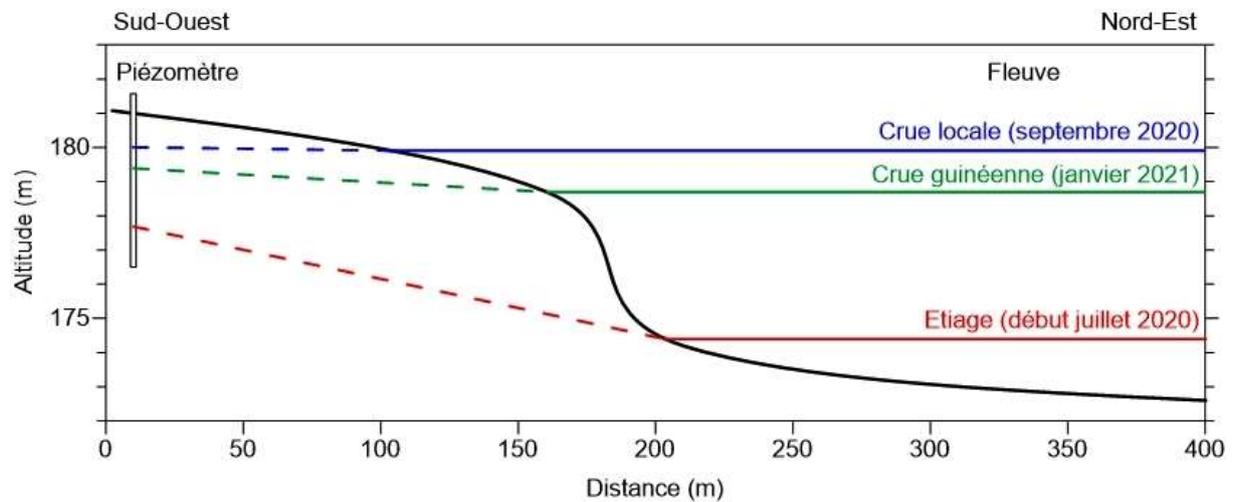


Figure 36: Coupe schématique du fonctionnement hydrologique du site de mesure de Gourou Tchirey présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve

4.1.2.4 Synthèse sur le sens des échanges entre la nappe et le fleuve

L'agencement des correspondances lithostratigraphiques réalisées à partir des données géologiques et hydrogéologiques réunies sur la zone d'étude, nous a permis d'établir des coupes géologiques. Ces coupes, nous ont permis de mieux définir les formations géologiques qui constituent les aquifères en amont et en aval de la zone. L'analyse des profils de corrélation montre qu'en amont de la zone d'étude les altérites s'amincissent vers le fleuve et constituent un aquifère peu profond. L'aquifère du socle fissuré ou fracturé capté le plus souvent par les ouvrages d'alimentation en eau potable se trouve dans les formations des roches vertes et magmatiques. Par contre en aval de la zone d'étude, la nappe phréatique se localise dans les formations du CT qui contiennent des niveaux oolitiques. Elle est plus épaisse vers l'Est.

L'étude piézométrique conduite sur les nappes des altérites, du CT et du socle fissuré ou fracturé a pu mettre en évidence pour chaque site une recharge directe par la pluie et une influence de la crue guinéenne en saison sèche sur les niveaux piézométriques. En général, les écoulements souterrains se font en direction du fleuve. Cependant, on remarque qu'à proximité du fleuve, les gradients hydrauliques peuvent s'équilibrer voire s'inverser en fonction des saisons et de la géologie (sites du jardin botanique et de Gongga Zougou).

L'ensemble des éléments présentés dans cette partie ne suffit pas pour quantifier précisément les flux souterrains et bien comprendre les interactions fleuve - nappe. Nous avons décrit en partie 3 une approche hydrogéophysique basée sur les méthodes géophysiques pour

l'acquisition de nouvelles données. Ces données permettront d'estimer les paramètres qui sont nécessaires au calcul de la loi de Darcy. La prochaine partie 4.2 de ce manuscrit est consacrée aux résultats issus des mesures géophysiques.

4.2 Géométrie et propriétés hydrodynamiques des aquifères

L'objectif de cette partie est d'estimer les principaux paramètres hydrogéologiques (épaisseur et perméabilité) qui permettent de quantifier les flux d'eau souterrains par utilisation de la loi de Darcy. Pour ce faire, nous allons, d'abord élaborer une stratégie de spatialisation des informations ponctuelles pour obtenir une image 2D précise des aquifères, puis, pour chaque site nous allons décrire les structures géométriques des aquifères à travers les méthodes géophysiques électriques et électromagnétiques et en même temps estimer la perméabilité et la transmissivité notamment avec les résultats des mesures RMP.

4.2.1 Spatialisation des structures hydrogéologiques

4.2.1.1 Vers une représentation 2D des sondages TDEM

Les résultats de l'interprétation TDEM en 1D se présentent sous forme de courbe de variation de la résistivité calculée des terrains en fonction de la profondeur. Les résistivités sont représentées sur une échelle logarithmique. La Figure 37 montre un exemple typique de résultats d'inversion 1D sur cinq sondages TDEM faits sur le site de Werkéré en rive droite face à Gonga Zougou au bord du fleuve.

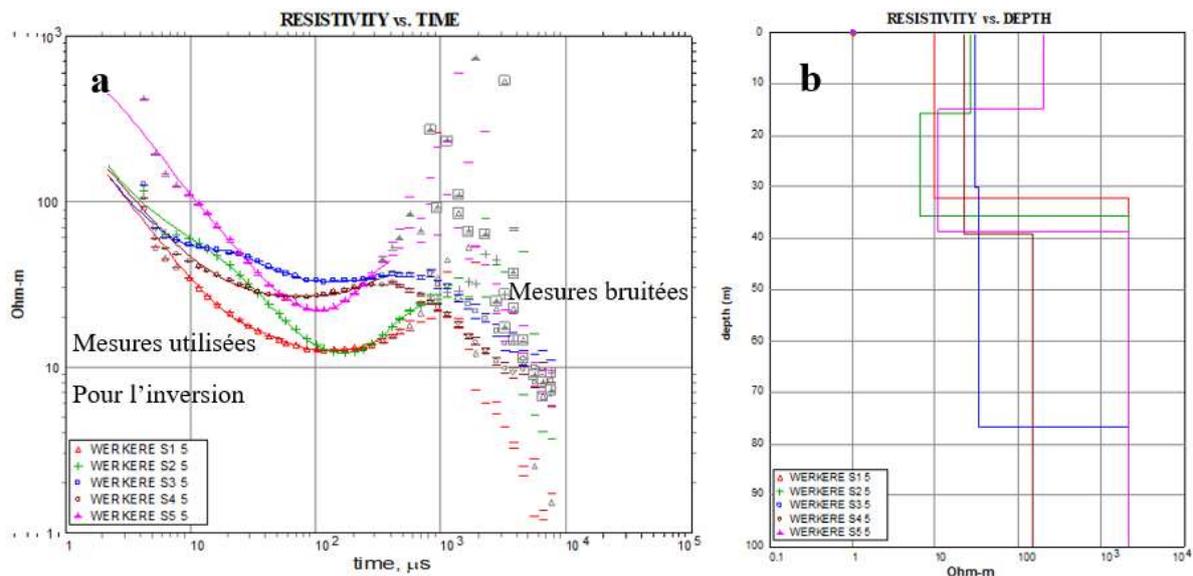


Figure 37: Exemple de résultats TDEM sur le site de Werkéré au bord du fleuve où le socle résistant est peu profond. a- Ajustement des modèles de résistivités sur les mesures TDEM ; b- Résultats d'inversion 1D des sondages TDEM.

Pour faciliter la lecture de tous nos résultats de sondages TDEM et avoir une bonne représentativité des résistivités électriques, nous avons interpolé les résultats des inversions 1D en 2D. L'interpolation en profil 2D permet de représenter les valeurs de résistivités issues de l'interprétation 1D sous forme de pseudo-section géo-électrique. La méthode d'interpolation

des pseudo-sections utilise le même logiciel TEM-RES que celui utilisé pour l'inversion 1D. Elle nécessite d'avoir à sa disposition :

- Les données enregistrées lors des mesures sur le terrain (fichier TEM).
- Les résultats issus de l'inversion 1D enregistrés au format INT (fichier INT).
- Les résultats des transformations (t)->(h), reçus dans la fenêtre Res(h) et écrits dans le fichier PSC.
- Les coordonnées (X, Y) de chaque point de sondages. Ces coordonnées permettent d'avoir la position de chaque sondage et la distance entre les sondages.
- L'altitude des points de sondage pour la représentation de la topographie de la surface du sol et la représentation des valeurs de résistivité en fonction de l'altitude. Cette représentation facilite l'interprétation des résultats en termes de formations géologiques traversées.

Dans notre étude, certaines des altitudes utilisées pour les calculs d'interpolation de résistivité ont été obtenues grâce aux données du modèle numérique d'élévation SRTM-GL1-30 m (Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global, résolution approximative de 30 m, N.A.S.A, 2000). Les autres altitudes utilisées sont issues de nos mesures de nivellement (cf. paragraphe 3.2.3).

Une fois que tous les paramètres sont réunis et tous les points nécessaires sont marqués, c'est-à-dire que toutes les informations des sondages constituant le profil sont créées, on passe au processus de construction du profil géo-électrique. Le profil géo-électrique interpole les résultats 1D pour les représenter sous la même forme que les images de tomographie de résistivité électrique avec une variation de palette de couleur (exemple Figure 38). La palette caractérise les différentes valeurs de résistivité des terrains. Elle est représentée en format logarithmique et peut être changée, adaptée par rapport à d'autres palettes dans le but de faire une étude comparative. La représentation sous forme de tomographie de résistivité électrique permet de suivre l'évolution latérale des différentes strates géologiques et ainsi disposer d'information précise concernant la géométrie des aquifères.

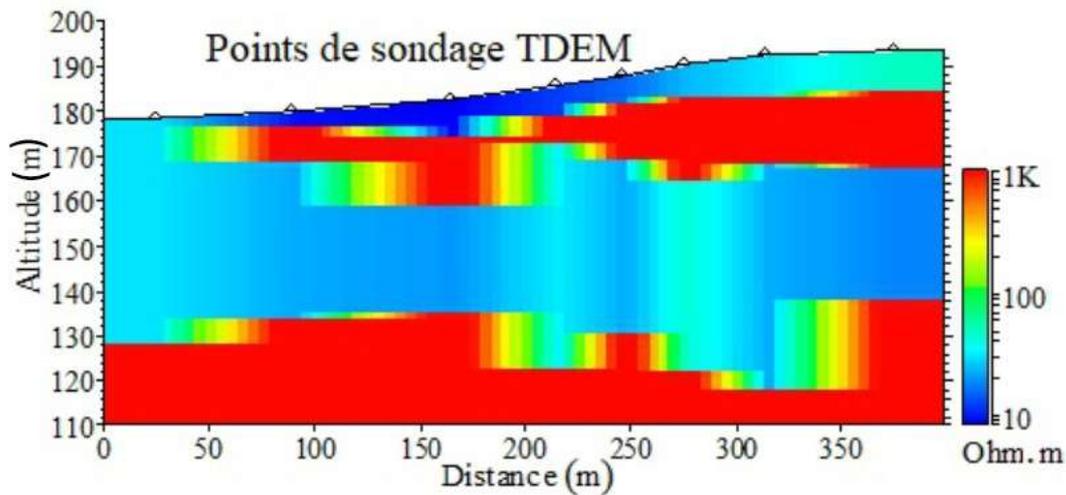


Figure 38: Exemple de sondages TDEM interpolés sous forme d'image de tomographie de résistivité électrique sur le site de Gonga Zougou

4.2.1.2 Etude comparative de l'ERT, du TDEM et des logs lithologiques des forages

Pour estimer les incertitudes géophysiques dans le cadre de la caractérisation des aquifères de la zone d'étude, nous avons mené une étude comparative de la méthode ERT et TDEM avec la description des formations géologiques obtenues d'après les logs lithologiques des forages. Pour pouvoir corréliser les résistivités électriques mesurées par géophysique et la géologie dans les forages, nous avons regardé les logs géologiques des forages les plus proches de nos profils ERT. Le premier forage utilisé pour la corrélation correspond à celui réalisé par WASCAL (West African Science Center on Climat Change and Adapted Land Use) à la Faculté de Sciences et Techniques de l'Université Abdou Moumouni de Niamey. Le second forage utilisé pour la corrélation est celui de Gonga Zougou. Il a été réalisé par l'entreprise SEFI en 1989. La distance entre le profil ERT du jardin botanique et le forage WASCAL est d'environ 200 m. La distance entre le profil ERT et le forage de Gonga Zougou est d'environ 800 m. Les sondages TDEM ont été réalisés aux mêmes endroits que les profils ERT. La distance entre les mesures géophysiques et les forages induit une incertitude sur la correspondance entre les épaisseurs des formations géologiques et celle des couches de résistivités.

La Figure 39 montre les distributions verticales de résistivité estimées par ERT et TDEM. Ces distributions sont représentées sous forme de logs de couleurs. L'échelle de couleurs varie de 10 à 500 $\Omega.m$ et représente la gamme des différentes résistivités. Les variations de résistivité des terrains peuvent être décrites comme des changements de la géologie et/ou de la conductivité électrique de l'eau souterraine. Dans notre cas, les distributions de résistivité sont corrélées aux logs de forage.

La Figure 39a montre une formation superficielle peu épaisse ~10 m constituée d'alluvions anciennes qui correspond à une couche de résistivité de 500 Ω .m. Les dépôts d'alluvions anciennes se composent d'une superposition de mélange de sable et graviers. Cette formation est déposée sur une deuxième couche plus épaisse (~30 m) et conductrice : 10 Ω .m d'après les sondages ERT, 30 à 90 Ω .m d'après le TDEM. La deuxième couche est une couche argileuse formée d'une alternance d'altérites et de méta-basalte altéré (d'après le log géologique). Ensuite le TDEM montre une couche plus résistante (500 Ω .m) à partir de 45 m : c'est le socle. Le socle est visible sur le forage à partir de 40 m. Il n'est pas détectable par l'ERT dont la profondeur d'investigation est de ~ 25 m. La comparaison des résultats ERT, TDEM et du log de forage permet de déduire que le TDEM a tendance à surestimer l'épaisseur du premier terrain résistant sur ce site.

Le log de forage de la Figure 39b montre, premièrement, une fine couche de couverture oolitique latérisée de moins de 2 m qui se marque par un terrain résistant superficiel sur le panneau ERT. Cette couverture n'est pas perceptible sur les résultats TDEM. Le modèle TDEM commence par un terrain de résistivité intermédiaire (~100 Ω .m) de 10 m d'épaisseur. Ce terrain intègre la couverture latéritique résistante superficielle et le 2^{ème} terrain très conducteur (10 Ω .m) détecté par l'ERT et qui correspond à de la kaolinite d'après le log de forage. Plus en profondeur, les résultats ERT et TDEM montrent une couche avec des valeurs de résistivité de 200 à 500 Ω .m attribuées à une couche sableuse. L'épaisseur de cette couche sableuse (7 m d'après le forage) a tendance à être surestimée par le TDEM. Ensuite vient une autre couche conductrice (30 - 40 Ω .m) correspondant à des argiles blanches avant le socle résistant qui n'est pas vu par l'ERT.

Cette analyse comparative permet de mettre en évidence que le TDEM est moins précis que l'ERT, mais il va plus en profondeur. Ce manque de précision s'illustre par deux principaux constats dont premièrement une surestimation des épaisseurs des couches résistantes comparées aux descriptions des logs des forages et de l'ERT, et deuxièmement le manque de résolution du TDEM sur les stratifications fines. La difficulté du TDEM à distinguer des strates fines a été démontrée antérieurement dans les travaux de Descloitres et al. (2013) au Niger sur les aquifères sablo-argileux du bassin du Lac Tchad et par Flores Avilés et al. (2020) sur les aquifères argilo-limoneux en Bolivie. La méthode par imagerie de résistivité électrique ERT a tendance à montrer des variations verticales de résistivité électrique qui sont mieux corrélées aux épaisseurs des différentes strates géologiques observées sur les forages.

Une chose importante à noter est que ces méthodes géophysiques TDEM et ERT utilisées dans la cadre de notre caractérisation de la zone critique ont la qualité de bien représenter la distribution latérale des valeurs de la résistivité. Les variations des valeurs de résistivité représentent des variations dans la nature des formations géologiques. Dans notre zone d'étude où l'eau souterraine est très peu minéralisée plus la couche est conductrice plus elle est susceptible d'être considérée comme une formation argileuse. C'est une information cruciale pour le potentiel hydrogéologique de l'aquifère.

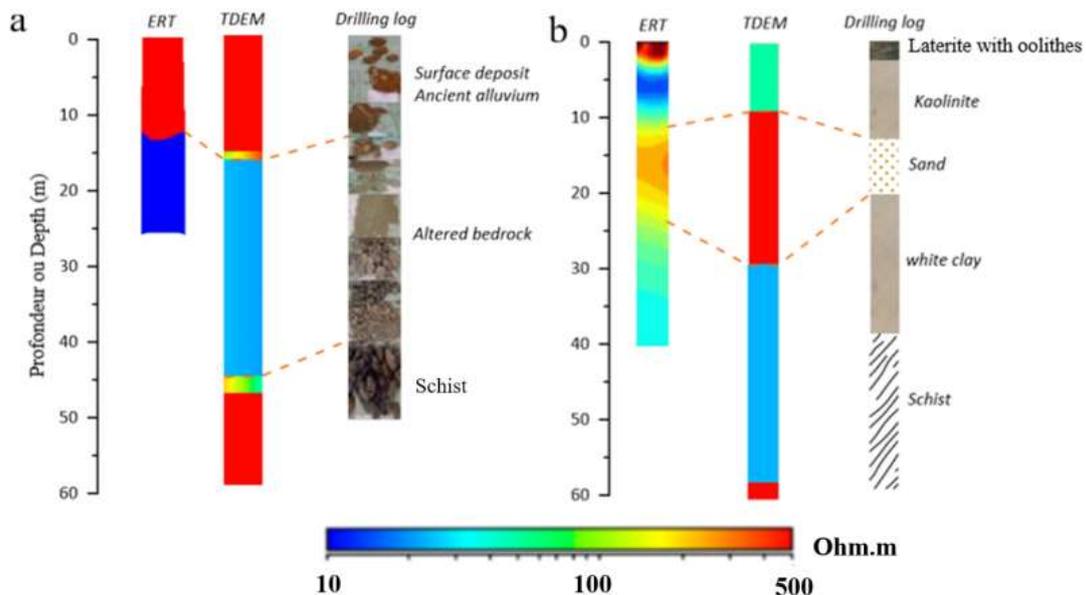


Figure 39: Etude comparative des sondages TDEM, ERT avec les logs des forages. a- Site du jardin botanique à Niamey ; b- Site de Gongga Zougou

4.2.2 Analyse hydrogéophysique de chaque site

4.2.2.1 Jardin botanique

Dans le jardin botanique de l'université Abdou Moumouni situé au bord du fleuve en rive droite, nous avons effectué un profil de tomographie de résistivité électrique de 140 m de longueur d'orientation SW – NE de telle sorte à être perpendiculaire au fleuve. Ce profil passe par les deux piézomètres P₁ et P₂ qui ont servi pour l'étude sur la direction des flux d'eau souterrains.

Les résultats de la tomographie électrique réalisée sur ce site de Niamey montrent deux couches dont l'interface est oblique (Figure 40). Ces couches se présentent comme suit :

- Une couche résistante superficielle qui tend vers les 1000 Ω .m et qui s'épaissit vers l'ouest (Figure 40). D'après les informations des logs géologiques des piézomètres P₁ et P₂ cette couche résistante est composée de plusieurs couches de sable et graviers (Figure 30).

- Une couche conductrice de moins de $10 \Omega.m$ qui caractérise les altérites argileuses grises observées sur les logs lithologiques (Figure 30). Ces altérites sont peu profondes ($\sim 6m$) là où se trouve le piézomètre P₁. L'interface oblique constitue la ligne de partage entre le recouvrement sédimentaire à l'ouest du panneau et les altérites argileuses qui affleurent au-delà du profil à l'est en bordure du fleuve.

Les piézomètres P₁ et P₂ captent essentiellement la formation des altérites argileuses mais également des sables et gravillons superficiels appartenant aux alluvions quaternaires.

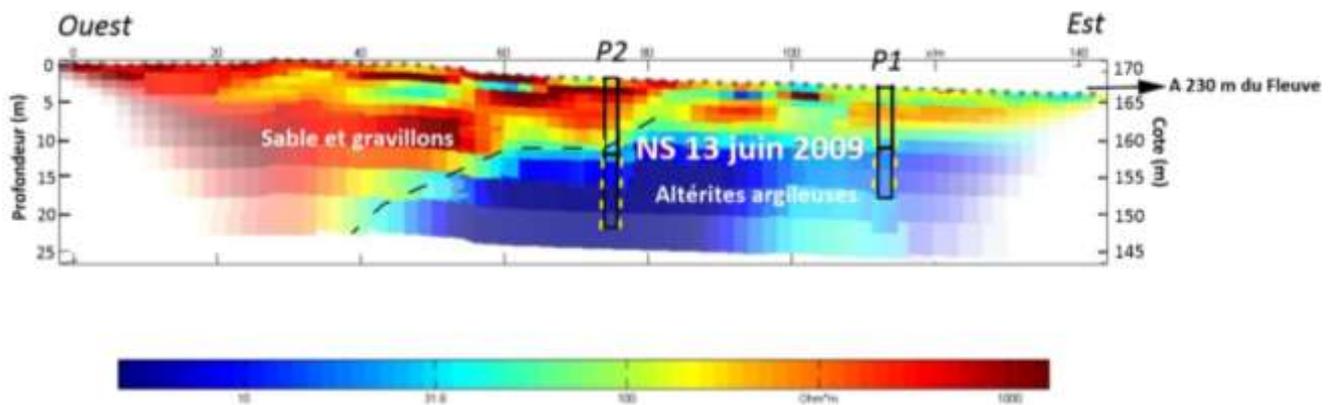


Figure 40: Tomographie de résistivité électrique sur le site de Niamey (jardin botanique, RMS = 5.66%)

Pour compléter la tomographie ERT, nous avons exécuté plusieurs sondages TDEM suivant un profil (Figure 41). Le profil TDEM qui recouvre le profil ERT et le dépasse en longueur mesure presque 3 km de long et traverse le fleuve. En plus de l'extension latérale, les sondages TDEM permettent d'aller plus en profondeur que le profil ERT.

Les résultats des sondages TDEM montrent en rive droite une architecture du sous-sol en 3 strates de résistivité (Figure 41). De la surface en profondeur nous avons un premier terrain résistant situé au-dessus de 170 m d'altitude qui présente des valeurs de résistivités en général comprises entre 700 et 2000 $\Omega.m$. L'épaisseur du terrain est de 10 m en moyenne mais diminue vers le fleuve jusqu'à disparition sur les berges. La comparaison avec les logs géologiques et les affleurements permet d'attribuer ce niveau résistant aux alluvions quaternaires anciennes du fleuve. Celles-ci sont composées de sables et gravillons, avec des niveaux latéritiques à certains endroits. Le deuxième terrain est conducteur, entre 20 et 30 m d'épaisseur, et se trouve en dessous de 170 m d'altitude. Ce terrain a une valeur de résistivité dans la gamme de 10 à 30 $\Omega.m$. D'après les informations des forages, il correspond aux formations argileuses ou argilo-sableuses issues de l'altération du socle. Ces deux premières strates sont celles qui ont été observées sur le profil de tomographie de résistivité électrique.

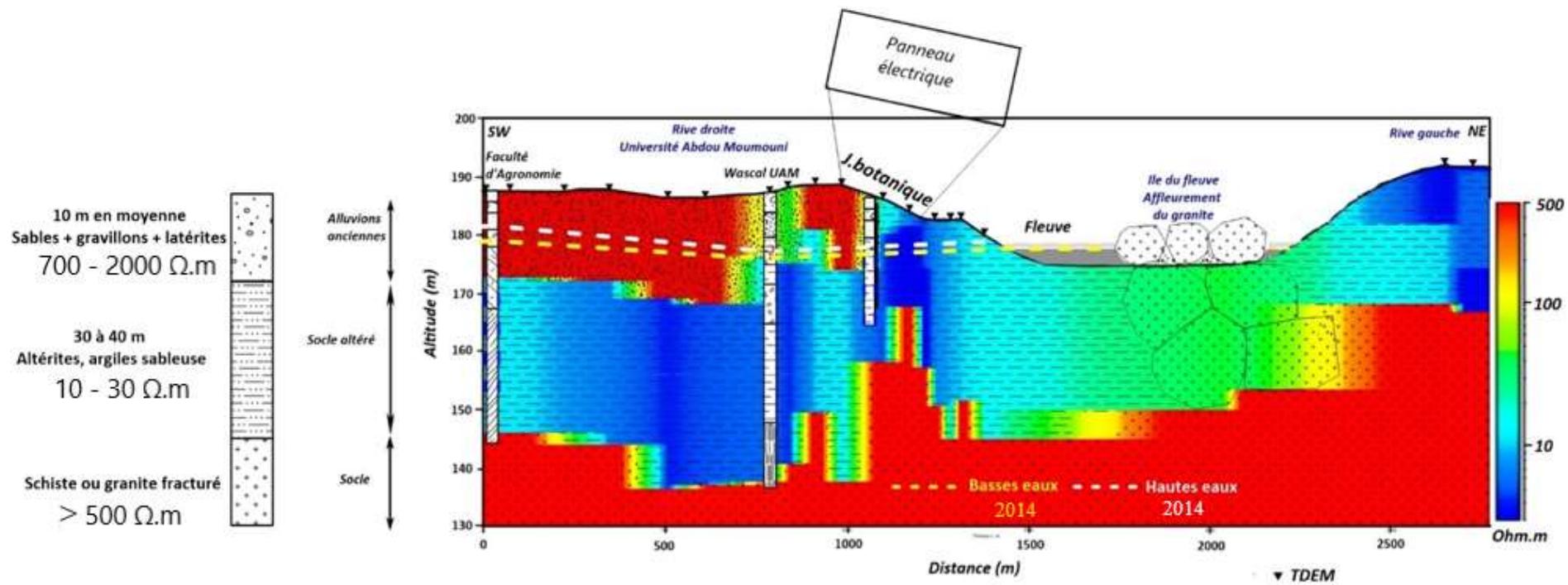


Figure 41: Coupe hydrogéophysique du site de Niamey

Enfin, un terrain très résistant, jusqu'à 2000 Ω .m, est situé en dessous de la couche argileuse. D'après les descriptions de la géologie des forages, ce terrain résistant correspond au socle.

Sur la première strate, on remarque une diminution de la valeur de résistivité à la position du forage de Wascal UAM (Figure 41). Une hypothèse qui pourrait expliquer cette particularité est liée à la présence d'une faille, récemment identifiée suite aux travaux de réalisation du forage WASCAL en 2019. D'après une communication personnelle de Pr. Konaté M. (enseignant-chercheur, géologue, à l'Université Abdou Moumouni de Niamey) la faille a rejoué récemment au point de causer des fissures sur le bâtiment du laboratoire de Biologie de la Faculté de Sciences et Techniques. La faille correspond à une fracture ouverte de 20 – 25°N. Etant toujours active elle pourrait expliquer que les terrains superficiels aient été remaniés, modifiant ainsi leur résistivité.

Les résultats des sondages TDEM sur l'île du fleuve font apparaître seulement deux terrains. Les valeurs de résistivité du premier terrain sont comprises entre 40 et 150 Ω .m. Elles sont plus faibles que celles du deuxième terrain qui correspond au socle, mais sont plus élevées que celles de formations argileuses de part et d'autre du fleuve. Sur l'île du fleuve, on voit l'affleurement des blocs de granite entouré de sable mouillé (Planche photo 2). Cela peut expliquer la valeur de la résistivité sur le premier terrain. Enfin en rive gauche, les résultats montrent un terrain conducteur dont la valeur de résistivité est inférieure à 20 Ω .m qui est directement posé sur le socle résistant. Ce terrain conducteur correspond à la base argileuse du CT3 et aux altérites du socle qui sont difficilement différenciables.

Les résultats TDEM à Niamey confirment que les ouvrages hydrogéologiques sur le site du jardin botanique captent l'aquifère des altérites du socle. Ils suggèrent que le forage de la Faculté d'Agronomie capte également l'aquifère des altérites et non l'aquifère de socle fissuré. L'aquifère capté par ce forage reste incertain car d'une part le log géologique présente une description ambiguë du degré d'altération du schiste et d'autre part la précision sur l'épaisseur d'un terrain conducteur entre deux résistants est faible avec la méthode TDEM.

4.2.2.2 Gongga Zougou

Ce site a la particularité d'être situé à un endroit où la vallée du fleuve est particulièrement étroite, entourée par deux plateaux formés de grès du CT. Ce site inclut 3 zones de prospection géophysiques :

- Le site principal où les niveaux piézométriques ont été suivis (cf § 4.1.2.2) situé en rive gauche ;

- Le site de Sékoukou, également en rive gauche, à 5 km en amont du site principal ;
- Le site de Werkéré – Sadoré, en rive droite, en face du site principal.

- **Site principal de Gongga Zougou à fine échelle**

Ce site principal de Gongga Zougou bénéficie de trois types de mesures géophysiques : TDEM, ERT et RMP. Ces mesures géophysiques ont été réalisées suivant un profil Est – Ouest qui s’étend sur une distance d’environ 400 m de long. Pour ce site, nous avons tout d’abord réalisé un profil ERT (Figure 42) de 284 m centré sur les deux puits suivis puis un profil TDEM qui part du fleuve à son niveau le plus bas et arrive au pied du plateau (Figure 43).

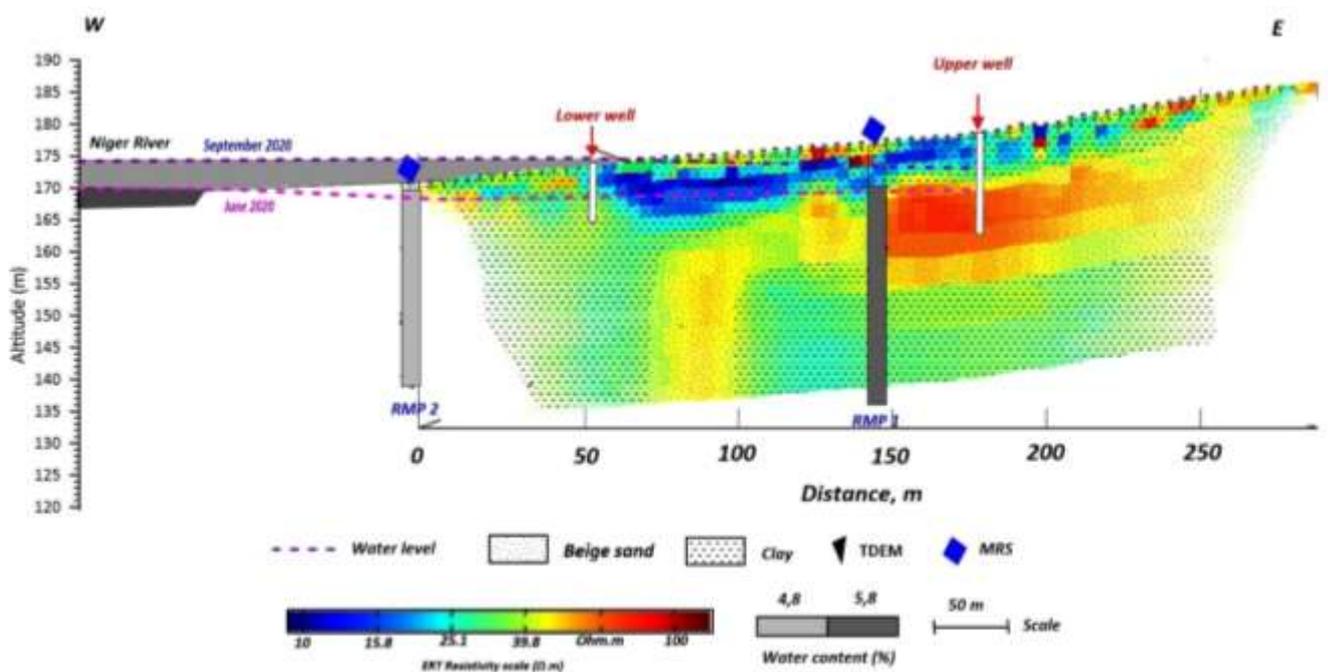


Figure 42: Coupe hydrogéophysique du site de Gongga Zougou avec la méthode de ERT (cf. localisation en Figure 15)

Les résultats de la géophysique (Figure 42 et Figure 43) montrent une stratification à 4 terrains. Le premier terrain est conducteur avec une résistivité de 8 - 20 Ω .m. Situé au-dessus de 170 m d’altitude, ce terrain conducteur a une épaisseur comprise entre 5 et 9 m d’après l’ERT. Il n’est présent que dans la partie centrale de la coupe hydrogéophysique. La comparaison des valeurs de résistivité à la géologie des forages et aux l’affleurements dans les ravines permet d’identifier ce premier terrain comme de l’argile blanche. On observe un second terrain très résistant (100-2000 Ω .m) avec une épaisseur moyenne de 10 m qui disparaît vers l’ouest au contact avec le fleuve. Ce terrain correspond à une couche de sable beige d’après la géologie du forage de Gongga Zougou. Vient ensuite le troisième terrain relativement conducteur (\sim 30 Ω .m). Les logs

géologiques qualifient ce terrain d'argile blanche de 18 à 19 m d'épaisseur et les échantillons recueillis pendant le sur-creusage du puits du haut confirme la présence de kaolinite entre 14 et 16 m de profondeur. Enfin on a un quatrième terrain qui est très résistant et visible uniquement sur la coupe des sondages TDEM (Figure 43). De par l'analyse des coupes géologiques, ce quatrième terrain correspond au socle de granite fissuré que capte le forage de Gongga Zougou et son analogue de Garba Goungou en rive droite qui présente les mêmes caractéristiques. Dans cette partie de la zone d'étude, les sondages RMP indiquent que les 2 terrains intermédiaires (sable beige et argile) ont une teneur en eau comprise entre 4,8 et 5,8%.

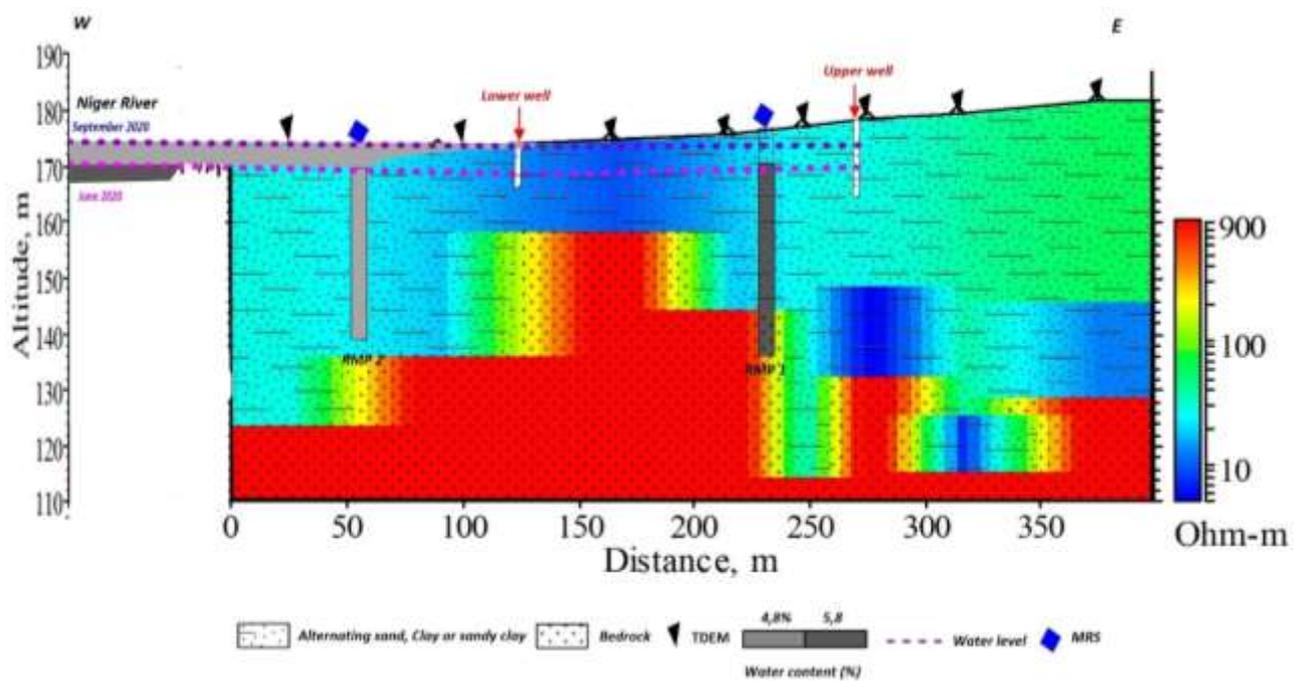


Figure 43: Coupe hydrogéophysique du site de Gongga Zougou avec la méthode TDEM

- **Site amont Sékoukou**

Le site de Sékoukou est situé à 5 km de celui de Gongga Zougou en amont au bord du fleuve également. C'est un site d'observatoire du programme WASCAL de l'Université Abdou Moumouni. Ce site a la particularité d'être doté d'un réseau de mesures climatiques (humidité de l'air, évapotranspiration, pression atmosphérique, température.), d'un pluviographe, d'un forage et de mini forages artisanaux (petit diamètre et faible profondeur). Malheureusement aucun suivi du niveau de l'eau dans la nappe n'a été entrepris sur ce site jusqu'à maintenant. Nous avons réalisé sur ce site des mesures géophysiques permettant de mieux comprendre l'interaction de la nappe avec le fleuve. Nous avons effectué six sondages TDEM et deux

sondages RMP avec les mêmes paramètres que ceux utilisés à Gongga Zougou. Au moment de la rédaction de ce manuscrit, nous n'avons pas terminé le traitement des données qui ne seront donc pas présentés ici. Cependant les premiers résultats indiquent des similitudes avec ceux de Gongga Zougou. En plus du site WASCAL, nous avons également réalisé des sondages TDEM et RMP sur un site intermédiaire dans un Kori du village de Tahirou Koira situé entre Sékoukou et Gongga Zougou. Ce kori charrie énormément d'eau et de sédiments par ruissellement vers le fleuve pendant la saison des pluies comme nous en avons été témoins sur le retour d'une mission.

- **Site de Gongga Zougou à grande échelle (Sadoré – Werkéré – Gongga Zougou)**

La Figure 44 représente une coupe hydrogéophysique interprétée qui caractérise les différentes structures qui composent la géométrie des aquifères en aval de la zone d'étude. Cette coupe a été obtenue par un prolongement des mesures géophysiques sur la rive droite sur le plateau de Sadoré dans le but de comprendre le fonctionnement des aquifères de part et d'autre du fleuve. Sur la rive droite les mesures ont été faites jusqu'au sommet du plateau à Sadoré contrairement à la rive gauche. Dans le souci d'uniformiser les informations sur les deux rives, nous avons également effectué des mesures géophysiques sur le plateau de Gongga Zougou en rive gauche. Malheureusement les données ne sont pas exploitables car l'appareil TEMFAST a rencontré des problèmes techniques au moment des sondages. Faute de temps, ces sondages TDEM n'ont pas pu être refaits. Nous nous contenterons donc des informations recueillies sur le plateau de Sadoré.

L'analyse interprétative de la coupe permet de distinguer trois terrains de résistivités différentes. Le premier terrain est résistant (entre 100 et 500 Ω .m selon l'échelle de couleur de la Figure 44). Son épaisseur moyenne sous le plateau est de 44 m. Ce terrain a été érodé par le fleuve et est absent dans la vallée. Il correspond aux formations du Continental Terminal (CT). De par l'observation faite sur place, il est composé d'oolithes cuirassés et de dépôts de sables fins en surface. En faisant une étude corrélative avec les logs géologiques, ce terrain est aussi composé de sable peu argileux et de latérite. C'est dans ce terrain que se localise l'aquifère des oolithes que capte les puits décrits dans les travaux de Plote (1961).

Le deuxième terrain est conducteur avec une résistivité moyenne de 20 Ω .m qui correspond aux argiles. Ce terrain argileux est continu et présente une épaisseur moyenne d'environ 20 m. Il peut correspondre à la base argileuse de la formation du CT3 et/ou aux altérites du socle.

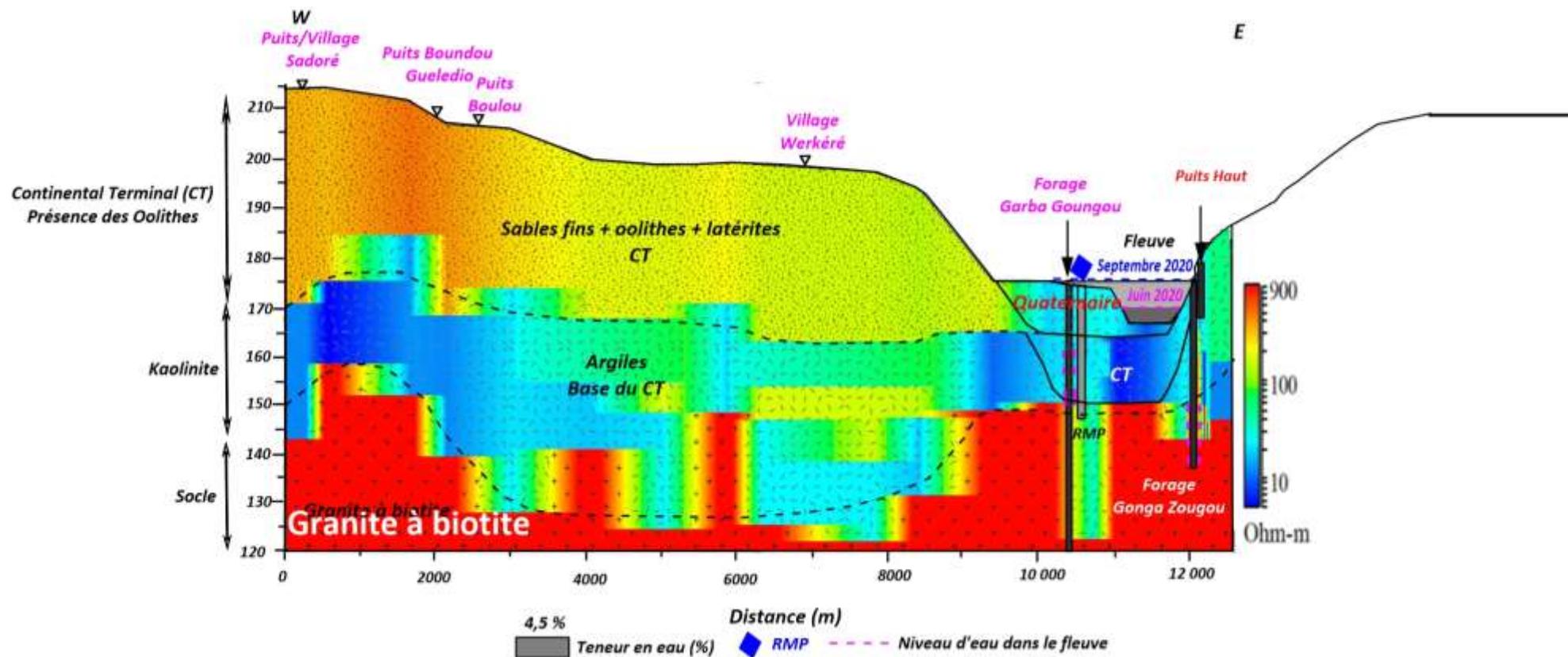


Figure 44: Coupe hydrogéophysique large échelle du site aval de la zone d'étude (Sadoré – Werkéré - Gonga Zougou)

Enfin le troisième terrain est résistant et correspond au socle granitique fissuré que captent les forages dans la vallée du fleuve.

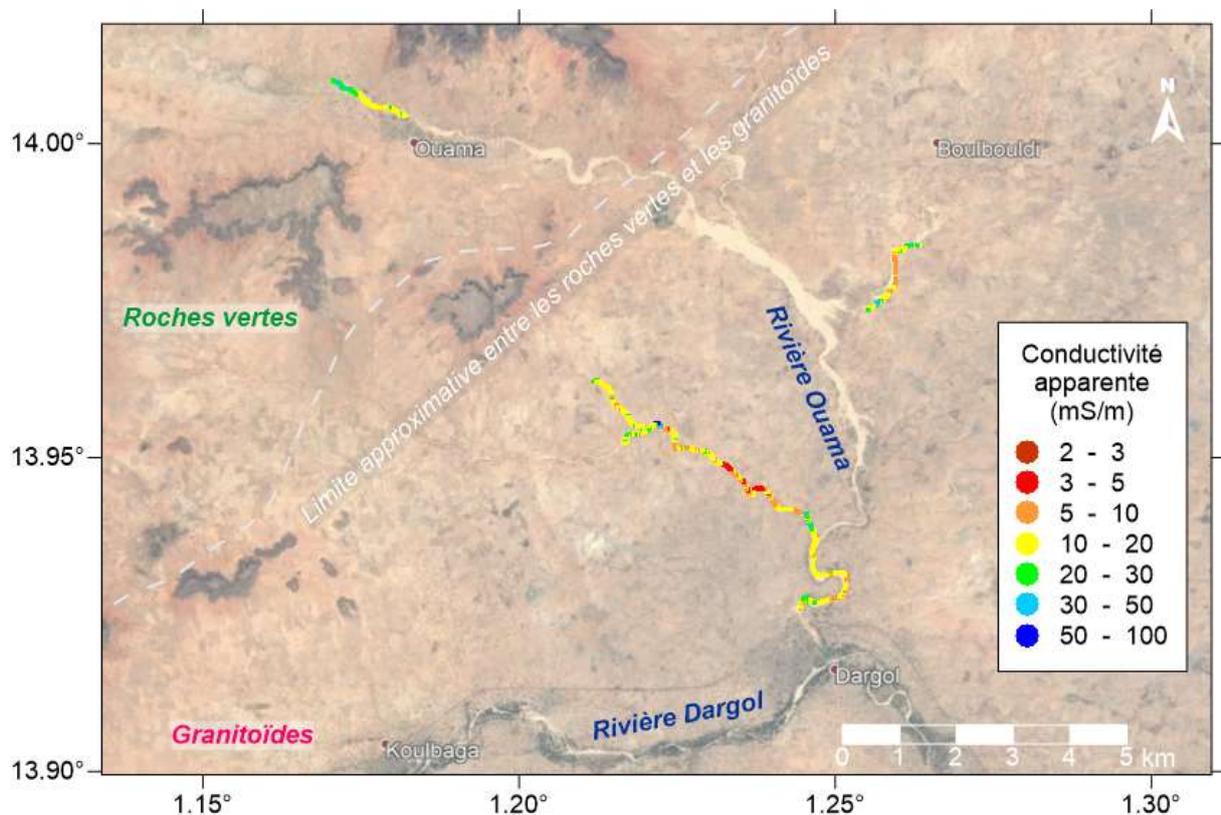
Les résultats RMP montrent que sur ce site aval les aquifères ont une faible teneur en eau comprise entre 4,5 et 5,8 %. En conclusion, la coupe hydrogéophysique permet de valider et extrapoler la coupe géologique faite en aval de la zone d'étude (Figure 29).

4.2.2.1 Ouama - Dargol

Bien que nous n'ayons pas pu finaliser l'étude sur le Dargol en raison des conditions sécuritaires, nous verrons dans cette partie tous les résultats des sondages géophysiques qui ont été faits sur le sous bassin de Ouama.

- **Résultats de la cartographie électromagnétique FEM**

La cartographie électromagnétique avec le CMD-explorer montre une grande variabilité spatiale dans les valeurs de conductivité apparente. Par exemple avec la bobine n°3 qui a la plus grande profondeur d'investigation, ces conductivités varient de 2 à 65 $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Figure 45) ce qui correspond à des résistivités apparentes variant de 15 à 500 $\Omega\cdot\text{m}$.



Nous avons tenté de réaliser des inversions à partir des données électromagnétiques acquises avec le CMD-explorer en utilisant les valeurs des 3 bobines correspondant chacune à une profondeur d'investigation différente. Des exemples de ces inversions sont donnés dans l'annexe 1. N'ayant pas réussi à calibrer les données, l'ajustement de ces données par un modèle de résistivité n'a pas abouti à des résultats satisfaisants. Néanmoins, nous pouvons noter que les valeurs de conductivité mesurées avec les 3 bobines présentent une hétérogénéité de comportement qui traduit une variabilité dans la structuration des six premiers mètres du sous-sol.

Au final, les mesures FEM n'ont pas pu être interprétées quantitativement. Toutefois elles ont mis en évidence des hétérogénéités. La cartographie de ces hétérogénéités nous a aidé à choisir l'emplacement des autres mesures géophysiques.

- **Résultats des sondages électrique verticaux**

Des sondages électriques verticaux ont été réalisés sur six sites sélectionnés en fonction des valeurs de conductivités apparentes FEM dans le but de calibrer ces dernières. Le choix du dispositif de mesure VES n'était pas adapté à la structuration géo-électrique du sous-sol. En conséquence, les résultats de ces sondages électriques ne peuvent pas être interprétés quantitativement. Ils montrent néanmoins la structure géo-électrique du sous-sol (annexe 2) avec en général la présence d'une couche conductrice entre deux couches résistantes, les épaisseurs des couches variant d'un site à un autre. Cette information nous a aidé à choisir le dispositif de mesure pour la tomographie de résistivité électrique (cf. annexe 3).

- **Résultats de la tomographie électrique (ERT)**

Pour caractériser les alluvions du bassin de Ouama, nous avons réalisé quatre tomographie de résistivité électrique (ERT) et 4 sondages RMP (P₁ à P₄). Les résultats de l'inversion des mesures ERT faite par le logiciel *DC2DInvRes* sont issus du couplage des données des dispositifs Alpha et Beta. Ces résultats sont représentés sous forme de variations de gamme de couleurs selon une palette qui correspond à des valeurs de résistivités comprises entre 20 et 2500 $\Omega.m$ pour représenter la distribution spatiale de la résistivité inversée.

La Figure 46 présentent les résultats des mesures ERT et RMP sur 4 sections de la rivière Ouama et ses affluents. Les résultats de nos panneaux combinés à nos connaissances nous renseignent sur la structuration du sous-sol et nous permettent d'avoir une première interprétation.

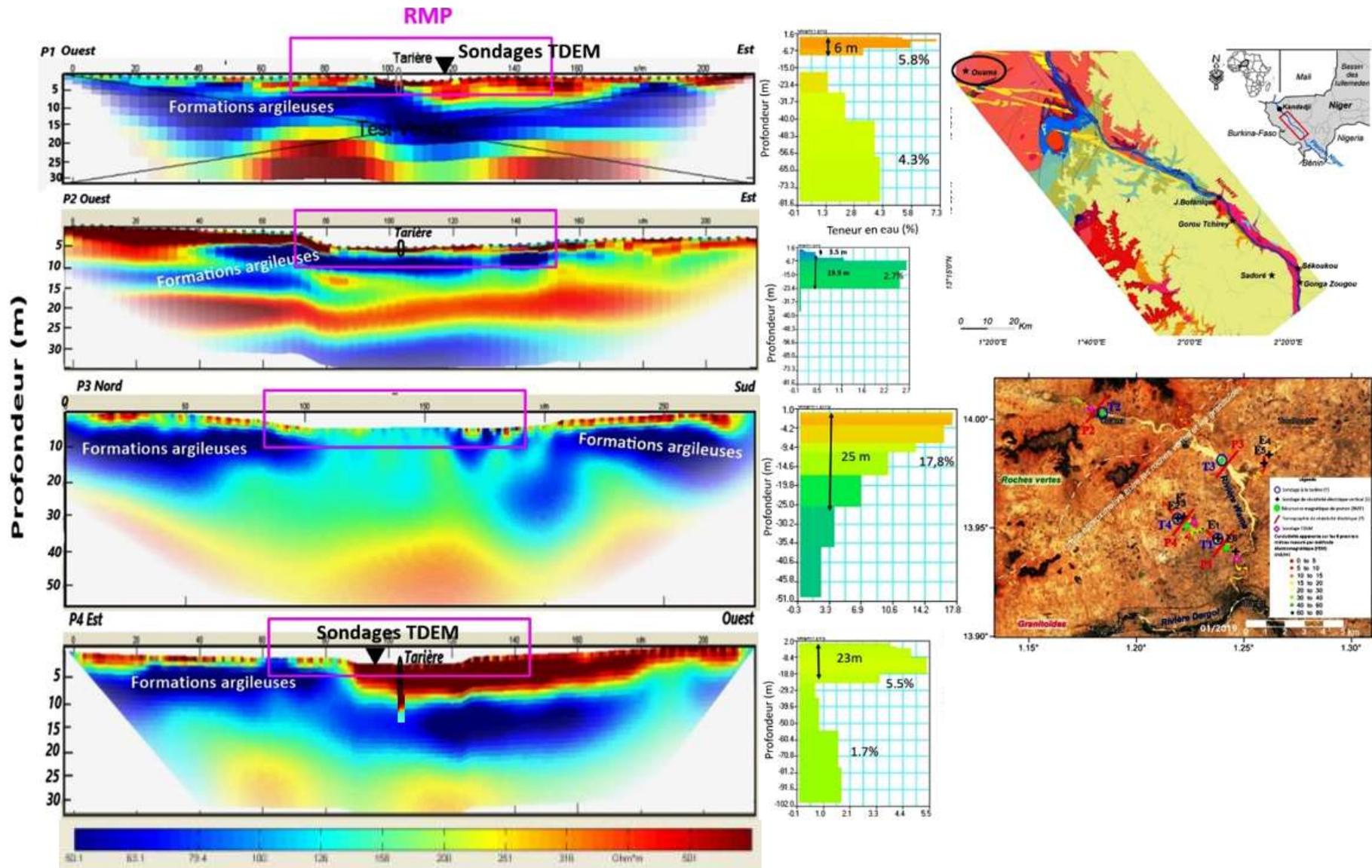


Figure 46: Résultats de l'ERT et des sondages RMP sur le bassin de Ouama

On observe peu de variations horizontales avec en général trois couches à peu près tabulaires qui se superposent de la manière suivante :

- Une première couche en surface, résistante avec une résistivité comprise entre 300 et 2500 $\Omega.m$, d'épaisseur très variable sur un même panneau et entre les panneaux. Cette gamme de résistivité en surface correspond à du sable meuble selon les tableaux de correspondance de résistivité versus nature des roches.
- Ensuite une deuxième couche conductrice (de 25 à 100 $\Omega.m$) d'épaisseur variable qui atteint à certains endroits jusqu'à 20 m de profondeur. Elle correspond à des formations argileuses, vraisemblablement les altérites.
- Enfin la troisième couche qui est très résistante avec des valeurs qui vont au-delà de 500 $\Omega.m$. Cette couche n'est rien d'autre que le socle fissuré ou sain qui apparaît aux environs de 20-25 m de profondeur.

En dehors de ces trois couches, on remarque sur le panneau P2 une quatrième couche conductrice. Sur ce panneau P2 la troisième couche n'est probablement pas du socle mais une couche résistante de nature inconnue qui s'intercale entre les deux zones argileuses. Pour lever le doute sur la nature de la 3^{ème} couche et avoir la profondeur du socle, d'autres investigations sont à prévoir dans le futur.

Le profil P3 présente aussi une particularité dans le creux de la vallée avec un seul terrain de résistivité intermédiaire ($\sim 150 \Omega.m$) au-dessus du socle résistant. Dans les environs, la nappe affleure à moins de 5 cm à certains endroits. Vu les caractéristiques de la nappe (très perméable d'après les résultats RMP), l'infiltration se fait de manière directe dans la ravine. Après ruissellement des eaux de pluies, des mares connectées à la nappe constituent des points d'eau en surface. Sur les berges du côté nord, les villageois creusent le sable un peu plus en profondeur (10-15 cm) pour accéder à la nappe. Localement, on assiste à la formation récente d'une mare permanente (d'après nos échanges avec les villageois) malgré l'irrégularité de la pluie dans la zone. Ce phénomène illustre bien le paradoxe du Sahel qui désigne une augmentation du ruissellement et des stocks d'eau souterrains sur une période récente malgré une pluviométrie déficitaire. Dans cette zone, pour mieux connaître l'étendue de la nappe et l'origine de la mare, des sondages géophysiques complémentaires et un suivi hydrodynamique doivent être prévus à l'avenir.

- **Résultats des sondages RMP**

Les résultats issus des sondages par résonance magnétique des protons sur le bassin de Ouama nous permettent de voir la répartition de l'eau dans les aquifères. Sur les sondages P1 et P4 l'inversion des mesures RMP (Figure 46) révèle la présence de deux niveaux aquifères séparés, tandis que sur P2 et P3 une seule nappe est détectée. Les résultats RMP sont cohérents avec les résultats ERT : les niveaux aquifères détectés par RMP sont localisés sur les terrains résistants de l'ERT ; les niveaux conducteurs sont marqués par l'absence d'eau détectée par RMP ce qui confirme qu'il s'agit de formations argileuses.

Sur les sites P1 et P4 localisés dans un affluent de la rivière Ouama, les 2 aquifères détectés peuvent être attribués à l'aquifère alluvionnaire en surface et l'aquifère du socle fissuré en profondeur. Ces 2 aquifères sont séparés par un niveau argileux imperméable d'après les résultats RMP. L'aquifère alluvial a une teneur en eau relativement faible (5-6%) et une épaisseur variable (~6 m sur P1 et ~20 m sur P2). L'aquifère de socle fissuré semble avoir une faible teneur en eau (2-4 %) mais l'incertitude des résultats RMP en profondeur est importante.

Le sondage P3 situé dans la rivière Ouama là où la nappe est quasi affleurant est caractérisé par un aquifère dont l'épaisseur dépasse 25 m et qui contient une quantité d'eau importante avec des teneurs en eau RMP atteignant 18%. Cet aquifère est interprété comme l'aquifère alluvial. Sur le sondage P2 situé plus en amont sur la rivière Ouama, l'aquifère détecté contient environ 2,5% d'eau, ce qui est très faible. Cet aquifère est relativement profond par rapport aux autres sites (niveau piézométrique RMP autour de 6m de profondeur). Il est surmonté par une formation argileuse d'après les résultats ERT. Il ne doit donc pas s'agir de l'aquifère alluvial qui est sans doute trop fin sur ce site pour être détecté par RMP.

En bref, les résultats RMP et ERT mettent en évidence un aquifère alluvial qui peut être important en termes de ressource en eau. Cela rejoint les observations faites par Plote (1961) dans la région. Cet aquifère alluvial paraît déconnecté de l'aquifère de socle par une formation argileuse (mis en évidence par l'ERT) sauf localement sur le site P3 où la formation argileuse semble avoir été incisée par le kori.

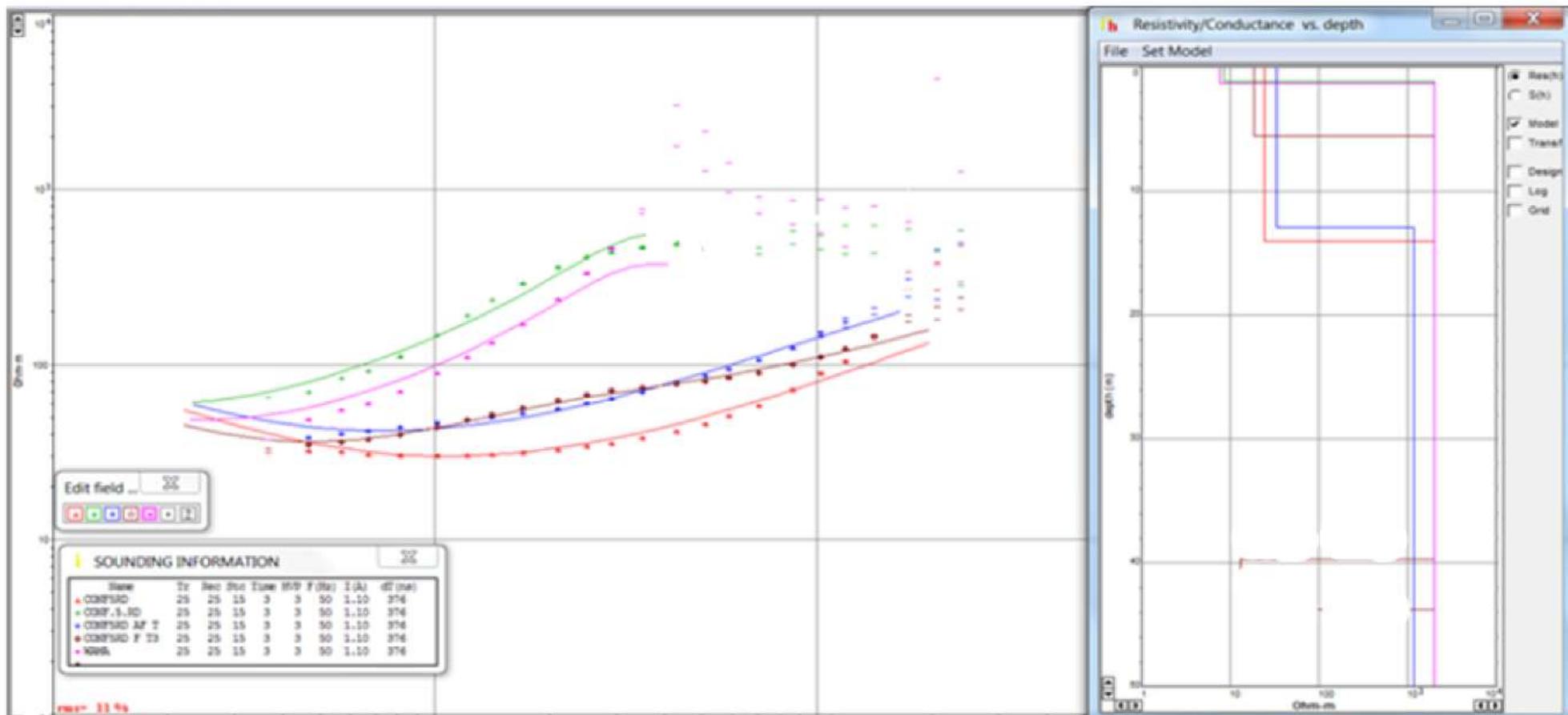


Figure 47: Résultats des sondages TDEM dans le bassin de Ouama

- **Résultats des sondages TDEM**

Sur le bassin de Ouama, nous avons fait quelques sondages TDEM avec des boucles de mesures de 25 × 25 m². Les résultats des sondages TDEM (Figure 47) montrent des variations verticales de résistivité qui peuvent être représentées par un modèle avec 2 couches. Nous observons la présence d'une première couche conductrice d'épaisseur qui varie de 2 à 15 m et avec une gamme de résistivité qui varie de 9 à 50 Ω.m. Cette couche correspond à la deuxième sur nos panneaux électriques avec les mêmes caractéristiques en profondeur et en résistivité. Il faut noter que la méthode TDEM n'est pas très adaptée à la caractérisation des tous premiers mètres du sous-sol. C'est pour cela qu'avec le TDEM nous ne possédons pas d'information sur la première couche résistante détectée par l'ERT. En plus de la couche conductrice, les résultats TDEM montrent une deuxième couche résistante avec une résistivité supérieure à 1000 Ω.m. Devant la faible résolution des mesures TDEM dans ces terrains qui restent relativement résistants, la méthode n'a pas été retenue pour des investigation complémentaires sur le bassin du Dargol.

- **Résultats des sondages à la tarière**

La Figure 48 montre les différentes formations géologiques rencontrées dans le kori du Ouama jusqu'à 3,5 m de profondeur obtenues suite à trois sondages à la tarière effectués au centre de nos panneaux électriques (P1, P2 et P4).

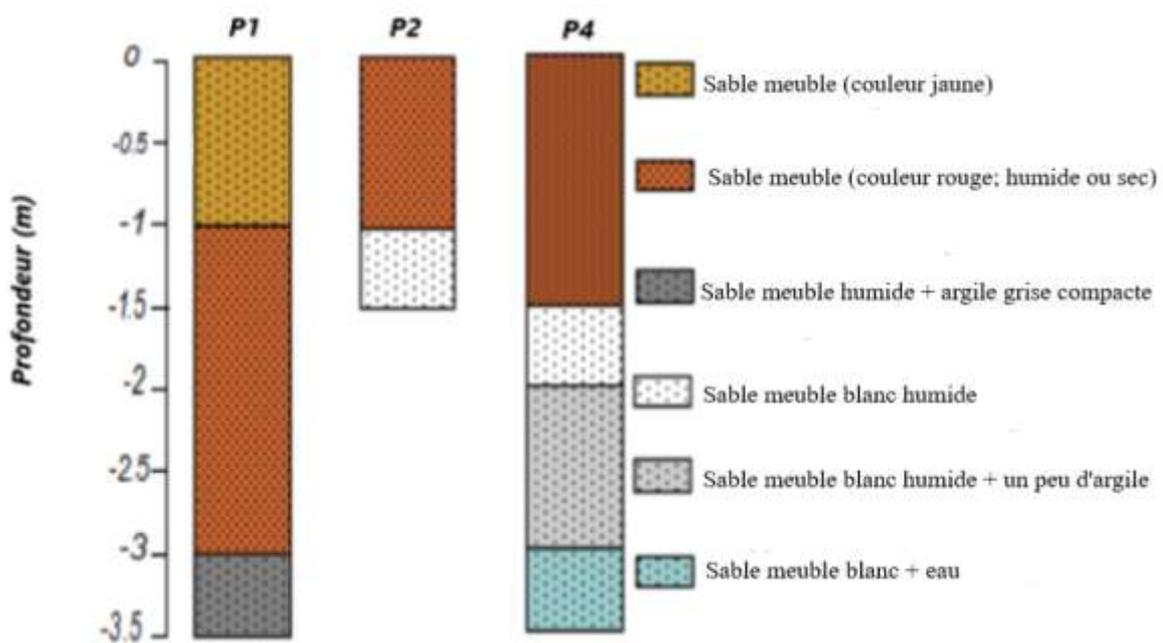


Figure 48: Description lithologiques des échantillons relevés par les sondages à la tarière sur le site de Ouama (Le sondage P3 n'a pas pu être réalisé car sur un site marécageux)

- Le sondage P1 placé sur une zone résistante au centre de la ravine (Figure 48) confirme la présence d'une couche sableuse de 3 m d'épaisseur. Il confirme également la couche argileuse compacte et dure (qui a empêché la poursuite du sondage à la tarière) observée sur le panneau ERT. Nous n'avons pas pu avoir d'information géologique au-delà de 3,5 m de profondeur.
- Le P2 a été fait sur une zone identifiée comme conductrice par les mesures FEM, au milieu de la rivière Ouama (quasiment sèche au moment du sondage). Notre sondage a été interrompu à cause de l'eau d'où la conclusion que la nappe phréatique se trouve à 1,5 m de profondeur dans la rivière. Sur les échantillons remontés, on observe du sable meuble cohérent avec le petit terrain résistant en surface détecté par ERT.
- Enfin le P4 toujours en zone conductrice sur la cartographie FEM, montre des couches sableuses avec peu ou pas d'argile jusqu'à 3,5 m de profondeur. Vient ensuite l'aquifère alluvionnaire visible sur le sondage RMP.

4.2.2.2 Gorou Tchirey

La particularité du site de Gorou Tchirey est qu'une partie du kori reste humide avec de l'eau qui coule depuis des sources en saison sèche et en saison humide vers le fleuve tandis qu'une partie en amont reste sèche en dehors des crues éclaires pendant la saison pluvieuse. Sur ce site, nous avons réalisé des sondages TDEM et RMP suivant un profil dans le lit du kori, affluent du fleuve. L'orientation du profil suit approximativement un sens perpendiculaire au fleuve dans la direction SW – NE sur une longueur de 2,4 km. Nous allons interpréter les résultats TDEM pour la caractérisation de la géométrie de l'aquifère et les résultats RMP pour la quantification des propriétés hydrodynamiques dans la perspective de quantifier les flux.

La Figure 49 montre sur ce site de Gorou Tchirey une stratification des résistivités électriques avec 3 terrains, similaire à celle du site de Niamey dans le lit majeur du fleuve. Le site est composé d'un premier terrain avec une résistivité de $\sim 60 \Omega.m$ qui contient de l'eau d'après les sondages RMP avec une teneur en eau relativement faible (5 à 10%). Ce terrain correspond aux alluvions sableuses de l'affluent (Planche photo 14a). Les alluvions sableuses sur ce site constituent une nappe libre peu profonde et surtout peu épaisse (15 m en moyenne). L'épaisseur des alluvions diminue de l'amont vers l'aval. La nappe des alluvions affleure et forme des sources qui coulent durant toute l'année vers le fleuve. Nous avons estimé le débit de ces sources à $0,033 \text{ m}^3/\text{s}$ par les méthodes du flotteur et du colorant. Un flux d'eau souterrain de la

nappe vers le fleuve a été mis en évidence avec les chroniques piézométriques comparées à la côte du fleuve.

Le deuxième terrain visible sur la coupe hydrogéophysique du site est très conducteur avec des valeurs de résistivité qui varient de 3 à 10 Ω .m. Le terrain a une épaisseur de 20 m en moyenne. C'est un niveau argileux vraisemblablement imperméable (absence d'eau détectable par RMP). D'après les observations faites sur le terrain les argiles proviennent de l'altération du schiste (Planche photo 14b). Sur le forage que nous avons suivi à proximité du site (cf. §2.4.3), la couche argileuse est grisâtre et très compacte au point où les foreurs ont cassé une à deux tige(s) pendant la réalisation du forage. L'observation géologique faite sur le terrain a montré qu'au-dessus du socle argileux altéré, nous retrouvons une formation de conglomérats indurés surmontée de sables (Planche photo 14b). L'ensemble de ces formations a une épaisseur de moins de dix mètres sur les berges du kori.

Ensuite le 3ème terrain résistant (de 100 à 500 Ω .m) est le socle schisteux. Malgré la similitude avec le site du jardin Botanique, ici le socle semble être moins profond.



Planche photo 14: Affleurements dans le kori de Gourou Tchirey et sur ses berges
a- Dépôt de sable alluvionnaire sur le fond du kori ; b - Schiste altéré surmonté par des conglomérats et du sable dunaire

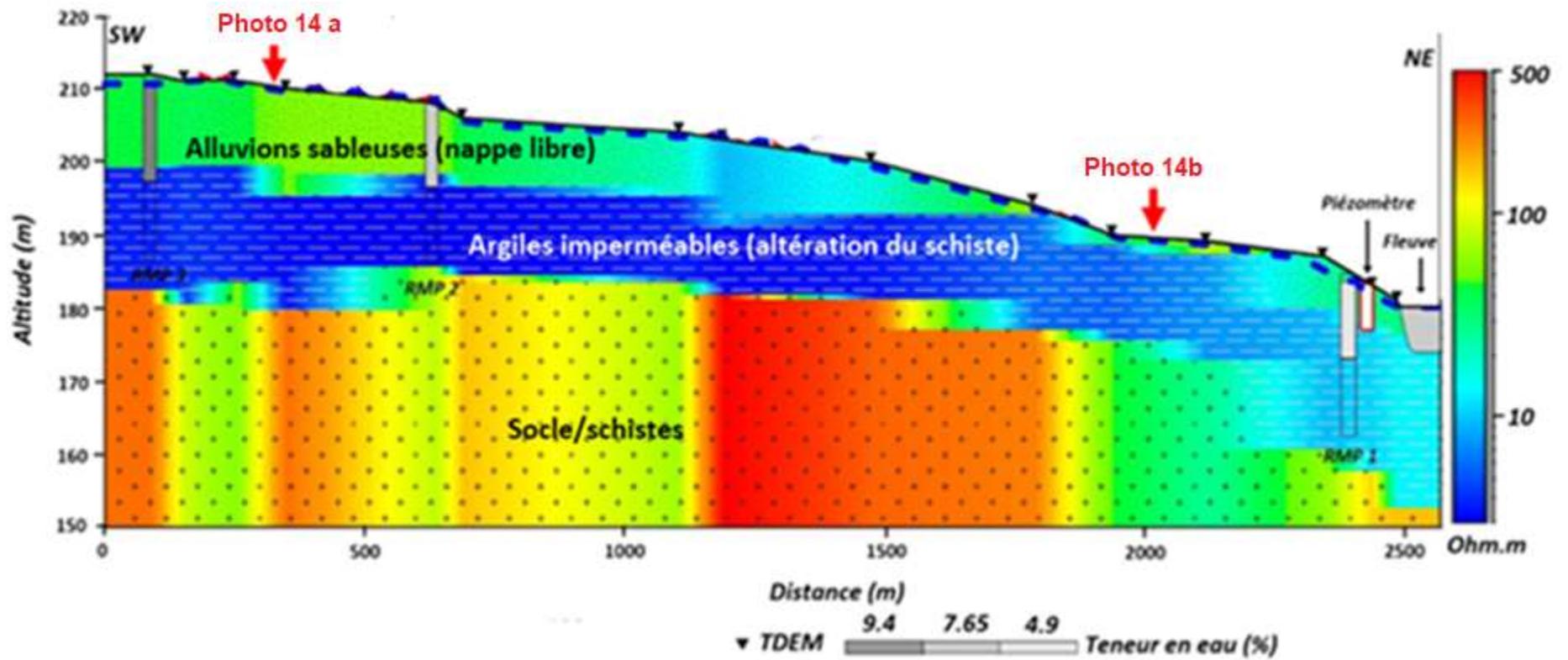


Figure 49: Coupe hydrogéophysique du site de Gorou Tchirey

4.3 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons pu identifier les différentes formations aquifères de la zone d'étude et déterminer leurs principales caractéristiques :

- L'aquifère du CT3. Il est constitué de formation argilo-sableuses. Ces formations sont présentes en rive droite et partiellement en rive gauche, mais sont généralement absentes dans la vallée où elles ont été érodées. Dans la région de Niamey, la base du CT3 qui est en contact avec le socle est argileuse et a priori non aquifère.
- Les aquifères du socle (aquifère des altérites et aquifère du socle fissuré). Ces aquifères proviennent de l'altération des formations schisteuses et granitiques de la zone d'étude. Il est à noter que les altérites ne sont pas toujours aquifères car parfois très argileuses. Leur épaisseur varie de 20 à 40 m selon les sites. A Niamey, leur transmissivité est de l'ordre de $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Les aquifères alluviaux du fleuve et de ses affluents. Ils sont en continuité hydraulique avec les aquifères du CT3 et des altérites de socle. Dans la vallée du fleuve, ils sont formés d'alluvions anciennes et d'alluvions récente argilo-sableuses avec parfois des graviers. Leur épaisseur peut atteindre une quarantaine de mètres. Dans le lit des affluents, les alluvions sont sableuses avec des perméabilités généralement comprises entre $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, mais qui peuvent atteindre $1 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Leur épaisseur atteint localement 25 m dans les grands affluents (Ouama et Dargol), mais ne semble pas dépasser 15 m dans les affluents plus petits comme celui de Gourou Tchirey.

Les flux d'eau souterrains que nous avons mis en évidence par nos suivis piézométriques montrent un comportement complexe qui dépend de l'échelle d'observation, du contexte géomorphologique et géologique, et de la saison :

- A large échelle ($\sim 1 \text{ km}$), les gradients hydrauliques indiquent toujours un flux d'eau de l'aquifère vers le fleuve quel que soit le contexte géologique et la saison. Ce résultat confirme ceux des études antérieures.
- A fine échelle ($\leq 300 \text{ m}$), notre étude a permis de mettre en évidence une diversité de comportement selon les sites. Sur le site de l'université de Niamey (large vallée fluviale présentant un contact socle/alluvion), le niveau piézométrique est toujours plus bas que le niveau du fleuve indiquant un flux d'eau du fleuve vers l'aquifère. A l'inverse, sur le site de Gourou Tchirey (confluence d'un petit affluent avec le fleuve Niger), le niveau

piézométrique est toujours plus haut que le niveau du fleuve indiquant un apport d'eau permanent de l'aquifère vers le fleuve. Quant au site de Gongga Zougou (vallée étroite du fleuve avec un contact CT3/alluvion), le sens du gradient hydraulique dépend de la saison. Sur ce site la comparaison des niveaux piézométriques et limnimétriques montre une alternance entre des périodes où le fleuve recharge l'aquifère et des périodes où l'aquifère alimente le fleuve.

Chapitre 5 : Echanges fleuve-aquifères et Impacts

Chapitre 5 : Echanges fleuve-aquifères et Impacts

Maintenant que nous avons caractérisé les aquifères et déterminé le sens des flux d'eaux souterrains à petite échelle, nous allons chercher quel fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-aquifères peut expliquer nos observations. Cela va nous amener à construire un schéma conceptuel 3D de notre zone d'étude. Les différents flux d'eau souterrains identifiés sur ce schéma seront ensuite quantifiés et comparés au débit du fleuve ainsi qu'aux besoins en eau pour certains usages.

5.1 Fonctionnement de l'hydrosystème fleuve – aquifères

Pour comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-aquifères, nous avons besoin de représenter les niveaux piézométriques dans toutes les dimensions de l'espace. Dans cet objectif, nous proposons de mettre en regard les coupes schématiques 2D de nos sites d'étude avec une représentation sous forme de carte piézométrique. Nous nous focaliserons principalement sur les deux sites qui représentent un contact entre les aquifères régionaux (CT et altérites de socle) et l'aquifère alluvial du fleuve Niger : Niamey à l'amont et Gongga Zougou à l'aval. Cela nous permettra ensuite de proposer un schéma conceptuel général de l'ensemble de la zone d'étude sous forme de bloc diagramme.

5.1.1 Fonctionnement du site amont

Pour rappel, le site amont, localisé sur le campus universitaire de Niamey représente un contact entre l'aquifère des altérites du socle et l'aquifère alluvionnaire du fleuve. Il est situé à un endroit où la plaine alluviale s'élargit (Figure 50a). Sur ce site, les chroniques piézométriques (Figure 31) montrent que les piézomètres du jardin botanique situés à environ 250 m du fleuve ont des niveaux toujours inférieurs au niveau du fleuve, tandis que le forage de la faculté d'agronomie situé à 1 km du fleuve a un niveau toujours supérieur à celui du fleuve.

Comme le sens du gradient hydraulique ne varie pas en fonction de la saison, nous avons choisi, sur ce site, de représenter la carte piézométrique avec le sens des flux à une seule date. Les critères pour choisir cette date sont : i) la disponibilité d'un maximum de données à peu près concomitantes ; ii) une situation où les niveaux varient peu dans le temps afin de diminuer l'incertitude liée au fait que les mesures ne sont pas faites exactement à la même date. La date ainsi choisie est mi-septembre 2014. A cette période nous avons : les mesures manuelles sur les 2 piézomètres du jardin botanique (le 11 septembre) ; des mesures piézométriques réalisées dans le cadre du projet AGES (Vassolo et al. 2015) dans 7 puits ou forages en rive droite dont

celui de la faculté d'agronomie ; le niveau du fleuve à la station hydrométrique de Niamey ; et une vue satellite du 11 septembre permettant de connaître l'emprise du fleuve.

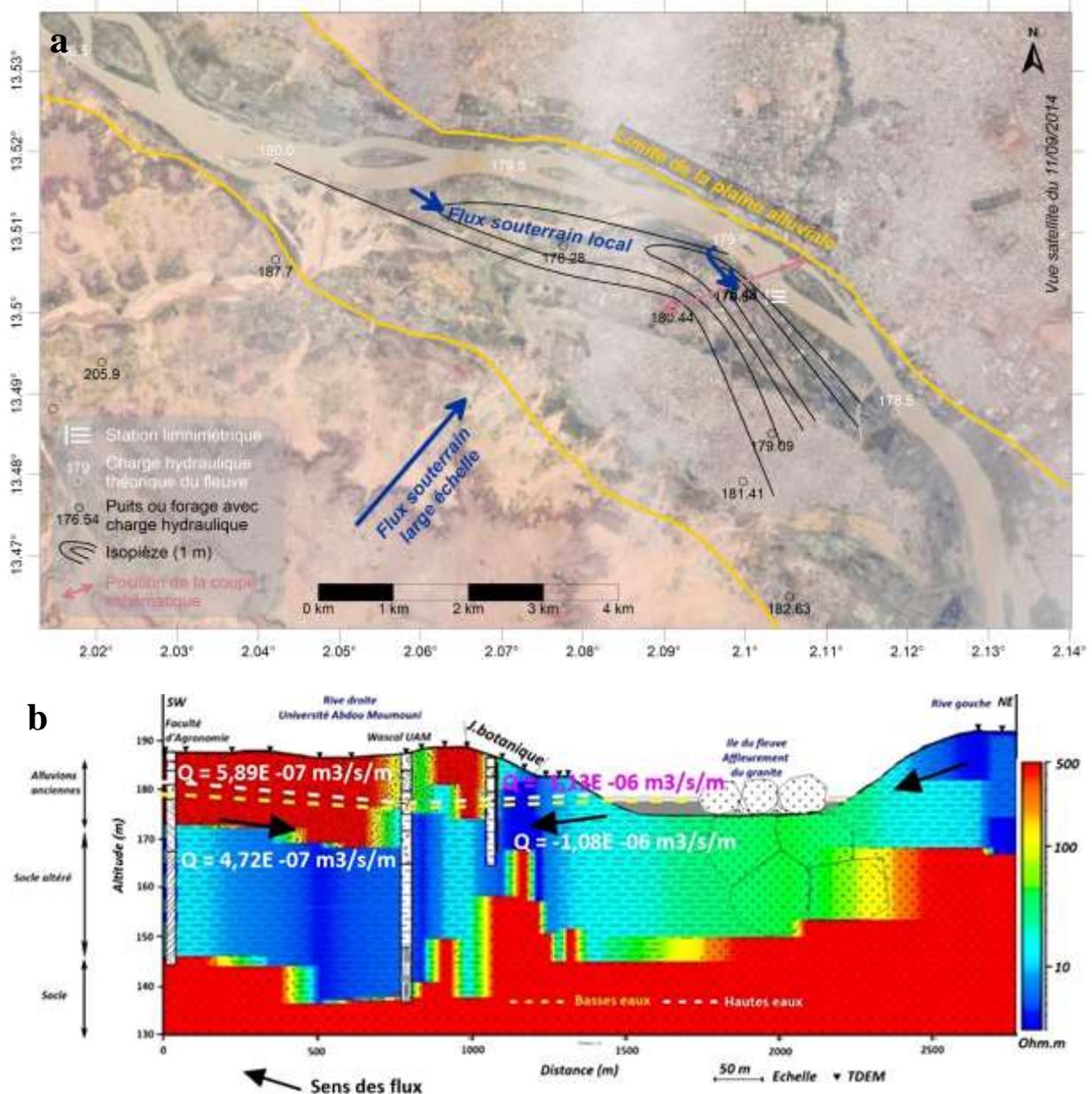


Figure 50: Fonctionnement hydrogéologique d'un contact entre l'aquifère alluvial et le socle (site du jardin botanique). a- Cartes piézométriques d'après les mesures du 11 septembre 2014 et voisines ; b- Coupe schématique représentant les flux le 11 septembre 2014 (hautes eaux) et le 30 juin 2014 (basse eaux)

Pour construire la carte piézométrique, nous avons calculé la charge hydraulique théorique du fleuve à partir du niveau mesuré à la station hydrométrique et en considérant le gradient hydraulique du fleuve de 0.158 ‰ donné par la monographie hydrologique du bassin du Niger (ORSTOM, 1970) pour la section Tillabery-Niamey en période de crue. Les isopièzes ont été tracées à la main en tenant compte de ces charges hydrauliques théoriques du fleuve et des

niveaux piézométriques récoltés. Ces isopièzes ont été tracées uniquement à proximité immédiate du fleuve, les flux souterrains à plus grande échelle étant déjà documentés par ailleurs (Figure 14).

La carte piézométrique ainsi tracée est présentée en Figure 50a. Cette carte piézométrique met en évidence un flux d'eau souterrain du fleuve vers l'aquifère à l'échelle locale ainsi qu'un flux d'eau souterrain dans la même direction que l'écoulement du fleuve. A ces flux s'ajoute le flux souterrain large échelle en direction du fleuve. Sur la vue en coupe (Figure 50b), seul les deux flux opposés (du fleuve vers l'aquifère à proximité du fleuve et inversement lorsqu'on s'en éloigne) sont visibles. Le flux d'eau souterrain qui circule dans le même sens que le fleuve n'apparaît pas sur la coupe car perpendiculaire à elle. On peut qualifier ce flux dans l'aquifère de la plaine alluviale de « inféro-flux ». Le flux d'eau souterrain du fleuve vers l'aquifère à l'échelle locale montre une recharge de l'aquifère par le fleuve. Cette recharge est également perceptible sur les chroniques piézométriques qui sont influencées par la crue guinéenne en saison sèche (Figure 31). Elle peut s'expliquer par l'élargissement de la plaine alluviale au niveau du site d'étude.

5.1.2 Fonctionnement du site aval

Le site de Gongga Zougou à l'aval de notre zone d'étude présente un contact entre l'aquifère du Continental Terminal (CT3), les alluvions du fleuve et le socle. Il est situé à un endroit où le fleuve passe particulièrement près d'un plateau (~500 m). Les chroniques des niveaux piézométriques et du niveau du fleuve (Figure 33 reproduite en haut de la Figure 51) montrent des courbes qui se croisent, indiquant des inversions dans le sens des gradients hydrauliques.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du système fleuve-aquifère sur ce site, nous avons choisi de représenter les niveaux piézométriques en lien avec le niveau du fleuve à trois dates caractéristiques : deux en basses eaux, en début et fin d'étiage ; une au moment du pic de crue du fleuve (le 08/09/2020). Les dates en début et fin d'étiage (05/04/2021 et 30/06/2020 respectivement) ont été choisies de telle sorte que le niveau du fleuve soit le même aux deux dates. Pour tracer les cartes piézométriques nous avons utilisé les mesures dans les 2 puits, le niveau du fleuve, et le gradient hydraulique du fleuve (ORSTOM, 1970). Nous avons fixé le niveau piézométrique sous le milieu du plateau à l'aide de la carte piézométrique générale de la zone d'étude (Figure 2) en tenant compte de la hausse piézométrique pluriannuelle (+ 7 m entre 1997 et 2020 sur le forage de Tioubi d'après les données AMMA-CATCH). Etant donné, le faible nombre de données pour construire les cartes, celles-ci restent schématiques.

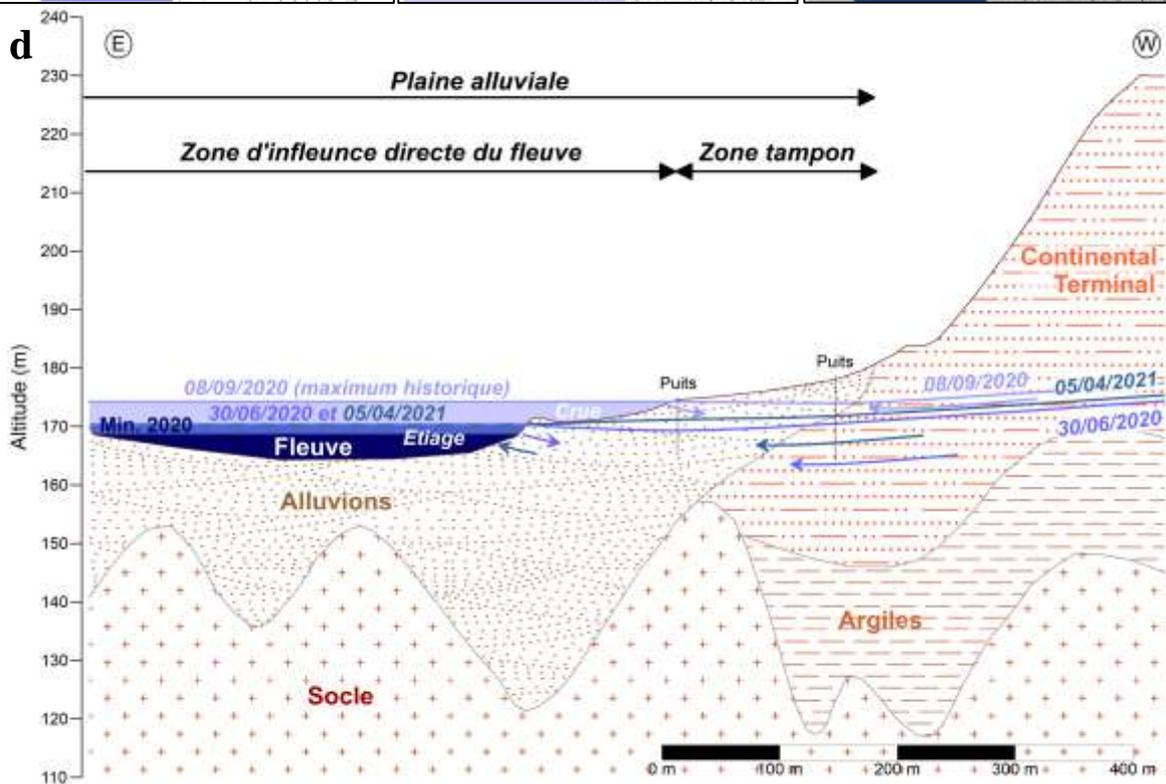
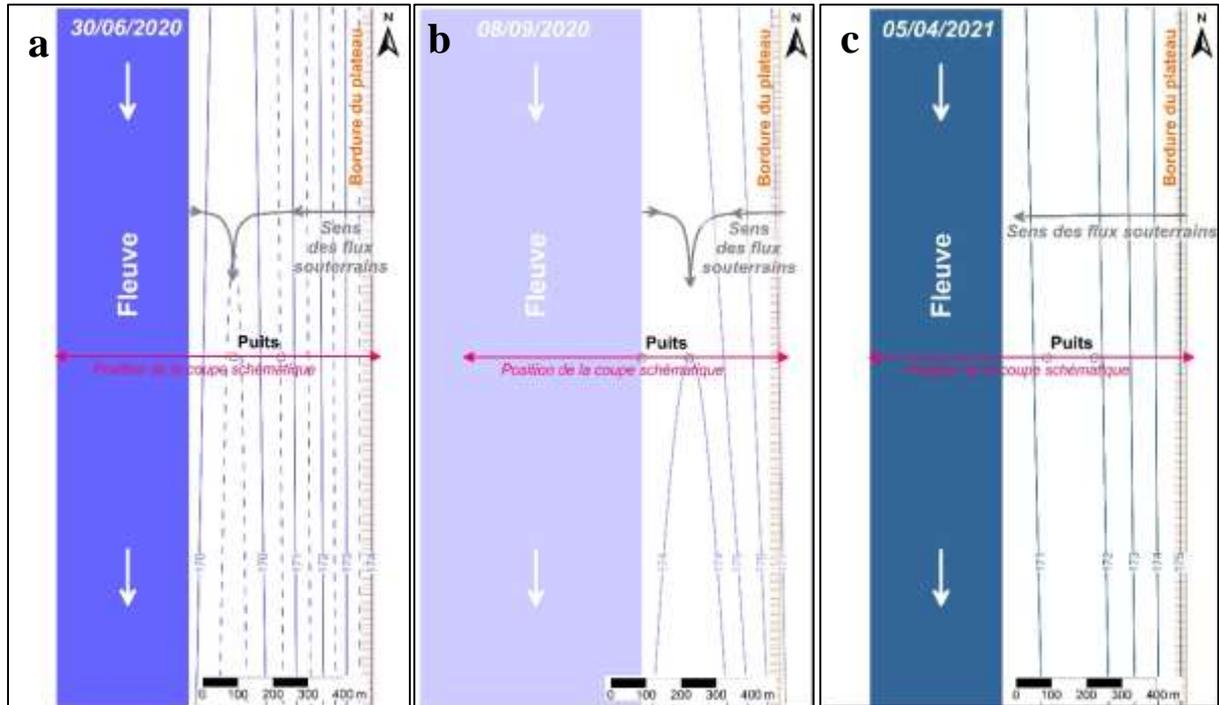
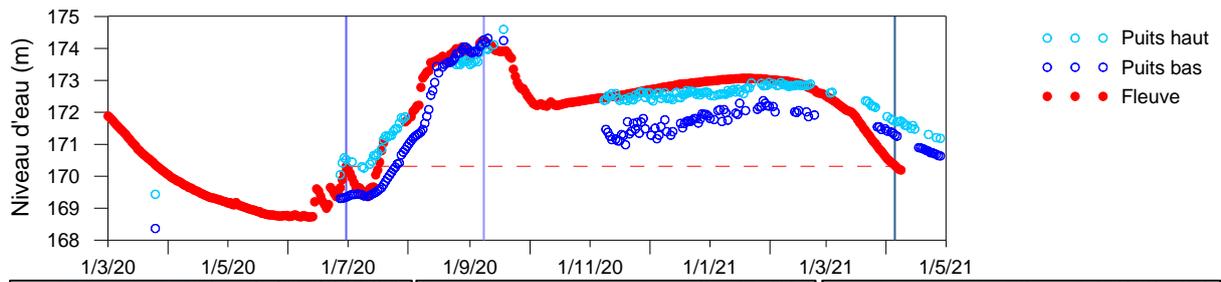


Figure 51: Fonctionnement hydrogéologique d'un contact entre la plaine alluviale et le Continental Terminal (site de Gonga Zougou). a- b- et c- Cartes piézométriques schématiques à des dates caractéristiques (cf. hydrogramme en haut) ; d- Coupe schématique représentant les flux aux mêmes dates.

En fin d'étiage, lorsque le fleuve commence à remonter suite aux premières pluies de la saison, la carte piézométrique (Figure 51a) montre un comportement similaire à celui observé sur le site amont : on observe un flux souterrain large échelle en direction du fleuve, un flux local du fleuve vers l'aquifère et un flux souterrain dans le sens d'écoulement du fleuve (i.e. inféro-flux). Il en est de même au moment du pic de crue (Figure 51b), à la différence que des isopièzes et les flux se décalent avec l'élargissement du fleuve. Lorsque le fleuve se retire pour retourner à son niveau d'étiage (Figure 51c), la charge hydraulique de l'aquifère indique qu'il est en position d'alimenter le fleuve. Le flux du fleuve vers la nappe n'existe plus. A priori, l'inféro-flux est toujours présent, ce qui se traduit par des isopièzes obliques et non parallèles au fleuve.

La coupe schématique du site qui juxtapose les niveaux piézométriques avec la structure géologique issue de l'interprétation des résultats géophysiques (Figure 51d) montre que le fleuve n'interagit pas directement avec l'aquifère du Continental Terminal malgré la proximité du plateau. Il est possible d'expliquer nos observations par un flux d'eau souterrain de l'aquifère du Continental Terminal vers l'aquifère alluvial et des échanges entre le fleuve et cet aquifère alluvial qui agit comme une zone tampon. Ces échanges entre le fleuve et l'aquifère alluvial varient selon les saisons. Lorsque le niveau du fleuve monte avec les apports des écoulements de surface, il dépasse le niveau piézométrique en rivage du fleuve. Le fleuve alimente alors l'aquifère alluvial. Lorsque le fleuve se retire il peut se retrouver à un niveau inférieur à celui de l'aquifère alluvial qui se vidange alors dans le fleuve. Il est à noter que cette situation ne se produit pas systématiquement. Si elle a bien eu lieu pendant l'année d'observation hydrologique 2020/2021 marquée par une crue locale qui a été exceptionnelle par son amplitude et sa durée et par une crue guinéenne importante, une mesure isolée en mars 2020 (cf. hydrogramme de la Figure 51) semble indiquer que le fleuve est resté en position de recharger l'aquifère toute l'année hydrologique 2019-2020. Ainsi nous pouvons penser que le rôle tampon de l'aquifère alluvial ne se fait pas uniquement à l'échelle saisonnière mais également à l'échelle interannuelle.

5.1.3 Cas des affluents

Les résultats géophysiques obtenus sur les affluents du fleuve Niger (site du Dargol et site de Gourou Tchirey) montrent que les alluvions de ces affluents ont une épaisseur conséquente (jusqu'à 25 m). Ces alluvions constituent un aquifère avec un flux souterrain dans le sens des écoulements de surface (inféro-flux). Les écoulements de surface sont majoritairement temporaires et se produisent essentiellement pendant la saison pluvieuse, mais ils peuvent

devenir permanent en bas de versant (ex. site de Gourou Tchirey). L'écoulement de surface permanent indique une résurgence de l'aquifère alluvial au niveau des sources. Nos chroniques piézométriques montrent que cet aquifère alluvial est toujours en position d'alimenter le fleuve, quel que soit la saison et l'échelle spatiale considérée.

5.1.4 Schéma conceptuel général

Les sites expérimentaux que nous avons choisis pour notre étude présentent une diversité de comportements qui permet de mieux cerner le fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-aquifères. A partir de ces comportements que nous venons de décrire, nous avons pu construire un modèle conceptuel général de fonctionnement sous forme de bloc diagramme (Figure 52).

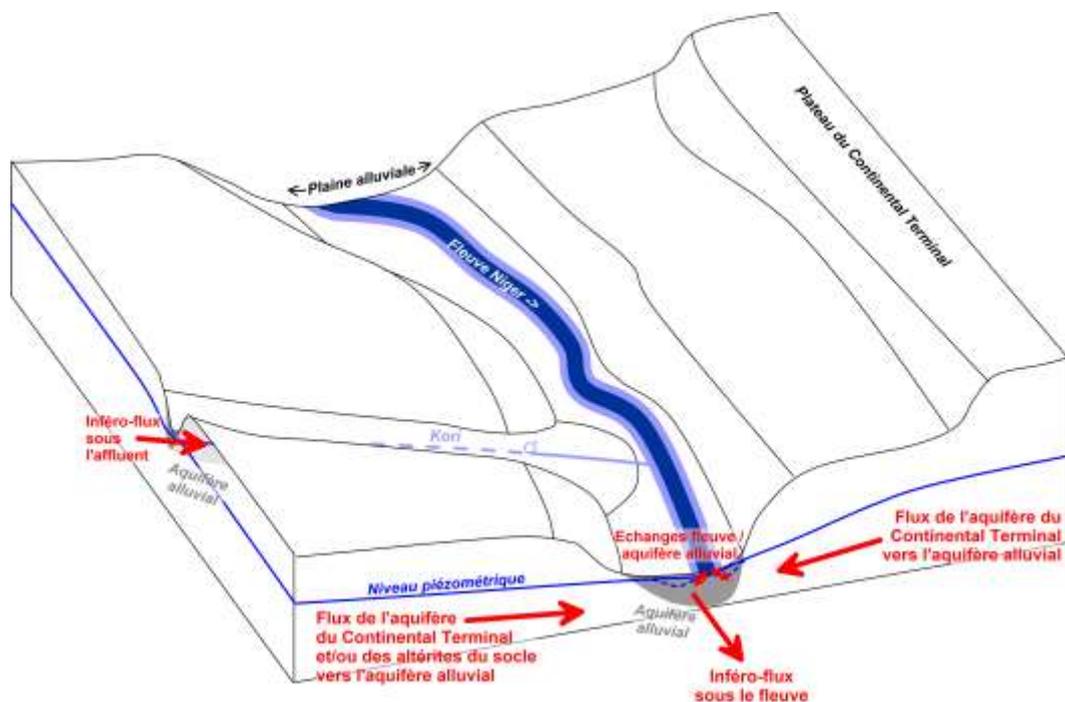


Figure 52: Schéma conceptuel des interactions entre le fleuve et les aquifères qui l'entourent.

Les différents aquifères présents dans la zone d'étude (aquifère du Continental Terminal, aquifère des altérites de socle et aquifères alluviaux) sont en continuité hydraulique à l'échelle de la zone d'étude. Les aquifères du Continental Terminal et des altérites de socle sont drainés par la plaine alluviale. Ils ne sont pas en interaction directe avec le fleuve. Le fleuve interagit avec son aquifère alluvial qui peut être en position d'être rechargé ou drainé par le fleuve selon la géomorphologie de la vallée et selon la saison. L'aquifère alluvial du fleuve, en plus du flux d'eau qu'il reçoit des aquifères du Continental Terminal et des altérites du socle, est alimenté par les aquifères alluviaux de ses affluents dans lesquels circule un inféro-flux. L'aquifère alluvial du fleuve est également soumis à un inféro-flux qui accompagne les écoulements de surface.

5.2 Quantification des flux

Pour quantifier les différents flux d'eau souterrains impliqués dans notre schéma conceptuel (Figure 52), nous avons utilisé la loi de Darcy (équation 1, §3.2.4). Cette loi relie le débit (Q en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) qui traverse une section à la surface de cette section (A en m^2), au gradient hydraulique (i sans unité) et à la perméabilité (K en $\text{m}.\text{s}^{-1}$). En première approximation, les flux d'eau souterrains que nous étudions sont horizontaux. Les sections traversées par ces flux sont donc verticales et la loi de Darcy peut alors se simplifier en la formulation suivante :

$$Q = T \times i \times l \quad (5)$$

où « T » est la transmissivité de l'aquifère (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), c'est-à-dire l'intégrale de la perméabilité sur l'épaisseur saturée de l'aquifère ; « l » est longueur de la section considérée (en m). Dans notre cas, nous avons choisi de calculer les débits par mètre linéaire (q en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}$), ce qui revient à fixer arbitrairement la longueur à 1 mètre. La relation devient alors :

$$q = T \times i \quad (6)$$

Pour calculer les gradients hydrauliques, nous avons utilisé les charges hydrauliques dans les puits et forages (i.e. les niveaux piézométriques) ainsi que la charge hydraulique du fleuve. Les différences de charge sont le plus souvent connues avec une précision centimétrique et la distance entre les points d'observation avec une précision métrique à décimétrique. En conséquence nous considérons que la précision sur les gradients hydrauliques est de manière générale assez bonne, de l'ordre de $\pm 10\%$ de la valeur.

Les valeurs de transmissivité utilisées sont issues de :

- L'essai de pompage du forage de la faculté d'Agronomie pour les calculs sur le site Niamey. Cet essai de pompage est le plus proche du site du jardin botanique et représente une valeur moyenne parmi la gamme de valeur des essais de pompage réalisés en rive droite à Niamey (Tableau 5).
- Les résultats des mesures RMP pour le site du kori de Gourou Tchirey et pour le site aval à Gongga Zougou.

Pour chacune de ces valeurs nous estimons que la précision est de l'ordre d'un facteur 2 (+100%/-50%). C'est donc l'incertitude sur la transmissivité qui engendre la plus grande incertitude sur l'estimation des flux d'eau souterrain. Sauf exception que nous mentionnerons, nous estimons que les flux calculés ont une précision de l'ordre de +110%/-60%.

5.2.1 Flux d'eau entre le fleuve et son aquifère alluvial

Pour quantifier les flux d'eau échangés entre le fleuve Niger et son aquifère alluvial, la charge hydraulique du fleuve a été comparée avec celle dans les ouvrages à proximité sur les sites de Niamey (amont) et Gonga Zougou (aval) à différentes dates. Les dates retenues pour ces calculs correspondent aux périodes caractéristiques du cycle hydrologique 2020-2021 identifiées sur la Figure 51. Sur le site de Niamey, ces flux locaux ont également été calculés pour l'étiage et la crue de 2014 afin de pouvoir les comparer aux flux entre l'aquifère des altérites de socle et l'aquifère alluvial (§5.2.2). Les ouvrages utilisés sont le piézomètre P1 du jardin botanique (équipé d'un enregistreur jusqu'en octobre 2020) et le puits du bas à Gonga Zougou. A noter toutefois une exception au moment du pic de crue en 2020 où ces 2 ouvrages ont été atteints par le fleuve. A cette date, nous avons utilisé le piézomètre P2 du jardin botanique et le puits du haut de Gonga Zougou. L'estimation du flux avec le piézomètre P2 pendant la crue de 2020 est soumise à une forte incertitude du fait de la proximité du fleuve avec le piézomètre à cette date : l'hypothèse d'horizontalité des flux n'est plus valide et le calcul avec l'équation de Darcy simplifiée n'est pas vraiment appropriée dans ces conditions particulières. Les résultats de tous les calculs de flux entre le fleuve et son aquifère alluvial sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7: Estimation des flux d'eau échangés entre le fleuve et son aquifère alluvial à différentes périodes

	Date	Points d'observation	CH (m)	L (m)	i (‰)	T (m ² .s ⁻¹)	q (m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹)
Site amont	18/07/14	Fleuve à Niamey	178.24	262	12.5	2.5×10 ⁻⁴	3.1×10 ⁻⁶
		P1 jardin botanique	174.97				
	16/09/14	Fleuve à Niamey	179.10	213	12.3		3.1×10 ⁻⁶
		P1 jardin botanique	176.48				
	30/06/20	Fleuve à Niamey	177.92	262	20.6		5.2×10 ⁻⁶
		P1 jardin botanique	172.52				
09/09/20	Fleuve à Niamey	181.80	14	(341)	(8.5×10 ⁻⁵)		
	P2 jardin botanique	177.03					
22/06/21	Fleuve à Niamey	177.46	262	3.28	8.2×10 ⁻⁷		
	P1 jardin botanique	176.60					
Site aval	30/06/20	Fleuve à Gonga Zougou	170.31	128	7.50	6×10 ⁻⁴	4.5×10 ⁻⁶
		Puits bas	169.35				
	08/09/20	Fleuve à Gonga Zougou	174.24	135	1.78		1.1×10 ⁻⁶
		Puits haut	174.00				
	05/04/21	Fleuve à Gonga Zougou	170.34	128	-7.42		-4.5×10 ⁻⁶
		Puits bas	171.29				

CH : Charge hydraulique ; L : distance entre les points d'observation ; i : gradient hydraulique entre le fleuve et l'ouvrage de référence ; T : transmissivité ; q : flux par mètre linéaire entre le fleuve et l'aquifère alluvial. Un flux positif indique que le fleuve recharge l'aquifère ; un flux négatif indique que le fleuve est alimenté par l'aquifère. Les valeurs entre parenthèses correspondent à des valeurs de plus grande incertitude. Fond jaune : étiage ; fond bleu : période de crue.

Les flux entre le fleuve et l'aquifère alluvial sont très variables dans le temps et dans l'espace (Tableau 7). La variabilité dans le temps se marque par une variabilité saisonnière et une variabilité interannuelle. Ainsi, le flux d'eau du fleuve vers l'aquifère alluvial est bien plus important à l'étiage 2020 qu'à l'étiage 2021 à la fois sur le site amont et sur le site aval où ce flux devient même négatif, c'est-à-dire qu'il s'inverse et que l'aquifère alimente le fleuve. Sur le site amont, le flux d'eau pendant l'étiage 2014 est intermédiaire entre l'étiage 2019 et l'étiage 2020. Or la pluviométrie à Niamey en 2013 a été légèrement déficitaire (cumul de 421 mm à la station de l'IRD) ; elle a été très déficitaire en 2019 (cumul de 345mm) et excédentaire en 2020 (cumul de 684 mm). On peut donc imaginer que le flux du fleuve vers l'aquifère alluvial à l'étiage dépend de la saison pluvieuse précédente : après une saison pluvieuse déficitaire, l'aquifère qui s'est moins rechargé est en position plus basse par rapport au fleuve qui, en conséquence l'alimente davantage ; inversement après une saison pluvieuse excédentaire l'aquifère se retrouve dans une position plus haute et reçoit moins d'eau du fleuve voire lui en restitue. Ce mécanisme aurait besoin d'être modélisé pour être validé, mais ces résultats mettent bien en évidence le rôle tampon de l'aquifère alluvial.

En termes de variabilité spatiale, le site de Niamey présente un flux d'eau du fleuve vers l'aquifère alluvial toujours plus important que sur le site de Gongga Zougou. Une explication à cette différence est liée à la géomorphologie des sites : le site de Niamey est situé là où la plaine alluviale s'élargit (vallée de 4.6 km de large) tandis que le site de Gongga Zougou est situé à un point où la plaine se rétrécit (vallée de 2.8 km de large). Il est probable que dans des localités où la plaine alluviale se rétrécit encore davantage (plus en aval de la zone d'étude), l'aquifère alluvial soit toujours en position d'alimenter le fleuve.

5.2.2 Flux d'eau souterrain des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial du fleuve

Pour calculer les flux d'eau des aquifères des altérites du socle et du Continental Terminal (CT) vers l'aquifère alluvial du fleuve, nous avons utilisé les gradients piézométriques entre 2 ouvrages proches dans la vallée alluviale : le forage P1 du jardin botanique et le forage de la Faculté d'Agronomie sur le site de Niamey ; les deux puits sur le site de Gongga Zougou. Les mesures ayant été faites dans la vallée alluviale, les gradients piézométriques utilisés pourraient être perturbés par le flux d'eau du fleuve vers l'aquifère alluvial. Dans ce cas il est possible que les flux des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial soit légèrement sous-estimé. Le calcul de ces flux sur le site de Niamey a été effectué pour l'année 2014, car c'est là que les données du forage de la Faculté d'Agronomie sont disponibles (Vassolo et al. 2015). Un calcul a été fait

en période d'étiage (juillet) et un en période de crue (septembre). Sur le site de Gongga Zougou, un seul calcul a été effectué pour l'étiage 2020 car pendant la crue l'influence du fleuve sur les niveaux piézométriques dans les puits a empêché de déterminer le flux en provenance de l'aquifère du Continental Terminal.

Tableau 8: Estimation des flux d'eau souterrain des aquifères régionaux (altérite du socle et Continental Terminal) vers l'aquifère alluvial du fleuve

	Date	Point d'observation	NP (m)	L (m)	i (‰)	T (m ² .s ⁻¹)	q (m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹)
Altérites	18/07/14	Forage Fac. Agro.	179.32	807*	5.39	2.5×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻⁶
		P1 jardin botanique	174.97				
	16/09/14	Forage Fac. Agro.	180.44	807*	4.91		1.2×10 ⁻⁶
		P1 jardin botanique	176.48				
CT	30/06/20	Puits haut	170.53	135	8.74	6×10 ⁻⁴	5.2×10 ⁻⁶
		Puits bas	169.35				

NP : Niveau piézométrique ; L : distance entre les points d'observation ; * la distance considérée n'est pas la distance entre les deux ouvrages mais la distance entre leur projection sur une droite perpendiculaire au fleuve ; i gradient hydraulique ; T : transmissivité ; q : flux par mètre linéaire entre l'aquifère régional et l'aquifère alluvial. Fond jaune : étiage ; fond bleu : période de crue.

Le Tableau 8 présente les résultats des calculs des flux des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial. On remarque que le flux du CT à l'étiage 2020 est plus important que le flux des altérites du socle à l'étiage 2014. Vraisemblablement les deux aquifères n'ont pas la même influence sur l'aquifère alluvial. Toutefois la différence entre les valeurs pourrait être perturbée par la variabilité interannuelle mise en évidence au paragraphe précédent (5.2.1). En 2014, le flux de l'aquifère des altérites du socle varie peu entre la période d'étiage et la période de crue. La comparaison du Tableau 7 et du Tableau 8 montre que, sur le site amont, le flux de l'aquifère des altérites est moins important que le flux du fleuve vers l'aquifère alluvial. Au contraire sur le site aval, le flux de l'aquifère du Continental Terminal est plus important que celui du fleuve vers l'aquifère alluvial. Cette différence peut s'expliquer par une combinaison de facteurs géologique et géomorphologique.

5.2.3 Inféro-flux des affluents vers le fleuve

Les flux d'eau souterrains dans l'aquifère alluvial d'un affluent du fleuve Niger ont été estimés sur le site de Gourou Tchirey en utilisant la charge hydraulique dans le forage et la charge hydraulique du fleuve. Tout comme précédemment, il est possible que cette estimation soit biaisée par le flux d'eau du fleuve vers son propre aquifère alluvial. Pour vérifier la cohérence de nos résultats, les mesures RMP effectuées en amont du kori de Gourou Tchirey ont également été utilisées. La précision sur la charge hydraulique estimée par RMP est faible car le sondage RMP n'a pas été nivelé et car l'incertitude sur le niveau piézométrique RMP est de l'ordre du mètre. De plus, les mesures RMP ont été réalisées avant que le piézomètre soit foré

et les mesures de charges hydrauliques pour le calcul du gradient ne sont donc pas concomitantes. Toutefois, comme la distance entre le piézomètre et la mesure RMP est grande (2.2 km), la répercussion de l'incertitude de la charge hydraulique RMP sur l'estimation du gradient hydraulique est faible. En conséquence l'inféro-flux calculé à l'aide des mesures RMP, bien que peu précis, est considéré de qualité correcte.

Le calcul de l'inféro-flux dans l'aquifère du kori de Gourou Tchirey a été effectué en période d'étiage et au pic de crue 2020. Cet inféro-flux a été calculé par mètre linéaire pour comparaison avec les flux calculés au paragraphes précédents (5.2.1 et 5.2.2). Il a ensuite été multiplié par la largeur moyenne du kori (50 m) pour évaluer la contribution totale de l'aquifère alluvial.

Tableau 9: Estimation de l'inféro-flux sous le kori de Gourou Tchirey

	Date	Point d'observation	CH (m)	L (m)	i (‰)	T (m ² .s ⁻¹)	q (m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹)	Q (m ³ .s ⁻¹)
Gorou Tchirey	15/03/20	RMP3	207	2180	13	2×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁴
	04/07/20	Piézomètre	177.78					
		Fleuve	175.48	200	11.5		2.7×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻⁴
	11/09/20	Piézomètre	180.07	90	2.78		5.6×10 ⁻⁷	2.8×10 ⁻⁵
		Fleuve	179.82					

CH : Charge hydraulique ; L : distance entre les points d'observation ; i gradient hydraulique ; T : transmissivité ; q : inféro-flux par mètre linéaire dans l'aquifère alluvial du kori de Gourou Tchirey ; Q : inféro-flux dans l'aquifère alluvial du kori sur toute sa largeur. Fond jaune : étiage ; fond bleu : période de crue.

Les résultats des calculs d'inféro-flux dans l'aquifère alluvial du kori de Gourou Tchirey sont présentés dans le Tableau 9. Les flux calculés à l'étiage entre le sondage RMP et le piézomètre, d'une part, et entre le piézomètre et le fleuve d'autre part, sont similaires. Cette similitude suggère qu'à l'étiage le flux du fleuve vers son aquifère alluvial sur le site de Gourou Tchirey est négligeable par rapport à l'inféro-flux du kori qui alimente le fleuve. Au moment du pic de crue en 2020, l'inféro-flux calculé semble bien plus faible que celui à l'étiage, ce qui est étonnant car la crue correspond à une période de recharge des aquifères. Il est probable cette valeur calculée en période de crue soit perturbée par le flux d'eau du fleuve vers son aquifère alluvial.

En période d'étiage, l'inféro-flux dans l'aquifère alluvial du kori de Gourou Tchirey (Tableau 9) est du même ordre de grandeur que le flux des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial du fleuve (Tableau 8). Cela semble indiquer qu'à cette période l'aquifère alluvial du kori est en équilibre hydraulique avec les aquifères régionaux.

L'inféro-flux total dans l'aquifère du kori de Gourou Tchirey est d'environ 10 m³ par jour. Cela est 100 à 200 fois moins que le flux dans l'aquifère de la paléo-vallée du dallol Maouri (Abdou Mahaman et al. 2021) qui rejoint le fleuve Niger à la frontière triple Niger-Bénin-Nigéria.

5.2.4 Inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve

Pour estimer l'inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve, nous avons comparé les niveaux piézométriques dans les ouvrages situés au plus proche du fleuve sur le site de Niamey et sur le site aval : piézomètre P1 du jardin botanique et puits du bas de Gongga Zougou. Ces ouvrages sont situés entre 100 et 300 m du rivage du fleuve à l'étiage et ils ont été tous les deux atteints par le fleuve au moment de la crue exceptionnelle de 2020. Il est à noter que les ouvrages du site de Gongga Zougou n'étant nivelés que de manière relative sans rattachement à une valeur absolue (cf. §3.2.3), la précision sur la différence de charge entre les deux ouvrages est assujettie à une incertitude d'ordre métrique. Toutefois la distance entre ces ouvrages étant importante, l'estimation du gradient hydraulique utilisé pour le calcul de flux garde une précision acceptable ($\pm 30\%$ de la valeur). La transmissivité utilisée pour le calcul de flux est une valeur moyenne entre les 2 sites considérés. Tout comme pour le calcul de l'inféro-flux de l'affluent, l'inféro-flux du fleuve a été calculé par mètre linéaire ainsi que pour l'ensemble de la largeur de la vallée fluviale (4 km en moyenne d'après ORSTOM, 1970).

Tableau 10: Inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve Niger entre le site amont et le site aval

Date	Point d'observation	NP (m)	L (km)	i (%)	T (m ² .s ⁻¹)	q (m ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹)	Q (m ³ .s ⁻¹)
30/06/20	P1 jardin botanique	172.52	46.5	0.068	4×10 ⁻⁴	2.7×10 ⁻⁸	1.1×10 ⁻⁴
	Puits bas Gongga Zougou	169.35					
08/09/20	P1 jardin botanique	176.99		0.058		2.3×10 ⁻⁸	9.4×10 ⁻⁵
	Puits bas Gongga Zougou	174.27					

NP : Niveau piézométrique ; L : distance entre les points d'observation ; i gradient hydraulique ; T : transmissivité ; q : inféro-flux par mètre linéaire dans l'aquifère alluvial du fleuve ; Q : inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve sur toute sa largeur. Fond jaune : étiage ; fond bleu : période de crue.

Le Tableau 10 présente les résultats des calculs d'inféro-flux dans l'aquifère alluvial du Niger en période d'étiage et de crue. Les gradients hydrauliques dans l'aquifère en 2020 sont du même ordre de grandeur que le gradient hydraulique du fleuve mesuré en 1955 (ORSTOM 1970) entre Niamey et Say (situé à 12 km en aval de Gongga Zougou) en période d'étiage (0.073 ‰) et en période de crue (0.067 ‰). Cela suggère un certain équilibre entre le fleuve et son aquifère alluvial à l'échelle de la zone d'étude. L'inféro-flux du fleuve par mètre linéaire est deux ordres

de grandeurs inférieurs aux autres flux identifiés sur notre schéma conceptuel. Même intégré sur toute la largeur de la vallée fluviale, le flux d'eau souterrain parallèle aux écoulements de surface est faible (8 à 9 m³/jour) et complètement négligeable par rapport au débit du fleuve.

5.3 Impact des eaux souterraines sur le débit du fleuve et sur la gestion intégrée des ressources en eau

5.3.1 Influence des aquifères sur le débit du fleuve

Pour discuter de l'impact des eaux souterraines sur le débit du fleuve, nous allons extrapoler les calculs des flux réalisés dans notre zone d'étude sur une portion du fleuve allant du barrage de Kandadji (dont la mise en service est prévue pour 2025) jusqu'à la frontière avec le Nigéria à Dolé. Cette portion mesure 530 km de long. En amont (jusqu'à Tillabéry en rive gauche et Niamey en rive droite) la vallée alluviale est essentiellement en contact avec les formations de socle ; en aval, elle est bordée majoritairement par les formations du Continental Terminal.

Si à l'échelle pluriannuelle le fleuve est vraisemblablement en équilibre avec l'aquifère alluvial dans la zone d'étude, le rôle tampon de l'aquifère alluvial lui permet à une échelle de temps plus courte d'amortir les crues et de soutenir les étiages. Nous avons utilisé nos données récoltées pendant l'année de crue exceptionnelle en 2020 et l'étiage qui a suivi en 2021 pour quantifier ce rôle tampon. Supposant que la contribution de l'aquifère alluvial dépend essentiellement de la géomorphologie et peu du contact avec les aquifères régionaux, nous avons utilisé les valeurs de flux obtenus sur le site de Niamey et de Gongga Zougou (Tableau 7) que nous avons attribué à 530 km de rivage chacune pour représenter les deux rives entre Kandadji et Dolé (Tableau 11). Nous avons également calculé le flux environnemental des aquifères régionaux vers la vallée alluviale, cette fois en tenant compte du contexte géologique (Tableau 11). Les inféro-flux des affluents ont été négligés car leur valeur par mètre linéaire et du même ordre que celle du flux des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial.

La capacité de l'aquifère alluvial à amortir une crue du fleuve est très limitée si on compare le flux d'eau du fleuve vers l'aquifère de 46 m³.s⁻¹ avec le débit des écoulements de surface dépassant 3000 m³.s⁻¹ pendant la crue locale de 2020. De même, la capacité de l'aquifère à soutenir les étiages reste modeste : elle représente moins de 2 % du débit de base (120 m³.s⁻¹) prévu à la sortie du barrage de Kandadji. Ceci peut toutefois être significatif en conditions naturelles lors des étiages sévères. Ainsi pour l'étiage de 2018 (cf. §1.5) l'aquifère alluvial aurait pu contribuer à 13% des écoulements de surface. En cas d'alerte orange correspondant à un débit du fleuve passant sous le seuil de 10 m³.s⁻¹, cette contribution pourrait même aller

jusqu'à près de 20%. Il est à noter que cette contribution de l'aquifère est variable dans l'espace. Elle n'a jamais été observée par exemple sur la ville de Niamey où le fleuve est toujours en position de recharger l'aquifère alluviale, ce qui rend la capitale particulièrement vulnérable aux sécheresses du fleuve. L'apport des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial ($4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est quant à lui significatif en période d'étiage.

Tableau 11: Estimation approximative des débits d'eau souterrains sur la portion Kandadji-Dolé

Capacité de l'aquifère alluvial à amortir une crue du fleuve	<p><u>Hypothèses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 530 km avec un flux de $8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ • 530 km avec un flux de $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <p>Total : $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</p>
Capacité de l'aquifère alluvial à soutenir l'étiage du fleuve	<p><u>Hypothèses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 530 km avec un flux de $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ • 530 km avec un flux de $-8.2 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <p>Total : $1.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</p>
Contribution des aquifères régionaux à l'aquifère alluvial	<p><u>Hypothèses :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 76 km en rive gauche et 194 km en rive droite avec un flux de $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ • 454 km en rive droite et 336 km en rive gauche avec un flux de $5.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ <p>Total : $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$</p>

5.3.2 Comparaison des flux souterrains avec les besoins en eau dans la vallée

Pour juger de la significativité des flux souterrains en dehors de leur contribution au débit du fleuve, il est apparu nécessaire de comparer ces flux aux besoins en eau pour différents usages. Le Tableau 12 recense les principaux besoins en eaux dans la vallée du fleuve Niger entre le barrage de Kandadji et la frontière avec le Nigéria.

Tableau 12: Demande en eau pour certains usages dans la vallée du Niger en aval de Kandadji

Usage	Besoin en eau (en 2025)	Source
Alimentation en eau potable de la vallée du Niger dont la ville de Niamey	Population : 3.3 millions d'habitants Besoin quotidien par habitant : 70 L → Total : $2.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Nodalis et al. (2018)
Abreuvement du bétail	68 millions de m^3 pour 6,25 millions Unités de Bétail Tropical (UBT) → Total : $2.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Nodalis et al. (2018)
Petite irrigation pour le maraîchage	30 m^3 par jour et par hectare	Enquête sommaire auprès de maraîchers

Le flux d'eau souterrain des aquifères régionaux vers l'aquifère alluvial, estimé à $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ est significatif comparé aux besoins en eau potable de la population. Il peut également permettre de couvrir les besoins en eaux pour l'abreuvement du bétail, ce qui est particulièrement important dans cette zone agropastorale où l'alimentation de la population dépend fortement de

l'élevage. En revanche, cet apport d'eau souterraine ne permet pas d'irriguer de grandes surfaces dans la vallée du fleuve. Au mieux, 13 000 hectares pourraient être irrigués avec cet apport si les autres besoins sont couverts par ailleurs. Cette surface ne représente qu'environ 7% de la surface de la vallée du fleuve entre Kandadji et la frontière avec le Nigéria. Ce résultat rejoint les travaux de Nazoumou et al. (2016), qui par d'autres méthodes ont conclu que le potentiel irrigable dans la vallée du fleuve reste limité.

5.4 Synthèse

Dans cette partie nous avons pu confronter notre travail aux travaux antérieurs à travers une analyse quantitative et qualitative de nos résultats. Ceci nous a permis de nous assurer de la concordance de nos résultats avec les études qui ont été faites avant notre travail. Cette partie a aussi permis de s'assurer que notre contribution a amélioré la connaissance des échanges nappes – rivières en bordure du fleuve Niger dans la région de Niamey.

Nous avons pu expliquer les processus hydrogéologiques de la zone d'étude en amont et en aval avec une représentation 3D des flux d'eau souterrains. Les interactions nappe - rivière restent assez complexes et nécessitent un suivi dans les années à venir, ne serait-ce que pour évaluer l'impact des débits contrôlés par le barrage de Kandadji sur les ressources en eau.

Conclusion générale

Conclusion générale

6.1. Synthèse des résultats

Les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont difficiles à observer et à caractériser et de ce fait, elles sont souvent ignorées. Ces interactions dépendent de processus soumis à la variabilité naturelle des précipitations particulièrement importante au Sahel et accentuée par le changement climatique global. Elles sont également affectées par les activités humaines à travers les prélèvements d'eau (pompage dans les aquifères et dans les cours d'eau permanent), les aménagements des cours d'eau, les changements d'états de surface des bassins versants (ex. défrichement en zone rurale ; urbanisation).

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse était de mieux comprendre et quantifier les échanges entre le fleuve Niger et les aquifères qui l'entourent au sud-ouest du Niger dans la perspective d'une gestion durable de la ressource en eau et d'une évaluation des risques d'inondation. Cette étude s'est basée sur une approche méthodologique multidisciplinaire incluant une analyse géologique, des suivis hydrogéologiques et des mesures géophysiques. Quatre sites expérimentaux ont été sélectionnés pour représenter différents types d'interaction entre le fleuve Niger et les différents aquifères de la zone d'étude située dans une zone de transition géologique socle-sédimentaire et de transition hydrologique endoréique-exoréique. Trois de ces sites ont été suivis pendant l'année hydrologique 2020-2021 marquée par une pluviométrie excédentaire à l'échelle de toute l'Afrique de l'Ouest. Cette forte pluviométrie généralisée a provoqué une crue historique du fleuve et nous a offert la chance de documenter des conditions extrêmes.

Les résultats qu'ont apporté cette étude sont résumés ci-dessous en lien avec les objectifs spécifiques que nous nous sommes fixés.

6.1.1 Direction des flux entre le fleuve et les aquifères

En comparant les chroniques piézométriques avec les charges hydrauliques du fleuve, nous avons observé qu'à large échelle (~ 1 km), les flux d'eau souterrains se font toujours des aquifères vers le fleuve quel que soit le contexte géologique. Cela confirme les résultats des travaux antérieurs. Notre étude apporte des éléments nouveaux à une échelle spatiale plus fine à laquelle nous avons pu faire une typologie des échanges :

- Sur le site où l'aquifère alluvial est en contact avec l'aquifère des altérites du socle et où la vallée alluviale s'élargit, le flux d'eau souterrain à fine échelle est dans le sens opposé du flux à large échelle. Le fleuve est ainsi toujours en position de recharger l'aquifère proche du rivage (< 300 m).
- Sur le site où l'aquifère alluvial est en contact avec l'aquifère sédimentaire du Continental Terminal et où la vallée se rétrécit, la direction du flux d'eau souterrain à fine échelle varie dans le temps. Lorsque le niveau du fleuve monte, ce flux se fait du fleuve vers l'aquifère. Lorsque le fleuve se retire, ce flux peut, selon les années, s'inverser. L'aquifère alimente alors le fleuve.
- Sur le site de confluence d'un affluent avec le fleuve Niger, le flux d'eau souterrain est toujours en direction du fleuve, quelle que soit l'échelle considérée et la saison.

Cette diversité de comportements traduit des interactions fleuves-aquifères complexes à fine échelle spatiale. Ces interactions dépendent à la fois du contexte géologique/géomorphologique et de la saison.

6.1.2 Géométrie et caractéristiques hydrogéologiques des aquifères

Les mesures géophysiques (électrique, électromagnétique et par résonance magnétique des protons) ont permis de spatialiser les informations géologiques et hydrogéologiques issues de la description des forages et des essais de pompage. Les résultats ont montré une continuité hydraulique entre les différentes formations aquifères : formation des altérites de socle, formation sédimentaire du Continental Terminal et formations alluviales. Dans la vallée du fleuve, les aquifères sont de relativement faible épaisseur (20 à 50 m). Ces aquifères sont généralement peu perméable et il en résulte des transmissivités comprises essentiellement dans la gamme 5×10^{-5} à $8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces résultats permettent de paramétrer l'équation de Darcy que nous avons utilisée pour quantifier les flux d'eau souterrain.

6.1.3 Modèle conceptuel de fonctionnement de l'hydrosystème fleuve-aquifères

Le croisement des informations sur la direction des flux d'eau souterrains et la géométrie des aquifères a permis d'établir les principes de fonctionnement des échanges fleuve-aquifères suivant :

- Les aquifères régionaux des altérites de socle et du Continental Terminal n'interagissent pas directement sur le fleuve. Ils alimentent l'aquifère alluvial qui a un rôle tampon.

- L'aquifère alluvial échange avec le fleuve. En fonction du contexte géomorphologique, géologique et climatique, il peut être en position d'être rechargé par le fleuve ou au contraire de l'alimenter. Son rôle tampon s'entend aussi dans le sens où cet aquifère est capable d'amortir les crues et de soutenir les étiages du fleuve.
- Un inféro-flux (c'est-à-dire un flux d'eau souterrain dans le sens de l'écoulement de surface) existe dans l'aquifère alluvial du fleuve ainsi que dans les aquifères alluviaux des affluents qui alimentent l'aquifère alluvial du fleuve.

6.1.4 Quantité d'eau impliquée dans les échanges fleuve-aquifères

Les différents flux d'eau souterrain ont été quantifiés en utilisant l'équation de Darcy. Le flux d'eau environnemental des aquifères régionaux vers la vallée alluviale a été estimé par mètre linéaire à des valeurs comprises entre 1.2×10^{-6} et $5.2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. En intégrant cette valeur sur la portion du fleuve entre le barrage de Kandaji en construction et la frontière avec le Nigéria, cela représente $\sim 4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est très faible comparée au débit de crue du fleuve, mais devient significatif en période d'étiage surtout si l'étiage est sévère. Ce débit est également non-négligeable comparé aux besoins en eau de la population riveraine du fleuve.

La capacité de l'aquifère alluvial à amortir les crues et à soutenir les étiages a été évaluée en considérant les flux saisonniers entre le fleuve et l'aquifère. L'année hydrologique 2020-2021, par son caractère exceptionnel donne une bonne estimation du maximum de ces capacités. Ainsi, la capacité de l'aquifère alluvial à amortir les crues du fleuve est faible : au pic de crue, le flux « absorbé » par l'aquifère est de $\sim 46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre le barrage de Kandaji et la frontière avec le Nigéria tandis que le débit du fleuve à Niamey dépasse $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La capacité de l'aquifère alluvial à soutenir les étiages est significatif dans le cas d'étiage sévère (jusqu'à 20% du débit en cas d'alerte orange sécheresse), mais sera négligeable lorsque le barrage de Kandadji assura un débit $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ comme prévu.

Il est important de noter que toutes les estimations des flux d'eau souterrains sont relativement grossières. Elles nécessiteraient d'être affinées par des chroniques plus longues pour mieux appréhender la variabilité interannuelle que nous avons détecté mais que nous n'avons pas pu quantifier faute de données suffisantes. Il serait également important d'augmenter les points d'observation pour mieux documenter la variabilité spatiale que nous avons mis en évidence sur nos sites expérimentaux mais que nous n'avons pas pu cartographier.

6.2 Valorisation des résultats

Les résultats de nos travaux ont été présentés à la communauté scientifique internationale au cours des événements suivants :

- Hama Garba O.K., Boucher M., Nazoumou Y., Favreau G., Wubda M., Descloitres M., Legchenko A., Maina F. Z., 2021, Apport des méthodes ERT, TDEM et RMP pour évaluer la contribution des eaux souterraines au débit du fleuve Niger dans la région de Niamey. *12^{ème} colloque international GEOFCAN, 9-10 mars 2021, Grenoble, France.* <https://doi.org/10.15454/GEOFCAN-2021>. p. 29-32 (présentation orale).
- Hama Garba O.K., Boucher M., Nazoumou Y., Wubda M., Descloitres M., Legchenko A., Vandervaere J.P., Maina F.Z. 2021, Evaluation de la contribution des eaux souterraines aux eaux de surface à partir des méthodes géophysiques et dans un contexte sahélien : Cas du fleuve Niger dans la région de Niamey. *Journées scientifiques de l'Observatoire AMMA-CATCH, 3-4 mars 2021*, en visioconférence, (présentation orale).

Une publication est actuellement en cours de préparation. Elle a été soumise à la revue *Frontiers In Water*. L'éditeur s'est montré intéressé mais a demandé des corrections majeures qui n'ont malheureusement pas pu être réalisées dans les délais imparties par la revue. L'article est en cours d'amélioration pour être soumis de nouveau :

- Hama Garba O.K., Boucher M., Nazoumou Y., Favreau G., Wubda M., Descloitres M., Legtchenko A., Vandervaere J.P., Maina F.Z., Combined use of geophysical, hydrological and geological surveys to infer fine-scale groundwater fluxes through the middle Niger river valley. *En préparation.*

6.3 Perspectives

A la fin de cette étude, les résultats issus des études géologiques, géophysiques (ERT, TDEM et RMP) ainsi que des mesures du niveau des eaux souterraines et de surface, ont permis l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des aquifères en lien avec le fleuve Niger dans la région de Niamey. Toutefois des connaissances complémentaires s'avèrent nécessaires pour améliorer encore la gestion durable des ressources en eaux souterraines. En effet pour améliorer les connaissances sur l'échange nappe – fleuve Niger dans la région de Niamey, et aussi pour consolider nos résultats ainsi que leur application pratique, il convient de conduire par la suite d'autres recherches comme entre autres :

- Intégrer toutes les informations recueillies dans un modèle numérique d'écoulement des eaux souterraines pour une meilleure compréhension du système. Ce modèle aidera à évaluer et à quantifier les ressources en eaux souterraines. Il pourra permettre de tester l'impact de différents scénarios de développement sur les ressources en eau souterraine, y compris les problèmes de pollution qu'il peut y avoir au niveau des rizières. Il aidera également à améliorer les modèles existants pour une prise en compte des eaux souterraines dans le schéma directeur de l'assainissement. Un autre aspect de ce modèle est de pouvoir tester la sensibilité des échanges fleuve-aquifères aux variations spatiales de géologie et géomorphologie de la vallée fluviale ainsi qu'à la variabilité interannuelle des précipitations et des débits du fleuve.
- Réaliser une étude à plus grande échelle pour mieux caractériser l'hétérogénéité de ces aquifères avec des mesures TDEM, ERT et RMP plus raffinées. Cela permettra de mieux caractériser les aquifères et de connaître leurs limites en dehors du lit majeur du fleuve. Cette étude permettra de bien contraindre les conditions aux limites du modèle numérique.
- Élargir le réseau et les données de suivi piézométrique sur une longue période et sur une échelle d'espace plus large tout en assurant la qualité des données pour mieux comprendre les échanges nappes – fleuve.
- Réaliser des études de géochimie et isotopique sur les eaux souterraines et de surface pour déterminer et caractériser l'origine et la saisonnalité de la recharge des aquifères. Cela permettra de mieux appréhender le rôle tampon de l'aquifère alluvial. Aussi cette étude permettra d'évaluer les risques de pollutions des eaux souterraines par les eaux de surfaces.
- Repositionner les événements récents étiage / crue (2018 – 2020) dans la variabilité historique récente (à partir de 1950).
- Revenir éventuellement sur notre hypothèse que les résultats locaux représentent ce qui se passe tout le long du fleuve.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdou Babaye, M. S., 2012.** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako - Niger). *Thèse de doctorat, Université de Liège (Belgique) et Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*, 265p.
- Abdou Babaye, M.S., Urban, P., Ousmane, B., Favreau G., Brouyère, S., Dassargues, A. 2019.** Characterization of recharge mechanisms in a Precambrian basement aquifer in semi-arid south-west Niger. *Hydrogeol. J.* 27, 475–491. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1799-x>
- Abdoulahi, A., Bosch, K., Zinsou, D.S., Rabé, S., Abdourahamane, H.D., 2019.** Caractérisation physicochimique et piézométrique des aquifères de la zone de Niamey. *Rapport Technique N°6 du projet "Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines (AGES)", élaboré par l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN), Niamey et l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles de l'Allemagne (BGR), Hanovre: 114 p., 19 fig., 8 tab., 5 ann.; Niamey.*
- Abdou Mahamane, R., Nazoumou, Y., Favreau, G., Issoufou Ousmane, B., Boucher, M., Taylor, R.G., Lawson, F.M.A., Abdou Babaye, M.S., Guéro, A., Legchenko, A., 2021.** Estimation par méthodes géophysiques du flux souterrain des aquifères du bassin des Iullemmeden vers le fleuve Niger via une large vallée quaternaire. *12ème Colloque GEOFCAN, 9-10 mars 2021, Grenoble, France, en visioconférence, pp 13-16.* <https://doi.org/10.15454/GEOFCAN-2021>.
- Alhassane Hado, H., Adamou, M.M., Favreau, G., Boucher, M., Hima, K., Daro, I.D., 2021.** Rise of Urban Water Table as a Cause of Flooding: Improving Knowledge in the City of Niamey (Niger Republic). *J. Water Resour. Prot.* 13, 976–999. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.1312053>
- Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, J.-M., Yalo, N., Lawson, F.M.A., Adihou, A.C., 2018.** Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa. *J. Afr. Earth Sci.* 139, 341–353. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.007>
- Ama Salah, I., Liegeois, J.-P., Pouclet, A., 1996.** Evolution d'un arc insulaire océanique birimien précoce au Liptako nigérien (Sirba): géologie, géochronologie et géochimie. *Journal of Afrique Earth Science* 22, 235–254. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(96\)00016-4](https://doi.org/10.1016/0899-5362(96)00016-4)

- Amogu, O., 2009.** La dégradation des espaces sahéliens et ses conséquences sur l'alluvionnement du fleuve Niger moyen. *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble)*, 444p.
- Amogu, O., Descroix, L., Souley Yero, K., Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., Vischel, T., Bader J.C., Bouzou Moussa, I., Gautier, E., Boubkraoui, S., Belleudi, P., 2010.** Increasing River Flows in the Sahel ? *Water* 2, 170-199. <https://doi.org/10.3390/w2020170>
- Bechler-Carmaux N., 1998.** Les risques liés à l'eau dans une capitale sahélienne : pénurie et excès d'eau à Niamey (Niger). *Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur (Strasbourg)*, 288p. <http://www.theses.fr/1998STR1GE03>
- Bechler-Carmaux, N., Lamotte, M., Mietton, M., 1999.** Les étiages du Fleuve Niger : Risque de pénurie en eau pour l'agglomération de Niamey (Niger). *Sécheresse 1999, 10(4)* :281-8.
- Benech, C., Marmet, E., 1999.** Optimum depth of investigation and conductivity response rejection of the different electromagnetic devices measuring apparent magnetic susceptibility. *Archaeological Prospection 6(1) 1999, 31–45. Archaeol. Prospect. 6, 123–123.*
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%2910990763%28199906%296%3A2%3C123%3A%3AAID-ARP129%3E3.0.CO%3B2-N>
- Bernert, G., Dehays, H., Garin, H., Zunino, C., 1985.** Programme d'urgence pour le renforcement de l'alimentation en eau potable des quartiers périphériques de Niamey (Niger). *Exécution de 50 forages productifs. Rapport BRGM/MHE. 52 pp.*
- Bosch, K., Heckmann, M., 2019.** Rapport de synthèse des activités du projet AGES. - Phase II. - *Rapport de synthèse du projet "Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines (AGES)", élaboré par l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN), Niamey et l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles de l'Allemagne (BGR), Hanovre: 26 p.; Hanovre.*
- Boubakar Hassane, A., 2010.** Aquifères superficiels et profondes et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger). *Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey*, 250p.
- Boubakar Hassane A., Leduc C., Favreau G., Bekins B., Margueron T. 2016.** Impacts of a large Sahelian city on groundwater hydrodynamics and quality: example of Niamey (Niger). *Hydrogeology Journal, 24, 2, 407-423.* doi: 10.1007/s10040-015-1345-z.

- Boucher M., 2007.** Estimation des propriétés hydrodynamiques des aquifères par Résonance Magnétique des Protons dans différents contextes géologiques, de l'échantillon à l'échelle hydrogéologique. *Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 199p.*
- Boucher, M., Favreau, G., Descloitres, M., Vouillamoze, J.-M., Massuel, S., Nazoumou, Y., Cappelaere, B., Legchenko, A., 2009a.** Contribution of geophysical surveys to groundwater modelling of a porous aquifer in semiarid Niger: An overview. *Comptes Rendus Geosci., Hydrogéophysique 341, 800–809.*
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.008>
- Boucher, M., Favreau, G., Vouillamoze, J.M., Nazoumou, Y., Legchenko, A., 2009b.** Estimating specific yield and transmissivity with magnetic resonance sounding in an unconfined sandstone aquifer (Niger). *Hydrogeol. J. 17, 1805.*
<https://doi.org/10.1007/s10040-009-0447-x>
- Boucher, M., Favreau, G., Nazoumou, Y., Cappelaere, B., Massuel, S., Legchenko, A., 2012.** Constraining Groundwater Modeling with Magnetic Resonance Soundings. *Groundwater 50, 775–784.* <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00891.x>
- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., Boulain, N., Ramier, D., Laurent, J.-P., Favreau, G., Boubkraoui, S., Boucher, M., Bouzou Moussa, I., Chaffard, V., Hiernaux, P., Issoufou, H.B.A., Le Breton, E., Mamadou, I., Nazoumou, Y., Oi, M., Otlé, C., Quantin, G., 2009.** The AMMA-CATCH experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger – Investigating water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *Journal of Hydrology 375, 34–51.*
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.021>
- Castany, G., 1982.** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *DUNOD, PARIS, ISBN : 978-2-04-011221-9, 238p.*
- Champaud, J., 1961.** La navigation fluviale dans le moyen Niger. *Cahiers d'Outre-Mer. 14, 255–292.* <https://doi.org/10.3406/caoum.1961.2213>
- Danielsen, J.E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergaard, V., Sørensen, K.I., 2003.** The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *J. Appl. Geophys. 53, 181–198.* <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2003.08.004>
- Dehays, H., Garin, H., Zunino, C., 1986.** Programme d'urgence pour le renforcement de l'alimentation en eau potable des quartiers périphériques de Niamey (Niger). Deuxième phase : exécution de 68 forages. *Rapport BRGM/MHE. 30 pp.*
- Descloitres, M., Chalikakis, K., Legchenko, A., Moussa, A.M., Genthon, P., Favreau, G., Le Coz, M., Boucher, M., Oi, M., 2013.** Investigation of groundwater resources in the

- Komadugu Yobe Valley (Lake Chad Basin, Niger) using MRS and TDEM methods. *J. Afr. Earth Sci.* 87, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.07.006>
- Descloitres, M., Favreau, G., Vouillamoz, J.M., Boucher, M., 2007.** Rapport de mission géophysique au Niger en 2006 : projet hydrogéophysique, 120p. http://www.amma-catch.org/IMG/pdf/rapport_tdem_niger_2006_avec_annexes.pdf
- Descloitres, M., Guérin, R., Albouy, Y., Tabbagh, A., Ritz, M., 2000.** Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization. A case study in resistive rocks of the Fogo volcano, Cape Verde Islands. *J. Appl. Geophys.* 45, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00015-X)
- Descloitres, M., Ritz, M., 1994.** Prospection géophysique par la méthode TDEM des aquifères de la Caldeira du volcan Fogo (archipel des îles du Cap-Vert) : rapport de mission, 27p.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., Sighomnou, D., 2009.** Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, 375, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.012>
- Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.-L., Sighomnou, D., Vauclin, M., 2012.** Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. *Glob. Planet. Change* 98–99, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009>
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Dacosta, H., Panthou, G., Quantin, G., Diedhiou, A., 2013.** Évolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger moyen (Sahel). *Climatologie* 10, 37–49. <https://doi.org/10.4267/climatologie.78>
- Favreau, G., 2000.** Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger). *Thèse de doctorat, Université Paris Sud 11*, 353p.
- 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: A review. *Water Resources Research*, 45, W00A16. <https://doi.org/10.1029/2007WR006785>.
- Favreau G., Nazoumou Y., Leblanc M., Guéro A., Goni I.B., 2012.** Groundwater resources increase in the Iullemmeden 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 Hydrogeology (27), 7, 113-128, CRC Press Inc., Leiden, The Netherlands.*
- Fitterman, D.V., Stewart, M.T., 1986.** Transient electromagnetic sounding for groundwater. *Geophysics 51*, 995–1005. <https://doi.org/10.1190/1.1442158>
- Flores Avilés, G.P., Descloitres, M., Duwig, C., Rossier, Y., Spadini, L., Legchenko, A., Soruco, Á., Argollo, J., Pérez, M., Medinaceli, W., 2020.** Insight into the Katari-Lago Menor Basin aquifer, Lake Titicaca-Bolivia, inferred from geophysical (TDEM), hydrogeological and geochemical data. *J. South Am. Earth Sci. 99*, 102479. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102479>
- Florsch, N., Muhlach, F., 2018.** Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques. ISTE Group, 197p.
- Greigert, J., 1957.** Introduction à la connaissance hydrogéologique du bassin occidental du Niger (rapport fin de campagne 1955-1956). Troisième partie. Les principales nappes du bassin occidental du Niger. *h-ch. Dir. Féd. Min. Géol. Dakar. Dakar, Sénégal, 35 p.*
- Greigert, J., 1966.** Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). *Publication n°2, Rapport BRGM/Direction des Mines et de la Géologie (Niger), 153-199, BRGM édition, Paris, France, 234 p.*
- Greigert, J., Pognet, R., 1965.** Carte géologique de la République du Niger au 1 : 2 000 000. *BRGM, édition, Paris, France.*
- Greigert, J., Pognet, R., 1967.** Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. Mémoires du Bureau des Ressources Géologiques et Minières, 258 p.
- Guérin, R., Descloitres, M., Coudrain, A., Talbi, A., Gallaire, R., 2001.** Geophysical surveys for identifying saline groundwater in the semi-arid region of the central Altiplano, Bolivia. *Hydrol. Process. 15*, 3287–3301.
- Guéro, A., 2003.** Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemeden (Niger) : approches géochimique et hydrodynamique. *Thèse de doctorat, Université Paris 11, 257p.*
- Hassane Saley, A.K., 2018.** Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la Région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques. *Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay et Université Abdou Moumouni, 252 p.*

- Kehren, S., 1995.** L'agglomération de Niamey (Niger): contribution à une meilleure connaissance des disponibilités et des besoins en eau. *Mémoire de Maitrise, Université Strasbourg 1*, 138p.
- Kenyon, W. E., 1997.** Petrophysical principles of applications of NMR logging. *The Log Analyst, March-April* : 21-43.
- Kemgang, D.T., Boucher, M., Mvondo, E.V.Y., Favreau, G., Ngounou Ngatcha, B., Yalo, N., Goni, I.B., Legchenko, A., 2019.** Contribution of time domain electromagnetic and magnetic resonance soundings to groundwater assessment at the margin of lake chad basin, Cameroon. *J. Appl. Geophys.* 170, 103840.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103840>.
- Kilian, C., 1931.** Des principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc.géol.Fr., 109 - 111
- Koïta M., 2010.** Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). *Thèse de doctorat, Université Montpellier 2 et Université Abobo-Adjame*, 220 p.
- Lachassagne, P., Baltassat, J.M., Legchenko, A., Machard de Grammont, H., 2005.** The links between MRS and the hydrogeological parameters. *Near Surface Geophysics.* 3(4), 259-265.
- Lachassagne, P., Wyns, R., 2005.** Aquifères de socle : nouveaux concepts – Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences n° 2*, 32-37, 6p.
- Laouel Cherif, M., et Zakari, I., 2017.** Caractérisation hydrographique et estimation de stockage en eau dans le lit du cours d'eau cristallin de Ouama, sous bassin de Dargol, Niger. *Rapport de Master 2, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger)*, 69p.
- Lebel, T., Panthou, G., Vischel, T., 2020.** Inondations en Afrique: une nouvelle ère hydroclimatique. *The conversation France 2020*, 6p en ligne, 2431-2134.
<https://theconversation.com/inondations-en-afrique-une-nouvelle-ere-hydroclimatique-148739>
- Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008.** Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Glob. Planet. Change* 61, 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011>
- Leduc, C., Bromley, J., Schroeter, P., 1997.** Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *Journal of Hydrology*, 188–189, 123–138. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03156-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03156-3)

- Legchenko, A., 2004.** Magnetic resonance sounding: Enhanced modeling of a phase shift. *Appl. Magn. Reson.* 25, 621–636. <https://doi.org/10.1007/BF03166553>
- Legchenko, A., Baltassat, J.-M., Beauce, A., Bernard, J., 2002.** Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *J. Appl. Geophys.* 50, 21–46. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00128-3)
- Legchenko, A., Ezersky, M., Boucher, M., Camerlynck, C., Al-Zoubi, A., Chalikakis, K., 2008.** Pre-existing caverns in salt formations could be the major cause of sinkhole hazards along the coast of the Dead Sea. *Geophys. Res. Lett.* 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL035510>
- Legchenko, A., Valla, P., 2002.** A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *J. Appl. Geophys., Surface Nuclear Magnetic Resonance: What is Possible?* 50, 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00127-1)
- Legchenko, A., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F.M.A., Alle, C., Descloitres, M., Boucher, M., 2016.** Interpretation of magnetic resonance measurements in the varying earth's magnetic field. *Geophysics* 81, WB23–WB31. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0474.1>
- Loireau, M., 1998.** Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien. *Thèse de doctorat, Université Montpellier 3, 413p.* <http://www.theses.fr/1998MON30058>
- Loke, M., 2001.** Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 136 p.
- Loke, M., Acworth, I., Dahlin, T., 2003.** A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.* 34, 6.
- Machens, E., 1973.** Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. *Memoires du B.R.G.M., n° 82. Editions B.R.G.M, Paris, 167 p.*
- Mahé, G., Leduc, C., Amani, A., Paturel, J.-E., Girard, S., Servat, E., Dezetter, A., 2003.** Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. *Hydrology of mediterranean and semiarid regions : proceedings of an international symposium, Publication - AISH (E. Servat, W. Najem, C. Leduc & A. Shakeel, eds.), 215–222, Wallingford : AISH.*
- Malam Abdou, M., 2014.** Etats de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des bassins sahéliens ; études expérimentales en zones cristalline et sédimentaire. *Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (France) et Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 303p*

- Malam Abdou, M., Vandervaere, J. P., Bouzou Moussa, I., Descroix, L., Mamadou, I., Faran Maiga, O., 2016.** Genèse des écoulements sur deux petits bassins versants cristallins de l'Ouest du Niger: approche multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique. *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 22, 363–375. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11537>
- Maréchal, J. C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K., Touchard, F., 2003.** Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle: concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Geosci.* 335, 451–460. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00082-8)
- Millot, J.A., 1913.** Les crues du Niger. *Annales de Géographie* 22, 68–93. <https://doi.org/10.3406/geo.1913.8385>
- Monfort, M. 1996.** Reconstitution géologique des aquifères du continental terminal dans la région de Niamey. *Mémoire de Maîtrise Sciences de l'Environnement, ORSTOM: Montpellier*, 54 p.
- Nazoumou, Y., Favreau, G., Adamou, M.M., Maïnassara, I., 2016.** La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger? *Cah. Agric.* 25, 15003. <https://doi.org/10.1051/cagri/2016005>
- Nicholson, S.E., Dezfuli, A.K., Klotter, D., 2012.** A Two-Century Precipitation Dataset for the Continent of Africa. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1219–1231. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00212.1>
- Nodalis, OIEau, ISL, 2018.** Détermination d'une structure de gestion du barrage de Kandadji. *Rapport final de structure de gestion* 191 p.
- Oï, M, 2009.** Réalisation de forage - Site de l'Université Abdou Moumouni, Niamey. *Rapport IRD-UAM* 10 p.
- ORSTOM, 1970.** Monographie hydrologique du bassin du Niger: 3^{ème} partie. Le Niger moyen. 158 p. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:14373>
- Ousmane, B., 1988.** Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahéenne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est). *Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey*, 441 p.
- Ousmane, B., Djibo, S., Soumana, I., 2010.** Étude préliminaire de la pollution bactériologique des eaux des aquifères discontinus du socle du département de Tera /Liptako nigérien. *Afrique Science* 06(3), 27-36.

- Ousseini, I., 1986.** Etude de la répartition des formations sableuses et interprétation des dépôts éoliens dans le Liptako oriental (République Du Niger). *Thèse de doctorat, Université Paris 6*. <http://www.theses.fr/1986PA066568>
- Ousseini, I., Morel, A., 1989.** Utilisation de formations alluviales azoïques pour l'étude des paléoenvironnements du Pléistocène supérieur et de l'Holocène au sud du Sahara; l'exemple de la vallée du fleuve Niger dans le Liptako nigérien. *Bulletin Société Géologique France V*, 85–90. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.V.1.85>
- Panthou, G., 2013.** Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. *Thèse de doctorat Université de Grenoble* 270 p.
- Plote, H., 1961.** Reconnaissance hydrogéologique du Liptako et des régions adjacentes. Ministère des Travaux publics, des Mines et de l'Hydraulique de la république du Niger. *Rapport BRGM, 95 p., Paris, France.*
- Recensement général de la population et de l'habitat. Etat et structure de la population du Niger en 2012, Institut National de la Statistique, 88 p., Niamey, Niger.*
- Sido, Y.A., 2010.** Etat des lieux de la riziculture : cas du Niger. *Rapport FAO, 57 p.* https://reca-niger.org/IMG/pdf/Rapport_etat_des_lieux_de_la_riziculture_au_Niger.pdf
- Sighomnou, D., Descroix, L., Genthon, P., Mahe, G., Moussa, I., Gautier, E., Mamadou, I., Vandervaere, J., Bachir, T., Coulibaly, B., Rajot, J., Issa, O., Malam Abdou, M., Dessay, N., Delaitre, E., Maiga, O., Diedhiou, A., Panthou, G., Vishel, T., Hiernaux, P., 2013.** La crue de 2012 à Niamey : un paroxysme du paradoxe du Sahel. *Sécheresse* 24, 1 : 3-13. DOI : 10.1684/sec.2013.0370
- Soumaïla, A., Henry, P., Rossy, M., 2004.** Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest) : plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *Comptes Rendus Géoscience* 336, 1137–1147.
- Soumaïla, A., Konaté, M., 2005.** Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Africa Geoscience Review* 12, 161–178.
- Tabbagh, A., 2007.** What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting method? *Archaeometry* 28, 185–196. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1986.tb00386.x>
- Tabbagh, A., 1986.** Applications and advantages of the Slingram EM method for archaeological prospecting. *Geophysics* 51. <https://doi.org/10.1190/1.1442112>

- Taylor, C.M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D.J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P.P., Janicot, S., Klein, C., Panthou, G., 2017.** Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature* 544, 475–478. <https://doi.org/10.1038/nature22069>
- Thevoz, C., Ousseini, I., Bergoeing, J. P. 1994.** Aspects géomorphologiques de la vallée du Niger au Sud de Niamey (Secteur Saga Gourma - Gorou Kirey). *Revue de Géographie Alpine, N° hors-série : "Au Sahara-Sahel. Milieu et sociétés du Niger."* Vol. I. 65-80.
- Vassolo, S., Schuler, P., Guéro, A., Rabé, S., Mounkaila, M., Menge, S., 2015.** Caractérisation des eaux souterraines de la région de Niamey, Niger). *Rapport Technique N°2 du projet "Appui à l'ABN pour la Gestion des Eaux Souterraines (AGES)", élaboré par l'Autorité du Bassin du Fleuve Niger (ABN), Niamey et l'Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles de l'Allemagne (BGR), Hanovre: 50 p., Niamey.*
- Vouillamoz, J. M., 2003.** La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique. *Thèse de doctorat, Université de Paris 11, 342p.* <https://www.theses.fr/2003PA112062>
- Vouillamoz, J.-M., Descloitres, M., Bernard, J., Fourcassier, P., Romagny, L., 2002.** Application of integrated magnetic resonance sounding and resistivity methods for borehole implementation. A case study in Cambodia. *J. Appl. Geophys.*, 50, 67–81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00130-1)
- Vouillamoz, J.M., Favreau, G., Massuel, S., Boucher, M., Nazoumou, Y., Legchenko, A., 2008.** Contribution of magnetic resonance sounding to aquifer characterization and recharge estimate in semiarid Niger. *J. Appl. Geophys.* 64, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.12.006>
- Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014.** The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. *J. Appl. Geophys.* 107, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.012>
- Wubda, M., Descloitres, M., Yalo, N., Ribolzi, O., Vouillamoz, J.M., Boukari, M., Hector, B., Séguis, L., 2017.** Time-lapse electrical surveys to locate infiltration zones in weathered hard rock tropical areas. *J. Appl. Geophys.* 142, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.027>

Sites internet consultés

https://reca-niger.org/IMG/pdf/SPIN_FINAL_Niger.pdf

https://reca-niger.org/IMG/pdf/RECA_filiere_peche_Note1_fevrier2013.pdf

<https://www.aquaportail.com/definition-5159-drainage.html>

http://nigerhycos.abn.ne/portal/IMG/pdf/bulletin_mars_2018_vf.pdf

<http://nigerhycos.abn.ne/portal/spip.php?article255>

<https://www.studiokalangou.org/10008-forum-zarma-08-04-2018-la-peche-et-la-promotion-de-la-pisciculture-au-niger>

<https://climateservices.it/la-chronique-dramatique-de-linondation-de-niamey-niger-le-6-septembre-2020/>

LISTE DES PLANCHES PHOTO

Planche photo 1: Véhicules embourbés	9
Planche photo 2: Fleuve Niger à des niveaux extrêmes.....	12
Planche photo 3: Nouvel élément de l'échelle à la station de Niamey deux jours après son installation (le 09/09/2020 à 13h13) sur le fleuve Niger.....	13
Planche photo 4: Plateaux et terrasse	17
Planche photo 5: Exemple de végétation	25
Planche photo 6: Quelques exemples d'activités faites au bord et/ou sur le fleuve Niger	29
Planche photo 7: Formations géologiques rencontrées dans des koris au sud de Niamey.....	35
Planche photo 8: Exemples d'affleurement dans le bassin de Ouama.....	36
Planche photo 9: Equipement Syscal Pro Switch pour la réalisation de tomographie électrique sur le bassin de Ouama.....	61
Planche photo 10: Equipement TEM-FAST	64
Planche photo 11: Equipement CMD-Explorer pour la cartographie électromagnétique sur le bassin de Ouama (Coordonnées en UTM : 31P ; X : 310548 ; Y : 1541390 ; 15/11/2018)	68
Planche photo 12: Deux appareils de sondage RMP utilisés sur le terrain.....	71
Planche photo 13: Exemple de sondage à la tarière.....	81
Planche photo 14: Affleurements dans le kori de Gourou Tchirey et sur ses berges.....	122

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude sur le bassin du Fleuve Niger	3
Figure 2: Carte des niveaux piézométriques dans l'aquifère du Continental Terminal autour de Niamey en septembre 1993 (Leduc et al. 1997).....	4
Figure 3: L'hydrogramme du fleuve Niger à la station de Niamey au cours des années hydrologiques 2018 à 2021 et pour les années de références (crue 2012 et étiage 1985)	11
Figure 4: Localisation de la zone d'étude et modèle numérique de terrain issu des données SRTM du Niger.....	16
Figure 5: Terrasse de la vallée du fleuve Niger proche de Niamey (Ousseini et Morel, 1989)18	
Figure 6: Localisation des stations hydrologique et météorologique dans la ville de Niamey	20
Figure 7: Moyennes mensuelles des précipitations (en mm) sur la période 2009 à 2020 à la station de Niamey IRI. Le cumul annuel moyen est de 457 mm (cf. localisation en Figure 6 ; Données AMMA-CATCH).....	20
Figure 8: Evolution de la pluviométrie depuis 1940 dans le Sud-Ouest du Niger enregistrée sur plusieurs pluviographes : a- Cumul annuel de précipitation ; b- Cumul moyen pour les jours pluvieux ; c- Nombre de jours pluvieux ; d- Indice d'intensité hydro climatique (Panthou, inédit)	21
Figure 9: Températures observées à la station de de l'IRD en 2020 (cf. localisation en Figure 6). (a) Température moyenne journalière et (b) Moyennes, minimales et maximales mensuelles des températures journalières.	23
Figure 10: Evolution de l'occupation des sols sur une partie du sud-ouest Niger à brousse tigrée	26
Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude (d'après Greigert 1966) et réseau hydrographique.....	31
Figure 12: Modèle conceptuel d'aquifère de socle (Lachassagne et Wyns, 2005).....	32
Figure 13: a- Coupe géologique schématique Ouest-Est du bassin des Iullemmeden (Greigert 1966), b- Coupe schématique conceptuelle zoomée sur la zone d'étude.....	33

Figure 14: Carte piézométrique de Niamey, avril 2017 (modifiée d'après Bosch and Heckmann, 2019).....	39
Figure 15: a- Site du Jardin Botanique avec la position des forages et des différents sondages géophysiques, b- Coupe géologique schématique traversant le fleuve au niveau de l'Université Abdou Moumouni à Niamey (Bechler-Carmaux et al. 1999).....	45
Figure 16: a- Site de Gongga Zougou avec la position des puits et des sondages géophysiques, b- Coupe géologique schématique dans la zone de Gongga Zougou (modifiée d'après Monfort, 1996).....	47
Figure 17: Site de Ouama avec la position des mesures géophysiques	48
Figure 18: a- Site de Gorou Tchirey avec la localisation des sondages géophysiques, des sources et du piézomètre, b- Coupe schématique Est-Ouest de la vallée du fleuve Niger dans le secteur de Gorou Tchirey (Thevoz et al. 1994).....	51
Figure 19: Principe de mesure de la résistivité électrique (d'après Florsch et Muhlach, 2018)	59
Figure 20: Exemple de résultat d'inversion des sondages électriques sur le bassin de Ouama site 1 avec IPI2WIN.....	60
Figure 21: Principe général du TDEM (Descloitres et al., 2007)	63
Figure 22: Principe du Slingram pour un corps conducteur (Florsch et Muhlach, 2018).....	67
Figure 23: Schéma du fonctionnement du Numis (Boucher, 2007 ; modifié).....	71
Figure 24: Exemple de résultat d'inversion des données de sondage RMP sur le site de Gongga Zougou	74
Figure 25: Comparaison des transmissivités estimées par RMP et par essai de pompage dans les aquifères du Continental Terminal et des alluvions quaternaires du sud-ouest du Niger (Boucher, 2007).....	76
Figure 26: Localisation de la coupe géologique en amont de la zone d'étude	86
Figure 27: Coupe géologique en amont de la zone d'étude à partir des forages décrits dans Bernet et al. (1985) et Dehays et al. (1986)	87
Figure 28: Localisation de la coupe géologique en aval de la zone d'étude.....	90
Figure 29: Coupe géologique en aval de la zone d'étude	91

Figure 30: Logs lithologiques des piézomètres du jardin botanique (d'après Oï, 2009)	92
Figure 31: Chroniques piézométriques, pluviométriques et limnimétriques sur le site de Niamey. a- Sur toute la période d'observation 2009 – 2020 et b – Zoom sur 2 années hydrologiques contrastées : 2014/2015 quasi-absence de crue locale, malgré une pluviométrie annuelle 634 mm ; 2015/2016 crue locale bien marquée avec une pluviométrie annuelle de 470 mm à Niamey	94
Figure 32: Coupe schématique hydrogéologique du site de Niamey présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve pendant l'étiage. Pendant la crue locale de la saison des pluies et pendant la crue guinéenne de la saison sèche.	96
Figure 33: Chroniques piézométriques du site de Gongga Zougou compare au niveau du fleuve et à la pluviométrie. Année hydrologique 2020 - 2021	97
Figure 34: Coupe schématique du fonctionnement hydrologique du site de Gongga Zougou présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve en basses eaux (étiage 2020) et en hautes eaux (crue locale 2020 et crue guinéenne 2021).	98
Figure 35: Chronique piézométrique du site de Gorou Tchirey comparée au niveau du fleuve et à la pluviométrie. Année hydrologique 2020 - 2021	99
Figure 36: Coupe schématique du fonctionnement hydrologique du site de mesure de Gourou Tchirey présentant les niveaux d'eau mesurés dans la nappe et le fleuve	100
Figure 37: Exemple de résultats TDEM sur le site de Werkéré au bord du fleuve où le socle résistant est peu profond. a- Ajustement des modèles de résistivités sur les mesures TDEM ; b- Résultats d'inversion 1D des sondages TDEM.	102
Figure 38: Exemple de sondages TDEM interpolés sous forme d'image de tomographie de résistivité électrique sur le site de Gongga Zougou	104
Figure 39: Etude comparative des sondages TDEM, ERT avec les logs des forages. a- Site du jardin botanique à Niamey ; b- Site de Gongga Zougou	106
Figure 40: Tomographie de résistivité électrique sur le site de Niamey (jardin botanique, RMS = 5.66%)	107
Figure 41: Coupe hydrogéophysique du site de Niamey	108

Figure 42: Coupe hydrogéophysique du site de Gongga Zougou avec la méthode de ERT (cf. localisation en Figure 15).....	110
Figure 43: Coupe hydrogéophysique du site de Gongga Zougou avec la méthode TDEM.....	111
Figure 44: Coupe hydrogéophysique large échelle du site aval de la zone d'étude (Sadoré – Werkéré - Gongga Zougou)	113
Figure 45: Cartographie FEM sur le bassin de Ouama : conductivité électrique apparente mesurée avec la bobine n°3 (profondeur d'investigation d'environ 6m).....	114
Figure 46: Résultats de l'ERT et des sondages RMP sur le bassin de Ouama	116
Figure 47: Résultats des sondages TDEM dans le bassin de Ouama.....	119
Figure 48: Description lithologiques des échantillons relevés par les sondages à la tarière sur le site de Ouama	120
Figure 49: Coupe hydrogéophysique du site de Gorou Tchirey	123
Figure 50: Fonctionnement hydrogéologique d'un contact entre l'aquifère alluvial et le socle (site du jardin botanique). a- Cartes piézométriques d'après les mesures du 11 septembre 2014 et voisines ; b- Coupe schématique représentant les flux le 11 septembre 2014 (hautes eaux) et le 30 juin 2014 (basse eaux).....	129
Figure 51: Fonctionnement hydrogéologique d'un contact entre la plaine alluviale et le Continental Terminal (site de Gongga Zougou). a- b- et c- Cartes piézométriques schématiques à des dates caractéristiques (cf. hydrogramme en haut) ; d- Coupe schématique représentant les flux aux mêmes dates.	131
Figure 52: Schéma conceptuel des interactions entre le fleuve et les aquifères qui l'entourent.	133

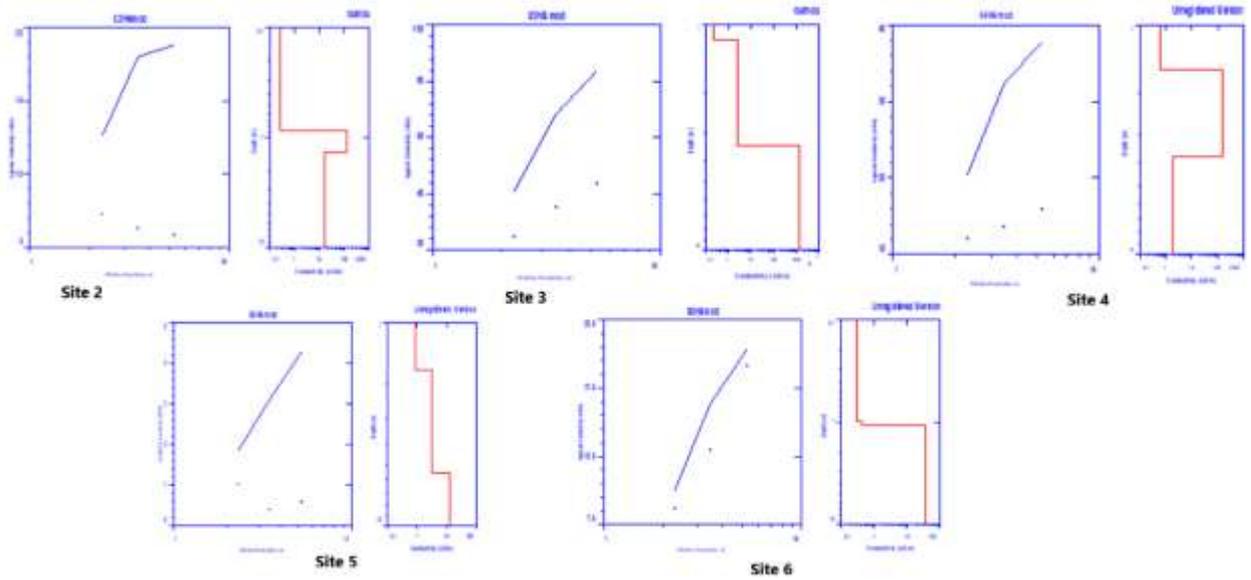
LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des sites d'études.....	49
Tableau 2: Piézomètres (Pz) et puits (Pt) suivis.....	53
Tableau 3: Les modes de mesure du CMD-Explorer et les profondeurs d'investigations.....	69
Tableau 4: Récapitulatifs des sondages géophysiques réalisés sur les différents sites	77
Tableau 5: Caractéristiques des essais de pompage du BRGM en 1984 et 1985 et paramètres hydrodynamiques issus de leur interprétation	88
Tableau 6: Transmissivités issues des résultats des essais de pompage de 1989 dans les ouvrages proches de Gongga Zougou.....	89
Tableau 7: Estimation des flux d'eau échangés entre le fleuve et son aquifère alluvial à différentes périodes	135
Tableau 8: Estimation des flux d'eau souterrain des aquifères régionaux (altérite du socle et Continental Terminal) vers l'aquifère alluvial du fleuve	137
Tableau 9: Estimation de l'inféro-flux sous le kori de Gourou Tchirey	138
Tableau 10: Inféro-flux dans l'aquifère alluvial du fleuve Niger entre le site amont et le site aval	139
Tableau 11: Estimation approximative des débits d'eau souterrains sur la portion Kandadji-Dolé.....	141
Tableau 12: Demande en eau pour certains usages dans la vallée du Niger en aval de Kandadji	141

ANNEXES

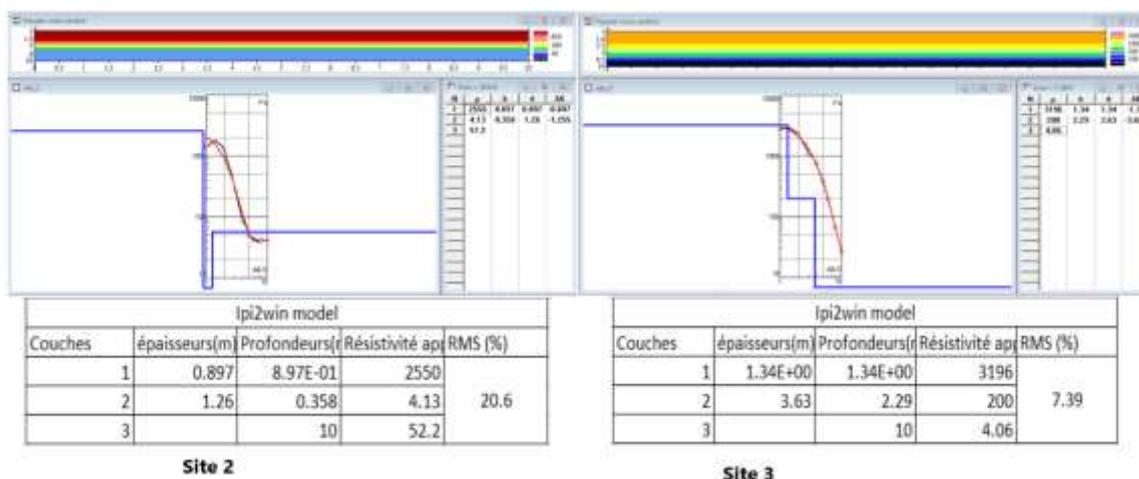
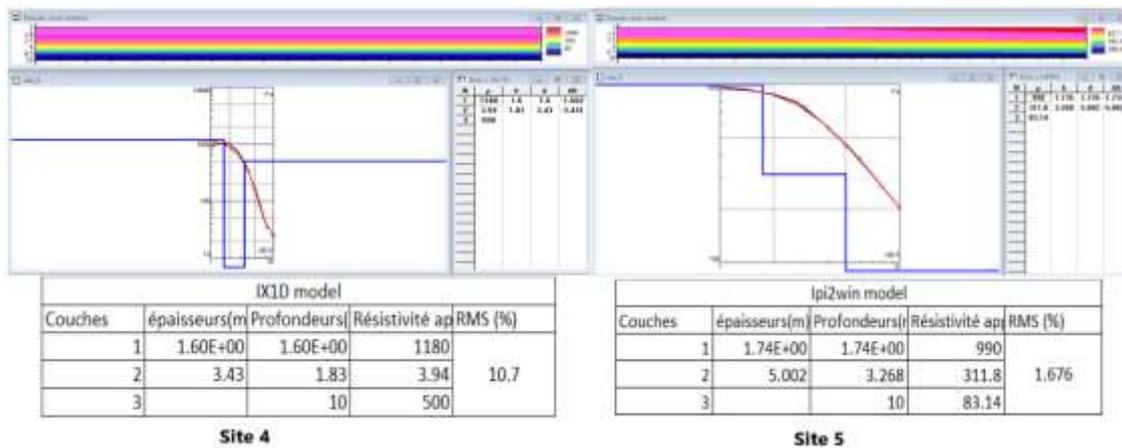
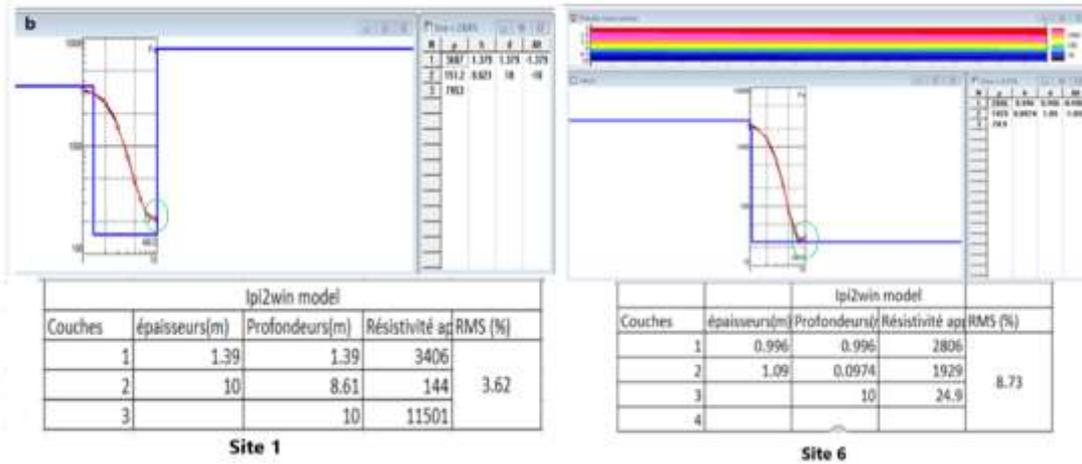
Annexe 1 : Sondages électromagnétique (CMD-Explorer)

Résultat de modélisation avec IX1D des conductivités mesurées avec le CMD-Explorer sur cinq sites de calibration du bassin de Ouama.



Annexe 2 : Sondages électriques verticaux

Résultats d'inversion des sondages électriques verticaux réalisés sur les six sites du bassin de Ouama avec le syscal kid.



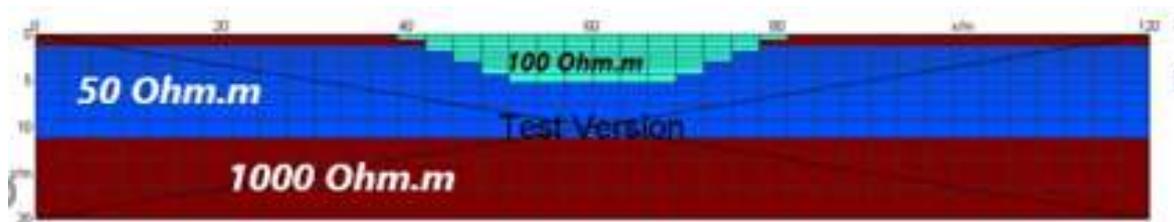
Annexe 3 : Tomographie électrique

Simulation numérique réalisée au bureau avant la mise en œuvre sur le terrain

- **Modèle synthétique ou conceptuel**

Le modèle pédologique type traduit en modèle conceptuel (avec répartition des valeurs de résistivité en fonction de la nature des strates) a été choisi sur la base des différentes coupes lithologiques des forages situés sur le bassin versant de Dargol et aussi sur la base de la reconnaissance de terrain effectuée pendant la première campagne de mesure géophysique en Août 2018. Ce modèle est composé d'une ravine sableuse saturée en eau de ***profondeur inconnue*** (le but de l'utilisation de la méthode) entourée de part et d'autre d'une couche sableuse de 2m à peu près, ensuite un horizon de couche argileuse variable et enfin le socle.

Ce modèle a été simplifié et traduit en modèle de résistivité. Les valeurs de résistivité des différentes couches ont été obtenues par les résultats de l'inversion des données de sondages TDEM réalisés au cours de la campagne géophysique du mois d'Août.



Modèle de résistivité apparente

- **Choix du dispositif**

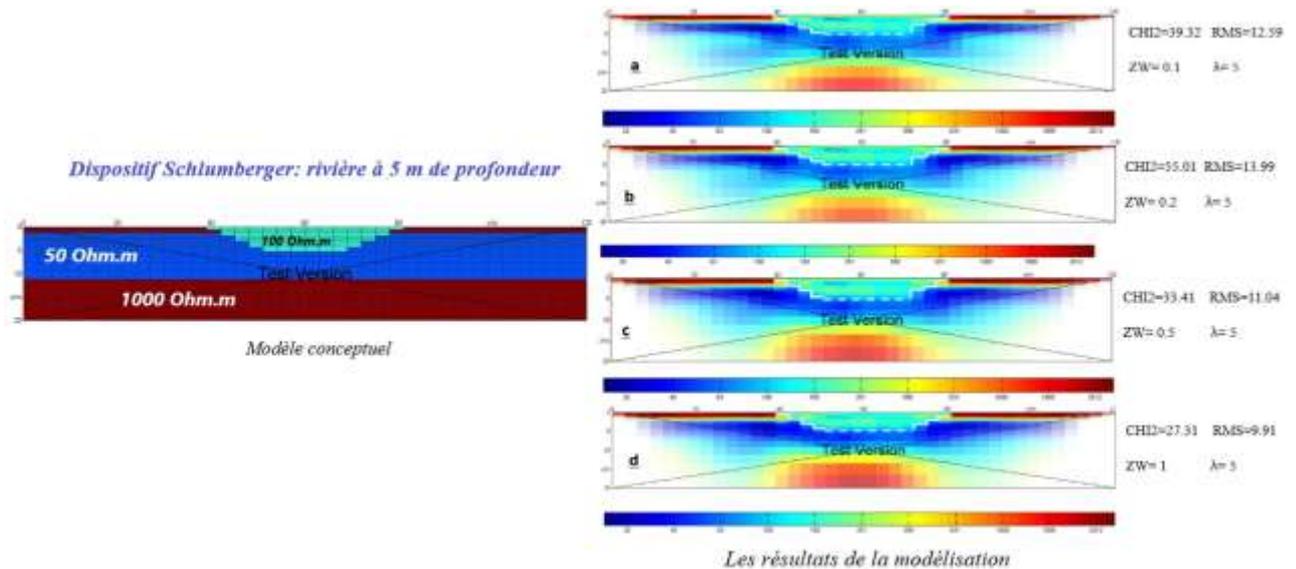
Le test du choix du dispositif a porté sur les configurations : Wenner Alpha, Wenner Beta, Schlumberger et un couplage du Wenner Alpha et Wenner Beta. Cela s'explique par le fait que les dispositifs comme Pôle-pôle, Pôle-Dipôle demandent une implantation d'une ou deux électrodes à l'infini qui peut être compliquée en fonction du terrain.

Le dispositif qui sera testé est composé de 40 électrodes espacées de 3m. Cet écartement a été choisi parce que la ravine est a priori peu profonde (profondeur d'investigation recherchée d'environ 20 m au milieu du dispositif). Les paramètres blocky et Robust n'ont été utilisés dans aucun des modèles. Seul le Z-weight (ZW) et Lambda (λ) ont été modifiés individuellement en vue d'obtenir les paramètres qui optimisent le mieux l'inversion.

- **Résultats de la modélisation**

La modélisation a été effectuée avec une rivière de 5 m de profondeur, une couche argileuse de 10 m et le socle également sur une épaisseur de 10 m, ce qui donne une profondeur totale de 20 m. Les valeurs de résistivité sont représentées sur le modèle conceptuel.

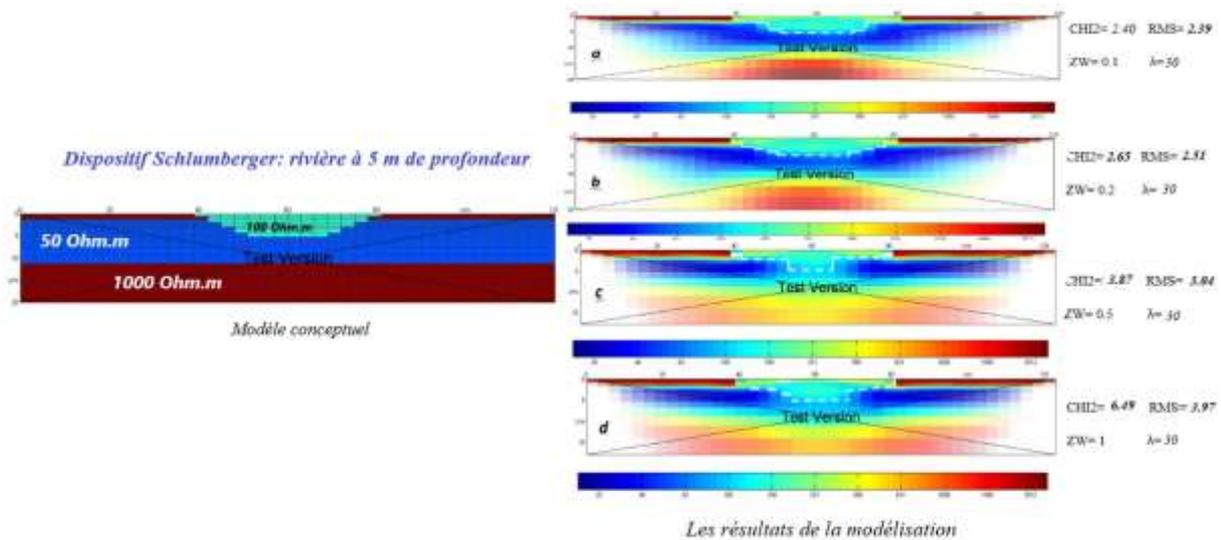
Dispositif Schlumberger



Modélisation de la ravine à 5 m de profondeur avec le dispositif Schlumberger et $\lambda = 5$

La première modélisation a été faite avec le dispositif Schlumberger et $\lambda = 5$ (cf. image ci-dessus).

- Avec ces paramètres, le résultat de la modélisation donne une représentation de la rivière qui concorde avec le modèle conceptuel ;
- Le fond de la rivière est bien représenté à 5 m sur le modèle conceptuel et aussi sur le résultat de la modélisation ;
- Malgré la bonne représentation des différentes couches et de la variation verticale sur les modèles, les paramètres qui minimisent mieux les erreurs sont ceux du modèle **d**. Ils donnent un CHI² plus faible et un RMS aussi faible que les autres.



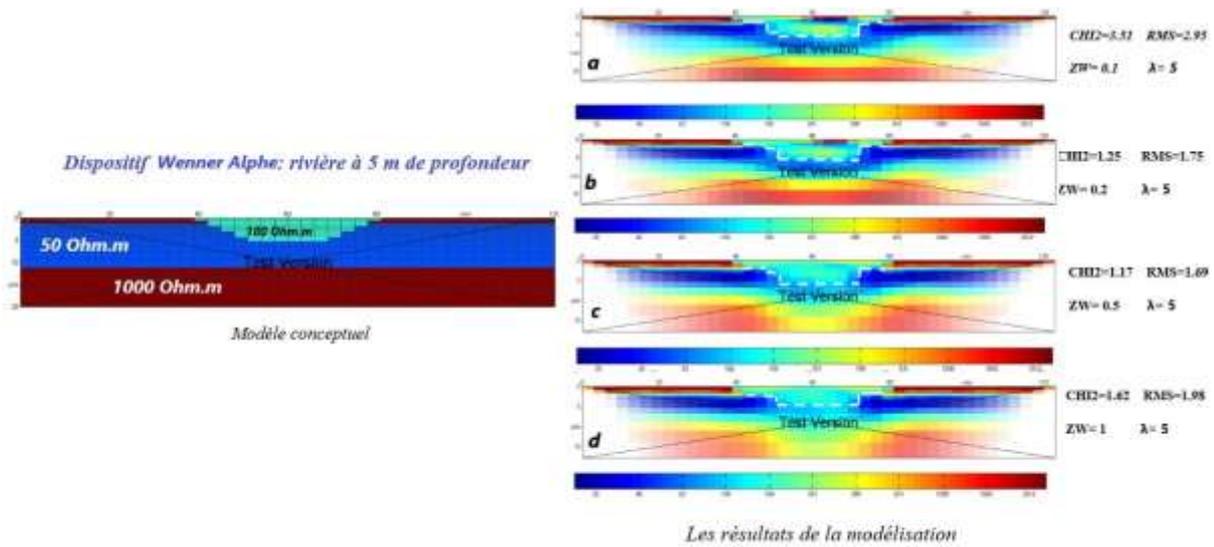
Modélisation de la ravine à 5 m de profondeur avec le dispositif Schlumberger et $\lambda = 30$

Sur la figure ci-dessus, les paramètres de la modélisation de la figure précédente ont été maintenus sauf le Lambda λ qui a été changé (de 5 on est passé à 30). Les résultats montrent que :

- Avec $\lambda = 30$ on a une bonne optimisation des erreurs dont le RMS qui tend vers 1 et le CHI² vers 2 ;
- Le paramètre $ZW = 0.1$ et $ZW = 0.2$ donne une représentation du fond de la ravine à 5 m avec des RMS et CHI² faible (*a et b*).
- Sur les figures *c et d* le modèle a du mal à bien représenter le fond de la ravine. Il est situé entre 4 et 5 m sachant que sur le modèle conceptuel le fond est à 5 m.

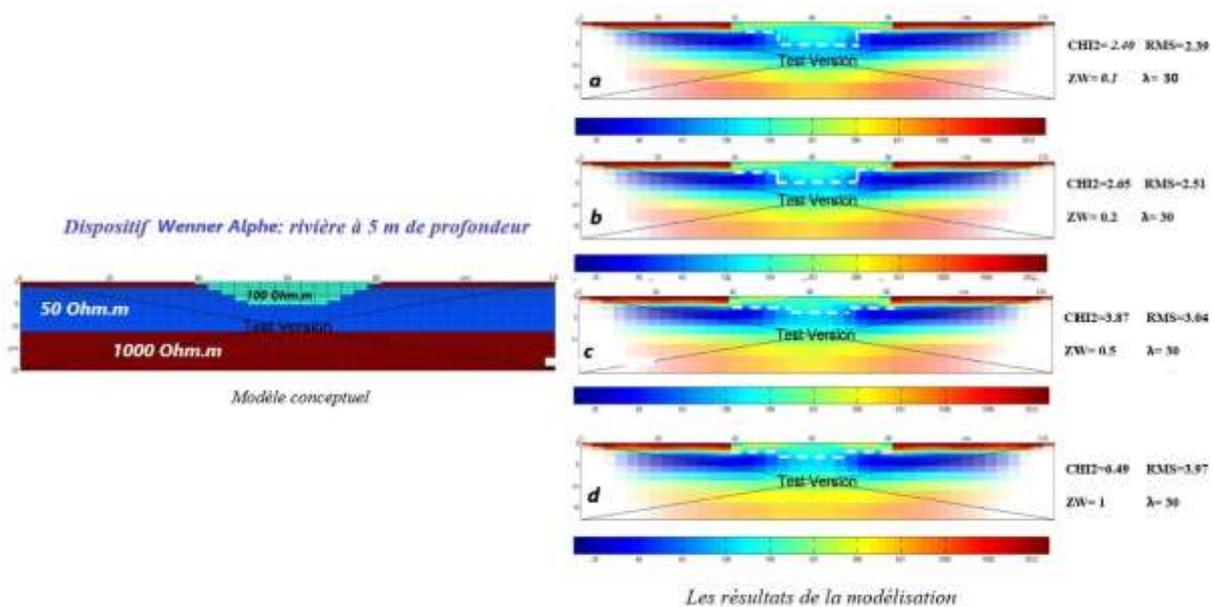
Pour la modélisation de la ravine à 5 m avec Schlumberger le meilleur jeu de paramètre retenu est celui de la figure *a*. C'est lui qui donne un modèle concordant avec des faibles valeurs de **RMS = 2.39** et **CHI² = 2.40**.

Dispositif Wenner Alpha



Modélisation de la ravine à 5 m de profondeur avec le dispositif Wenner Alpha et $\lambda = 5$

La modélisation avec le dispositif wenner alpha et $\lambda = 5$ donne un résultat qui caractérise mal la forme de la rivière hormis sa profondeur. On observe également l'apparition d'une nouvelle petite couche résistante (bande rouge au-dessus de la rivière) avec les deux premiers panneaux **a** et **b** qui ont respectivement un Z-Weight = 0.1 et 0.2. Pour le wenner alpha avec $\lambda = 5$, le meilleur jeu de données à retenir est celui de **c** car il minimise le mieux les erreurs RMS=1.69 et CHI²=1.17.

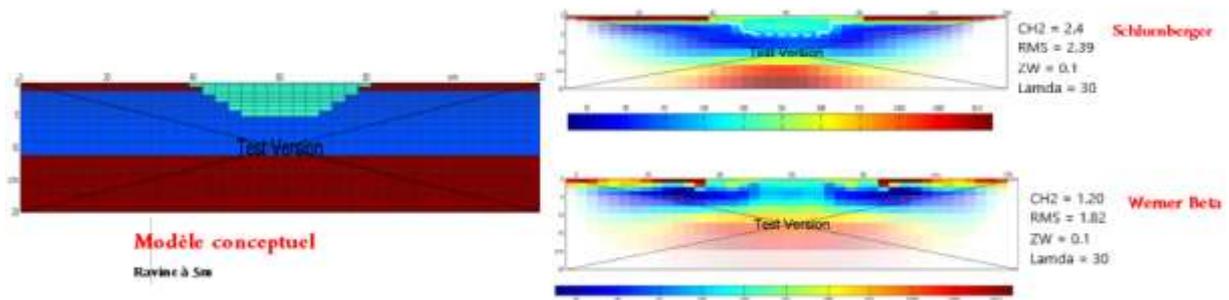


Modélisation de la ravine à 5 m de profondeur avec le dispositif Wenner Alpha et $\lambda = 30$

Le même dispositif wenner alpha est utilisé à nouveau mais avec un $\lambda = 30$. Sur les panneaux résultants de cette modélisation, on constate qu'il représente mieux la ravine. Mais on remarque aussi une sous-estimation de la profondeur sur les panneaux **c** et **d**. Le meilleur résultat à retenir avec $\lambda = 30$ est le **a** dont les paramètres d'erreur valent : RMS=2.39 et $\text{CHI}^2=2.40$. Malgré tout, ce wenner alpha n'est pas très bon seul car il sous-estime la profondeur sachant qu'il est plus sensible aux variations verticales de la résistivité apparente et part moins en profondeur. Peut-être qu'il sera plus intéressant de l'utiliser en le couplant avec un autre dispositif qui sera sensible aux variations horizontales des couches. Pour vérifier cette hypothèse, nous verrons par la suite de la modélisation ce que nous obtiendrons suite à un couplage de wenner alpha avec wenner beta ou Schlumberger.

A l'issu de ces modèles, on retiendra les paramètres $\lambda = 30$ et ZW=0.1 ou 0.2 parce que les RMS et CHI^2 ont tendance à tendre vers 1. Or selon les règles de la méthode, le meilleur dispositif à choisir pour les sondages sur le terrain après modélisation est celui qui caractérise bien les milieux et minimise les pourcentages d'erreurs. Tel n'est pas le cas pour les deux dispositifs utilisés précédemment. Pour cela, nous allons continuer la modélisation avec $\lambda = 30$ et avec d'autres dispositifs tout en faisant varier le ZW entre 0.1 ou 0.2.

Après avoir modéliser avec ZW égal à 0.1 et 0.2, nous nous sommes rendu compte qu'ils donnent pratiquement les mêmes résultats avec une marge d'erreur de ± 0.01 . Mais lorsque le ZW = 0.1, on obtient une faible valeur de RMS. Pour la suite nous allons juste vous présenter les résultats du ZW = 0.1



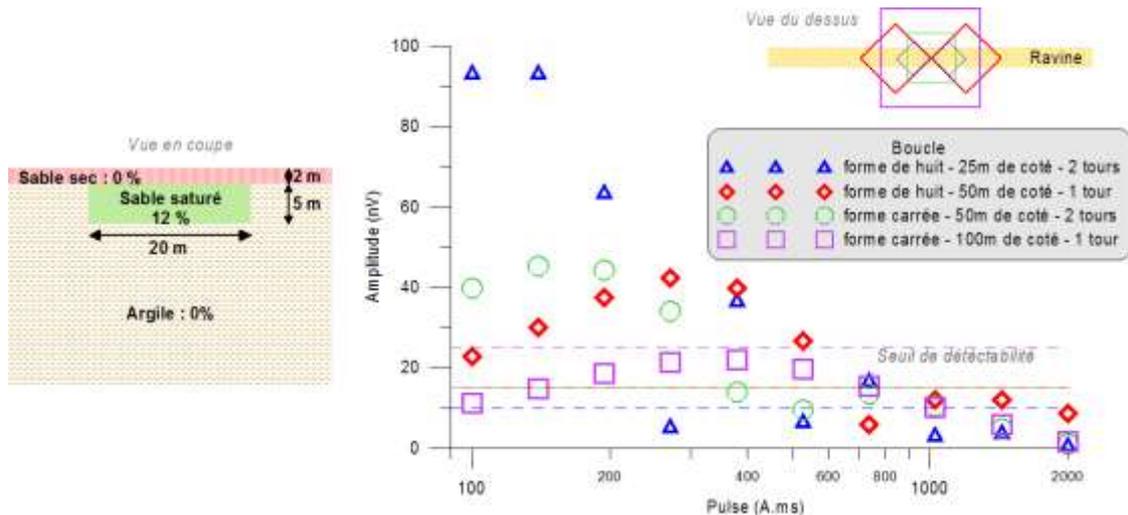
Modélisation de la ravine à 5 m de profondeur avec le dispositif Wenner Beta, Schlumberger et $\lambda = 30$

Pour conclure la partie de cette modélisation synthétique, après analyse de plusieurs scénarios nous décidons de retenir les dispositifs wenner Alpha et Beta couplés comme dispositif à utiliser pour nos mesures sur le terrain. En ce qui concerne le traitement des données de terrain acquises, nous allons combiner lors de l'inversion l'Alpha et le Beta avec les paramètres $ZW = 0.1$, $\lambda = 30$ et sans Blocky ni Robust.

Annexe 4 : Méthode de Résonance Magnétique des Protons (RMP)

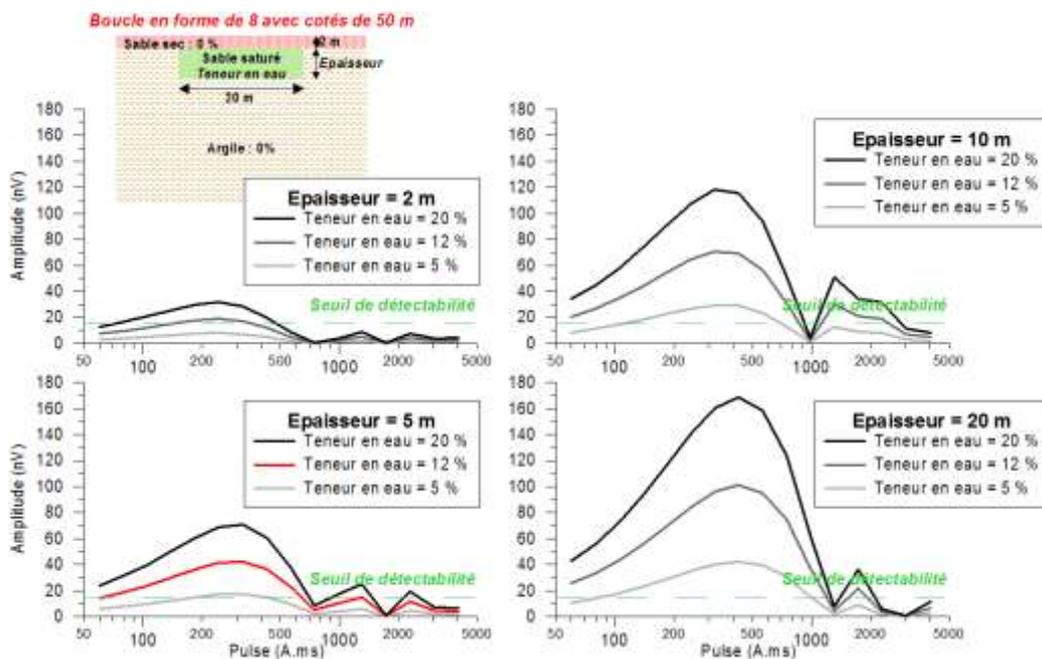
Modélisation RMP préliminaire

Pour pouvoir optimiser la qualité des données, nous avons également réalisé une modélisation synthétique RMP au bureau avant la mise en place sur le terrain. Grâce à cette modélisation nous avons pu choisir la forme et les dimensions de la boucle qui convient au mieux pour notre cas. Notre choix s'est porté sur la boucle de forme de huit avec deux carrés de 50 m de coté comme dimension (en rouge sur la figure ci-dessous).



Modèle pour le choix de la boucle RMP

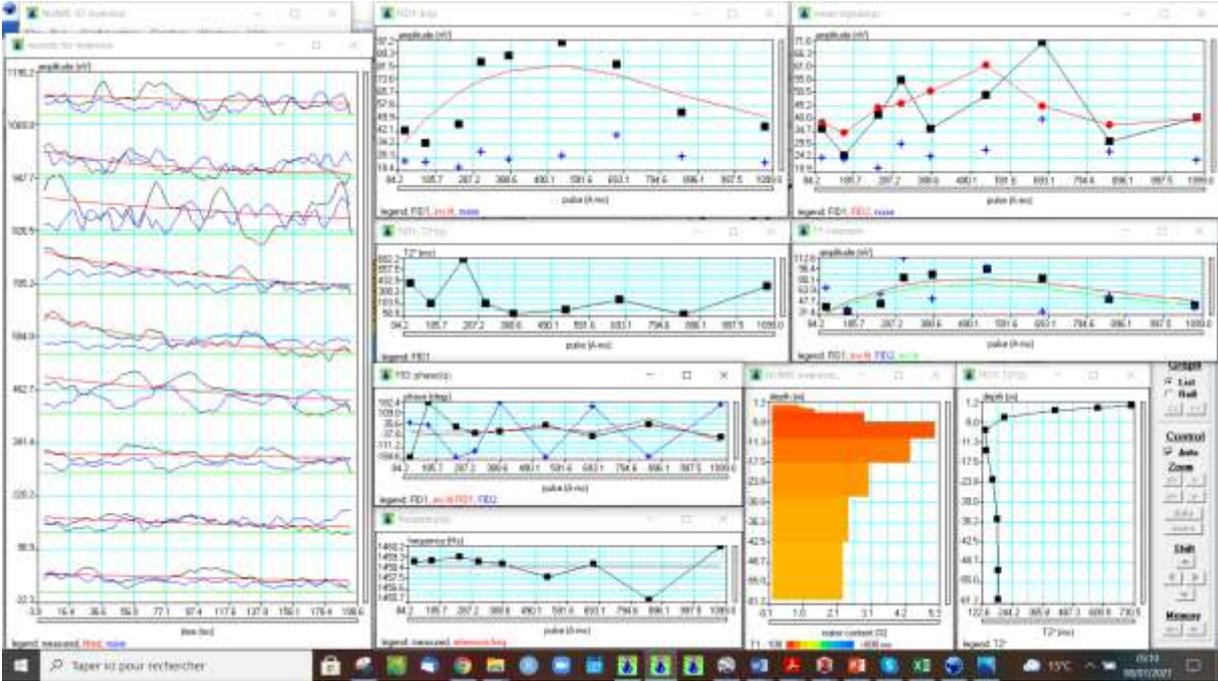
Après le choix de la boucle, nous avons aussi modélisé l'influence des caractéristiques de la ravine sur la détectabilité du signal RMP :



Résultat de la modélisation RMP synthétique avec les paramètres choisis

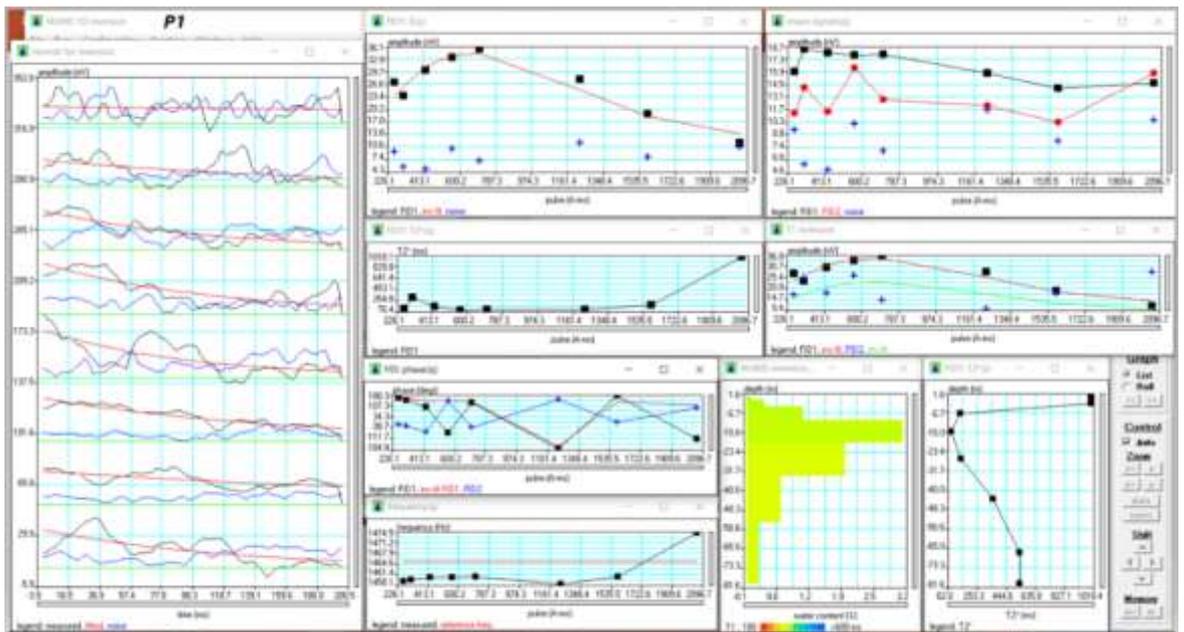
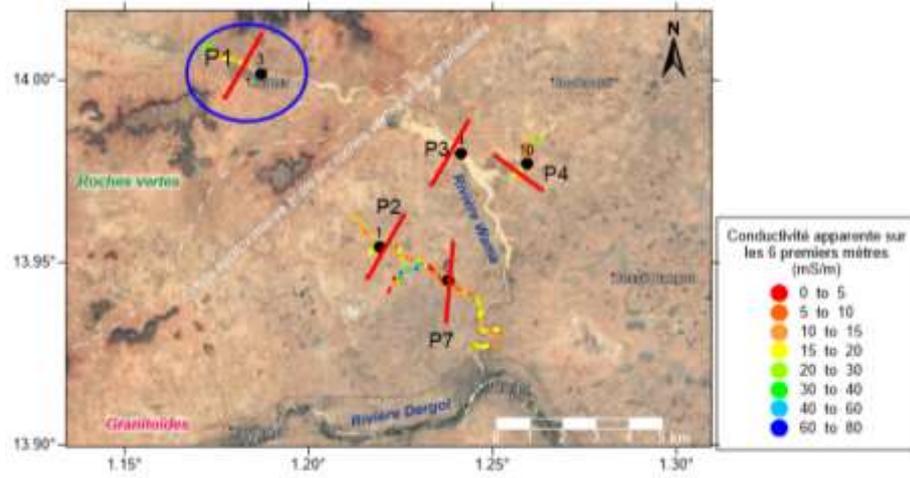
Résultats d'inversion des sondages RMP site par site

- Site de Werkéré

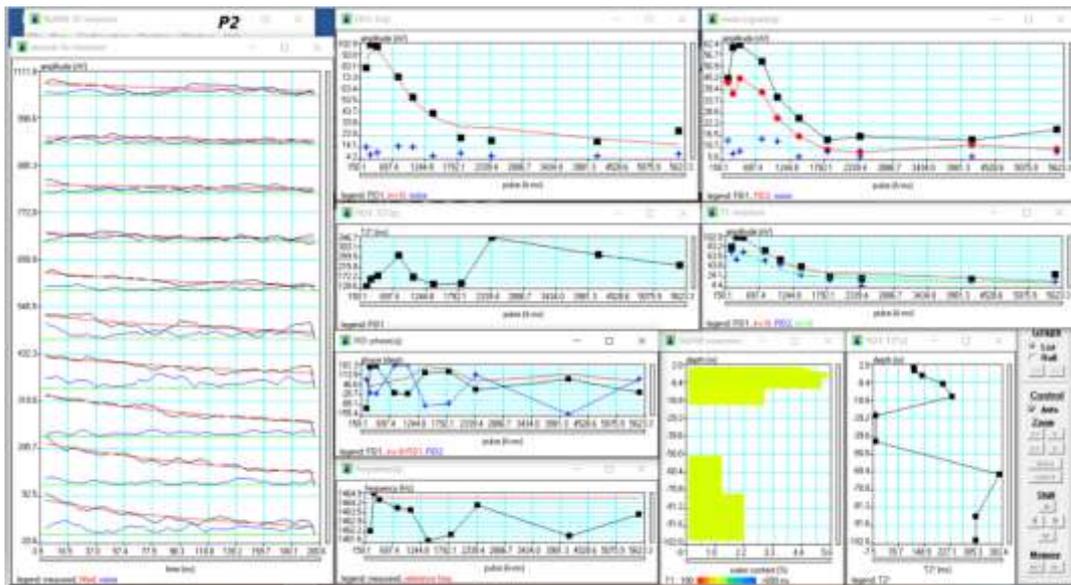
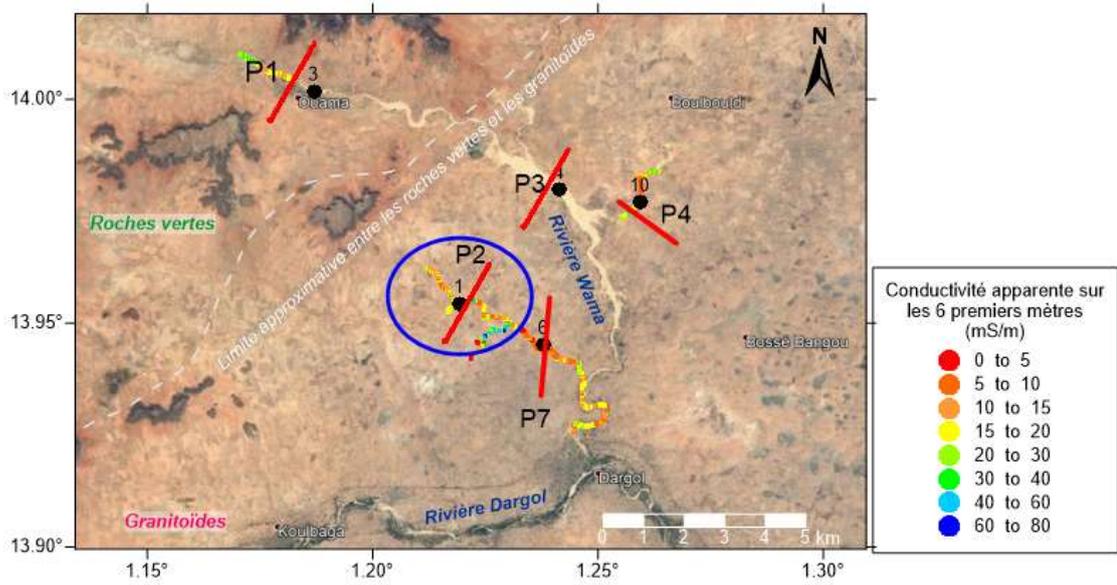


- Site de Ouama dans le bassin versant de Dargol

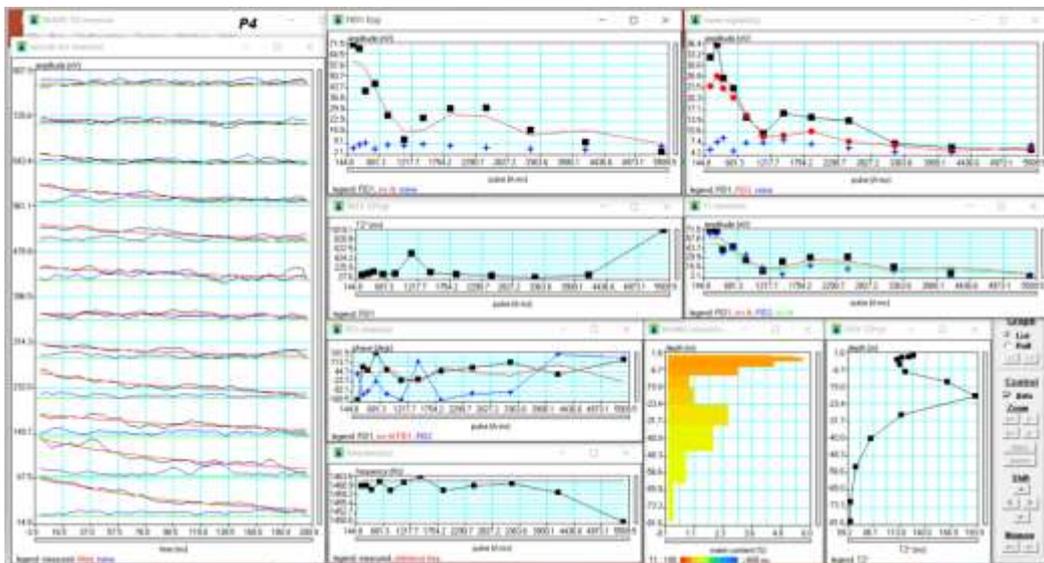
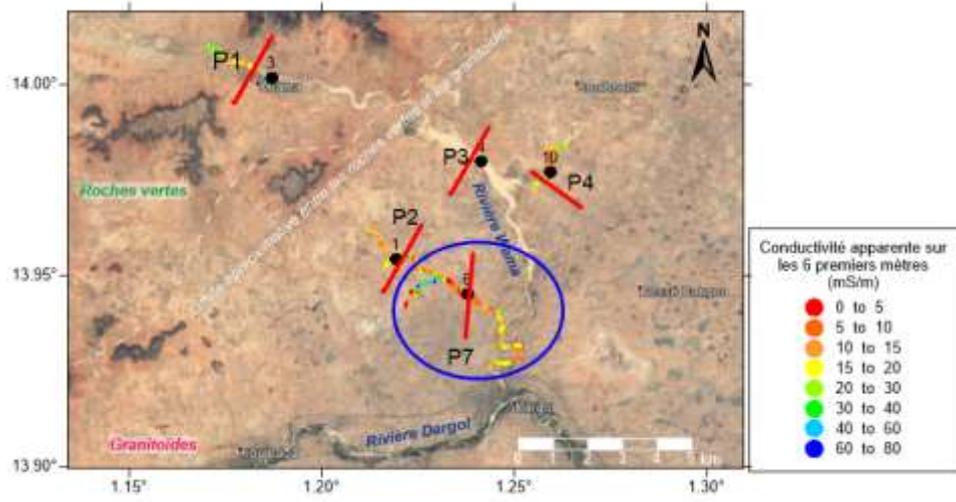
Sondage P1



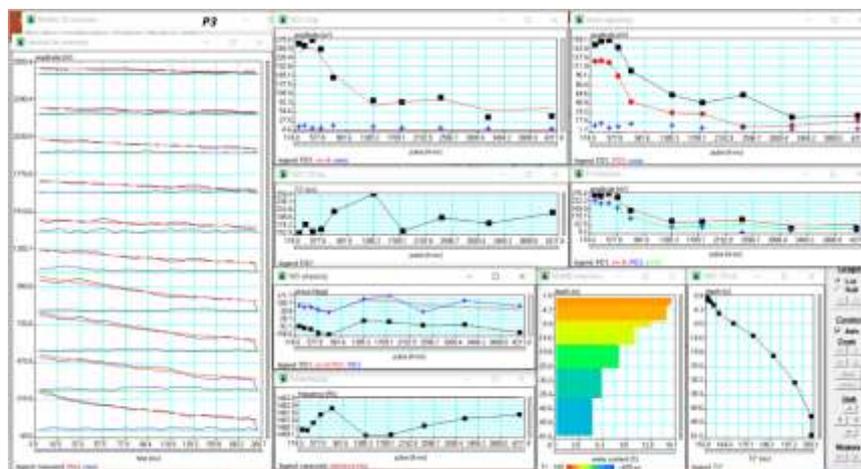
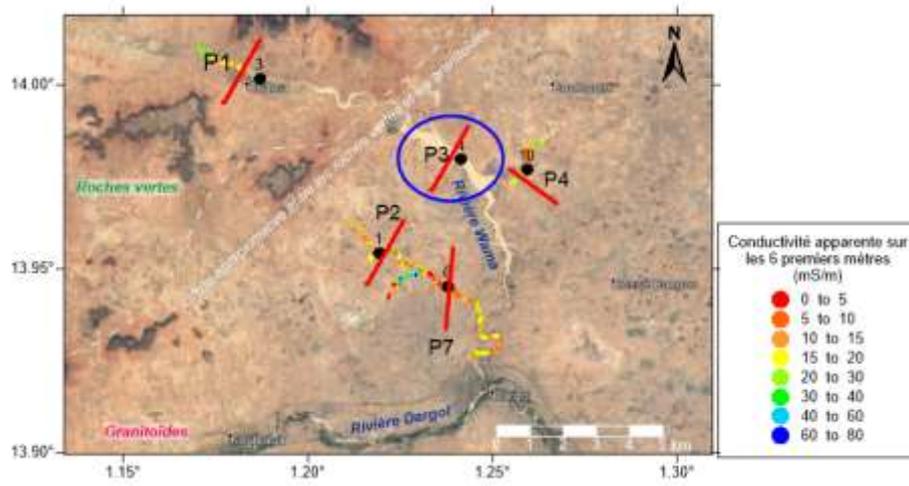
Sondage P2



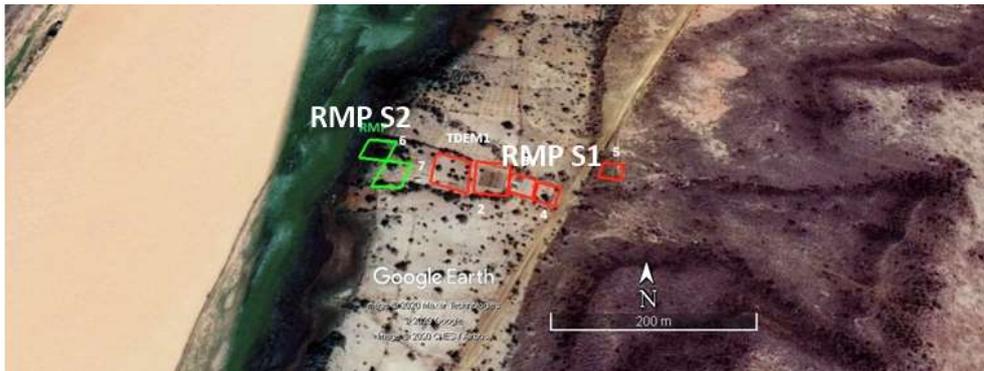
Sondage P4



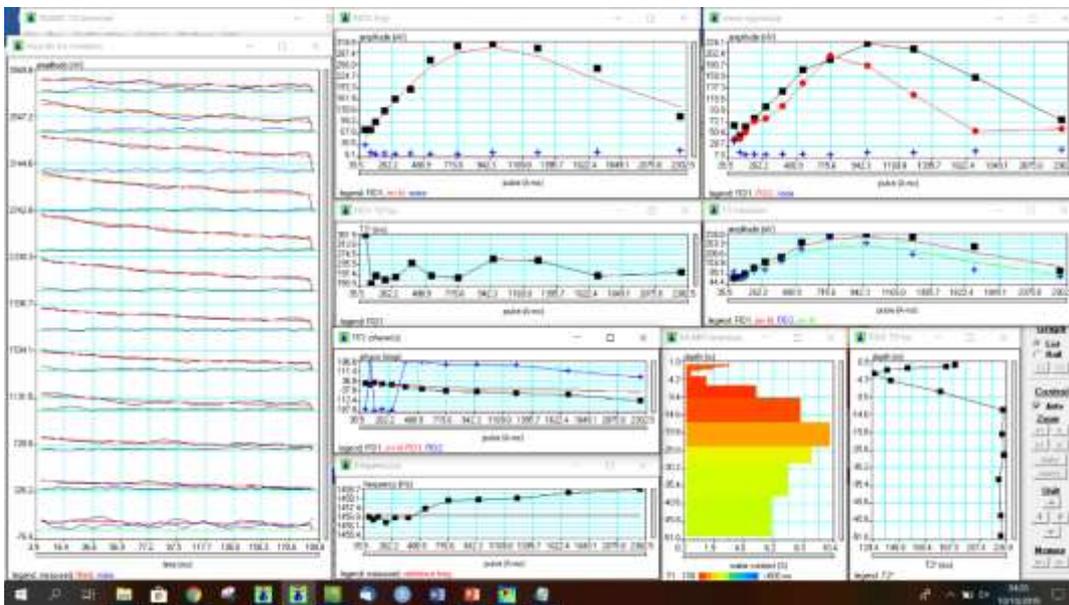
Sondage P3



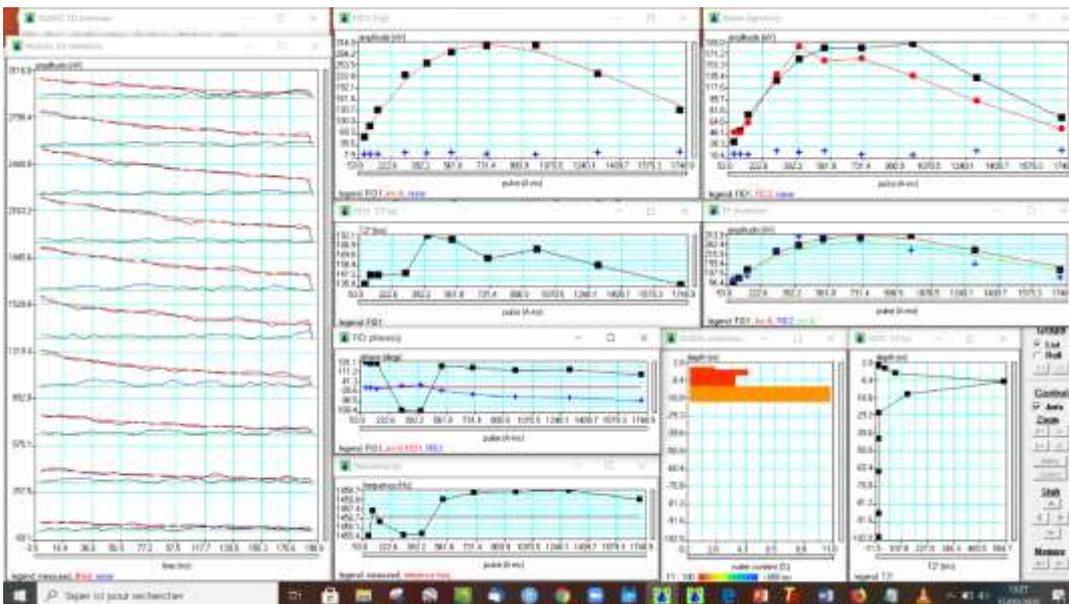
- Site de Gongga Zougou



Sondage S1



Sondage S2



Title: Hydrogeophysical study of exchanges between the Niger River and sedimentary and basement aquifers in Niger

Keywords: Aquifer-river exchange, piezometry, electrical and electromagnetic geophysical methods (ERT and TDEM), Magnetic Resonance Sounding (MRS), Sahel

Abstract: In the semi-arid southwestern Niger, in the Tillabéry and Niamey (capital of Niger Republic) regions, the Niger River has experienced emblematic effects of climate change. The consequences of the 1970s - 1980s severe droughts have altered the land cover and the water cycle. These disruptions and the observed intensification of rainfall events have resulted in (1) environmental degradation (deforestation and soil crusting) which has led to an increase in the runoff rate; (2) a long-term rise in the water table; and subsequently, (3) a modification of the hydrological regime of the Niger River. As a result, we observe on the one hand, an increase in the frequency of flooding during the rainy season in Niamey (e.g., 2012, 2020) and, on the other hand, a recurrence of low water flows at the end of the dry season, threatening domestic water supplies in the capital city (e.g., 2018). To better forecast river flows in the perspective of (1) sustainable water resource management and (2) flood risk control, this study aims to quantify the contribution of groundwater to the Niger River. This groundwater contribution is often difficult to estimate due to highly variable seasonal flows.

By combining quantitative hydrogeological and geophysical approaches, the study made it possible to characterize the different aquifer structures and their hydrogeological functioning along the Niger River. The piezometric monitoring allow drawing up a typology of exchanges according to geomorphology and geology. At a large scale (~ 1 km), these monitoring have confirmed that groundwater flows are towards Niger River regardless of the geological context and the season. At a finer scale, the functioning of the system becomes more complex and depends on the geology, the geomorphology, and the season. All the results highlighted the buffer role of the alluvial aquifer which (1) exchanges with the river and (2) is recharged by the adjacent regional aquifers (weathered basement and sedimentary formation of the Continental Terminal). The comparison of groundwater fluxes with river warning levels at the Niamey station ($1760 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for flood alert; $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ for drought alert) shows that the capacity of the alluvial aquifer to dampen floods (maximum $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) and to support low water levels ($\sim 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) remains limited. However, the flux from regional aquifers towards the Niger River valley represents a significant environmental flux ($\sim 4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ over a 530-km-long section) compared to current consumption in link with the main water needs of the population (domestic use, irrigation, pastoralism).

Titre : Etude hydrogéophysique des échanges entre le fleuve Niger et les aquifères sédimentaires et de socle au Niger

Mots clés : Echange nappe - rivière, piézométrie, méthodes géophysiques électriques et électromagnétiques (ERT et TDEM), Résonance magnétique des protons (RMP), Sahel

Résumé : Dans le sud-ouest semi-aride du Niger, dans les régions de Tillabéry et de Niamey (capitale du pays), le fleuve Niger a connu des effets emblématiques du changement climatique. Les conséquences des sécheresses sévères endurées dans les années 1970 - 1980 ont modifié la couverture du sol et le cycle de l'eau. Ces bouleversements ainsi que l'intensification observée des événements pluvieux ont pour conséquence (1) la dégradation de l'environnement (déforestation et encroûtement des sols) qui a conduit à une augmentation du taux de ruissellement ; (2) une remontée durable de la nappe phréatique ; et par la suite, (3) une modification du régime hydrologique du fleuve Niger. En conséquence, on observe d'une part, une augmentation de la fréquence des inondations pendant la saison des pluies dans la ville de Niamey (ex., 2012, 2020) et, d'autre part, une récurrence de faibles débits d'étiage en fin de saison sèche, menaçant l'approvisionnement en eau domestique de la capitale (ex., 2018). Pour mieux prévoir les débits du fleuve dans la perspective (1) d'une gestion durable de la ressource en eau et (2) de la maîtrise des risques d'inondation, cette étude vise à quantifier la contribution des eaux souterraines au débit du fleuve. Cette contribution des eaux souterraines est souvent difficile à estimer en raison des flux saisonniers très variables.

Combinant les approches quantitatives hydro-géologiques et géophysiques, l'étude a permis de caractériser les différentes structures aquifères et leurs fonctionnements hydrogéologiques en bordure du fleuve Niger. Les suivis piézométriques ont permis de dresser une typologie des échanges en fonction de la géomorphologie et de la géologie. A large échelle (~ 1 km) ces suivis ont confirmé que les flux d'eau souterrains sont en direction du fleuve, quel que soit le contexte géologique et la saison. A plus fine échelle, le fonctionnement du système devient plus complexe et dépend à la fois de la géologie, de la géomorphologie et de la saison. L'ensemble des résultats a permis de mettre en évidence le rôle tampon de l'aquifère alluvial qui (1) échange avec le fleuve et (2) est rechargé par les aquifères régionaux adjacents (altérites de socle et formation sédimentaire du Continental Terminal). La comparaison des flux souterrains avec les seuils d'alerte à la station de Niamey (1760 m³.s⁻¹ pour l'alerte orange aux crues ; 10 m³.s⁻¹ pour l'alerte sécheresse) montre que la capacité de l'aquifère alluvial à amortir les crues (max. 46 m³.s⁻¹) et à soutenir les étiages (max. 2 m³.s⁻¹) reste limitée. Le flux des aquifères régionaux vers le fleuve Niger représente toutefois un flux environnemental significatif (~4.5 m³.s⁻¹ sur une section de 530 km de long), comparé à la consommation actuelle liée aux principaux besoins en eau de la population (eau domestique, irrigation, pastoralisme).