Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Mémoire de maîtrise en Sciences de la terre

Présenté par Madame Habsatou ANGO

Evaluation des potentialités des ressources en eau du Parc W du Niger

Membres du jury

René LEFEBVRE, PhD, INRS, Centre Eau Terre Environnement, Québec **(Directeur)**

Boureima OUSMANE, PhD, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger (**Co-directeur**)

Alfonso RIVERA, PhD, Commission géologique du Canada, Québec **(Évaluateur interne)**

Éric ROSA, PhD, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue**,** Québec (**Évaluateur externe**)

Août 2019

DÉDICACES

Au terme de ce travail, j'ai bien voulu témoigner ma profonde gratitude à ceux-là qui me sont si chers. Il s'agit de:

- ✓ À mon époux M. Moussa Sayabou, Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement pour ses diverses contributions et son soutien moral et la patience qu'il a fait montre tout au long de mon cycle ;
- ✓ À mon père, M. Ango Namata, qui œuvre constamment pour le succès de ses enfants et surtout pour m'avoir inculqué l'amour des études et le courage de persévérer ;
- ✓ À ma mère, Fati Amadou pour toute son affection et ses prières qui m'ont toujours accompagné ainsi que son soutien inlassable qui m'a permis d'étudier dans la quiétude ;
- ✓ À mon chers fils, Mohamed Sayabou
- ✓ À mes frères et sœurs.

REMERCIEMENTS

Cette étude est le fruit d'efforts conjugués de nombreuses personnes et institutions auxquelles j'adresse mes remerciements et ma profonde gratitude. Il s'agit particulièrement :

*Mr **René Lefebvre** (INRS, Québec), pour avoir accepté de diriger ce mémoire et pour tous les efforts déployés au cours de l'élaboration de cette étude ;*

*Mr **Boureima Ousmane** (UAM, Niger) pour ses contributions diverses et surtout la coordination des travaux de terrain ;*

*Mr **Bernard Giroux**, Directeur de programme de Maitrise en sciences de la Terre (INRS, Québec), pour sa disponibilité et ses conseils ;*

*Les évaluateurs, Mr **Alfonso Rivera** et Mr **Éric Rosa,** pour leur disponibilité et leurs contributions ayant permis l'amélioration de la qualité de cette étude.*

*Mr **Maximilien Delestre** (Rennes, France) pour sa contribution et sa collaboration dans l'étude bibliographique ;*

*Tout le personnel de l'INRS et particulièrement **Jean-Marc Ballard**, **Marco Boutin**, **Melanie Raynauld**, **Guillaume Legare-Couture, Stefane Premont, Alain Rousseau**, **Charles Gignac, Khalid Oubennaceur, Christine Rivard**, (INRS, Québec) et **John Molson (Université Laval, Québec)** pour leurs contributions et collaborations ;*

***Dr. Abdoul Kader Hassan** (UAM, Niger), **Nasser Zanguina, Saidou Sahabi** pour leur contribution à la réalisation des travaux de terrain ;*

Le personnel et des Ministères de l'hydraulique et celui de l'environnement ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ces travaux, recevez mes remerciements fraternels; néanmoins je me dois de citer quelques - uns :

*Mr **Attahirou Karbo**, SG/MHA (Niger), Mr **Maman Moussa**, SGA/MHA (Niger)**,** Mr **Chaibou Tankari**, DGH/MHA (Niger) et leurs collaborateurs, de n'ayant ménagé aucun effort dans leur soutien technique en logistique lors de nos missions de terrain, en déployant des moyens conséquents pour la mise en œuvre de la mission de terrain d'octobre 2018 ; la Colonel **Issa Mariama Ali**, Directrice de la faune et des aires protégées d'avoir bien accueilli notre projet d'étude et le soutien technique quant à l'organisation de nos différentes missions de terrain; le Colonel **Ibro Adamou**, DGA des Eaux et Forêts pour ses contributions dans la mise en œuvre des travaux de*

*terrain au Parc W ; Mr **Sahailou Samaila**, Directeur actuel de la faune et des aires protégées pour ses contributions diverses dans l'organisation de nos missions de terrain; au Colonel **Djibey Moussa**, conservateur du Parc W du Niger et ses collaborateurs, particulièrement Mr **Harissou Yahou**, chargé du suivi écologique du Parc W, pour leur contribution et collaboration dans l'organisation de nos visites au Parc W.*

Ces travaux ont été financés par le Programme Canadien de Bourse de la Francophonie avec la contribution du Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement et le Ministère en charge de l'Environnement du Niger.

Table des matières

DÉDICACES ..... *ii*
REMERCIEMENTS ..... *iii*
LISTE DES FIGURES ..... *ix*
LISTE DES PHOTOS ..... *xi*
LISTE DES CARTES ..... *xii*
LISTE DES ANNEXES ..... *xiii*
RÉSUMÉ ..... *xv*
ABSTRACT ..... *xvi*
INTRODUCTION *1*
I. GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE *3*
1.1. Généralités sur la région de Tillabéri 3
1.1.1. Situation géographique et administrative 3
1.1.2. Cadre climatique 4
1.1.3. Cadre topographique et hydrographique 6
1.1.4. Occupation du territoire 7
1.1.5. Cadre géologique et hydrogéologique 10
1.2. Généralités sur la zone du Parc W du Niger 11
1.2.1. Rappel historique du Parc W du Niger et des travaux effectués 11
1.2.2. Situation géographique de la zone d'étude, le Parc du W 12
1.2.3. Cadre administratif et organisationnel 13
1.2.4. Topographie et hydrographie 14
1.2.4.1. Topographie 14
1.2.4.2. Hydrographie 15
1.2.5. Climat 16
1.2.6. Végétation, faune et occupation des sols 17
1.2.7. Cadre géologique et géomorphologique 19
1.2.8. Pédologie 20
1.2.9. Cadre hydrogéologique 21
1.2.9.1. Aquifères 22
1.2.9.2. Recharge des nappes en régions semi-arides 29
II. MATERIELS ET METHODES 36
2.1. Matériels utilisés 36
2.2. Méthodologie 37
2.2.1. Essais hydrauliques 38

2.2.1.2. Pompage d'essai de longue durée *40*
2.2.2. Description de la méthode de bathymétrie 40
2.2.3. Echantillonnage de l'eau 42
2.2.4. Programme d'exploitation durable de la ressource en eau du Parc W ... 45
III. RESULTATS DES TRAVAUX *46*
3.1. Résultats des essais hydrauliques 46
3.2. Résultats des travaux de bathymétrie 52
3.3. Conditions hydrogéologiques du parc du w 55
3.3.1. Approvisionnement en eau de la faune 55
3.3.2. Hydrostratigraphie 56
3.3.3. Piézométrie 56
3.3.4. Propriétés hydrauliques 57
3.3.5. Estimation de la recharge pour le Parc W 58
3.3.6. Géochimie et isotopes de l'eau 63
3.3.6.1. Caractérisation hydrogéochimique du Parc du W 63
3.3.6.2. Géochimie isotopique 66
3.3.6.4. Types d'eau 69
3.4. Modélisation numérique 74
3.4.1. Modèle conceptuel hydrogéologique 76
3.5. Gestion durable des ressources en eau 82
3.5.1. Besoin en eau de la faune et capacité d'approvisionnement 82
3.5.2. Rendement des installations hydrauliques existantes 84
3.5.3. Programme d'exploitation durable 84
IV. DISCUSSIONS DES RESULTATS *87*
4.1. Essais hydrauliques 87
4.2. Topographie des mares 89
4.3. Géochimie isotopique 89
CONCLUSION ET PERSPECTIVES *92*
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES *94*
ANNEXES *106*
CARTES DE LA RÉGION D'ÉTUDE *111*

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1:CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX COURS D'EAU DE LA REGION DE TILLABERI (ABDOURHAMANE ET AL., 2016) 7
TABLEAU 2:TEMPERATURE DU PARC W DU NIGER (AQUASTAT/FAO, 2017) 17
TABLEAU 3:UNITES PEDOLOGIQUES DE LA CARTE DES SOLS DU PARC W DU NIGER DE CENTRE DE DONNEES EUROPEEN EXTRAIT DE LA CARTE MONDIALE DES SOLS A 1:500000, VOLUME 1 LEGENDE (FAO, UNESCO, 1974)..... 21
TABLEAU 4: DONNEES D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DU PARC W, DU NIGER ET DE LA COMMUNE RURALE DE TAMOU, DEPARTEMENT DE SAY (BRGM, 1990 ; DIRECTION REGIONALE DE L'HYDRAULIQUE DE TILLABERI, 2004)..... 25
TABLEAU 5:CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES DES AQUIFERES DU SYSTEME DES IULLEMEDEN ET DES AQUIFERES DU SOCLE (MH/E, 2011)..... 28
TABLEAU 6: COMPARAISON DES METHODES DE DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES FORAGES DU PARC W 47
TABLEAU 7: CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES FORAGES DU PARC W (SOURCE DE DONNEES DU BRGM DES ESSAIS REALISES EN 1990)..... 50
TABLEAU 8: COMPARAISON AVEC LE TABLEAU 7 DES CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES FORAGES DU PARC W DU NIGER POUR LES ESSAIS REALISES SUR 3 FORAGES EN 2018..... 50
TABLEAU 9:CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES DU SOCLE D'AFRIQUE (ABDOU, 2012) 50
TABLEAU 10: SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES DU PARC W DU NIGER 51
TABLEAU 11:VOLUME CUMULE DE LA MARE DE GNAFAROU 52
TABLEAU 12:SECTIONS POUR LA RIVIERE MEKROU..... 53
TABLEAU 13:SECTIONS POUR LA RIVIERE TAPOA 54
TABLEAU 14:RECAPITULATIF DES CAPACITES DE STOCKAGE D'EAU DES MARES... 54
TABLEAU 15:QUELQUES PROPRIETES HYDRAULIQUES DANS DES PUITS ET FORAGES A PROXIMITE DU PARC DU W (BERNERT 1981[1], BRGM 1987[2], MCD 1992[3], GIRARD 1993[4], OBUOBIE 2008[5]). 58
TABLEAU 16PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES MESURES SUR LE TERRAIN 65
TABLEAU 17: VALEURS LIMITES DES PARAMETRES CHIMIQUES POUR L'EAU POTABLE (OMS, 2004) 66
TABLEAU 18: SYNTHESE DES ANALYSES GEOCHIMIQUES..... 70
TABLEAU 19: CALCUL DE DURETE DE L'EAU..... 73
TABLEAU 20: CONDITIONS DES SIMULATIONS NUMERIQUES INITIALES UTILISANT DES PROPRIETES HYDRAULIQUES UNIFORMES 75

TABLEAU 21: SYNTHESE DES CONDITIONS OBSERVEES DANS LA REGION D'ETUDE SUPPORTANT LE MODELE CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE DU PARC DU W 77
TABLEAU 22: BESOINS EN EAU DES POPULATIONS DE FAUNE DU PRW (MESU/DD, 2015)..... 83
TABLEAU 23: BESOIN EN EAU EN FONCTION DE LA CONSOMMATION JOURNALIERE 83
TABLEAU 24:NOMBRE TOTAL DE POINTS D'EAU SUR LES TROIS COMPOSANTES (RABEIL, 2003)..... 107
TABLEAU 25: LISTE D'ETUDE REALISEES DANS LE CADRE DU PROJET ECOPAS, SUR LES PARCS DU COMPLEXE W -ARLY -PENDJARI (WAP) ET DANS LE CADRE DU PROGRAMME D'APPUI AUX PARCS DE L'ENTENTE (PAPE)..... 108

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1:SITUATION DE LA REGION DE TILLABERI AU NIGER (MAINASSARA, 2010)..... 3
FIGURE 2:CIRCULATION ATMOSPHERIQUE DES MASSES D'AIR EN AFRIQUE DE L'OUEST (MOREL, 1981 CITE PAR GUERO, 2000) 4
FIGURE 3:ZONES CLIMATIQUES DU NIGER (PLUVIOMETRIE ANNUELLE MOYENNE SUR LA PERIODE 1975-2004), (SOURCE : RAPPORT PROGRAMME D'ACTION NATIONAL POUR L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES JUILLET 2006 D'APRES DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE, EDITION 2005 5
FIGURE 4: VARIATION DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE DE 1980 A 2012 DANS LA REGION DE TILLABERI (KATTIELLOU ET AL., 2014)..... 6
FIGURE 5:RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA REGION DE TILLABERI (ABDOURHAMANE ET AL., 2010)..... 7
FIGURE 6: OCCUPATION DES TERRES, NIGER 2013 (CILSS, 2016) 9
FIGURE 7: ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE VEGETALE DANS LE CENTRE SUD DU NIGER (CILSS, 2016) 9
FIGURE 8: LOCALISATION DU COMPLEXE WAP (USGS, 2017 A)..... 13
FIGURE 9: ORGANIGRAMME ADMINISTRATIF DU PARC W DU NIGER (COMMUNICATION PERSONNELLE DE L'ADMINISTRATION DU PARC W, 2017)..... 14
FIGURE 10: PRECIPITATIONS AUTOURS DU PARC NATIONAL DU W (MODIFIE DE L'USGS ,2017) 16
FIGURE 11: CARTE DE LA VEGETATION DU PARC W DU NIGER (RABEIL, 2003) 18
FIGURE 12 : MODELE CONCEPTUEL DE DEVELOPPEMENT DES AQUIFERES DANS LES ROCHES DU SOCLE SOUS UN CLIMAT SEMI-ARIDE (CHILTON ET FOSTER ,1995)..... 24
FIGURE 13: COUPE LITHOLOGIQUE D'UN FORAGE A LA PERIPHERIE DU PARC W (DIRECTION REGIONALE DE L'HYDRAULIQUE DE TILLABERI, 2004).... 26
FIGURE 14: COUPE LITHOLOGIQUE D'UN FORAGE DU PARC W DU NIGER (BRGM, 1990)..... 27
FIGURE 15: DISTRIBUTION GLOBALE DES ISOTOPES STABLES DANS LE LIPTAKO GOURMA (AIEA, 2017)..... 28
FIGURE 16: MECANISME DE RECHARGE EN ZONE SEMI-ARIDE (LERNER, 1997)……30
FIGURE 17: COURBE CARACTERISTIQUE DU FORAGE DE MOUSSIEMOU..... 47
FIGURE 18: FORAGE TAPOA MOUSSIEMOU, COURBE DE DESCENTE ET DE REMONTEE (MISSION ,2018)..... 49
FIGURE 19:FORAGE TAPOA MOUSSIEMOU,COURBE DE DESCENTE ET DE REMONTEE (ESSAI DU BRGM EN 1990)..... 49
FIGURE 20:MARE DE GNAFAROU 53
FIGURE 21: BILAN MENSUEL AVEC LES PARAMETRES LES MOINS FAVORABLES A LA RECHARGE (DELESTRE, 2017)..... 59
FIGURE 22: BILAN MENSUEL AVEC LES PARAMETRES LES PLUS FAVORABLES A LA RECHARGE (DELESTRE, 2017) 60

FIGURE 23: BILAN D'HUMIDITE DU SOL POUR L'ANNEE 2011 (DELESTRE ,2017) 61
FIGURE 24:BILAN D'HUMIDITE DU SOL POUR L'ANNEE 2014 (DELESTRE ,2017) 61
FIGURE 25: BILAN D'HUMIDITE DU SOL POUR L'ANNEE 2012 (DELESTRE, 2017) 61
FIGURE 26: BILAN D'HUMIDITE DU SOL POUR L'ANNEE 2015 (DELESTRE ,2017) 62
FIGURE 27 : RELATION 18 O ET 2H DANS LES PRECIPITATIONS EN ZONE SAHELIENNE DE L'AFRIQUE DE L'OUEST (BAMAKO, DAKAR, KANO, N'DJAMENA, OUAGADOUGOU), (ABDOU, 2012) 67
FIGURE 28: REPARTITION DES ISOTOPES STABLES DANS L'EAU ECHANTILLONNEE EN 2018 DANS LE PARC W DU NIGER..... 67
FIGURE 29: VALEURS DE ^{14}C DES EAUX PAR RAPPORT A $\delta^{13}C$ 68
FIGURE 30: RELATION ENTRE LES TENEURS EN TRITIUM ET LE POURCENTAGE EN CARBONE MODERNE 69
FIGURE 31:REPRESENTATION GRAPHIQUE DES TYPES D'EAU SUR LE DIAGRAMME DE PIPER 70
FIGURE 32:SECTION TRANSVERSALE TOPOGRAPHIQUE DANS LA PARTIE NORD-EST DU PARC NATIONAL DU W UTILISEE COMME BASE POUR LE MODELE NUMERIQUE 2D (LOCALISATION A LA CARTE I) 74
FIGURE 33:MAILLAGES NUMERIQUES ET CONDITIONS LIMITES UTILISEES POUR LES SIMULATIONS NUMERIQUES DU SYSTEME AQUIFERE (LA LIGNE VERTE REPRESENTE LA TOPOGRAPHIE DE SURFACE) 75
FIGURE 34:RESULTATS DE SIMULATION POUR DES CONDITIONS DE MODELE AVEC CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ANISOTROPE ET UNE ZONE SUPERIEURE PLUS PERMEABLE (KX = 10-5 M/S ;KZ = 10^{-6} M/S) REPRESENTANT LA ROCHE FRACTUREE ALTEREE ET UNE ZONE DE PERMEABILITE INFERIEURE (KX = 10^{-6} M/S ; KZ = 10^{-7} M/S) REPRESENTANT LE SUBSTRATUM ROCHEUX NON ALTERE. A) RECHARGE DE 10 MM/AN. B) RECHARGE DE 20 MM/AN. 76
FIGURE 35:CONDITIONS REPRESENTEES PAR LA SOLUTION DE DUPUIT-FORCHHEIMER 77
FIGURE 36:SOLUTION DE DUPUIT -FORCHHEIMER POUR LA SURFACE LIBRE. RECHARGE 2.5 A 15 MM/AN POUR K DE 10^{-6} A $5X10^{-6}$ M/S 80
FIGURE 37:SOLUTION DE CHESNAUX ET AL. (2005) 81
FIGURE 38:MODELE CONCEPTUEL DU PROGRAMME DE MONITORING POUR L'EXPLOITATION DURABLE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE 85
FIGURE 39:PROGRAMME DE MONITORING POUR L'EXPLOITATION DURABLE 86

LISTE DES PHOTOS

PHOTO 1: DENDROCYGNE VEUF (DENDROCYGNA VIDUATA) SUR LE FLEUVE NIGER, PARC NATIONAL W DU NIGER (UNESCO, 2016) 15
PHOTO 2:VEGETATION BRULEE A L'INTERIEUR DU PARC W DU NIGER (GREGOIRE ET AL, 2003) 19
PHOTO 3:TROUPEAU D'ELEPHANT DANS LE PARC DU NIGER (HALIDOU, 2009) 19
PHOTO 4: DEMONTAGE D'UN FORAGE A), SOUFFLAGE A L'AIR LIFT B)..... 39
PHOTO 5: TRAVAUX DE BATHYMETRIE, PARAMETRAGE AVEC LA STATION TOTALE (IMAGE DE DROITE) (MISSION DE MAI 2018)..... 41
PHOTO 6: COMBINAISON FILTRE – SERINGUE ET FILTRE MODELE FHT-45 .. 42
PHOTO 7: MATERIEL DE MESURES PHYSICO-CHIMIQUES IN SITU..... 43
PHOTO 8: ECHANTILLONNAGE DE L'EAU DE MARE DE MOUSSIEMOU A) ET AU BORD DE LA TAPOA B)..... 43
PHOTO 9: RIVIERE MEKROU EN PERIODE D'ETIAGE (MISSION DE MAI, 2018) EN A) ET INSTALLATION SOLAIRE AU NIVEAU DU FORAGE DE BATA (MAMAN ,2003) EN B) 55
PHOTO 10:DAMALISQUE (DAMALISCUS KORRINGUM) A GAUCHE ET HIPPOTRAGUE A DROITE DANS LE PARC W DU NIGER (UNESCO,2016) 109
PHOTO 11:COBE DE BUFFON A GAUCHE ET COBE DEFASSA A DROITE…...109
PHOTO 12:MARE DE MOUSSA KOIRA A GAUCHE ET RAVINEMENT CAUSE PAR L'EROSION A DROITE, PARC W (IMAGES PRISES LORS DE LA MISSION ,2017)……109
9
PHOTO 13: ÉQUIPEMENTS DEFFECTUEUX ET PANEAUX SOLAIRES DÉSINSTALLÉS……..110
PHOTO 14:BAOBAB ET GORGE DE LA TAPOA A DROITE (MISSION TERRAIN, 2017)……110

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Géologie du Parc W……...20
Carte 2 : Topographie……..112
Carte 3 : Hydrographie et points d'eau à l'intérieur du Parc W……...113
Carte 4 : Pédologie……...114
Carte 5 : Occupation des sols……....115.
Carte 6 : Réseau routier……..116

LISTE DES ANNEXES

Annexe électronique 1 : Rapport de stage de Delestre (2017)

Annexe électronique 2 : Courbe volume-altitude des mares

Annexe électronique 3 : Essais hydrauliques

Annexe électronique 4 : Fiches de forages

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AOF : Afrique Occidentale Française

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CILSS : Comité Inter Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

ECOPAS : Ecosystèmes en Afrique Soudano-sahélien

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

FAO : (*Food and Agriculture Organisation*) Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

INRS: Institut national de la recherche scientifique

IRH : Inventaire des ressources hydrauliques

IRSH : Institut de Recherche Scientifique et Humaine

MESU/DD : Ministère de l'Environnement, de la Salubrité Urbaine et de Développement Durable

MHA : Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement

PAPE : Programme d'Appui aux Parcs de l'Entente

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

RBTW : Réserve de Biosphère Transfrontalière du Parc W

SDAN : Schéma Directeur d'Approvisionnement en bois de la ville de Niamey

SG : Secrétaire Général

SGA : Secrétaire Général Adjoint

SIG : Système d'information géographique

SMB : (*Soil Moisture Balance*) Bilan hydrologique

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour la Science et la Culture

USGS: *United States Geological Survey*

WAP: W-Arly-Pendjari

RÉSUMÉ

La présente étude réalisée dans le cadre d'un mémoire de maitrise porte sur l'évaluation des potentialités des ressources en eau du Parc W du Niger situé en Afrique de l'ouest dans le sud-ouest du Niger. Avec une superficie de 2200 km^2, le Parc national du W du Niger est situé 150 km de la capitale du Niger (Niamey). Le parc renferme plus de 80 % de la biodiversité du pays avec des espèces emblématiques uniques de toute l'Afrique de l'ouest. Le parc est dans la zone sahélo-soudanienne caractérisée par un climat de type semi-aride chaud. La zone est soumise à une variabilité du climat qui impacte négativement les eaux de surface entrainant le tarissement précoce des mares pendant la saison sèche. Les points d'eau (mares et forages) utilisé par la faune sont insuffisants et inégalement répartis dans le Parc.

Le contexte hydrogéologique du Parc appartenant au socle précambrien rend l'exploitation de la ressource en eau souterraine aléatoire avec une faible productivité des ouvrages. Notre étude avait pour objectif principal d'évaluer les potentialités des ressources en eau souterraine du Parc du W du Niger pour leur exploitation rationnelle durable. La démarche de cette étude a impliqué d'abord la recherche et l'exploitation des données existantes ayant permis la caractérisation du contexte naturel de la zone. Des travaux de terrain ont porté sur la bathymétrie des mares pour déterminer les volumes d'eau mobilisable par les mares et les eaux souterraines. Des essais de pompage par palier et longue durée ont été réalisés pour faire l'estimation de la quantité d'eau mobilisable par les forages en place. L'échantillonnage et les analyses physico-chimiques et isotopiques de l'eau souterraine ont servi d'indicateurs pour apprécier la qualité de l'eau et le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère. L'interprétation des données avec un modèle numérique et une solution analytique a permis de définir la dynamique du système aquifère et de faire l'estimation de la recharge. La dernière partie des travaux a été consacrée à l'évaluation des besoins en eau de la faune ainsi que la gestion et l'exploitation durable de l'eau souterraine.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude montrent que l'aquifère est peu transmissif avec des débits faibles. La recharge de l'aquifère se fait de façon directe et diffuse, tel qu'indiqué par les isotopes stables. La solution de Dupuit-Forcheheimer a permis d'établir que la recharge doit être entre 2,5 et 15 mm/an pour respecter le temps de résidence de l'eau souterraine de l'ordre de 15000 ans tel qu'indiqué par le ^{14}C. Ce long temps de résidence est cohérent avec les types d'eau assez évolués chimiquement. La qualité physico-chimique des eaux souterraines est dans l'ensemble bonne.

La capacité d'approvisionnement des ouvrages hydrauliques montre que leur production peut en principe bien couvrir le besoin eau de la faune et la recharge est suffisante pour soutenir le niveau d'exploitation requis de l'eau souterraine. L'eau souterraine du Parc du W peut donc être exploitée de façon durable. L'approvisionnement des mares pour supporter la faune du Parc du W est donc un enjeu organisationnel et logistique plutôt qu'une question de disponibilité des ressources.

Mots clés : Afrique de l'ouest, Niger, Parc W du Niger, socle précambrien, hydrogéologie, eau de surface, isotopes, hydrochimie, recharge.

ABSTRACT

This study was carried out as part of a master's thesis and focused on the assessment of the water resources potential of the W National Park of Niger located in West Africa in southwestern Niger. With an area of 2200 km^2, the W Park is located 150 km from the capital of Niger (Niamey). The Park contains more than 80% of the country's biodiversity with emblematic species that are unique in West Africa. The Park is within the Sahelo-Sudanian zone characterized by a warm semi-arid climate, which is subject to climate variability that negatively impacts surface water, causing early drying of ponds during the dry season. Water points (ponds and boreholes) used by fauna are insufficient and unevenly distributed in the Park.

The hydrogeological context of the Park, which belongs to the Precambrian basement, makes the exploitation of groundwater resources uncertain with low productivity of the production wells. The main objective of our study was to assess the potential of the groundwater resources of Niger's W Park for their sustainable rational use. The study first involved the research and exploitation of existing data that made it possible to characterize the natural context of the area. Field work was done on the bathymetry of water ponds to determine the volumes of water that can be mobilized by ponds. Groundwater step tests and long-term pumping tests led to the estimation of the quantity of water that can be mobilized by existing wells. The sampling and analyses of the) physico-chemical and isotopic characteristics of groundwater have been used as indicators to assess water quality and residence time in the aquifer. The interpretation of data with a numerical model and an analytical solution made it possible to define the dynamics of the aquifer system and to estimate recharge. The last part of the work was devoted to assessing the water needs of wildlife and the sustainable management and use of groundwater.

Results obtained from this study show that the aquifer has a poor transmissivity with low flows. Aquifer recharge is direct and diffuse, as indicated by stable isotopes. The Dupuit-Forcheheimer solution established that the recharge must be between 2.5 and 15 mm / year to respect the residence time of groundwater of about 15000 years as indicated by ^{14}C. This long residence time is consistent with the chemically evolved water types. The physico-chemical quality of the groundwater is generally good.

The supply capacity of hydraulic structures shows that their production can in principle adequately cover the water needs of wildlife and recharge is sufficient to support the required level of groundwater exploitation. Groundwater in the W Park can therefore be used sustainably. The supply of ponds to support the fauna of the W Park is therefore an organizational and logistical issue rather than a question of resource availability.

Keywords: West Africa, Niger, Niger W Park, Precambrian basement, hydrogeology, surface water, isotopes, hydrochemistry, recharge

INTRODUCTION

Pays sahélien par excellence, situé en Afrique de l'ouest, le Niger couvre une superficie de 1 267 000 km^2 dont les trois quarts (3/4) sont occupés par le désert du Sahara dans sa partie septentrionale. La partie sud-ouest du pays occupée par le Parc du W qui s'étend sur une superficie de 2200 km^2 renferme une importante diversité biologique. La zone du Parc du W est limitée à l'est par le fleuve Niger, à l'ouest par le Burkina Faso, au nord par la rivière Tapoa et au sud par la rivière Mékrou. Elle est entourée d'une zone tampon constituée des réserves totale et partielle respectivement de Tamou (74,445 km^2) et de Dosso (3060 km^2). La zone tampon et le Parc du W disposent de potentialités naturelles, culturelles, historiques et archéologiques assez riches et variés. Elle dispose également des atouts importants dont la valorisation éco touristique favorable au développement durable de la zone concernée (ECOPAS, 2008a).

Avec une densité d'environ 2,97 animaux au km^2 (MESU/DD, 2015), le Parc W du Niger dispose d'un réseau hydrographique limité à deux cours d'eau permanents (le fleuve Niger et la rivière Mékrou) et quelques écoulements temporaires. Ces eaux de surface constituent les principales sources d'abreuvement des animaux et quelques forages d'eau réalisés équipés des systèmes photovoltaïques qui alimentent les mares. Ces points d'eau sont non seulement insuffisants mais également distants les uns des autres en défaveur d'un maillage adéquat qui limiterait le mouvement des animaux. Le climat semi-aride chaud de cette zone du Niger est soumis à une forte variabilité climatique occasionnant des sécheresses récurrentes qui ne favorise pas le remplissage des mares. Ce phénomène accentue l'évaporation avec comme conséquences la dégradation des terres et des ressources en eau du Parc du W (Taylor et al., 2002, cité par Abdou et al., 2016). La superficie utile autour des points d'eau permanents d'abreuvement des animaux est d'environ 12% de la superficie totale du Parc du W (MESU/DD, 2015) ; ce qui explique le mouvement des espèces fauniques vers la partie Béninoise ou Burkinabé du parc. Ce phénomène est un facteur contraignant pour le recensement général de la faune. Bon nombre des forages réalisés et équipés des systèmes photovoltaïques pour alimenter les mares pendant la saison sèche (octobre - mai) qui s'se trouvent dans un état de dysfonctionnement dû non seulement aux pannes récurrentes de l'exhaure mais aussi au contexte géologique et hydrogéologique particulier de la zone qui limite la productivité des

ouvrages. Ainsi pour répondre aux besoins sans cesse croissants des animaux face à la variabilité du climat dans cette zone semi-aride, cette étude est effectuée pour avoir plus d'informations en ce qui concerne l'hydrogéologie de la zone du Parc W. C'est dans cette perspective que s'inscrit cette étude dont l'objectif général est d'évaluer les potentialités des ressources en eau souterraine pour supporter les besoins en eau de la faune du Parc W du Niger.

Les objectifs spécifiques formulés consisteront à :

- ✓ Évaluer les besoins en eau de la faune ;
- ✓ Définir la dynamique du système aquifère ;
  - Évaluer les types d'aquifères et les propriétés hydrauliques ;
  - Quantifier la recharge du système aquifère ;
  - Étudier la géochimie et la qualité de l'eau souterraine ;
- ✓ Évaluer l'exploitation durable de l'eau souterraine ;
  - Déterminer le rendement des installations hydrauliques
  - Proposer un plan d'exploitation durable.

Le document est structuré en quatre (4) chapitres :

Le chapitre I décrit les généralités sur la zone d'étude ; le chapitre II décrit l'approche méthodologique ; le chapitre III présente l'ensemble des résultats des travaux effectués et enfin le chapitre IV présente la discussion des résultats.

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA ZONE D'ÉTUDE

1.1. Généralités sur la région de Tillabéri

1.1.1. Situation géographique et administrative

La région de Tillabéri est située au sud-ouest du Niger entre 0.15° et 4.25° de longitude Est et 11.88° et 15.70° de latitude Nord. Elle occupe l'essentiel de la bande ouest du pays, avec une superficie de 97251 km² (Mainassara, 2010).

La région de Tillabéri est découpée administrativement en six (6) départements (fig.1), subdivisés en 44 communes urbaines et rurales.

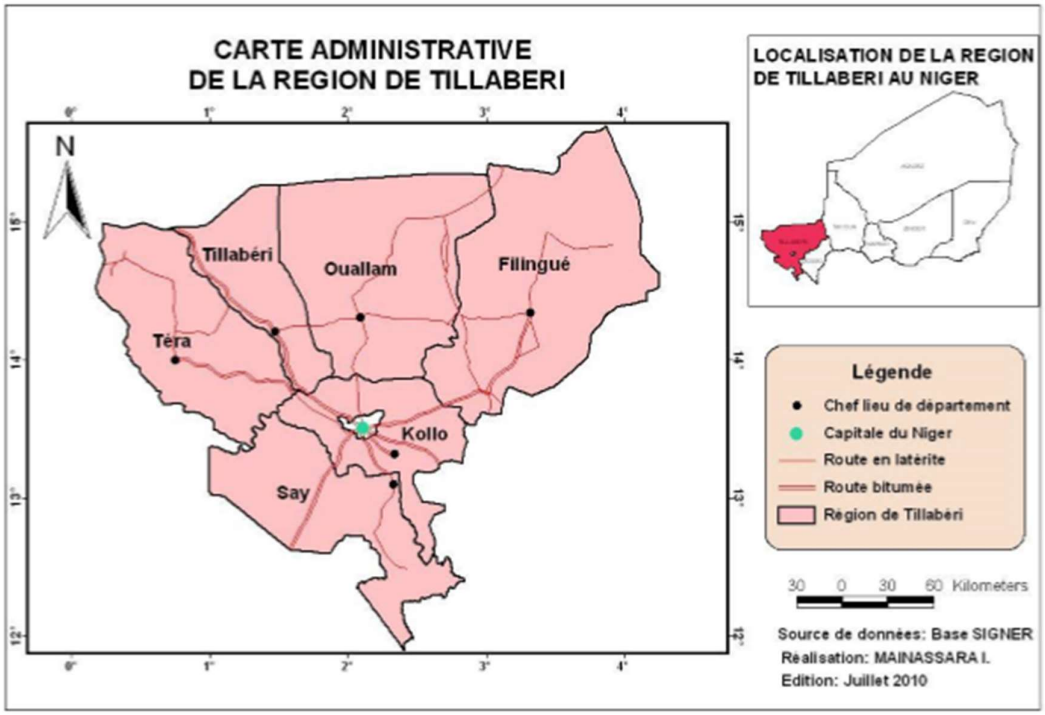


Figure 1:Situation de la région de Tillabéri au Niger (Mainassara, 2010)

1.1.2. Cadre climatique

Le climat de l'ouest nigérien est de type sahélo-soudanien et il est contrôlé par la confrontation de masse d'air, dont l'alizé humide originaire du Golfe de Guinée, transportant les précipitations et l'outre continental, masses d'air chaudes et sèches en provenance du Sahara. L'harmattan de direction nord-est est dominant et souffle d'octobre à mai (fig. 2), tandis que les vents humides en direction inverse caractérisent la mousson provenant de l'océan Atlantique (Ardoin-Bardin, 2004 ; Favreau, 1996 ; Abdou, 2012).

Les mouvements saisonniers du Front Intertropical (FIT) engendrent les deux principales saisons qui sont :

- une saison sèche, longue, allant de novembre à avril,
- une saison de pluie, plus courte, débutant le plus souvent en mai pour prendre fin en septembre, pouvant exceptionnellement s'étendre jusqu'en octobre (Abdou, 2012).

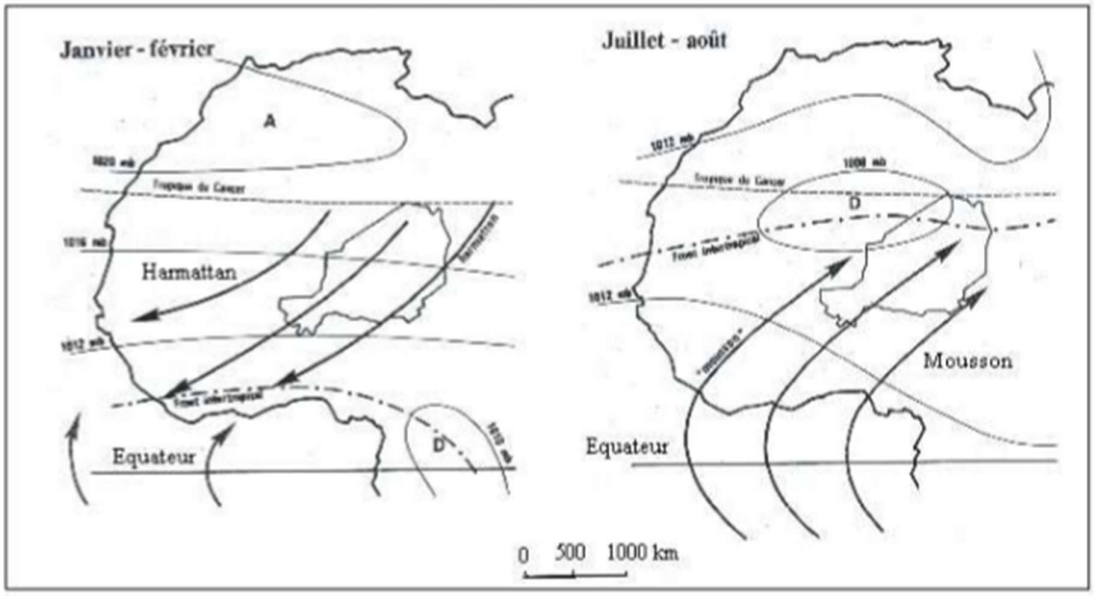


Figure 2:Circulation atmosphérique des masses d'air en Afrique de l'ouest (Morel, 1981 cité par Guéro, 2000)

Le climat de type sahélo-soudanien est au sud et celui de type sahélo-saharien est au nord (fig.3). Les hauteurs moyennes des précipitations annuelles varient de 250 mm

dans le nord de Filingué à plus de 700 mm dans l'extrémité sud de Say (Abdourhamane et al., 2016). L'évapotranspiration potentielle est supérieure à l'ordre de grandeur des précipitations variables dans le temps et dans l'espace (Fig. 4).

Les températures sont relativement constantes tout au long de l'année avec une moyenne annuelle de 36 °C entre mars et juin. Les températures maximales annuelles observées peuvent dépasser 45 °C en fin de saison sèche (avril-mai), alors que la valeur moyenne annuelle de la température minimale tourne autour de 22 °C (Desconnets, 1994). L'humidité relative de l'air en saison froide (octobre-février) et en saison de pluies peut excéder 80% alors qu'en saison sèche elle ne dépasse guère 10 à 15% (Girard, 1993).

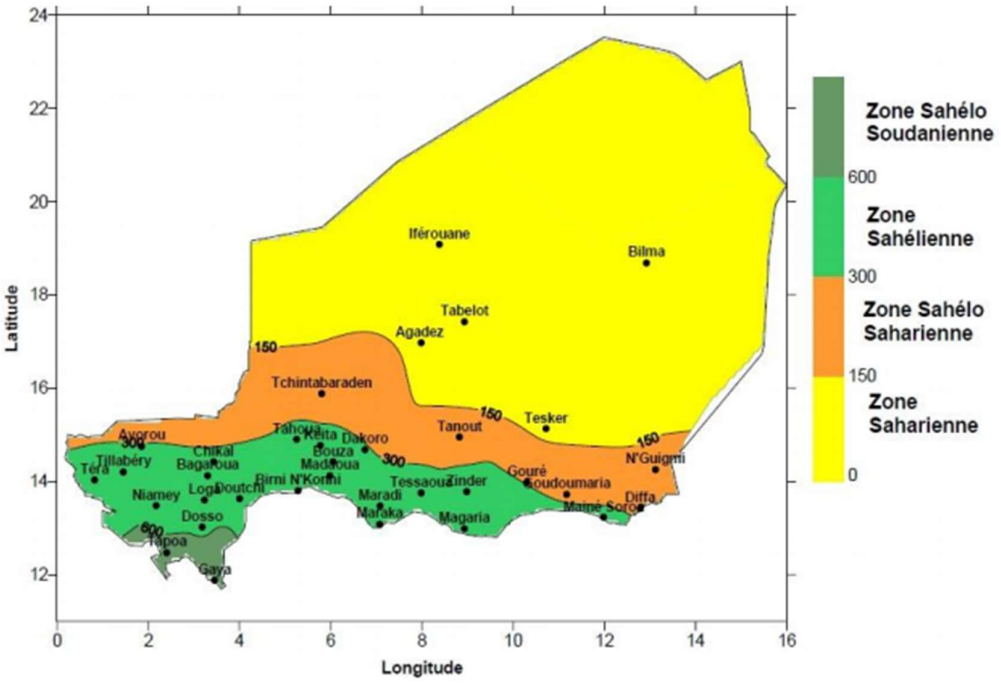


Figure 3:Zones climatiques du Niger (pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1975-2004), (Source : Rapport Programme d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques juillet 2006 d'après Direction de la Météorologie Nationale, édition 2005

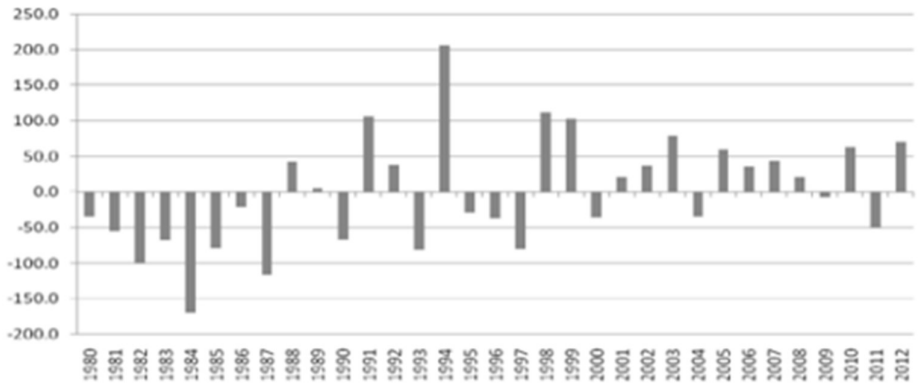


Figure 4: Variation de la pluviométrie annuelle de 1980 à 2012 dans la région de Tillabéri (Kattiellou et al., 2014)

1.1.3. Cadre topographique et hydrographique

Le sud-ouest du Niger présente un relief caractérisé par de larges plaines très aplanies peu accidentées et des vallées peu encaissée. Les altitudes ne dépassent guère 350 m (Abdou, 2012 ; CILSS, 2016).

Sur le plan hydrographique, le fleuve Niger et ses affluents de la rive droite (Goroul, Dargol, Sirba, Goroubi, Tapoa, Mékrou et Diamangou), (tableau 1) constituent l'essentiel des cours d'eau de la région de Tillabéri (fig. 5). Ce réseau hydrographique renferme également quelques koris à écoulements intermittent vers le fleuve Niger et saisonnier plus ou moins importants, de nombreuses mares permanentes, semi-permanentes ou temporaires et des vallées fossiles constituées par les dallols Maouri et Bosso, sur la rive gauche du fleuve Niger. Sur une longueur de 4200 Km de sa source (Guinée) à son embouchure (Nigéria), le fleuve Niger traverse le Niger sur 420 km dans la région de Tillabéri du nord - est vers le sud et son débit moyen annuel est de 1030 m^3/s. Il est d'ailleurs le troisième plus grand fleuve d'Afrique après le Nil et le Congo (Abdourhamane et al., 2016).

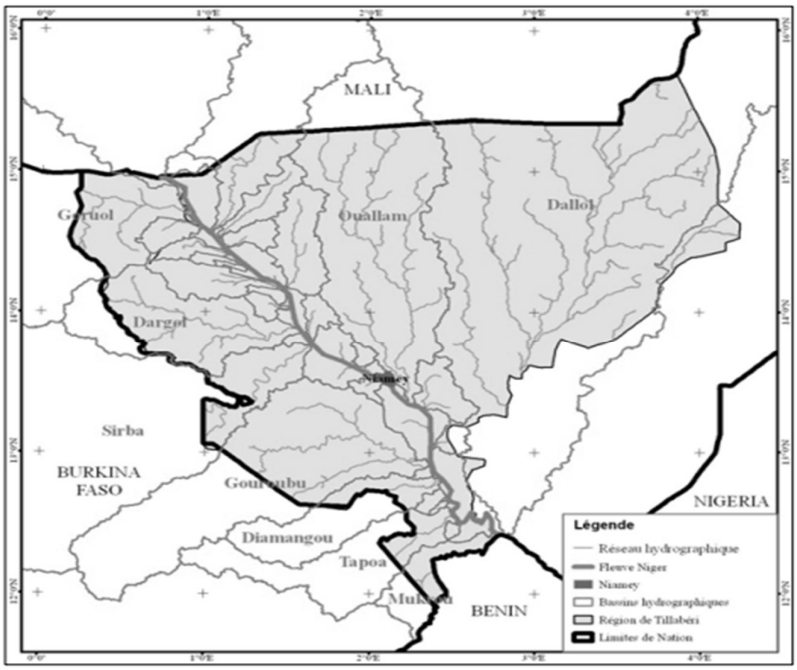


Figure 5:Réseau hydrographique de la région de Tillabéri (Abdourhamane et al., 2010)

Tableau 1:Caractéristiques des principaux cours d'eau de la région de Tillabéri (Abdourhamane et al., 2016)

Fleuve ou rivière	***Station hydro***	***Superficie du bassin-versant km²***	***Débit moyen annuel millions m³***
Niger	Niamey	700 000	28 500
Gorouol	Alcongui	44 850	220
Sirba	Garbé Kourou	38 750	697
Tapoa	Campement du W	15 500	40
Mékrou	Barou	10 500	923
Dargol	Kakassi	6 940	160

1.1.4. Occupation du territoire

Les régions du sahel ont connu des périodes de sécheresse récurrentes ayant provoqué entre autres des migrations intenses vers les zones plus humides. Cette situation se traduit dans le sud-ouest du Niger par une réduction du couvert végétal suite à l'envahissement des éleveurs transhumants et à la coupe abusive des arbres comme source de revenus. Cependant, au stade actuel, les images satellitaires montrent une augmentation du couvert végétal sur la bande sud du Niger grâce aux

bonnes pratiques de gestion des terres par les agriculteurs (Benoit, 1998 ; Issoufou, 2018 ; CILSS, 2016). La figure 6 montre que la zone du parc W est occupée par la savane. Les données de l'observatoire du sahel et du sahara (OSS ,2016) indiquent une régénération du couvert végétal. Cependant, dans le Parc W, de la savane arbustive, on évolution dans le domaine de foret galerie.

La figure 7 montre l'évolution de la couverture végétale dans le centre sud du Niger de 1957 à 2013. On constate une réduction drastique de la végétation de 1975 à 1985 qui correspond aux périodes de grande sécheresse qu'ont connues le Niger et une augmentation de la couverture végétale de 1990 au stade actuel.

La population de la région de Tillabéri est de 2 715 186 habitants (INS, 2012), soit une densité moyenne de 28 habitants/km^2. Constituée de plusieurs groupes ethnolinguistiques, la région est caractérisée par une croissance rapide de la population et des migrations récurrentes vers les centres urbains (Mainassara, 2010 ; Abdourhamane et al. , 2016) .

La ville de Say constitue un site à vocation touristique important du fait de sa renommée sur le plan islamique. Les principales activités pratiquées par la population restent l'agriculture, l'élevage, le commerce, l'artisanat et la pèche sur le fleuve Niger et les mares.

La partie sud-ouest, notamment la réserve de Biosphère du W du Niger reste inhabitée et aucune activité humaine n'est tolérée.

La réserve totale de faune de Tamou, créée en 1962, sert de zone tampon pour le parc national W au Niger, ainsi que pour la grande biosphère transfrontalière du parc régional W. Le parc national W et la réserve totale de faune de Tamou se situent dans une zone de transition entre la savane et les forêts claires du biome soudanien. L'écosystème naturel de la zone (fig.6) est essentiellement constitué de savanes arbustives et arborées, et de forêts galeries le long des cours d'eau principaux avec des grands arbres tels que : Ficus platyphylla, Cola laurifolia Anogeissus leocarpus, Diospyros mespiliformis, Tamarindus indica (Desconnets, 1994 ; UICN, 2010).

Malgré les mesures de surveillance en place en matière de protection de la réserve de Tamou, des activités illégales demeurent d'actualité. Il s'agit du défrichement de la brousse à des fins agricole, du braconnage du petit et gros gibier, de la transhumance illégale, de l'abattage d'arbres protégés, ou des feux de brousse incontrôlés (CILSS, 2016).

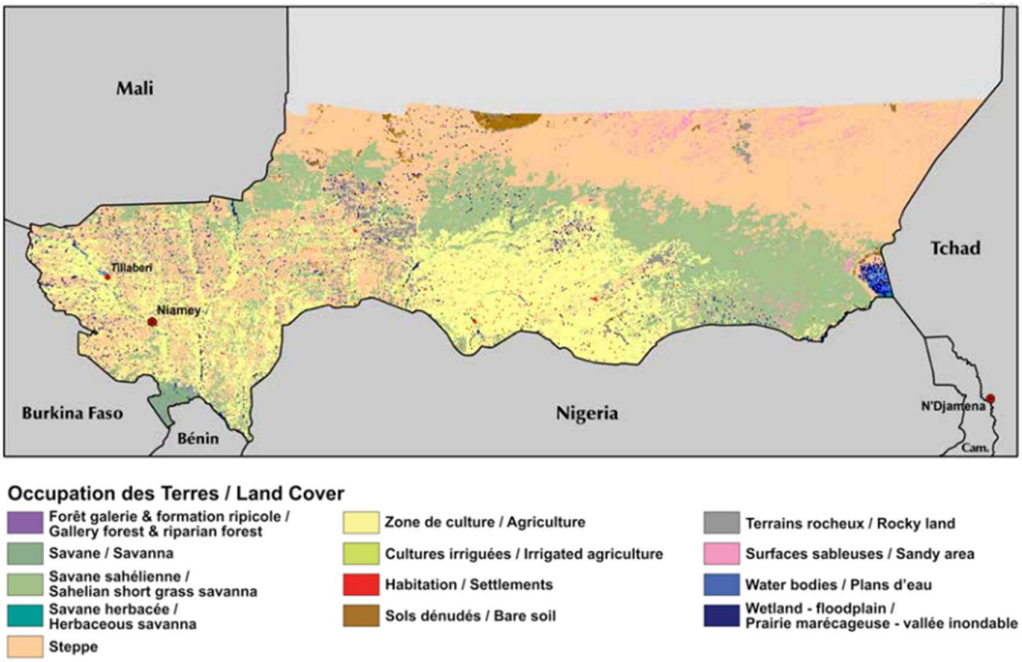


Figure 6: Occupation des terres, Niger 2013 (CILSS, 2016)

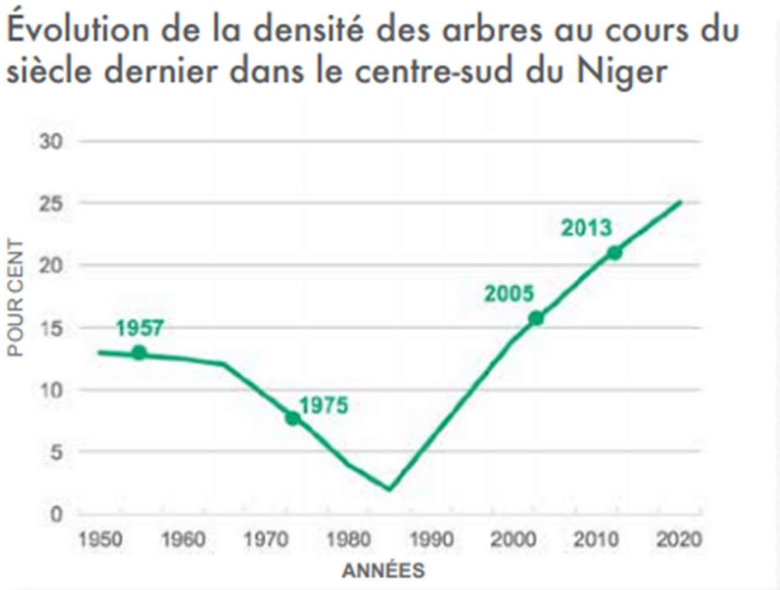


Figure 7: Évolution de la couverture végétale dans le centre sud du Niger (CILSS, 2016)

1.1.5. Cadre géologique et hydrogéologique

1.1.5.1. Cadre géologique

La géologique de la région comprend essentiellement des formations du socle précambrien, de l'infracambrien et des formations sédimentaires (1,1 Ga – 600 Ma), appartenant au continental terminal.

Le socle cristallin et cristallophyllien du Liptako formé majoritairement par des roches granitoïdes et métamorphiques a été très déformé (Deguen et al.,1978; Abdou et al.,1988; Affaton et al.,2000; Soumaila et Konaté, 2005; cités par Abdou, 2012) .

L'infracambrien est constitué par des grès du Voltaien. Le précambrien et l'infracambrien sont recouvert par le continental terminal et des dépôts alluvionnaires du quaternaire (Abdou, 2012).

1.1.5.2. Hydrogéologie

Les ressources en eau souterraine du Niger sont réparties dans trois types d'aquifères potentiels (Namori, 2006):

- Les nappes alluviales qui sont rechargées à partir de l'écoulement de surface des cours d'eau .Leur capacité et leur pérennité dépendent des propriétés des matériaux qui les constituent ainsi que de leur gradient hydraulique.
- Les nappes du continental terminal (CT) occupent la partie ouest du bassin occidental du Niger. Le CT fait partie du sous bassin des Oulimenden et couvre la région de Dosso, le centre et le nord-est de la région de Tillaberi et la partie ouest de la région de Tahoua.
- Les nappes de socle qui se développent en fonction de l'importance et de l'ouverture des fractures et des fissures. Parmi les différentes familles d'accidents tectoniques, les fractures de directions générales NE-SW et NW-SE sont les plus marquées. Ces aquifères sont considérés comme hydrauliquement confinés ou semi-confinées (Ango, 2012). Les niveaux statiques dans les forages s'établissent toujours au-dessus des fractures aquifères (Girard, 1993).

Les populations de la région de Tillabéri s'approvisionnent en eau à partir des systèmes d'Alimentation en Eau Potable (AEP) pour les milieux urbains, les puits modernes ou traditionnels et les forages équipés d'exhaure manuelle, électrique ou photovoltaïque ainsi que les cours d'eau naturels (fleuve Niger) pour le milieu rural.

1.2. Généralités sur la zone du Parc W du Niger

1.2.1. Rappel historique du Parc W du Niger et des travaux effectués

De nombreux vestiges qui remontent au paléolithique (-200 000 ans) marquent une présence anthropique dans le Parc Régional du W du Niger, caractérisée par une occupation humaine très faible (ECOPAS, 2005). La zone est infestée par la présence de mouches tsé tsé (causant la maladie du sommeil) et d'autres pathologies telles que l'onchocercose avant 1927.

La zone du Parc W a été découverte en 1926 par le vétérinaire Dr. Fiasson. Cette entité écologique fut qualifiée de " Parc refuge ". Plus tard, entre 1952 et 1953, la plus grande partie du Parc Régional du W est classée réserve totale de faune par les administrateurs coloniaux avant d'être érigée en Parc National par le décret de l'AOF (Afrique Occidentale Française) du 4 aout 1954, s'étendant sur le Bénin, le Burkina Faso et le Niger (Michelot, 2009). De cette période date le classement définitif des trois aires protégées en Parc nationaux du W constituant l'actuel " Parc Régional transfrontalier " (Lamarque, 2004).

Le Niger, à l'instar des autres pays (Bénin et Burkina Faso) a ratifié plusieurs conventions internationales relatives à la conservation de la biodiversité et des ressources naturelles. C'est ainsi que le Parc National du W du Niger a ratifié la convention Ramsar depuis 1987 relative aux zones humides, puis a été inscrit en 1996 sur la liste du Patrimoine Mondial et Reserve de Biosphère de l'UNESCO.

Plusieurs études ont conduit à la connaissance du Parc national du W du Niger. Les travaux de Gavaud (1965) ont apporté une contribution significative sur la connaissance de la pédologie du Niger occidental. La connaissance de la géologie a été possible grâce aux travaux de Greigert (1961) dans toute la partie sud-ouest du Niger, puis actualisée par le BRGM (2016). Les études réalisées par Greigert (1978) ont permis la caractérisation des eaux souterraines du Niger dans leur ensemble, notamment dans la zone du socle du Liptako à proximité du Parc W.

La contribution de Benoît (1998) retrace la géomorphologie du Parc grâce aux travaux de Gavaud (1966). Les travaux de Lamarque (2004) présentent une synthèse des caractéristiques environnementales du complexe W du Niger.

La végétation a fait l'objet de plusieurs études dans le Parc notamment grâce aux travaux de, Couteron (1992) et Benoit (1998). Ces travaux donnent une classification des espèces végétales présentes dans le Parc en fonction des caractéristiques climatiques de la zone et du type de sol.

Les grandes sécheresses de 1973 et 1984 qu'a connu le Niger se sont traduites par une réduction importante des ressources naturelles, ce qui a occasionné la migration vers les zones humides telles que la zone périphérique de la réserve de Biosphère du Parc W.

Depuis 2001, grâce au soutien technique et financier de l'Union Européenne, le programme ECOPAS s'est lancé dans une dynamique de coordination scientifique dans le cadre de la conservation de la biodiversité du complexe écologique transfrontalier du W entre les trois pays (Bénin, Niger et Burkina Faso) au bénéfice des populations locales (ECOPAS, 2001). Ce volet recherche est surtout centré sur l'inventaire des ressources naturelles, les dynamiques sociales et écologiques, le pastoralisme et la valorisation des ressources naturelles. Ce vaste programme a conduit à de nombreuses études thématiques spécifiquement sur la géographie, le pastoralisme, l'archéologie, la sociologie, l'écologie végétale et animale, etc. Plusieurs autres programmes et projets tels que le projet régional WAP de 2009 à 2013 (Ndiaye, 2014) et le programme d'appui aux Parcs de l'Entente (PAPE), de 2013 à 2016, ont permis le succès de la gestion transfrontalière de la RBT/W.

Les attentes du projet PAPE étaient le renforcement du cadre institutionnel régional de la conservation des aires protégées du complexe WAP pour une gestion concertée et harmonisée ; la gestion coordonnée des aires protégées du complexe WAP et de leurs ressources animales et végétales ; l'atténuation des pressions négatives exercées par les populations ainsi que le renforcement des capacités des institutions nationales de gestion des aires protégées (PNUD, 2014).

1.2.2. Situation géographique de la zone d'étude, le Parc du W

Le Parc du " W " du Niger est situé à environ 150 km de Niamey au sud dans la commune rurale de Tamou, département de Say (région de Tillabéri). Il s'inscrit entre

11° 54’ et 12° 35’ de latitudes Nord et 02° 04’ et 02° 50’ de longitude Est. Il Couvre une superficie de 2200 km^2 dont 25 km^2 de plan d’eau douce, le Parc national du W fait partie du vaste complexe écologique transfrontalier W-Arly-Pendjari (WAP) qui s’étend sur 16 000 km^2 (fig.8) partagé entre trois pays, le Bénin, le Burkina Faso et le Niger (UICN, 2017). Son nom découle de la forme en lettre “W “ que décrit le tracé du fleuve Niger dans la partie nord du Parc du W. Ses limites naturelles sont le fleuve Niger à l’est, le Burkina Faso à l’ouest, la rivière Tapoa au nord et la rivière Mékrou au sud. Le Parc du W du Niger est classé réserve de biosphère et patrimoine mondial de l’UNESCO depuis 1996 (ECOPAS, 2005).

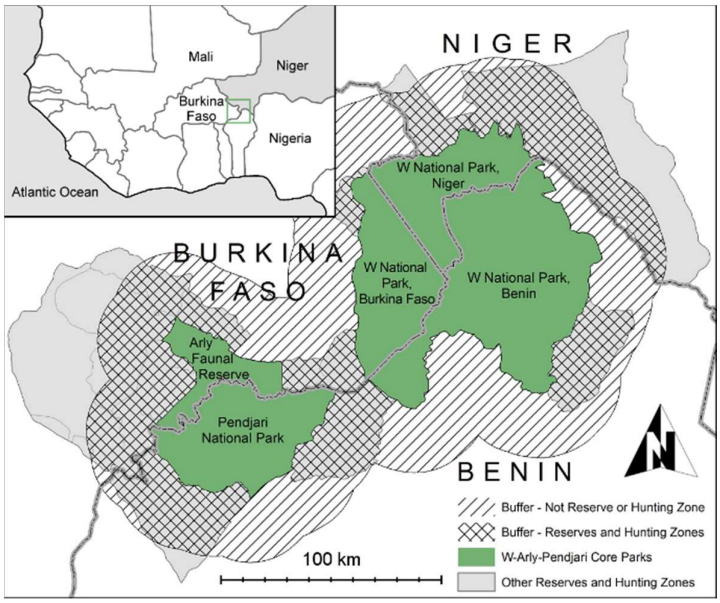


Figure 8: Localisation du complexe WAP (USGS, 2017 a)

1.2.3. Cadre administratif et organisationnel

Le Parc National du W du Niger est sous la tutelle du Ministère de l’Environnement, de la Salubrité Urbaine et du Développement durable. Le Parc du W est rattaché directement à la Direction de la Faune, de la chasse et des aires protégées. Un conservateur (Commandant) nommé par arrêté Ministériel dirige le Parc au sein du dit ministère. Ce dernier est appuyé par quatre sections : protection et surveillance, aménagement, suivi écologique et enfin administration et maintenance (fig. 9). A ces sections, il faut ajouter trois postes de contrôle situés à la limite est sur le fleuve Niger

et quelques postes de surveillance à l'entrée et à l'intérieur du parc W (Halilou, 2009). Le poste de surveillance de la Tapoa à l'entrée du Parc enregistre toutes les entrées des visiteurs, leur identité, le nombre de personnes et le motif de la visite.

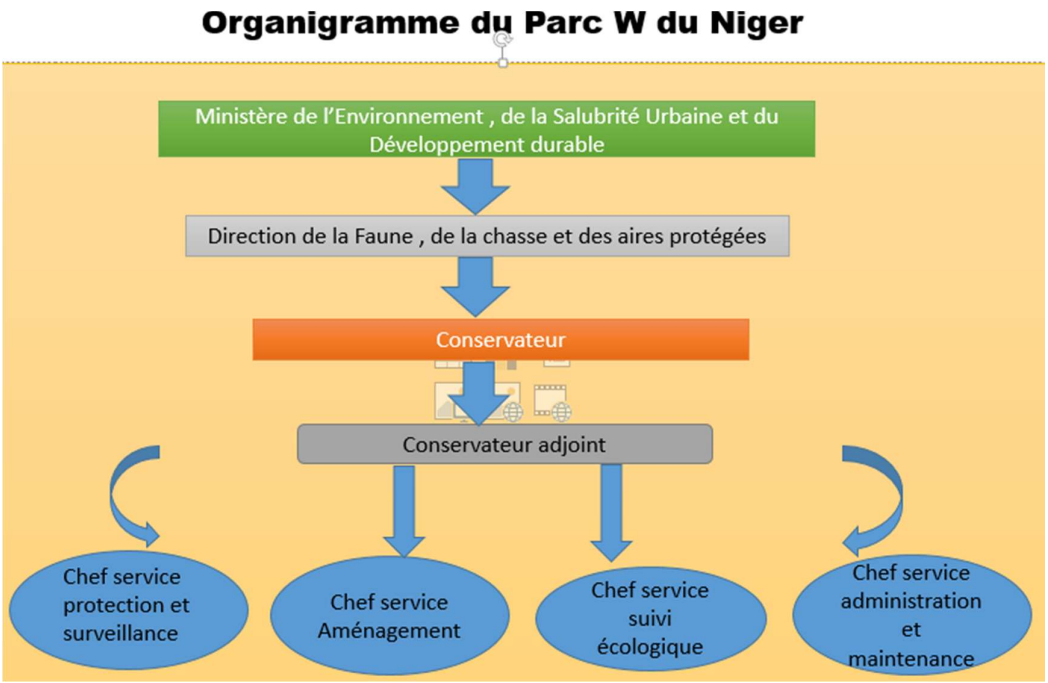


Figure 9: Organigramme administratif du Parc W du Niger (Communication personnelle de l'administration du Parc W, 2017)

1.2.4. Topographie et hydrographie

1.2.4.1. Topographie

La Zone du Parc W du Niger est située sur une pénéplaine ancienne et présentant un relief très peu contrasté. La topographie à l'intérieur du Parc varie entre environ 150 et 300 m d'altitude (Carte 2). Le paysage est dominé par des plateaux tabulaires rocheux et cuirassés, découpés par des vallées parfois abruptes (Benoit, 1998). Le plateau principal du Parc s'élève à 300 m, entaillé par des cours d'eau saisonniers et bordé par les vallées encaissées des plus importants cours d'eau qui descendent à environ 200 m d'altitude. La zone est aussi caractérisée par la présence des ravinements dus au phénomène d'érosion intense (Toko, 2008).

1.2.4.2. Hydrographie

La disponibilité de l'eau est un facteur essentiel à la survie de la faune du Parc national du W du Niger. Le réseau hydrographique est constitué de trois principaux cours d'eau (Carte 3) : le fleuve Niger et les rivières Mékrou et Tapoa (qui sont des affluents du Niger) et quelques cours d'eau temporaires se trouvant dans le Parc. En fait, seul le fleuve Niger et la rivière Mékrou sont permanents et coulent tout le long de l'année. La rivière Tapoa a un écoulement saisonnier de juin à octobre. Le Parc renferme également plus d'une trentaine de mares temporaires et semi-permanentes, naturelles ou artificielles, qui tarissent pendant la saison sèche.

Une des caractéristiques la plus marquée du réseau hydrographique est la présence des gorges, véritables incisions dans les bans de grès, au niveau des rivières de Tapoa et de la Mékrou (ECOPAS, 2002b).

Une bonne partie du Parc reste complètement dépourvue d'eau entre le mois de mars et mai rendant la faune dépendante de la rivière Mékrou et de quelques poches d'eau constituées par les retenues des mares.

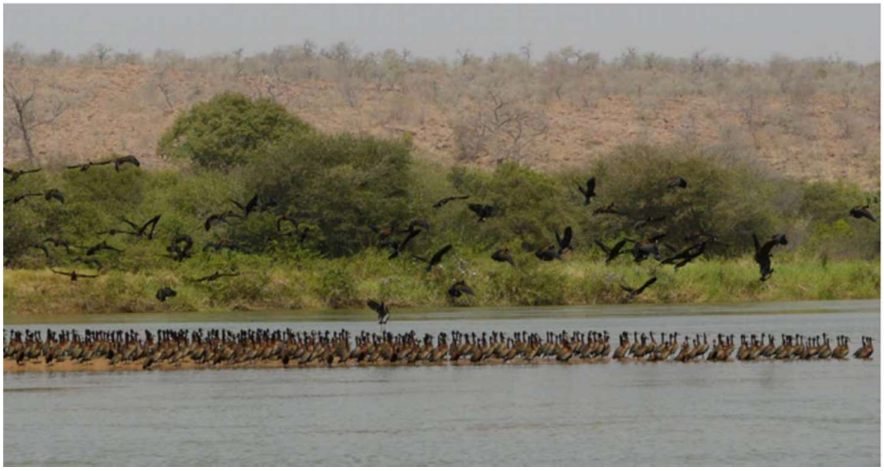


Photo 1: Dendrocygne veuf (Dendrocygna viduata) sur le fleuve Niger, Parc national W du Niger (UNESCO, 2016)

1.2.5. Climat

La zone du Parc national du "W" du Niger se situe en climat semi-aride de type sahélo-soudanien, avec des caractéristiques sahéliennes vers le nord et soudaniennes au sud. Les pluies sont très variables dans le temps et dans l'espace (Kattiellou et al., 2014).

La plupart des précipitations ont lieu pendant la saison des pluies qui va de mi-mai à septembre, avec le maximum de pluies en août (AQUASTAT / FAO, 2016; Hess, 1994; Funk et al., 2012). La pluviométrie moyenne annuelle est de 600 à 700 mm, vers le nord du parc, et de 800 à 900 mm dans la partie sud (fig.10).

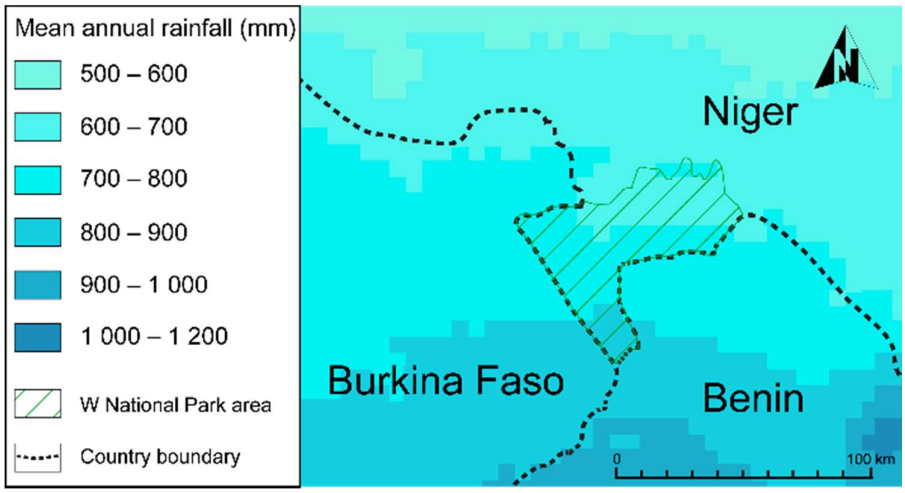


Figure 10: Précipitations autours du Parc national du W (modifié de l'USGS ,2017)

La pluie est apportée par la mousson, vent du sud-ouest qui transporte l'humidité de l'océan Atlantique (Ardoin-Bardin, 2004). Le Parc du W possède une station météorologique à l'entrée de la Tapoa où les relevés sont manuels. D'autres stations météorologiques plus distantes au Niger et dans les pays limitrophes permettent aussi de définir les conditions climatiques dans le Parc du W (Delestre, 2017).

L'année est divisée en deux saisons distinctes :

- ✓ Une saison sèche allant d'octobre à mai ;
- ✓ Une saison de pluies allant de juin à septembre ;

Les températures restent assez constantes tout au long de l'année, avec un maximum en avril et un minimum en janvier (tableau 2) ; (AQUASTAT / FAO, 2017).

La saison des pluies reste marquée par une baisse de température et une forte hygrométrie. L'évapotranspiration potentielle qui découle de ces températures peut atteindre 2250 mm/an dans la partie sud et dans le nord du département de Say (Ministère de l'hydraulique, 2005).

Tableau 2:Température du Parc W du Niger (AQUASTAT/FAO, 2017)

Température en °C			
Période	Maximale	Moyenne	Minimale
Janvier	32,8	25,2	17,7
Avril	39,7	31,1	26,6

1.2.6. Végétation, faune et occupation des sols

Le Parc national du W du Niger est situé dans une zone de transition entre la savane soudanienne et la zone boisée guinéenne. La végétation du PRW a fait l'objet de plusieurs études (Rabeil, 2003 ; Zouri, 2003 ; Lamarque, 2004 ; Lompo, 2005 ; Siddo, 2007). L'écosystème de la zone présente une grande diversité en termes de richesse floristique. La végétation est dominée par les savanes arbustives développées sur les sols latéritiques et sableux secs (Combretum, Guiera, Dichrostachys) (fig.11). On y trouve également des forêts galerie en bordure des cours d'eau saisonniers et des plaines d'inondation (carte 5), notamment le long du fleuve Niger dont les berges sont recouvertes de buissons épineux et bordées de Borassus (Oumarou, 2006). Ces espèces constituent un conservatoire de ressource génétique important pour la recherche agronomique africaine.

La région du W du Niger héberge les populations fauniques les plus nombreuses du pays avec plus de 80 espèces de mammifères, 350 espèces d'oiseaux et 114 espèces de poissons représentatives de la faune du fleuve Niger (Synodontis, Tilapia, Hydracyon) et plusieurs espèces de reptiles et d'amphibiens (Halilou, 2009). Le Parc du W renferme particulièrement d'importantes populations d'éléphants, de buffles,

hippotragues, hippopotames, phacochères et des singes, mais également de grands carnivores comme le lion, le guépard, le léopard et lycaons (Halilou, 2009).

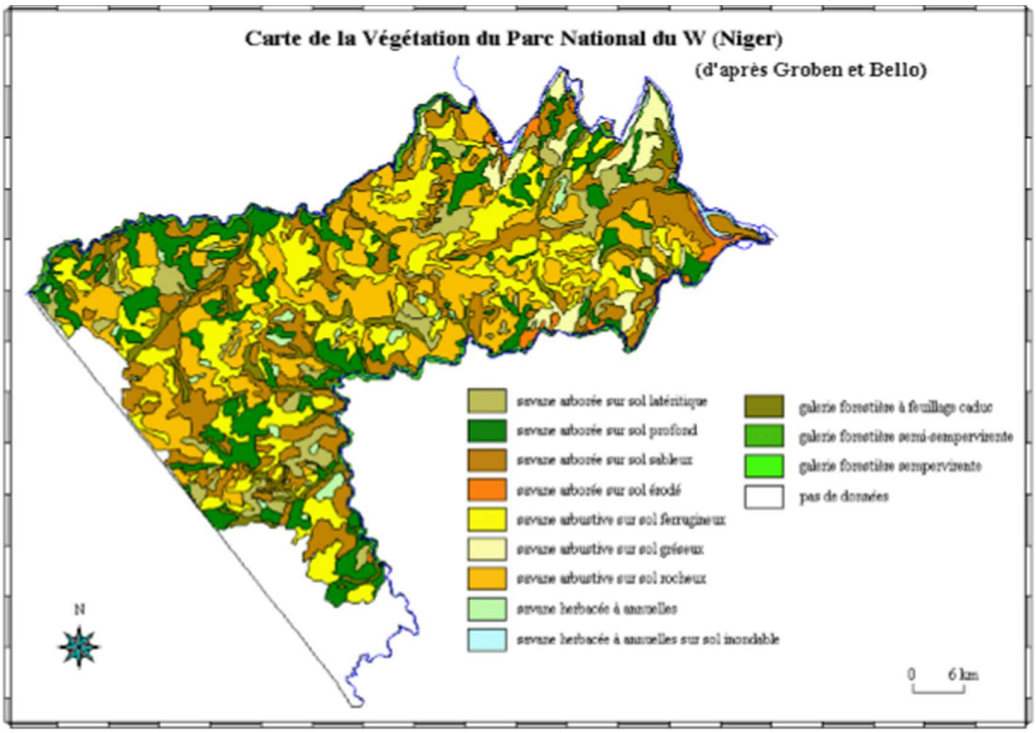


Figure 11: Carte de la végétation du Parc W du Niger (Rabeil, 2003)

Depuis les années 50, la région du W du Niger est longtemps restée inhabitée, à l'exception de quelques villages anciens qui datent d'environ 100 ans. Les grandes périodes de sécheresses ont occasionné un grand flux migratoire vers ces zones humides. La population est estimée à 101 600 habitants. L'état actuel de la zone du Parc W du Niger présente une densité démographique variable selon qu'on se situe dans la zone périphérique (zone tampon) ou dans l'aire centrale du Parc dont l'habitation est quasiment interdite à l'exception du personnel administratif du Parc. Les activités anthropiques ne sont pas permises à l'intérieur de cette aire protégée. Les activités socio-économiques pratiquées dans la zone tampon de la région du W du Niger sont l'agriculture, l'élevage, la pêche, la chasse, le commerce et le tourisme, l'exploitation forestière, etc. (Halilou, 2009).

Photo 2:Végétation brulée à l'intérieur du Parc W du Niger (Grégoire et al, 2003)

Photo 3:Troupeau d'éléphant dans le Parc du Niger (Halidou, 2009)

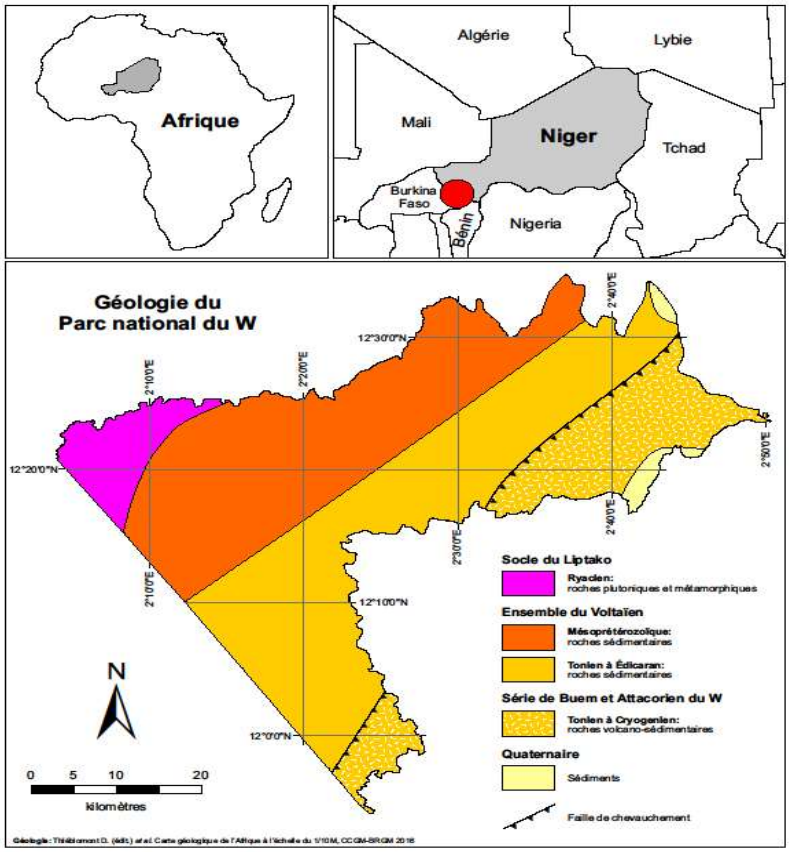
1.2.7. Cadre géologique et géomorphologique

Situé à l'extrémité nord-est du bassin voltaïque, la région du W du Niger constitue une vaste pénéplaine, caractéristique du vieux bouclier ouest Africain parsemé d'affleurements cristallins des roches les plus anciennes de la planète. Son relief est surtout marqué par la chaine de l'Atakora et quelques escarpements (falaise de Gobnangou) (ECOPAS, 2005). On distingue principalement cinq unités géomorphologiques dans la région du W (Rabeil, 2003):

- ✓ Les plateaux cuirassés au centre du Parc ;
- ✓ Les buttes cuirassées à l'ouest ;
- ✓ Les bancs de grès à l'est et au sud ;
- ✓ Les grandes vallées Mékrou, Tapoa et Niger ;
- ✓ Les plaines d'inondation le long du fleuve Niger et autres cours d'eau recouvertes de buissons épineux et bordées de Borassus (Idé, 2010).

La géologie du Parc national W du Niger est caractérisée par la présence des formations précambriennes et cambriennes, d'origines plutoniques ou volcaniques dont la plupart ont été fortement altérées et remaniées (Carte 1). Le précambrien supérieur est marqué par la série de Buem, constituée de schistes et des grès quartzites à filonnets de quartz au niveau du confluent de la Mékrou (Rabeil, 2003). Le précambrien moyen apparait sous forme de formations moins métamorphisées, représentées par l'Atakorien du W. À ces séries précambriennes sont liés les granites anciens syntectoniques qui affleurent sur une petite superficie près de la Tapoa.

L'infracambrien couvrant la majeure partie du Parc est constitué de grès du Voltaien recouverts à l'ouest et au nord par des formations sédimentaires du Continental Terminal. Il est essentiellement formé des grès quartzites grossiers de couleurs claires roses, parsemé des bancs de conglomérats. Le quaternaire est surtout affleurant dans la vallée du Niger.



Carte 1 : Géologie du Parc W du Niger (source de données, BRGM, 2017)

1.2.8. Pédologie

La pédologie du Parc W du Niger est marquée par de deux types de sols (Carte 4, tableau 3). On distingue , d'une part, des sols régiques peu évolués à faciès ferrugineux, sur colluvions argilo-sableuses, des lithosols sur grès et quartzites, des cuirasses sur la série de Buem constituées de produits d'altération de schiste formées de quartz et débris de grés fin sur une argile rose à jaunâtre à filonnets non remaniés de quartz. D'autre part, le long de la section nord sud de la Mékrou en longeant la

Tapoa, des sols ferrugineux tropicaux sur colluvions argilo-sableuses (grès quartzites Voltaiens) avec des épaisseurs variables (40-100 cm), lessivés, très évolués et des sols sur grès argileux rubéfiés avec association à lithosols, sols gravillonnaires, hydromorphes. Ces sols sont caractérisés par de nombreuses buttes tabulaires cuirassées (glacis moyens et supérieurs) (ORSTOM, 1966).

Tableau 3:Unités pédologiques de la carte des sols du Parc W du Niger de centre de données européen extrait de la carte mondiale des sols à 1:500000, volume 1 Légende (FAO, UNESCO, 1974)

Unités pédologiques de la carte des sols		
Code	**Désignation**	**Descriptions**
ARWl	Arenosol-plano-luvique	Sols recouvrant un horizon faiblement perméable à moins de 125 cm près de la surface avec une forte une texture grossière très différentes due à une alternance d'humidité et de sécheresse
RGeu	Régosols eutriques	Sols situé entre 20 et 50 Cm de la surface ayant un faible taux de saturation en base et ne contiennent pas de calcaire
CMvr	Cambisols vertiques	Sols sableux argileux ne presentant pas de propriété d'hydromorphie à moins de 100 m de profondeur
LvgL	Luvisols gleyiques	Sols argileux à caractère hydromorphe à moins de 50 m de profondeur et ayant un taux de saturation égale ou supérieur à 50% recouvrant uhn horizon faiblement perméable
Lxha	Lixisols hapliques	Sols ayant un horizon argileux ferralique , et dont le taux de saturation en bases (par NH4OAc 1 M) est d'au moins 50 % jusqu'à une profondeur de 100 cm (uniquement dans les Ferralsols).
LPli	Leptisols lithiques	Sols avec melange d'argile entre 20 et 100 cm de profondeur et renfermant une couche de roche dure continue

1.2.9. Cadre hydrogéologique

La région du W du Niger reposant majoritairement sur des formations du socle précambriennes et infracambriennes est caractérisée par des aquifères considérés comme " discontinus " en raison de leur discontinuité hydraulique (Abdou, 2012). La perméabilité de ces aquifères dépend de la porosité de fractures secondaires (fig. 12). Ces formations n'offrent de ressources importantes que dans leur zone d'altération.

1.2.9.1. Aquifères

En milieu semi-aride, la lithologie des aquifères du socle forment un système bicouche constitués des altérites (régolithes) et l'aquifère de fracture jouant le rôle de drain (Napo, 2007), généralement plus exploité (Assemian et al, 2013) (fig.12). L'épaisseur moyenne des altérites est d'environ 30 m, et dépend du climat, de la durée d'altération et de la topographie. L'élévation du terrain sous l'effet d'érosion intense n'est pas favorable aux dépôts des sédiments (WYNS, 2002, cité par Assemian et al., 2013). Par contre les formations fissurées sont plus importantes en termes d'épaisseur et assurent une productivité mieux appréciable en milieu semi-aride (Lachassagne et al, 2011). Les altérites sont le plus souvent exploitées par puits à grands diamètres et sont vulnérables à la pollution. Compte tenu de leur faible perméabilité et porosité, la productivité des aquifères de socle reste modeste en comparaison aux autres types d'aquifères (Lachassagne et al, 2005).

Le contexte géologique de la région du W caractérisé en grande partie par des grès volcaniques infracambriens fortement consolidés ne permet la circulation de l'eau qu'à travers un réseau de fissures et des failles. Cependant, il peut y avoir des intercalations de calcaires et de dolomites qui peuvent donner un excellent débit si elles sont karstifiées (MCD, 1992). De telles intercalations existent dans la série mi-voltaïque

On distingue deux types d'aquifères correspondant au modèle conceptuel des aquifères de boucliers en région semi-aride (fig.12), comme en témoigne les coupes lithologiques de la zone:

- ✓ L'aquifère superficiel est constitué des matériaux sédimentaires fortement altérés (régolithes) avec une capacité de production médiocre.
  Les descriptions assez détaillées des coupes lithologiques des forages situés à la périphérie du Parc W dans la Commune rurale de Tamou et dans le Parc (fiches de forage à l'annexe électronique) montrent que l'aquifère superficiel est constitué de sable, de cuirasse latéritique avec souvent des intercalations d'argiles et des granites altérés. Cet aquifère est généralement exploité par puits par des moyens traditionnels.
- ✓ L'aquifère fissuré ou fracturé reste la principale unité qui offre une productivité avec des débits d'exploitation plus satisfaisants. Il concentre l'essentiel des réserves en eaux souterraines en région de socle (Abdou, 2012).

L'aquifère fracturé est constitué essentiellement de granites, granodiorites altérées et ou fracturées de schistes fracturés ou de grès quartzitiques.

Le sous-sol du Parc W du Niger renferme plusieurs type de nappes : la nappe des grès du Voltaien qui est dominante, les nappes du socle (MH/E, 2011), le Continental Terminal (CT1) à certains endroits, et des dépôts alluvionnaires appartenant au quaternaire en bordure des cours d'eau principaux. Les coupes lithologiques des forages de Tamou situés à la périphérie du Parc montrent la présence des intrusifs (granodiorites), ce qui confirme que tous les forages réalisés ne captent pas la nappe du Voltaien (fig.13).

Les fiches techniques des forages du Parc W (fig.14) mettent en évidence des nappes semi-captives qui captent le socle, et des grès quartzitiques à certains endroits (Annexe électronique 4).

L'interprétation des coupes lithologiques de Tamou (périphérie du Parc) et des forages du Parc W présente des profondeurs d'altérations pour les formations sédimentaires de l'ordre de 30 m, alors que celle de l'aquifère fissuré se situe entre 30 et 60 m voir plus à certains endroits. Dans ce contexte hydrogéologique, l'exploitation de l'aquifère de fissure nécessite des travaux de prospection systématiques et locaux.

La présence de la couche altérée affecte non seulement les conditions de l'aquifère mais aussi la recharge. Le contexte lithologique et climatique de la zone révèle que la recharge est tributaire de la pluviométrie (alimentation directe) par des voies préférentielles (zones de fractures et veines quartzitiques). Elle peut également se faire de façon indirecte à travers le ruissellement de surface dans les bas topographiques locaux (bas-fonds, marigots …) ou régionaux (vallées alluviales) (BMW, 1993). La recharge se produit généralement lorsque l'alimentation est suffisante pour causer un relèvement de la surface libre de la nappe phréatique (Freeze, 1969; Freeze et Cherry, 1979). Des études dans des conditions similaires à celle du Parc W révèlent qu'en moyenne 10 à 20 mm des précipitations s'infiltrent dans le plateau et 10 à 80 mm dans les vallées en fonction de la distribution temporelle des pluies (Desconnets et al., 1997).

Les données chimiques et isotopiques fournies par le vaste projet de l'AIEA (2017) incluant le Liptako Gourma au nord du Parc W, confirme l'existence d'une recharge par les précipitations ou l'infiltration d'eau superficielle (rivières) dans des zones spécifiques d'épisodes pluvieux intenses. La droite météorique des eaux montre que le mode de recharge n'est pas directe, mais plutôt il s'agit d'une infiltration diffuse ayant été affectée par le phénomène de l'évaporation (fig.15). Les résultats des travaux dans le cadre du projet RAF/8/038 et NER/8/009 financé par l'AIEA dans le socle fracturé (tableau 6) donne une estimation de l'âge des eaux souterraines (MH/E, 2011).

Les données physico-chimiques obtenues et mesurées à la périphérie du Parc W (tableau 4) montrent que les eaux souterraines de cette région sont faiblement minéralisées avec des valeurs de conductivités très faibles (<250 us/cm). Par contre les eaux du Parc W paraissent plus chargées en sels minéraux avec des valeurs de conductivités de l'ordre de 226 à 2520 µS/cm. Les valeurs de pH sont comprises entre 7.7 et 8,3 (BRGM, 1990). Les températures des eaux souterraines mesurées dépassent les 30◦C (Mission de terrain ,2018). Les eaux du socle de Tillabéri en occurrence celle du Parc W pourraient contenir des nitrates dû aux fumiers des animaux et aux boues des litières (MH/E, 2011). Le faciès chimique de ces aquifères est eaux bicarbonatées calcique à dominance magnésienne.

Des études géochimiques réalisées dans le sud-ouest du Niger par Leduc et al. (1997) sur la nappe libre du Continental Terminal près de Niamey ont conduits à des résultats exceptionnels en termes de quantité et qualité. L'échantillonnage est porté sur 250 chroniques piézométriques et physico-chimiques des suivis chimiques et isotopiques. Les résultats révèlent que la minéralisation de la nappe libre est faible de l'ordre de 50 mg/l avec des faciès le plus souvent bicarbonaté à nitraté, sodique ou calcique. La présence de tritium et les activités ^{14}C élevées témoignent du renouvellement actuel de la nappe, mais cette nappe est distincte de celle du Parc du W. Le taux de renouvellement à partir des teneurs en tritium est estimé à 0,5% par an (Leduc et al., 1996). Le contexte hydrogéologique du Continental Terminal est toutefois fort différent de celui retrouvé dans le Parc du W.

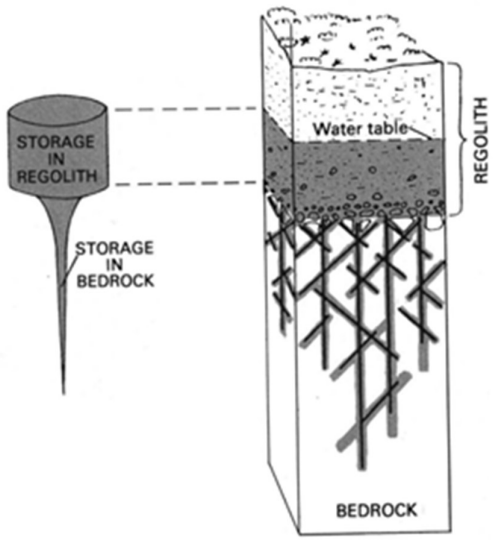


Figure 12 : Modèle conceptuel de développement des aquifères dans les roches du socle sous un climat semi-aride (Chilton et Foster ,1995)

Tableau 4: Données d'analyses physico-chimiques du Parc W, du Niger et de la commune rurale de Tamou, département de Say (BRGM, 1990 ; Direction Régionale de l'Hydraulique de Tillabéri, 2004)

						Concentrations des minéraux en mg/L										
	Localité	**IRH**	**C (µs/cm)**	**T °C**	**pH**	**Ca**	**Mg**	**K**	**Na**	**Fe**	**Cl**	**NO3**	**NO2**	**HCO3**	**F**	**SO4**
Parc W	TAPOA-BARRAGE	28647	226		7.7	30	36	4.5	14.4		13	3.5	0.01	244		19.5
	TAPOA-MOUSSIEMOU	28648	2520		7.7	228	154	22.5	150		15	3.5	0.01	213.5		11
	TAPOA-BATA	28649	341		8.1	39.6	23	1.25	6.1		1	4.8	0.01	216.5		2
	TAPOA-PERELEGOU	28650	459		8.3	20	11	5	91.6		1.1	3.9	0.01	286.7		12
	TAPOA-FOMBONI	28651	567		8	39.6	31	5.45	55.5		1.4	3	0.01	234.8		96
	TAPOA-GOURFANDOU	28652	255		8.1	26	13	5	15.9		1.5	3.09	0.02	167.7		1
Tamou	OURO SEKERE	673088	20	27.9	8	0.8	1	0.5	2	0.07	4	5.75	0.01	7.3	0	5
	PETAY	673096	100	25.5	6.8	7.7	3.1	0.5	19	0	6	8.8	0.24	63.44	0.9	15
	CHENE CHEGUEL	673087	245	28.1	7.9	23	6.8	3.5	28	0.03	6	7.52	0.02	148.8	0.13	7
	TIANPANGA	673084	165	28.5	8.5	16	1.5	10	12	0.02	20	29.7	0.1	48.8	0.09	7
	LELE	673082	370	26.1	7.9	46	46	1.2	15	0.02	10	3.1	0.01	231.5	0.13	7
	TIENE TONDI	673081	190	28.5	7.9	18	2.9	3.6	24	0.02	7	5.75	0.01	122	0.22	7
	BAMBOMA	673079	212	28.2	7.6	24	8.7	1.5	15	0.02	6	12.4	0.01	134.2	0.48	7

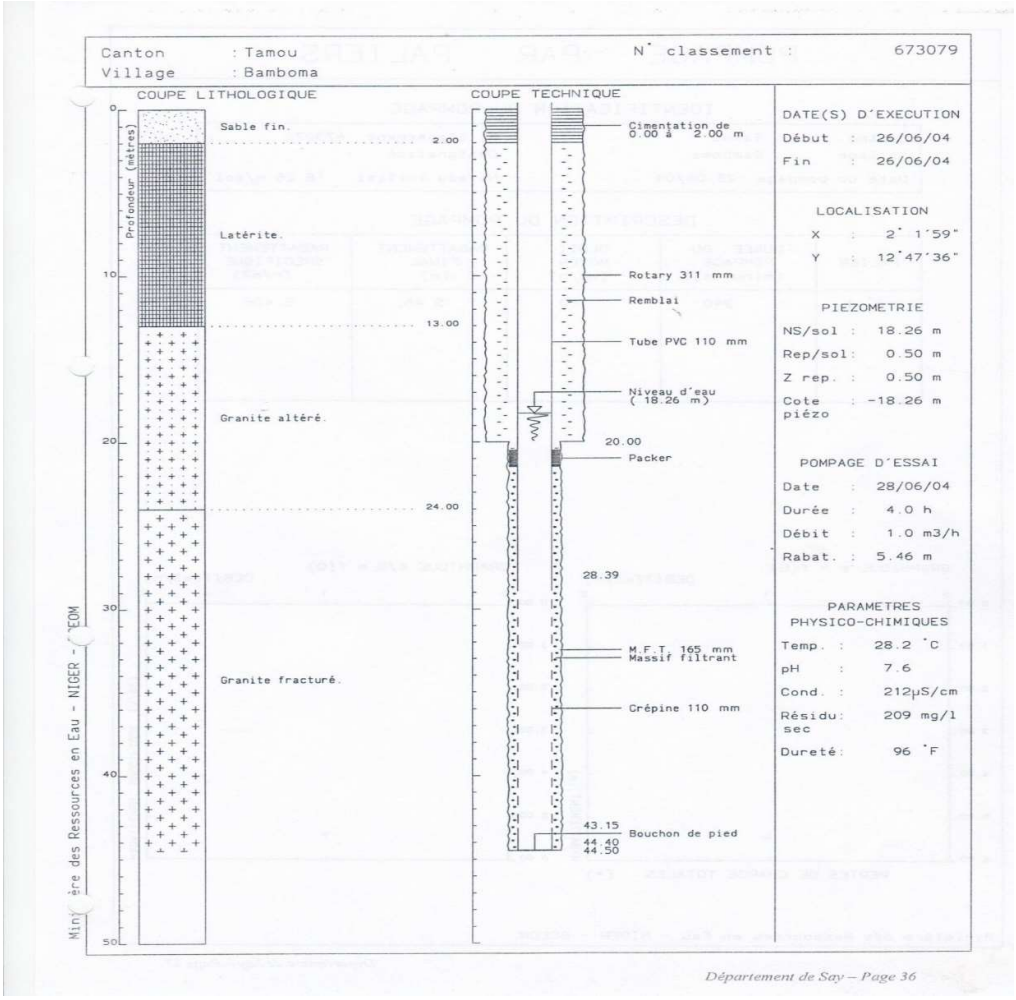


Figure 13: Coupe lithologique d'un forage à la périphérie du Parc W (Direction régionale de l'Hydraulique de Tillabéri, 2004)

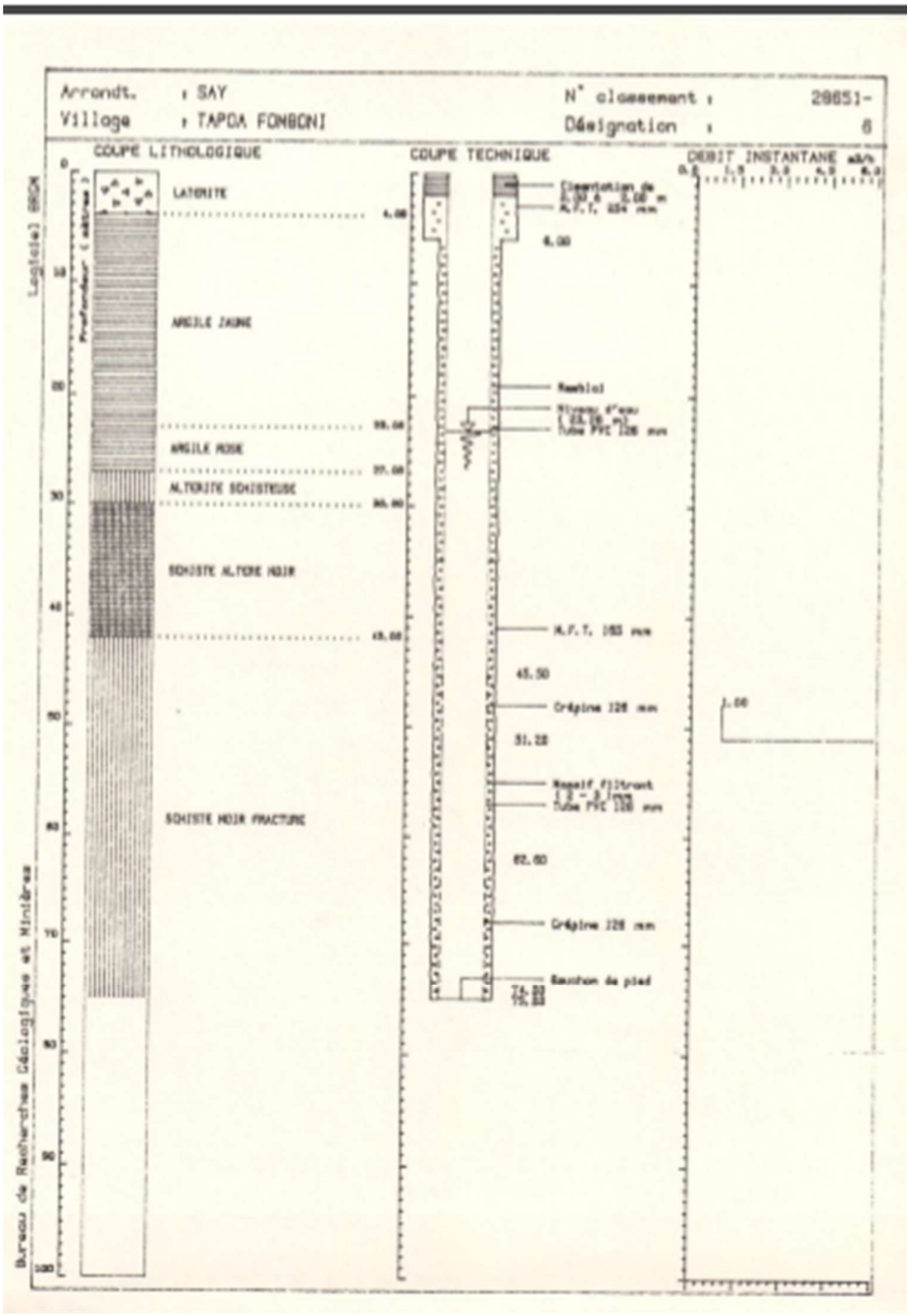


Figure 14: Coupe lithologique d'un forage du Parc W du Niger (BRGM, 1990)

Tableau 5:Caractéristiques isotopiques des aquifères du système des Iullemeden et des aquifères du socle (MH/E, 2011)

Aquifère	Variation $\delta^{18}O$		Variation $\delta^{2}H$		Variation $\delta^{3}H$		Variation Age (Années)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Continental Intercalaire	-7,18	4,10	-53,32	-27,81	0,00	10,00	Actuel	8280+/-230
Continental Terminal	-7,86	-3,43	-57,79	-17,87	-0,12	13,40	23210+/-1170	29185+/-6420
Socle fracturé	-7,31	0,62	-54,28	2,57			Actuel	116,19

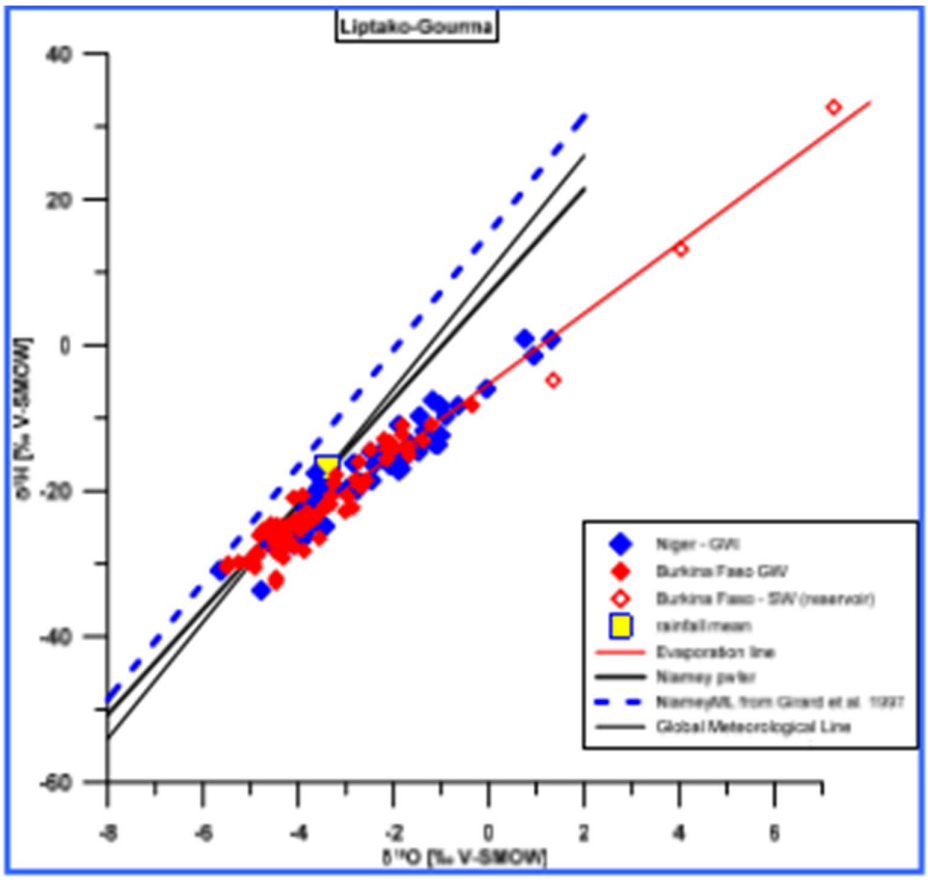


Figure 15: Distribution globale des isotopes stables dans le Liptako Gourma (AIEA, 2017)

1.2.9.2. Recharge des nappes en régions semi-arides

– **Processus de recharge**

Dans le contexte d'un climat semi-aride, l'interaction du climat, de la géologie, de la géomorphologie, de l'état du sol et de la végétation contrôlent le processus de recharge (Vries et Simmers, 2002). Une estimation précise de la recharge est souvent assez difficile en zone semi-aride du fait de la variation spatio-temporelle contrôlée par les conditions climatiques. Pourtant cette précision est indispensable dans l'estimation de la recharge des nappes afin de gérer les ressources en eau de façon durable (Favreau, 2000). En général, la recharge dans les zones semi-arides est beaucoup plus sensible aux conditions proches de la surface que dans les régions humides. Dans les régions semi-arides, l'évapotranspiration potentielle dépasse en moyenne les précipitations, de telle sorte que la recharge des eaux souterraines dépend particulièrement de fortes intensité de précipitations, de l'accumulation des eaux de pluies dans les dépressions et les cours d'eau dépendamment du type de sol et de la capacité des eaux de pluies à échapper à l'évapotranspiration par percolation rapide à travers des voies préférentielles telles que les fissures ou canaux et la couverture végétale.

Le phénomène de drainance par flux verticaux à travers les aquifères profonds est très fréquent en zone aride (Abdou, 2012). Leduc et al. (1997 et 2001) illustrent le rôle de la végétation se trouvant dans le sud-ouest du Niger où à la suite d'un changement d'affectation des terres, une augmentation de la recharge de 5 à 20 mm/an a provoqué une élévation à long terme de la nappe phréatique.

Lerner et al. ; (1990) distinguent trois modes de recharge en zone semi-aride (fig.16):

- ✓ Recharge directe par percolation verticale à travers la zone vadose qui a lieu lors d'un excès d'humidité du sol et de déficit d'évapotranspiration;
- ✓ Recharge indirecte qui a lieu par percolation jusqu'à la nappe phréatique à travers les lits des cours d'eau;
- ✓ Recharge localisée qui est une forme intermédiaire de recharge des eaux souterraines résultant de la concentration horizontale de l'eau près de la surface en l'absence de canaux bien définis.

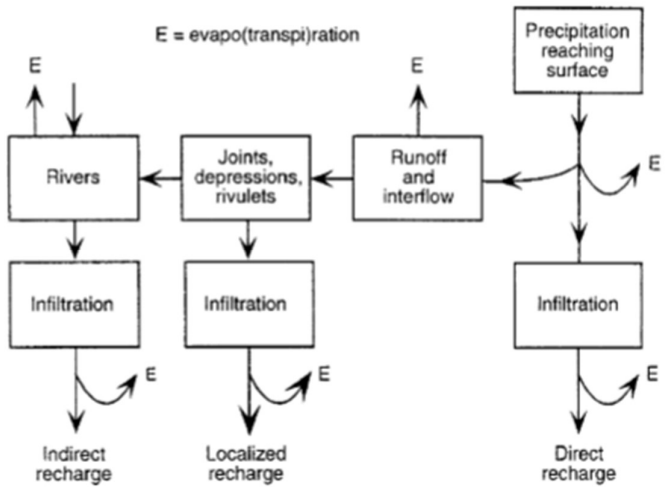


Figure 16:Mécanisme de recharge en zone semi-aride (Lerner, 1997)

En région semi-aride les mécanismes de recharge qui participent plus à l'alimentation des nappes sont les recharges indirectes et localisées (Joseph, 1991, cité par Abdou, 2012). Les isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O, ^{2}H) sont souvent utilisés pour déterminer le processus de recharge. Au Burkina Faso, Mathieu et Bariac (1996), cités par Favreau (2000), ont employé ces traceurs pour discriminer les infiltrations rapides (préférentielles) et lentes (diffuses) dans un sol argileux.

Plusieurs méthodes d'estimation de la recharge ont été expérimentées dans des conditions climatiques similaires au Parc W : le bilan hydrologique, le bilan massique des chlorures (Scanlon et al., 2006 ,cité par Vries et al.,2002), la modélisation de l'écoulement Darcien, les méthodes de mesures directes du débit printanier ou du débit de base des cours d'eau, les méthodes utilisant les hydrogrammes de puits et les traceurs géochimiques et isotopiques (^{14}C, ^{3}H, ^{2}H ,^{18}O) dans la zone saturée (Gieske et de Vries, 1990 ; Leduc et al., 1997,cité par Vries et al.2002). Seulement, l'inconvénient d'utiliser ces isotopes pour la détermination de la recharge est que pendant le processus de recharge, la molécule d'eau qui les constitue n'est plus conservée. La méthode utilisant le bilan de chlorure est une alternative simple et efficace.

- **Estimation de la recharge à partir de l'hydrogramme d'un cours d'eau**

L'hydrogramme d'un cours d'eau représente le débit mesuré en un point du bassin en fonction du temps. L'estimation de la recharge de la nappe est possible en soustrayant le volume potentiel total d'eau souterraine qui alimenterait un cours d'eau à la fin d'une récession (diminution exponentielle de l'écoulement souterrain d'un cours d'eau) du volume potentiel d'eau souterraine qui alimenterait le cours d'eau au début de la récession suivante, donc après la recharge.

Une façon simple d'appliquer de cette méthode pour le calcul de la recharge à long terme en considérant deux stations qui encadrent un cours d'eau est de calculer le débit de base au niveau de chaque station (avale et amont). La recharge équivalente s'obtient en soustrayant les deux débits de base divisés par l'aire du bassin. Delestre (2017) a appliqué cette méthode en utilisant le débit de la rivière Mékrou, mais cela s'est avéré très difficile car le débit d'étiage de la Mékrou est très faible et les mesures de débits en étiages sont donc très incertaines (voir annexe électronique).

- **Estimation de la recharge par la méthode de fluctuation de la nappe phréatique**

La méthode de fluctuation de la nappe phréatique est depuis longtemps utilisée pour estimer la recharge de la nappe phréatique (Meinzer, 1923, cité par Touré, 2016); de cette époque jusqu'à aujourd'hui, c'est l'une des techniques les plus employées dans toutes les conditions climatiques (Healy et Cook, 2002; Scanlon et al., 2002 cités par Touré,2016). Bien que la méthode soit simple, elle exige une grande disponibilité de données concernant le niveau de la nappe phréatique pour un suivi d'au moins deux ans.

La méthode de fluctuation de la nappe phréatique est bien adaptée aux aquifères peu profonds avec de courtes fluctuations de la nappe phréatique (Healy et Cook, 2002 cités par Touré ,2016). La méthode est basée sur l'hypothèse que l'élévation du niveau d'eau dans les aquifères à nappe libre est due à la recharge de l'eau arrivant à la nappe phréatique alors que toutes les autres composantes de l'eau souterraine, le débit de base vers les cours d'eau et les dépressions latérales de source, etc., sont négligeables pendant la période de recharge.

La recharge peut être calculée comme étant le produit du niveau de la nappe phréatique dans le temps par la porosité de drainage S_y (Touré, 2016).

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \qquad (1)$$

R : recharge (mm/s)

S_y : porosité de drainage (fraction volumétrique, sans dimension)

Δh : différence de charge (mm)

t : temps (s)

La porosité de drainage peut être estimée connaissant la porosité et la rétention spécifique comme suit (Healy et Cook, 2002, cités par Touré, 2016) :

$$S_y = \varphi - S_r \qquad (2)$$

Où φ est la porosité et Sr est la rétention spécifique (le volume d'eau retenu par la roche par unité de volume de roche).

La méthode de fluctuation piézométrique présente des limites. Elle peut convenir pour les nappes où les cycles annuels sont bien marqués. Le calcul de recharge exige la disponibilité de plusieurs chroniques piézométriques pour que la valeur soit plus représentative. La fréquence de mesure devrait être plus rapprochée (BRGM, 2015 a).

- **Etude dans des régions analogues et valeurs représentatives de recharge**

Un projet international de grande envergure sur l'énergie, l'eau et le bilan de carbone piloté par HAPEX – Sahel (*Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment*) a été réalisé pour déterminer la recharge directe dans le sud-ouest du Niger au cours de l'été 1992 (Bromley et al., 1997). L'estimation de la recharge a été faite par la méthode du profil de chlorure dans la zone non saturée du sol. Les résultats du profil sont obtenus à partir de 123 échantillons des zones non saturées prélevés dans un forage de 77 m de profondeur situé sur le côté ouest du plateau de Say (Tillabéri). Ce profil constitue le plus long qui ait été obtenu dans la région du Sahel et constituant une

référence unique et de longue durée de la recharge dans le passé. Les teneurs de chlorures varient tout au long de la saison avec des teneurs plus élevées en début de saison des pluies. Ces valeurs diffèrent également en fonction de l'intensité des précipitations et de la quantité des pluies.

L'estimation de la recharge par la méthode du bilan de chlorures à long terme a conduit à un taux de recharge de 13 mm/an pour les 70 m supérieurs du profil. Cette valeur tient compte de plusieurs hypothèses, dont une seule année de données de concentration en chlorure provenant de cinq pluviomètres du réseau EPSAT (Taupin et al., 1993, cité par Bromley et al.,1997) pour une concentration de chlorure dans les pluies de 0.62 mg/L et une pluviométrie annuelle de 564 mm au niveau de la station de Niamey où on dispose d'un enregistrement continu de 1905 à 1989. En utilisant l'estimation de la recharge moyenne à long terme de 13 mm/an, il était possible de calibrer le profil chronologiquement et de calculer le taux de mouvement et le temps de séjour de l'eau dans le profil (Cook et al., 1992, cité par Bromley et al., 1997). Un temps de résidence de 765 ans pour l'ensemble du profil a été déterminé.

Cette méthode d'estimation de recharge et de temps résidence s'est révélée fiable lorsque des contrôles indépendants tels que les données de tritium (^{3}H) ou du chlore 36 (^{36}Cl) étaient disponibles pour confirmer les résultats (Cook et al., 1992 cité par Bromley et al.,1997). Dans la même zone du degré Carré du HAPEX Sahel (Niger), Leduc et al. (1997) ont exploré la méthode de mesures de niveaux piézométriques pour l'estimation de la recharge. Malgré la forte variabilité spatiale et temporelle de la réponse de l'aquifère aux précipitations, un schéma de recharge a pu être déterminé. La recharge est dominée par l'infiltration des réseaux de drainage temporaire (mares et cours d'eau) et la réponse de l'aquifère dépend dans une large mesure des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et de la distance par rapport à la zone d'infiltration la plus proche. Dans de nombreux puits, les niveaux d'eau augmentent d'année en année. Il s'agit d'un processus de récupération de l'aquifère. Les estimations initiales de la recharge régionale sont de 50 à 60 mm/an, soit environ 10 % des précipitations annuelles. Par ailleurs, dans un contexte de climat similaire au Parc W, dans le nord du Ghana, l'estimation de la recharge a été faite par deux méthodes, à savoir la méthode utilisant le bilan hydrologique qui donne une plage de recharge de 12 – 268 mm/an et la méthode du bilan massique des chlorures avec un estimé de 11- 73 mm/an (Carrier et al., 2008 et 2011 a). Ces valeurs reflètent les conditions locales qui sont très variables. Plusieurs études avec des résultats satisfaisants ont montré que la recharge des aquifères pourrait être déterminée à partir des mesures géochimiques (Favreau, 2000). Les travaux d'Aranyossy et Gaye (1992)

au Sahel dans le cadre de la détermination du pic du tritium thermonucléaire ont conduit à un taux de recharge de 20 à 30 mm/an dans les sables dunaire au nord du Sénégal (Favreau, 2000).

- **Estimation de la recharge par le bilan hydrologique**

L'évaluation de la recharge par le bilan hydrologique est sans doute la méthode la plus couramment employée et facile à exploiter (Marsily, 1986). Le calcul de la recharge considère les différents processus que l'eau des précipitations subi jusqu'à la réalimentation des nappes. Le calcul est souvent fait pour chaque mois de l'année mais peut aussi être fait sur une base quotidienne.

L'équation simplifiée du bilan d'eau souterraine est donnée par la formule (3) suivante (Marsily, 1986) :

$$P = ETR + Q + I + \Delta s \qquad (3)$$, où :

P : précipitations totales ;

Q : ruissellement

ETR : évapotranspiration réelle ;

Δs : réserves en eau du sol

I : infiltration efficace, équivalent à la recharge R

Delestre (2017) a ainsi estimé la recharge pour la région du Parc du W avec la méthode de bilan hydrologique avec des intervalles de temps mensuels ainsi que quotidiens. Ce rapport est inclus dans les annexes électroniques du mémoire.

- **Estimation de la recharge par le bilan massique du chlorure**

La méthode du bilan massique du chlorure (CMB) a été développée par Eriksson et Khunakasem (1969) (cité dans Ting et al, (1998)). Cette méthode utilise le caractère conservatif de l'ion chlorure pour déterminer la part de l'eau infiltrée à partir d'une équation de masse (Favreau, 2000). Le chlorure ne contribue pas aux interactions

d'échange d'ions entre l'eau et la roche, et il ne peut pas être retiré de l'eau souterraine par processus chimique lorsqu'il atteint la nappe phréatique (Mazor, 2004 cité par de Vries et al. ; 2002. L'estimation de la recharge des eaux souterraines par la méthode du bilan massique du chlorure est fondée sur le principe simple qu'une fraction connue du chlorure dans les précipitations et les dépôts atmosphériques secs sont transportés vers la nappe phréatique par l'écoulement descendant de l'eau (Sumioka et Bauer, 2004, cité par Touré, 2016). Le calcul de la recharge se fait avec la relation suivante :

$$Re = (P.\ C_p) / C_{zns} \qquad (4)$$ où

Re : recharge interannuelle de la nappe

P : moyenne annuelle des précipitations

C_p : concentration moyenne en chlorure dans l'eau de pluie

C_{zns} : concentration moyenne en chlorure dans la zone non saturée au-delà de la reprise évaporatoire

La méthode est basée sur le simple calcul du rapport entre le dépôt total de chlorure dans les précipitations et les concentrations de chlorure dans les eaux souterraines. Cette méthode est de plus en plus utilisée dans l'estimation de la recharge, principalement dans les zones arides et semi-arides (Bazuhair et Wood, 1996; Mazor, 2004; Wheater, 2010; Diouf et al., 2012; Scanlon et al., 2006 cité par Vries et al.,2002).

Bien que cette méthode semble simple, ses conditions d'application nécessitent un examen rigoureux des processus de recharge (de préférence direct), de l'homogénéité géologique de l'aquifère et de l'absence de sources de chlorure (dans le ruissellement) autre que l'eau de pluie. L'infiltration doit être de type 1D vertical vers le bas (sans écoulement préférentiel, la dispersion et la diffusion sont négligeables par rapport à la convection verticale) et le flux massique de chlorure doit être équilibré (Carrier et al., 2008).

Dans le cadre de ce projet, cette méthode pourrait être très intéressante car elle a fait ses preuves dans le cadre du projet HAP (The Hydrogeological Assessment Project) au Ghana et surtout que nous disposons de données de chlorure dans les précipitations de la station de Niamey. Toutefois, l'application de cette méthode nécessiterait d'échantillonner la zone non saturée, ce qui n'était pas possible avec les ressources disponibles pour le présent projet. La méthode peut aussi être appliquée à l'aide de puits peu profonds (Carrier et al., 2008 et 2011a), mais il n'y a pas de tels puits disponibles à l'intérieur du Parc du W.

II. MATERIELS ET METHODES

2.1. Matériels utilisés

Le matériel comprend les données et les outils qui ont été utilisés dans le cadre de cette étude pour une meilleure compréhension des résultats attendus. Les données collectées font référence à des documents (rapports de thèses, de mémoires et les articles scientifiques) et des cartes électroniques en rapport avec le thème d'étude. L'acquisition des données topographiques, géologiques, hydrogéologiques, d'occupation des sols et climatiques a permis de caractériser le contexte naturel de la zone d'étude et d'établir les cartes de base. Ces données sont collectées à partir des sites internet publics et de certains organismes (P.ex. NASA, BRGM) Cette recherche d'information a été poursuivie, notamment directement auprès des organismes du Niger (P.ex. Direction nationale de la météorologie, Ministères de l'hydraulique, des mines, de l'environnement, l'ABN).

Les fiches techniques des forages d'eau réalisés par le BRGM en 1990 comprennent les coupes lithologiques ayant permis la caractérisation des aquifères, les données d'analyses physico-chimiques et des essais hydrauliques. Ces données sont disponibles au Ministères de l'hydraulique (Niger). Les coupes lithologiques des forages d'eau situés à la périphérie du Parc W dans la commune rurale de Tamou (Say) ont permis à mieux comprendre l'hydrogéologie de la zone d'étude.

Les fiches de sondages miniers dans le cadre de la prospection du phosphate par le Ministère des mines dans la zone d'étude ont permis de mieux comprendre la minéralisation des aquifères.

L'estimation de la recharge est faite par la méthode du bilan d'humidité du sol (*soil moisture balance*), ou bilan hydrologique. La méthode consiste à évaluer les paramètres du bilan hydrologique et à déterminer la part de l'infiltration qui atteint la nappe d'eau souterraine. Les données de pluies des stations proches du Parc ont servi de calcul de base pour la détermination des paramètres (précipitations, évapotranspiration et ruissellement).

Les données de débits des cours d'eau Tapoa et Mékrou sont fournies par la direction nationale de l'hydrologie du Niger.

Le matériel utilisé pour la réalisation des pompages d'essai est constitué de logistiques, d'un appareil de localisation des points des différents levés (GPS), d'un groupe électrogène, d'un compresseur à l'air pour le développement des puits par

soufflage à l'air lift, des tuyaux d'exhaure, du matériel de mesures de niveau d'eau, de volume, de mesure temps ; et des accessoires de plomberie (clé à griffes, étau, manchon vanne, raccords, etc.).
Les données des essais ont été interprétées à l'aide du logiciel OUAIP du BRGM, disponible en ligne.

L'essentiel des outils utilisés dans le cadre de la bathymétrie est constitué de la station totale et ses accessoires, d'un GPS et du zodiac (bateau à air pour le transport de ceux qui effectuent les mesures dans l'eau). L'interprétation des données obtenues par bathymétrie est faite pas le logiciel co-vadis.
Le matériel réuni pour la campagne d'échantillonnage d'eau est constitué des appareils de mesures *in situ* des paramètres physiques des eaux (conductivité, température, pH), de matériels de laboratoire (pipette graduée de 1 mL , des seringues en polyéthylène, des gants stériles, des bouteilles en polyéthylène de 30 mL, 500 mL et 1000 mL) . La solution de NaOH a été utilisée pour la conservation des échantillons destinés à l'analyse du carbone-14 et une glacière pour la conservation des échantillons.
Les analyses physico-chimiques sont réalisées au laboratoire de l'INRS et les d'analyses isotopiques au laboratoire de Waterloo (Canada).
Les diagrammes de Piper a été utilisé pour caractériser les types d'eau. Des modèles analytiques ont été élaboré pour étudier les conditions de recharge et le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère. Un modèle numérique Flonet, 2D a été développé pour comprendre le système d'écoulement dans la zone d'étude.

2.2. Méthodologie

La recherche de l'information existante est l'étape fondamentale de toute investigation afin d'obtenir une compréhension globale de la zone d'étude.

Cette étape a fait l'objet d'une mission de reconnaissance de la zone d'étude réalisée au Niger en juin 2017. Cette mission a permis de géo localiser les ouvrages hydrauliques et de faire un état de lieux des points d'eau existants .En 2018, une autre mission a été dédiée aux travaux de terrain pour collecter des données sur la région d'étude. Ces travaux comprenaient la mesure de niveaux d'eau (piézométrie), des levés géodésiques pour établir la topographie et les volumes des mares, des essais hydrauliques, et l'échantillonnage de l'eau pour des fins d'analyses physico-chimiques et isotopiques.

Les cartes de bases illustrant les conditions rencontrées dans la région d'étude se trouvent à la fin du document.

2.2.1. Essais hydrauliques

Les données de référence des essais de pompage proviennent de six (6) forages réalisés sous le contrôle du BRGM en 1990 (Tableau 8). Les fiches des forages et des essais étaient disponibles, mais il n'y avait pas de rapport accompagnant ces informations. Ainsi trois forages ont fait l'objet des essais dans le cadre de cette étude et les résultats interprétés et comparés avec les données initiales (voir Tableau 6: Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W du Niger)

- **Procédure générale des essais hydrauliques**

Deux principaux types d'essais hydrauliques peuvent être réalisés dans les puits, soient les essais de puits (essais par paliers) servant à évaluer la productivité du puits et les pompages d'essais ayant pour but d'évaluer les propriétés hydrauliques des aquifères (essais de longue durée). Ces essais sont brièvement décrits dans les sections suivantes.

2.2.1.1. Essais de puits

L'essai de puits ou essai par paliers est exécuté pour obtenir des renseignements sur les caractéristiques d'un ouvrage (puits ou forage) puisque c'est seulement les abords immédiats de l'ouvrage qui sont influencés. Le forage est pompé avec un débit aussi constant que possible pendant la durée du palier. Les niveaux piézométriques sont mesurés périodiquement avant, pendant et après les essais de pompage afin d'évaluer correctement les rabattements. Il permet ainsi de déterminer le débit spécifique du puits (le rapport de débit sur le rabattement), ce qui permet d'évaluer la productivité de l'ouvrage (Sandaou 2011). Ces essais par paliers permettent également de déterminer:

- ✓ la transmissivité ponctuelle autour de l'ouvrage de pompage ;
- ✓ Le débit critique du puits ou du forage testé ;
- ✓ Les pertes de charges avec les composantes linéaire et quadratique,
- ✓ Et les rabattements en fonction des débits ou inversement.

Le protocole retenu dans le cadre de cette étude est basé sur la méthode de paliers enchainés où le débit Q1 est doublé immédiatement à la fin de la durée du 1er palier. Le deuxième palier est engagé immédiatement après le premier palier avec un débit Q2 égal à 2Q1 et le troisième qui démarre avec un débit Q3=3Q1 aussitôt après le deuxième palier. La durée des essais est de 3 h de temps soit une (1) heure par palier suivi d'une remontée plus ou moins équivalente au même temps de pompage. Un développement à la pompe est préalablement effectué afin de déterminer le débit maximal pouvant être pompé et qui sert de projection des débits des paliers.

La photo 4 montre les opérations de démontage d'exhaure sur le forage et le jaillissement d'eau lors du soufflage a l'air lift réalisé pour nettoyer le puits.

Photo 4: Démontage d'un forage A), Soufflage à l'air lift B).

Avant de procéder aux essais par paliers, le niveau piézométrique et la profondeur totale sont mesurés suivis du soufflage à l'air (air lift) en vue de nettoyer l'ouvrage et éventuellement decolmater les crépines. Cette dernière opération est poursuivie jusqu'à l'obtention d'une eau claire. Un développement à la pompe d'une durée d'une heure est effectué pour apprécier le comportement de l'ouvrage et projeter les débits des paliers.

2.2.1.2. Pompage d'essai de longue durée

Le principe de base d'un pompage d'essai consiste à pomper à débit constant et à mesurer l'influence du pompage sur le niveau piézométrique dans l'ouvrage et au voisinage (piézomètre, puits, cours d'eau). Le niveau d'eau est mesuré de façon périodique afin de définir l'évolution du rabattement dans l'ouvrage en fonction du temps (Chapuis, 2007).

Le principal objectif recherché à travers un essai de nappe est la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (Dadoun, 2007) et éventuellement d'évaluer la présence de limites à l'aquifère. Ces propriétés sont la transmissivité, la conductivité hydraulique et le coefficient d'emmagasinement. Le temps de pompage est suffisamment long et le débit est maintenu aussi constant que possible durant la descente. La répartition géographique des ouvrages dans le parc W exclue la présence des piézomètres à proximité des forages testés. Ainsi, les essais considérés longue durée de nappe réalisés dans le cadre de cette étude est de 12 heures de descente et 12 heures de remontée; mais tout de même le temps de récupération se situe entre 6 et 7 heures de temps pour l'ensemble des forages testés. Cette durée était suffisante pour déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère en prolongeant le pompage jusqu'au régime permanent (Chapuis, 2007).

2.2.2. Description de la méthode de bathymétrie

La bathymétrie représente un ensemble de mesures de profondeur de la retenue d'eau de l'ouvrage par un levé topographique en vue de connaitre la topographie du fond submergé et déterminer le volume d'eau stocké ou stockable. La méthode consiste d'abord à placer des repères au niveau du site à lever, l'opérateur installe ensuite la station totale. Pendant ce temps, le croquiseur prend les coordonnées rectangulaires des points de repères avec le GPS afin de les insérer pendant le paramétrage de la station totale. Cette opération a pour but de géolocaliser le plan d'eau. Les porte-mires placent les cannes à l'endroit indiqué en orientant le prisme vers la station totale et l'opérateur lance le processus de mesures. Les coordonnées du point sont obtenues et enregistrées dans l'appareil; et le porte-mire continue à se déplacer jusqu'à couvrir toute la zone à lever.

Les coordonnées ainsi transférées seront traitées avec le logiciel de topographie appelé '' co-vadis '' pour produire le plan et illustrer le relief du fond à travers les

courbes de niveau. Le logiciel fournit des informations complémentaires telles que les superficies engendrées par les courbes de niveau. Le volume d'eau stocké est déterminé en faisant le produit des surfaces obtenues par planimétrage des plans des mares, et l'équidistance entre les courbes de niveau.

Les coordonnées X et Y des points de mesure ont été directement calculées par la station totale selon le paramétrage effectué. Les mêmes coordonnées sont transférées à l'ordinateur via un câble de transfert ou une clé USB spécialement conçue pour l'appareil. Le logiciel fournit les informations complémentaires telles que les superficies engendrées par les courbes de niveau qui se ferment. Ces superficies peuvent être aussi déterminées au moyen d'un instrument appelé ''planimètre''. Un tableau est ensuite dressé pour calculer les volumes cumulés de ces courbes de niveau. On peut aussi tracer un graphique nommé « courbe hauteur-volume » (exemple à la figure 19). Pour les rivières comme la Mékrou et la Tapoa, des profils en travers sont effectués. Ces profils permettent de déterminer la profondeur du cours d'eau, sa largeur à l'endroit précis de l'espace couvert par le levé et aussi de connaitre la section du cours d'eau. Ces mesures permettent éventuellement de calculer le débit en fonction de la vitesse de l'écoulement. Les résultats obtenus sont consignés à l'annexe électronique 2.

Photo 5: Travaux de Bathymétrie, paramétrage avec la station totale (image de droite) (mission de mai 2018)

2.2.3. Echantillonnage de l'eau

Les échantillons d'eau ont été prélevés après les essais de pompage de longue durée et sur certains forages justes après les opérations de soufflage et le développement à la pompe. Quelques mares ont aussi faits l'objet d'échantillonnage de même que l'eau de pluie dans le pluviomètre installé à l'intérieur du Parc.

Les bouteilles d'échantillonnage ont été préalablement étiquetées et marquées à l'aide d'un marqueur. Sur chaque étiquette figure le nom du site, le nom du forage, la date et l'heure du prélèvement, le type d'analyse à réaliser, et les paramètres physiques in situ (conductivité électrique, pH et température de l'eau, photo 7). Après l'étape d'étiquetage et marquage, la bouteille est ensuite scellée à l'aide d'un ruban adhésif afin d'éviter que l'eau puisse altérer les écritures. La présence d'un agent conservateur est aussi mentionnée sur la fiche. Le conservateur utilisé pour l'analyse du ^{14}C est du NaOH, 0.5 mL d'une solution 5 N introduit à l'aide d'une pipette de 1 mL.

Le prélèvement est une opération délicate de l'étape d'échantillonnage. La manipulation doit se faire avec précaution de façon à éviter toute contamination de l'échantillon. Des gants stérilisés ont été utilisés durant toutes les étapes de l'échantillonnage (photo 8). Avant le remplissage, la bouteille est rincée à plusieurs reprises de même que toutes les sondes des appareils à utiliser. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une seringue en polyéthylène adaptable au filtre selon la quantité d'eau à prélever (photo 6) Le volume d'eau filtré est de 30 mL pour les analyses chimiques et 500 mL à 1000 mL pour les analyses isotopiques. Les mesures spécifiques au prélèvement des échantillons destinés à l'analyse isotopique (^{3}H et ^{14}C) consistent à éviter au maximum les échanges atmosphériques avec l'échantillon. L'efficacité recherchée est l'absence totale des bulles d'air dans la partie supérieure de la bouteille.

Photo 6: Combinaison filtre – seringue et filtre modèle FHT-45

Photo 7: Matériel de mesures physico-chimiques in situ

Photo 8: Echantillonnage de l'eau de mare de Moussièmou A) et au bord de la Tapoa B)

La conservation consiste à maintenir l'échantillon d'eau dans les mêmes conditions d'origines naturelles en évitant les réactions chimiques pouvant influencer la qualité des résultats d'analyses.

Le site d'étude étant situé dans un contexte de climat chaud, la température des eaux est naturellement élevée de l'ordre de 30°C. Des mesures de refroidissement ont été prises sur le terrain afin de baisser cette température. Les échantillons ont été conservés au frais avant leur acheminement dans les laboratoires de l'Université de Waterloo pour les analyses isotopiques et celui de l'INRS pour les analyses chimiques.

Les paramètres analytiques sont constitués des métaux : Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Se, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zn et des anions : F, Cl, Br, SO_4, NO_3, NO_2.

Les métaux ont été analysés par spectroscopie d'émission par plasma à couplage inductif (ICP). C'est une méthode analytique très pratique et fiable mise au point dans les années 1960 pour la détermination des métaux dans les échantillons d'eau. Les échantillons sont préalablement filtrés, acidifiés et dilués au besoin. Le principe est basé sur une source ICP composé d'un courant d'argon gazeux ionisé par un champ de radiofréquences oscillant généralement à 27,1 MHz. Ce champ est couplé par induction au gaz ionisé par une bobine refroidie à l'eau entourant une "torche" à quartz qui supporte et confine le plasma. Un échantillon d'aérosol est généré dans un nébuliseur et une chambre de nébulisation appropriés et est transporté dans le plasma par un tube injecteur situé dans la torche. L'aérosol de l'échantillon est injecté directement dans l'ICP, soumettant les atomes constitutifs à des températures élevées d'environ 6000 à 8000°K. Une réduction significative des interférences chimiques est obtenue après dissociation des molécules. La température élevée du plasma excite efficacement l'émission atomique.

L'excitation fournie par l'ICP permet de détecter de nombreux éléments en tenant compte des interférences potentielles lors que les sels dissous dépassent 1500 mg/L.

L'analyse des anions est effectuée par chromatographie ionique. Cette méthode analytique d'échange d'ion est basée sur la séparation des molécules selon leurs charges. Il se produit des réactions ioniques entres les ions de charges opposées fixés sur la phase stationnaire entrainant ainsi leur rétention. Cette méthode à l'avantage de permettre de doser plusieurs anions simultanément. Outre le dosage des anions dans les liquides (bromures, sulfates, chlorures, nitrates, nitrites, composés de soufre réduit, dioxyde de soufre), la méthode permet aussi de quantifier les solides et l'air. Pour des concentrations très élevées les échantillons peuvent être dilués par un facteur approprié (Centre d'expertise en d'analyse environnementale du Québec, 2014).

Les limites de détection se situent entre 0.00009 et 0.009 pour les métaux et les limites de détection des anions varient de 0.004 à 0.005.

2.2.4. Programme d'exploitation durable de la ressource en eau du Parc W

Un programme de suivi de la ressource va être élaboré afin d'étudier le comportement des infrastructures dans le temps et la recharge qui va combler les pompages saisonniers pour alimenter les mares. La méthode consiste à mesurer le niveau d'eau d'un puits en début et à la fin de la saison des pluies sur une période d'au moins 3 ans. Des courbes de niveaux d'eau seront tracées en fonction temps (figure 38) ; si le niveau d'eau mesuré est stable, les courbes resteront horizontales et l'exploitation pourra être jugée durable. La disponibilité de la ressource est permanente pour assurer l'approvisionnement en eau de la faune. Si les courbes ont tendance à décroitre, cela sous-entend que la ressource diminue et que la situation est inquiétante pour le futur et qu'il faut prendre des dispositions pour assurer sa pérennité. Dans le cas où la courbe est ascendance, les conditions de recharge sont bonnes pour le long terme.

La période de mise en œuvre de ce programme dans le cadre de cette étude peut paraitre assez courte pour mieux apprécier ce programme. Cependant, il relève de la responsabilité des autorités en charge du Parc W à s'engager à suivre ce programme pendant au moins 10 ans ou 15 ans car il a l'avantage de permettre le suivi de l'exploitation de la ressource à long terme et aussi de contrôler l'état de l'équipement des forages (colmatage des crépines).

III. RESULTATS DES TRAVAUX

3.1. Résultats des essais hydrauliques

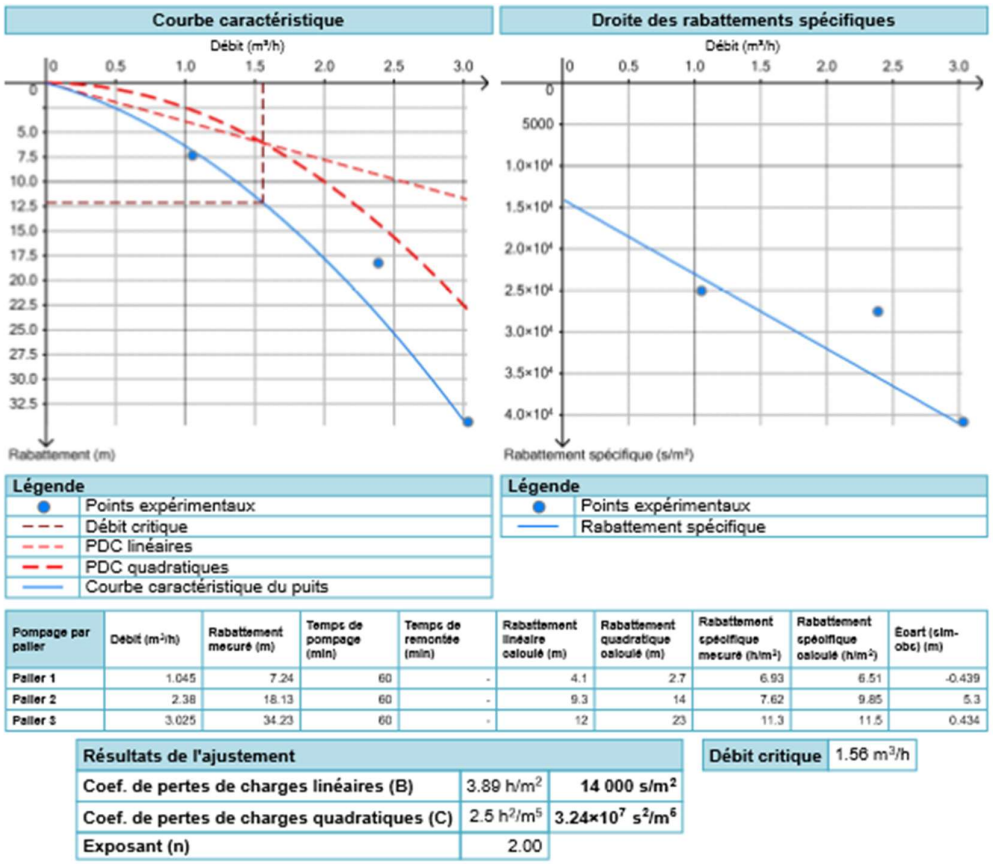
Les données des essais réalisés dans le Parc W par le BRGM en 1990 ont été réinterprétées avec le même modèle numérique (logiciel OUAIP du BRGM (2015b) utilisé dans le cadre de cette étude. Ces résultats ont été comparés avec ceux des essais réalisés sur trois forages accessibles au moment de l'étude sur les six programmés. Les trois (3) forages testés, Tapoa Barrage, Tapoa Moussièmou et Tapoa Bata sont localisés dans la partie nord du Parc W (voir carte 2 : localisation des points d'eau).

- **Essais de puits**

Le but de l'interprétation des données des pompages par paliers est la détermination de la relation expérimentale, liant le rabattement et le débit afin de la comparer aux relations de Jacob (équation 5) :

$$s=bQ^2+aQ \Rightarrow s/Q=bQ+a. \quad (5)$$

Cette méthode dite graphique a été utilisée pour aboutir à des résultats qui sont comparés avec ceux obtenus avec la méthode de Theis (tableau 6). Les deux méthodes ont permis de déterminer les paramètres recherchés (débit critique, rabattement critique, les pertes de charges linéaires et quadratiques, le débit d'exploitation qui est fonction du rabattement maximal admissible).



Pompage par palier	Débit (m³/h)	Rabattement mesuré (m)	Temps de pompage (min)	Temps de remontée (min)	Rabattement linéaire calculé (m)	Rabattement quadratique calculé (m)	Rabattement spécifique mesuré (h/m²)	Rabattement spécifique calculé (h/m²)	Ecart (sim-obs) (m)
Palier 1	1.045	7.24	60	-	4.1	2.7	6.93	6.51	-0.439
Palier 2	2.38	18.13	60	-	9.3	14	7.62	9.85	5.3
Palier 3	3.025	34.23	60	-	12	23	11.3	11.5	0.434

Figure 17: Courbe caractéristique du forage de Moussièmou

L'analyse de la courbe caractéristique ci-dessus, indique que le point d'inflexion de la courbe correspond à l'intersection des courbes des pertes de charges linéaires dues à l'écoulement laminaire et les pertes de charges quadratiques liées à l'écoulement turbulent dans les crépines (figure 17). La projection de ce point sur les deux axes indique les valeurs du débit et rabattement critiques à ne pas dépasser dans le cadre de l'exploitation de l'ouvrage.

Tableau 7: Comparaison des méthodes de détermination des caractéristiques des forages du Parc W

Caractéristique de quelques des forages du Parc W								
	Débit critique (m^3/h)		Rabat. Max (m)		Coef. B (h/m^2)		Coef.C (h^2/m^5)	
Nom des Forages	Theis	Graphique	Theis	Graphique	Theis	Graphique	Theis	Graphique
Tapoa Moussiemou	1.56	2.4	12.2	18	3.89	4.4	2.5	1.96
Tapoa Bata	6.7	7.5	4.77	3.4	0.402	0.85	6.00E-02	2.80E-02
Tapoa Barrage	4.5	3.9	15.4	13	2.76	2.614	0.156	0.179

Le Tableau (6) montre un récapitulatif des résultats des essais de puits réalisés en octobre 2018. La méthode de Theis a été comparée avec la méthode graphique classique de Jacob. Bien que la méthode de Theis qui utilise le logiciel OUAIP de BRGM semble plus rigoureuse, les écarts entre les données avec la méthode graphique ne sont pas importants.

- **Essais de nappe**

La méthode d'interprétation retenue pour les essais de nappe est la solution de Theis qui s'applique en nappe captive, isotrope et d'extension infinie (étendue) (Chapuis, 2007 ; Therrien, 2016). Les figures 18 et 19 montrent l'évolution du rabattement en fonction du temps pour les essais réalisés en 1990 et en 2018. La remontée est limitée dans l'intervalle de 6 h à 7 h de temps car on a constaté une bonne récupération de l'ouvrage.

Le tableau 7 donne une synthèse des caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W tels que réalisés en 1990 et réinterprétés par la méthode de Theis à l'aide de logiciel OUAIP. Une comparaison de ces caractéristiques est faite avec les nouvelles données des essais de 2018 (tableau 8) et aussi ceux de la sous-région en zone de socle (tableau 9).

Le tableau 10 presente une Synthèse des caractéristiques des ouvrages du Parc W du Niger.

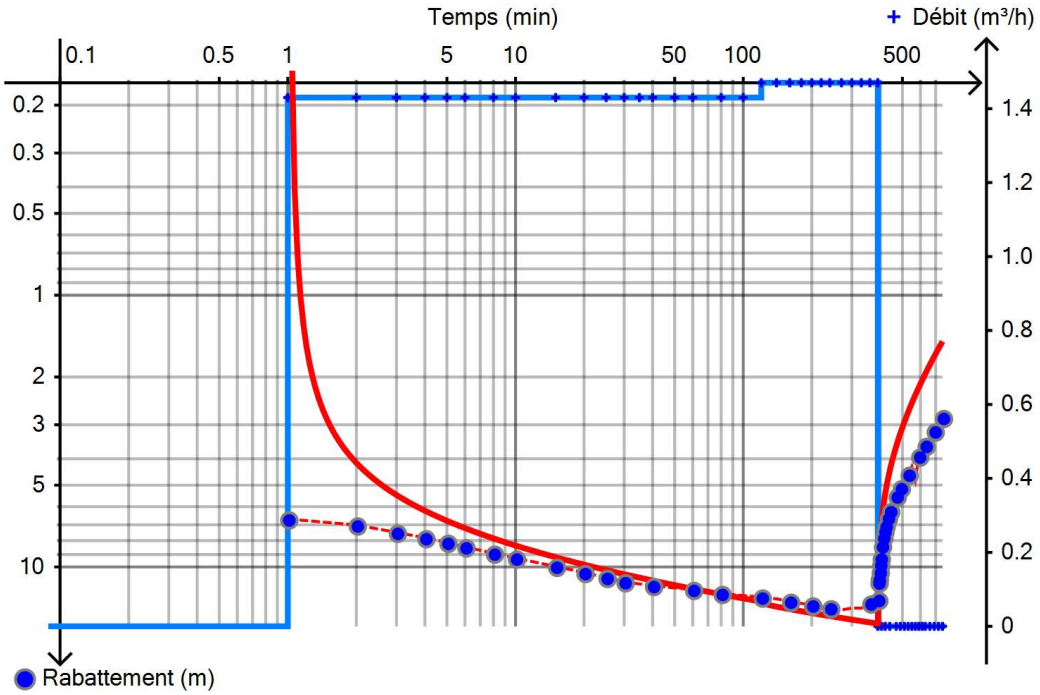


Figure 18: Forage Tapoa Moussièmou, courbe de descente et de remontée (Mission ,2018)

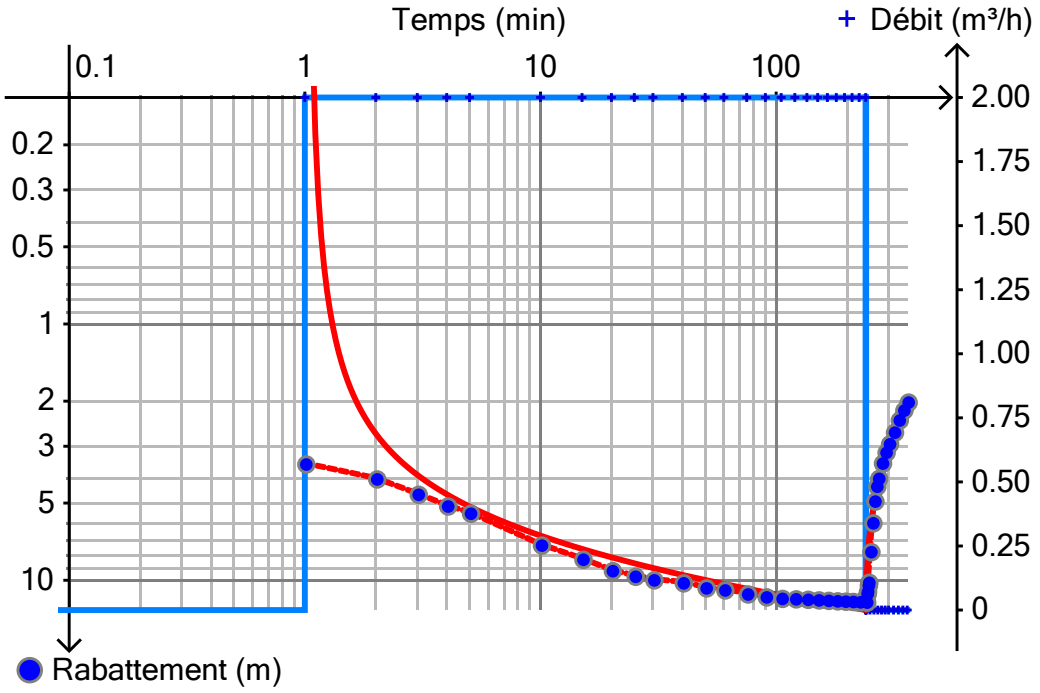


Figure 19:Forage Tapoa Moussièmou, courbe de descente et de remontée (essai du BRGM en 1990)

Tableau 8: Caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W (source de données du BRGM des essais réalisés en 1990)

Caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W du Niger (Données de 1990)					
Nom des ouvrages	Transmitivité (m2/s)	Perméabilité (m/s)	Coef. d'emmagasinement (-)	Coef.d'emmagasinement spécifique (m-1)	Coef. d'ajustement NASH
Tapoa Barrage	6.02E-05	2.86E-06	3.61E-02	1.72E-03	0.89
Tapoa Moussiemou	2.26E-05	3.43E-07	2.52E-01	3.82E-03	0.93
Tapoa Bata	2.58E-04	7.17E-06	2.59E-01	7.19E-03	0.91
Tapoa Fomboni	8.30E-05	2.50E-06	4.27E-01	1.29E-02	0.93
Tapoa Gourfandou	8.74E-04	2.08E-06	3.62E-04	8.62E-06	0.89
Tapoa Pérélégou	1.21E-04	2.62E-06	7.48E-02	1.63E-03	0.9

Tableau 9: Comparaison avec le tableau 7 des caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W du Niger pour les essais réalisés sur 3 forages en 2018

Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques des forages du Parc W du Niger										
	T (m2/s)		K (m/s)		Coef. S		Coef. Ss (m-1)		Coef. NASH	
Nom des ouvrages	1990	2018	1990	2018	1990	2018	1990	2018	1990	2018
Tapoa Barrage	6.02E-05	7.12E-05	2.86E-06	3.39E-06	3.61E-02	1.16E-03	1.72E-03	5.50E-05	0.890	0.95
Tapoa Moussiemou	2.26E-05	1.55E-05	3.43E-07	2.36E-07	2.52E-01	1.08E-01	3.82E-03	1.64E-03	0.935	0.77
Tapoa Bata	2.58E-04	2.49E-04	7.17E-06	6.92E-06	2.59E-01	1.19E-02	7.19E-03	3.29E-04	0.911	0.94

Tableau 10:Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du socle d'Afrique (Abdou, 2012)

Localités	Auteurs	Aquifères	Transmissivité T (m^2/s)	Coeff. Emmaga. S
Burkina Faso	Engaleenc, 1978	Roches vertes	4.10^{-6}	
	Compaoré et *al.*, 1997	Altérites	10-6 à 3.10^{-4}	$1,5.10^{-3}$ à 3.10^{-2}
	Yaméogo, 2008	Granites	$2,9.10^{-5}$ à $6,5.10^{-3}$	1.10^{-1} à 4.10^{-2}
Côte d'Ivoire	Engalenc, 1978	Schistes	2.10^{-5} à $6,10^{-4}$	
	Lasm, 2000	Gneiss migmatitique	1.10^{-4} à $4,52.10^{-5}$	
		Amphibolo-pyroxénites	$2,9.10^{-6}$ à $1,7.10^{-5}$	
Djibouti	Jalludin et Razack, 1997	Basalte	$3,3.10^{-4}$ à $1,4.10^{-1}$	2.10^{-5} et 10^{-4}
Niger	Ousmane, 1988	Granitoïdes	5.10^{-5} à $1,1.10^{-3}$	

Tableau 11: Synthèse des caractéristiques des ouvrages du Parc W du Niger

	Caractéristiques des ouvrages du Parc W												
		Coordonnées			Profondeur (m)	Niveau statique (m)	Diamètre (mm)	Profondeur des équipements (m) Sup. - inf.			Essais disponibles	Durée des essais (h)	État de fonctionnement
Nº	Nom du Forage	Latitude Nord	Longitude Est	Altitude (m)				Tube plein	Crépines	Nature du tube			
1	Tapoa Moussiemou	12°26'26.7''	002°23'08.7''	224	91	24.03	126	0.00 - 38.70 44.40 - 78.60	38.70 - 44.40 78.60 - 90.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990) Essais de puits & nappe(2018)	4 3 ; 6 h30	En panne
2	Tapoa Bata	12°28'24.4''	002°30'24.7''	196	49	16.54	126	0.00 - 30.90 36.60 - 42.30	30.90 - 36.60 42.30 - 48.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990) Essais de puits & nappe(2018)	6 3 ; 12 h00	Bon
3	Tapoa Barrage	12°28'0.90''	002°24'56.9''	232	67	1.4	126	0.00 - 48.90	48.90 - 66.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990) Essais de puits & nappe(2018)	4 3 ; 12 h00	Bon
4	Tapoa Fomboni	12°28'40''	002°22'40''	230	75	23.62	126	0.00 - 45.50 51.20 - 62.60	45.50 - 51.20 62.60-74.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990)	4	En panne
5	Tapoa Pérélegou	12°8'58.05''	002°31'15.86''	230	67	9.85	126	0.00 - 30.8 36.5 - 53.60	30.80 - 36.50 53.60 - 65.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990)	6	En panne
6	Tapoa Gourfandou	12°23'30''	002°16'55''	230	73	45.54	126	0.00 - 47.9	47.90 - 65.00	P.V.C.lisse	Essais de nappe (BRGM,1990)	4	En panne
7	Tapoa Village	12°28'40''	002°25'20''	223	75		165			P.V.C.lisse	Non réalisé		Sec non équipé
8	Ecole	12°28'22.7''	002°25'22.5''	214	65.42	1.94	126				Non disponible		En panne
9	Savanah Lodge	12°13'41.8''	002°23'16.8''	215							Non disponible		En panne
10	Tchiba	12°23'15.37''	002°68'19.69''			31.5					Non disponible		En panne
11	Tapoa -Hôtel	12°28'41.52''	002°26'17.63''	193							Non disponible		Bon
12	Yériyangou	12°17'41.18''	002°23'12.83''	246	78.54	49.3	126				Non disponible		En panne

3.2. Résultats des travaux de bathymétrie

Un exemple de volume en fonction de la hauteur est donné au tableau 11 pour la mare de Gnafarou. Ces données sont illustrées à la figure 20 qui montre une augmentation du volume d'eau cumulé en fonction de l'altitude. Les tableaux 12 et 13 montrent les données pour les sections des cours d'eau.

Les résultats des différents calculs sont consignés dans les tableaux suivant (Tableau 14).

Tableau 11:Volume cumulé de la mare de Gnafarou

Courbe de niveau	Hauteur (m)	Surface (m^2)	Surface moy (m^2)	Volume partiel (m^3)	Volume cumulé (m^3)	Observations
204,00	-	-	-	-	-	
204,25	0,25	50,87	25,44	6,36	6,36	
204,50	0,25	457,00	253,94	63,48	69,84	
204,75	0,25	1 270,90	863,95	215,99	285,83	
205,00	0,25	2 492,60	1 881,75	470,44	756,27	
205,25	0,25	4 592,47	3 542,54	885,63	1 641,90	
205,50	**0,25**	**8 911,98**	**6 752,23**	**1 688,06**	**3 329,96**	Plan d'eau
205,75	0,25	10 507,37	9 709,68	2 427,42	5 757,38	
206,00	0,25	12 270,58	11 388,98	2 847,24	8 604,62	
206,25	0,25	14 208,34	13 239,46	3 309,87	11 914,49	
206,50	0,25	16 320,66	15 264,50	3 816,13	15 730,61	
206,75	0,25	18 821,36	17 571,01	4 392,75	20 123,36	
207,00	**0,25**	**20 985,48**	**19 903,42**	**4 975,86**	**25 099,22**	Hautes eaux

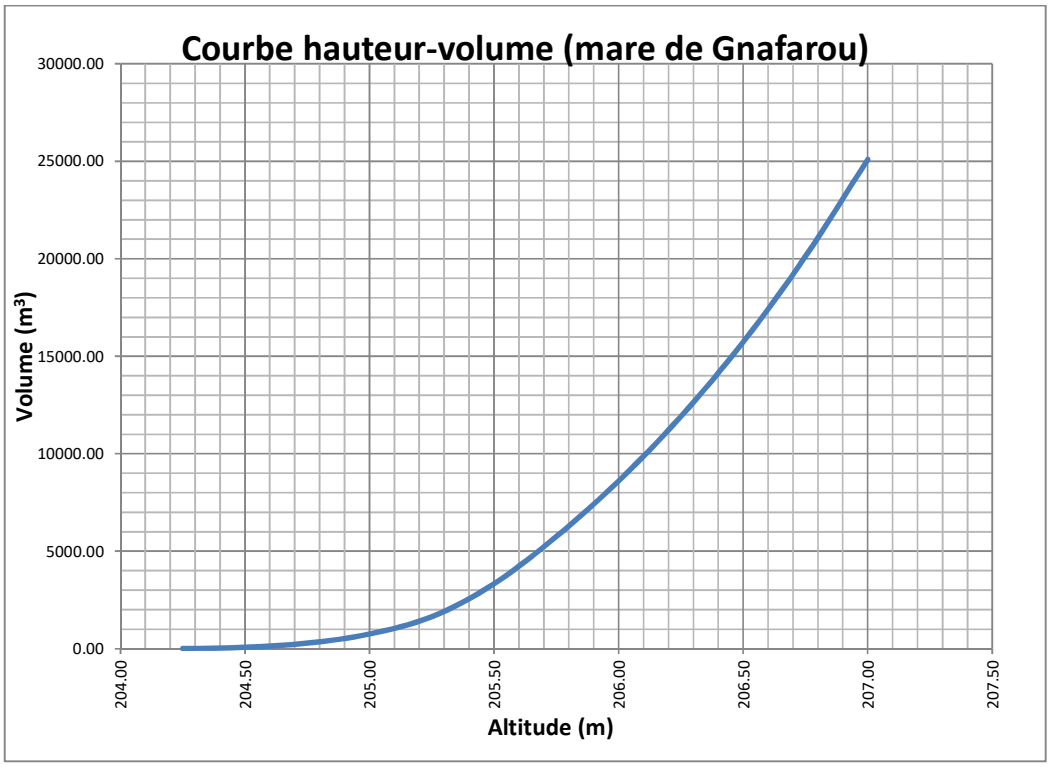


Figure 20:Mare de Gnafarou

Tableau 12:Sections pour la rivière Mékrou

Section	Largeur en gueule (m)	Largeur au plafond (m)	Profondeur moyenne (m)
1	53,47	29,21	3,68
2	42,18	30,16	4,95
3	43,30	26,35	5,48

Tableau 13:Sections pour la rivière Tapoa

Section	Largeur en gueule (m)	Largeur au plafond (m)	Profondeur moyenne (m)
1	50,17	29,91	1,28
2	63,66	29,09	2,08
3	69,60	27,36	2,11
4	56,00	27,48	1,27

Tableau 14:Récapitulatif des capacités de stockage d'eau des mares

Caractéristiques physiques des mares				
Mares	**Courbe de niveau (m)**	**Surface (m^2)**	**Volume cumulé (m^3)**	**Observations**
	237	4597.95	7411.31	Plan d'eau actuel
Moussa Kouara	238.5	16790.32	20510.71	Hautes eaux
	228.25	1579.44	386.81	Plan d'eau actuel
Batinga	229.75	6455.59	5688.19	Hautes eaux
	186	1846.21	758.62	Plan d'eau actuel
Dadinga	186.5	4104.8	2235.76	Hautes eaux
	246.75	1847.73	1483.38	Plan d'eau actuel
Moussiemou	248	3839.38	4895.47	Hautes eaux
	205.5	8911.98	3329.96	Plan d'eau actuel
Gnafarou	207	20985.48	25099.22	Hautes eaux

Les mares ayant fait l'objet d'intervention pendant la saison d'été 2018 sont les principales mares permanentes du Parc W du Niger. Ces ouvrages cumulent moins du tiers de leur capacité totale d'accumulation d'eau pendant l'étiage (mai-juin) par rapport à la saison des hautes eaux. La plupart de ces mares ont été aménagées récemment, ce qui a permis d'augmenter leur capacité de rétention. Pendant la période de réalisation des travaux, plusieurs des mares semi-permanentes et

temporaires étaient sèches. Le besoin en eau se fait beaucoup ressentir avec la présence des animaux très accrues autours des points d'eau à ce moment précis.

3.3. Conditions hydrogéologiques du parc du w

3.3.1. Approvisionnement en eau de la faune

L'approvisionnement en eau des espèces fauniques repose essentiellement sur les mares. Le recours aux eaux souterraines à travers les forages d'eau est un appoint afin de supporter la faune sauvage pendant la saison sèche. On dénombre douze (12) forages sur l'ensemble du Parc du W du Niger, (Rabeil, 2003). Ces ouvrages fonctionnent avec des pompes électriques alimentées par des sources d'énergies photovoltaïques. L'eau est drainée à travers des canalisations pour alimenter les mares.

Le Parc du W renferme une trentaine de mares permanentes, semi permanentes ou temporaires. Aujourd'hui ce nombre est réduit à une dizaine de mares dont quelques-unes seulement retiennent encore de l'eau pendant la saison d'étiage. Ce constat n'est pas du tout reluisant même au niveau de la rivière Mékrou (mission de terrain, 2018).

Photo 9: Rivière Mékrou en période d'étiage (Mission de mai, 2018) en A) et Installation solaire au niveau du forage de Bata (Maman ,2003) en B)

Le suivi des mares est effectué par le service aménagement du Parc malgré les contraintes financières pour faire face à cette gestion. Par contre, les cours d'eau principaux sont périodiquement suivis par la direction de l'hydrologie du ministère de l'hydraulique.

3.3.2. Hydrostratigraphie

Deux unités hydrostratigraphiques sont identifiées dans la zone du Parc W du Niger :

- La couche superficielle constituant l'aquitard est généralement formée des sédiments latéritiques dans les 3 premiers mètres, des sables argileux, des grès fins argileux, des graviers moyens argileux et des argiles jaune à rose. L'épaisseur des régolites est variable entre 10 et 30 m selon la topographie (figures des coupes des forages dans l'annexe électronique). Cette unité qui surmonte l'aquifère du roc fracturé renferme des nappes libres avec une faible capacité d'emmagasinement et est vulnérable à la pollution (Ousmane, 2011 ; Abdou, 2012).
- L'aquifère du roc fracturé est hydrauliquement plus conducteur et présente une lithologie plus ou moins homogène constituée des grès du Voltaien et des schistes fracturés. L'épaisseur du roc fracturée dans le Parc W se situe entre 30 et 60 m selon les venues d'eau observées lors des forages. La productivité de l'aquifère est liée à la perméabilité de fractures qui est fonction de l'ouverture et de la densité des fractures. Les schistes présentent une faible perméabilité de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m/s par comparaison aux granites (tableau 16 présenté à la section 4.4). L'aquifère de fracture renferme des nappes semi-captives, localement libres à certains endroits. L'épaisseur de son toit est variable d'un puits à l'autre (voir coupes des forages d'eau dans l'annexe électronique).

3.3.3. Piézométrie

Les données de mesure de niveau d'eau de référence sont celles du BRGM et qui datent de 1990, date de réalisation de certains forages d'eau du Parc sous la tutelle du Ministère de l'hydraulique et de l'environnent. Les suivis piézométriques ne sont pas effectués régulièrement car la plupart des forages sont en panne en raison de l'accessibilité difficile des ouvrages. L'archivage des données est une véritable préoccupation du fait des différentes réformes administratives qu'a connu le Ministère

de tutelle actuel du Parc. A l'époque, le projet GTZ sous la tutelle du Ministère des mines avait réalisé les premiers ouvrages du Parc dont les fiches techniques demeurent introuvables de même que certains ouvrages qui ont été réalisés dans le cadre du projet ECOPAS.

Généralement les ouvrages dans la région du W et ses environs sont peu profonds, moins de 100 m (BRGM, 1990 ; Direction régionale de Tillabéri, 2004). La profondeur des forages du Parc W varie entre 50 et 91 m (BRGM, 1990).

Le niveau statique des ouvrages localisés à la périphérie du Parc W se situe entre 1.40 et 45.5 m alors que les données des forages montrent des niveaux statiques se situant entre 1.1 et 49.24 m (BRGM, 1990).
Cependant, on note une variation saisonnière de niveau d'eau plus élevée au niveau des forages qui sont un peu éloignés des cours d'eau (Babayé, 2012). Dans les cas de cette étude la fluctuation est de l'ordre de 3.67 m en comparaison avec les niveaux mesurés par le BRGM en 1990 pour les forages supposés distants des cours d'eau principaux par rapport aux forages qui longent la rivière Tapoa dont l'amplitude se situe autour de 1.91 m (forage de l'école et Tapoa Barrage).

3.3.4. Propriétés hydrauliques

Les propriétés hydrauliques d'un aquifères sont généralement estimées à partir des essais hydrauliques. Il s'agit de la perméabilité ou conductivité hydraulique K (m/s), de la transmissivité T (T= K*b en m^2/s où K est la conductivité hydraulique et b l'épaisseur de la nappe) et le coefficient d'emmagasinement bien que cette propriété est souvent négligée car sa valeur est plus ou moins précise en fonction du type d'essai réalisé (Carrier et al., 2013). Les propriétés hydrauliques sont caractéristiques du type d'aquifère et de la nature de la roche.
Les roches du socle communément appelées roches cristallines d'origine plutonique et métamorphique peuvent être affectées par une altération au niveau des fracture donnant lieu à une perméabilité dite de fracture. Ces formations rocheuses sont caractérisées par une très faible perméabilité généralement inférieure à 10^{-8} m/s et une faible porosité. En régions semi-arides, les altérites jouent une fonction capacitive et présentent un réservoir généralement argileux avec une perméabilité d'environ 10^{-6} m/s dans les granites .Il est aussi à noter que dans les endroits où les altérites ont fortement subit le phénomène d'érosion, l'horizon fissuré peut remplir cette fonction capacitive lors que le sol se trouve partiellement ou totalement dénudé (Lassachagne

et al., 2015). La porosité est relativement élevée pour ce type d'aquifère (altérites), 5 à 30%, tout au sein des granites grossiers. Cependant l'aquifère fracturé est caractérisé par une perméabilité qui décrois en profondeur.

L'horizon fissuré assure la fonction transmissive de l'aquifère composite et est capté généralement par les forages en région de socle (Dewandel et al., 2006 ; Lassachagne et al., 2015).

Le socle sain pourrait être perméable localement en présence de fractures profondes comme en témoigne le modèle hydrogéologique conceptuel de Marechal et al. (2003); mais cette propriété est souvent négligée et le socle est considéré comme imperméable à l'échelle d'un bassin (Lassachagne et al., 2015 ; Abdou, 2012).

Par ailleurs, des études hydrogéologiques réalisées en Côte d'Ivoire ont démontré que la productivité des aquifères du socle est influencée par l'orientation et la densité des fracture et d'autres paramètres géologiques tels que l'épaisseur d'altération, la profondeur des forages, la nature pétrographique des formations aquifères (Gnamba et al., 2014). Le tableau 15 fait la compilation de propriétés typiques des aquifères dans le Parc du W.

Tableau 15: Quelques propriétés hydrauliques dans des puits et forages à proximité du Parc du W (Bernert 1981[1], BRGM 1987[2], MCD 1992[3], Girard 1993[4], Obuobie 2008[5]).

Propriété hydraulique	Grès	Schistes	Granites	Altérites
Profondeur moyenne de l'aquifère (m)	20 [3]	20 - 50 [1; 3]	20 - 40 [3]	1 [3] - 30 [1]
Débit moyen au puits (m^3/h)	5.2 [5]	4.2 [2]	2.8 [2]	3.7[2]
Débit spécifique moyen ($m^3/h/m$)	10.25 [5]	1.05 [2]	0.53 [2]	1.22[2]
Transmissivité (m^2/s)	1.10^{-4} [3]	1.10^{-4} [3]	2.10^{-5} [3]	
Coefficient d'emmagasinement			10^{-2} - 10^{-5} [4]	

3.3.5. Estimation de la recharge pour le Parc W

Les estimations de recharge réalisées dans le cadre de cette étude font référence aux données climatiques des stations plus ou moins proches du Parc, la station de Gaya et celle de Fada N'Gourma.

Les feuilles de calculs de la technique du bilan d'humidité du sol (Soil Moisture Balance, SMB) utilisées dans le cadre du projet du Ghana ont été adaptées à notre contexte d'étude par Delestre (2017) (voir annexe électronique du mémoire).

Les chroniques de cinq stations météorologiques ont été exploitées. Les chroniques climatiques journalières ayant servi au calcul de la recharge minimale pour les paramètres précipitations et températures présentant des trous ont été complétées pour chaque station à partir des données des autres stations selon la méthode d'estimation des moindres déviations. Les détails de l'estimation des paramètres requis pour l'application de cette méthode se trouvent dans l'annexe électronique.

Plusieurs scénarios ont été considérés pour aboutir à des valeurs plus ou moins acceptables en tenant compte des incertitudes des paramètres. Deux cas de figures utilisant les moyennes climatiques mensuelles (calculée à partir des chroniques journalières) se présentent : le premier tient compte des paramètres et variables les moins favorables à la recharge (fig. 21) et le deuxième, les plus favorables (fig. 22).

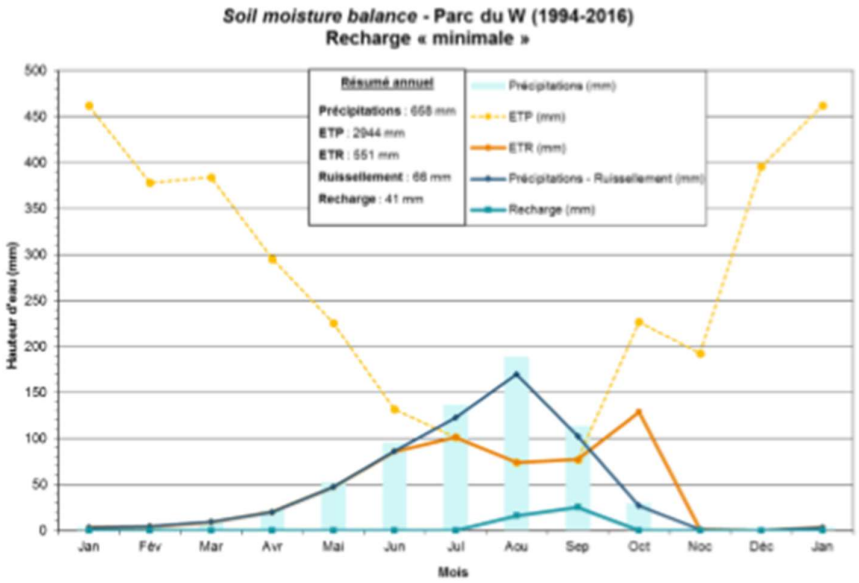


Figure 21: Bilan mensuel avec les paramètres les moins favorables à la recharge (Delestre, 2017)

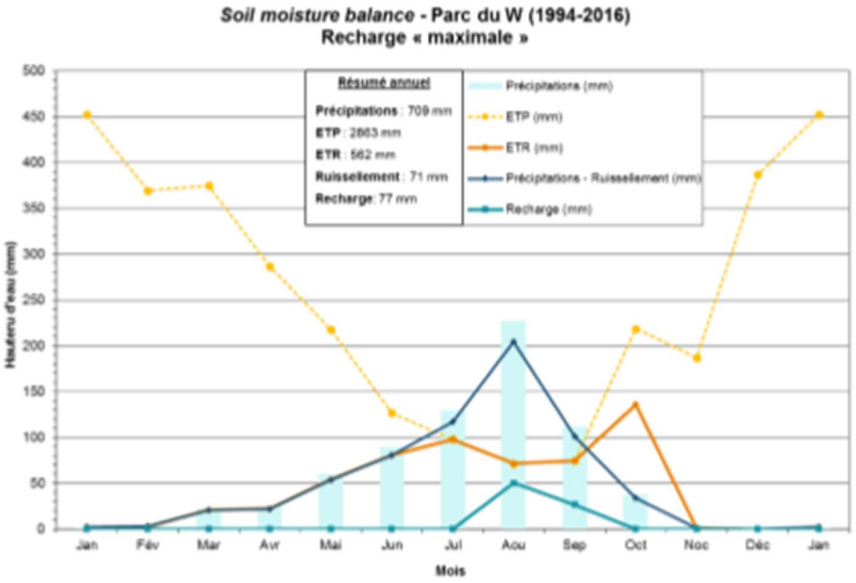


Figure 22: Bilan mensuel avec les paramètres les plus favorables à la recharge (Delestre, 2017)

Dans le 1er cas, la recharge minimale (26,5 mm/an) débute en septembre, puis s'arrête à partir du mois d'octobre. L'ETR dépasse alors les précipitations et le sol est asséché. Pour le 2e cas, la recharge maximale a lieu au mois d'août (50,2 mm) où les précipitations dépassent largement l'ETR. Entre juin et septembre, l'ETR équivaut à l'ETP. Le sol se réhumecte au mois de juillet.

Quatre autres scénarios de recharge ont été calculés par la méthode SMB en utilisant les données climatiques journalières et les conditions de recharge moyennement favorables, dont deux pour les années plus sèches et deux pour les plus humides (Delestre, 2017). Ces calculs ont été faits pour mieux capturer les processus de recharge à une échelle temporelle plus fine. Seules les données après 1994 et qui correspondent à la tendance actuelle du climat ont été utilisées. Sur deux années sèches considérées (2011-2014) représentées aux figures 23 et 24, la recharge totale est de l'ordre de 71 mm en août, alors qu'elle est nulle en 2014. Pour les deux années humides considérées (2012 -2015, fig. 25 et 26), les recharges ont lieu entre août et septembre. La recharge est de 76,0 mm en 2012 et 226 mm en 2015 (années plus humides). Des travaux additionnels sont requis pour mieux estimer la recharge dans la région d'étude.

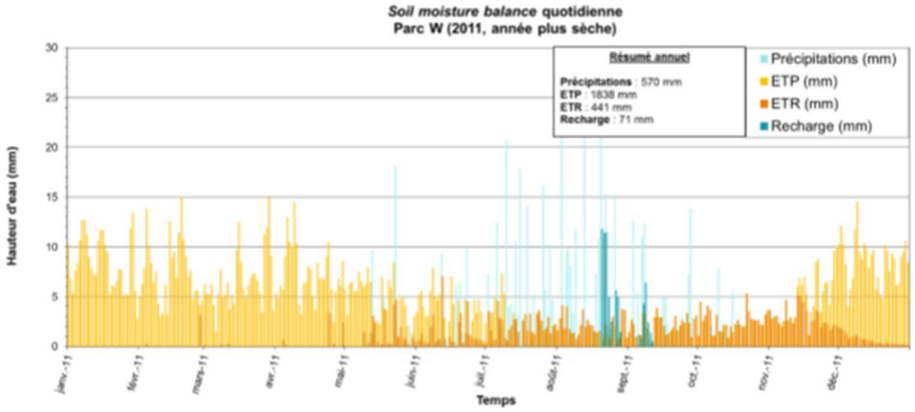


Figure 23: Bilan d'humidité du sol pour l'année 2011 (Delestre ,2017)

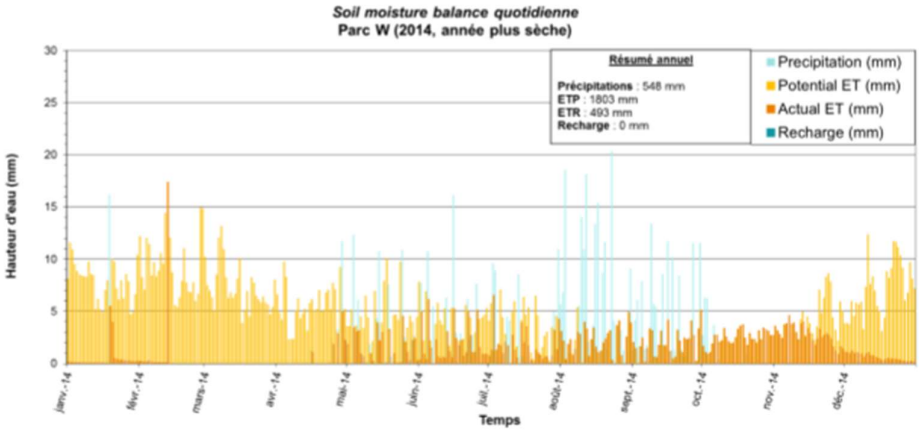


Figure 24:Bilan d'humidité du sol pour l'année 2014 (Delestre ,2017)

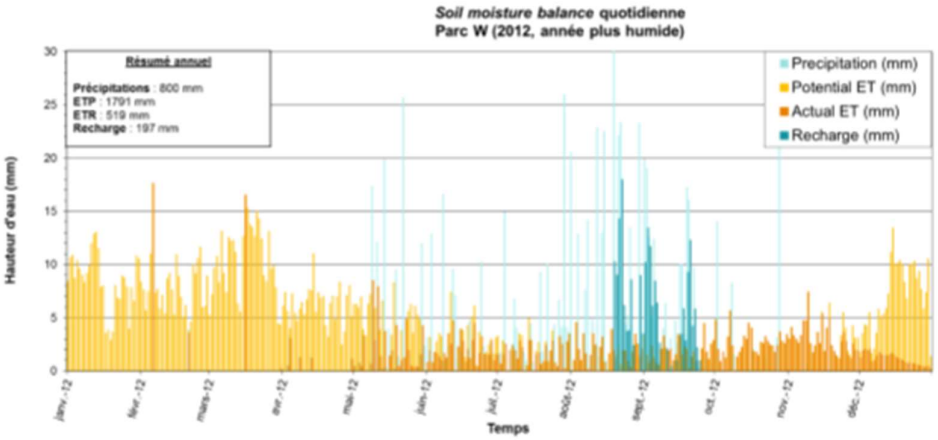


Figure 25: Bilan d'humidité du sol pour l'année 2012 (Delestre, 2017)

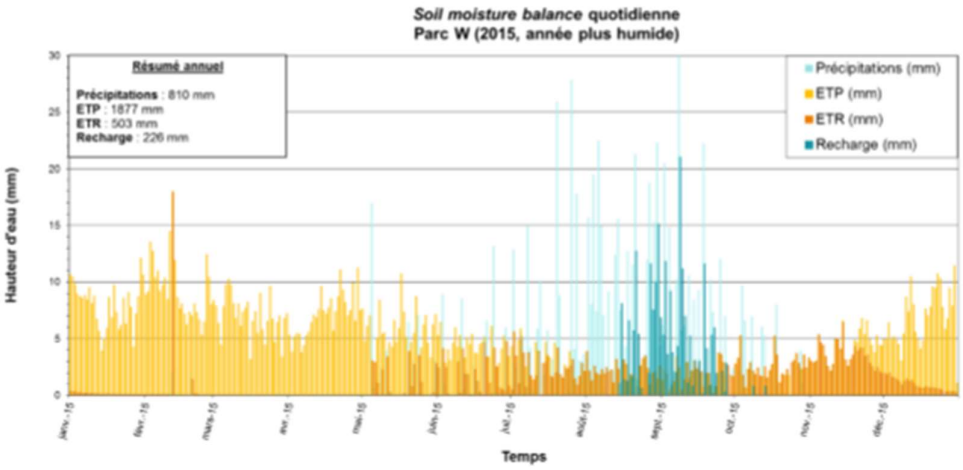


Figure 26: Bilan d'humidité du sol pour l'année 2015 (Delestre ,2017)

Les travaux sur le bilan hydrologique montrent que la recharge n'est vraiment possible que pendant la saison des pluies entre août et septembre. Les calculs effectués montrent que la recharge se concentre sur un nombre limité de jours allant de 1 à 21 jours (Delestre, 2017).

Le Parc du W du Niger est doté d'une station climatique à la Tapoa, dont seules les données de pluies sont disponibles sur des courtes périodes et avec des relevés discontinus (Direction de la météorologie, 2017). L'absence d'une station synoptique avec des relevés complets à l'intérieur du Parc W engendre un impact important sur la précision des résultats obtenus. Certes, les valeurs de recharges trouvées pour le Parc sont en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature (fraction de précipitations, 0,062P à 0,279P selon Girard, 1998 en zone semi-aride), mais elles constituent une gamme assez large, reflet de différentes situations testées. Le projet hydrogéologique au Ghana (Carrier et al., 2011a) proposait des recharges calculées par la méthode de bilan de chlorure (chloride mass balance), donnant des valeurs entre 11,7 mm/an (+/- 3,6 mm/an) et 76,6 mm/an (+/- 48,4 mm/an) avec une moyenne et une médiane autour de 40 – 45 mm/an. Les résultats trouvés pour le Parc semblent donc assez cohérents avec les valeurs proposées dans cette région dont les conditions climatiques sont similaires au Parc W. Néanmoins la même méthode ne peut pas être expérimentée pour le cas du Parc car les données bibliographiques des analyses chimiques des eaux de la zone présentent des teneurs très faibles en chlorure.

3.3.6. Géochimie et isotopes de l'eau

La géochimie des eaux souterraines étudie la composition chimique et isotopique de l'eau, la répartition des composés chimiques et les processus géochimiques responsables de la composition de l'eau, depuis l'atmosphère jusqu'à dans l'aquifère. Lors de la circulation de l'eau vers ou dans l'aquifère, l'interaction eau-roche conduit à un enrichissement en composés chimiques suite à différentes réactions de dissolution, d'hydrolyse et d'oxydo-réduction ; ce qui détermine sa composition chimique (Cloutier, 2004).

À l'est du Parc du W, les eaux de la nappe du Continental Terminal (CT3) sont caractérisées par une faible minéralisation avec un faciès chimique qui varie entre un pôle bicarbonaté calcique à un pôle nitraté calcique à sodique. Les teneurs des isotopes stables de l'eau sont représentatives de celles des pluies actuelles. Cependant, les eaux des aquifères profonds sont fortement minéralisées avec un faciès sulfaté et bicarbonaté calco-sodique à sodique.

Les fiches techniques des forages du Parc du W mettent en évidence des nappes semi-captives, avec un faciès lithologique majoritairement granitique et gréseux avec une alternance d'argile sableuse et de quartz. Les transmissivités sont de l'ordre de $2{,}1 \times 10^{-3}$ à $5{,}0 \times 10^{-4}$ m^2/s. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de $2{,}3 \times 10^{-4}$ à $2{,}4 \times 10^{-8}$.

Les études menées par Monfort (1997) en continuité avec le projet Hapex Sahel (*Hydrology and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel*) dans la partie sud-ouest du Niger montrent une distinction des eaux de la nappe superficielle à celle des aquifères profonds

Les teneurs des isotopes stables obtenues, appauvries en isotopes lourds engendrent une recharge sous conditions climatiques différentes, probablement plus humides qu'à l'état actuel (Fritz et Fontes, 1980, cités par Monfort, 1997).

3.3.6.1. Caractérisation hydrogéochimique du Parc du W

Au total huit (8) échantillons d'eau ont fait l'objet d'analyses chimiques et isotopiques. Il s'agit des échantillons d'eau souterraine (5 puits), des eaux de surface (2 échantillons de mares) et des eaux de pluies provenant du pluviomètre installé à l'intérieur du Parc W (1 échantillon). En considérant le nombre total des puits dans la

zone d'étude (12 forages), les échantillons sont tous collectés en une seule campagne d'échantillonnage (octobre, 2018). Quelques-uns des forages n'ont pas été échantillonnés du fait de l'inaccessibilité des pistes juste après la saison des pluies (sols humides et végétation).

La situation géographique des points d'eau montre leur inégale répartition dans l'espace du Parc W. La majorité des ouvrages forages et mares sont concentrés au nord dans le confluent de la Tapoa (cartes 2). Cette localisation est à la limite du système aquifère du Parc du W où se fait l'émergence de l'eau souterraine.

La conductivité électrique est mesurée in situ puis repris au laboratoire. Les mesures antérieures effectuées à la réalisation de certains puits du Parc W montrent une gamme de valeurs de conductivités électriques comprises entre 255 et 2520 μS/cm (BRGM, 1990). Les mesures sur les échantillons prélevés en 2018 donnent des conductivités électriques se situant entre 15 et 2420 μS/cm. La valeur de 15 μS/cm est attribuée à l'échantillon d'eau de pluies. Ce résultat montre bien que le forage de Moussièmou a conservé sa conductivité électrique très élevée entre 1990 et 2018. Tous les points d'eau restent dans la gamme des normes de conductivité de l'OMS (2000 μS/cm) en dehors du forage de Moussièmou où on note un dépassement significatif. Cependant, il existe une corrélation étroite entre la conductivité électrique, la température et éventuellement la nature de l'aquifère. Des études ont montré que la conductivité est élevée lors que la température s'accroit puisque le gradient géothermique augmente avec la profondeur (Tardat-Henry, 1984). D'autres approches indiquent que les fortes valeurs de conductivités caractérisent les aquifères profonds (Monfort, 1997).

Les valeurs de la température de l'eau à l'image des autres paramètres ont été déterminées sur le terrain. Les températures mesurées varient entre 25 et 32°C. Des études ont montré qu'il existe une corrélation entre la température de l'eau et la profondeur des forages. Les forages profonds présentent généralement des températures élevées parce que le gradient géothermique varie en fonction de la profondeur (Ousmane, 2011).

Tableau 16:Paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain

Identification	Caractéristiques physiques des points d'eau du Parc W du Niger				
	Conductivité (µS/cm)	pH	Température (°C)	Niveau statique (m)	Profondeur (m)
Forage Tapoa- Moussièmou	2500	6.4	32.5	20.17	90.33
Forage Tapoa- Bata	362	6.6	31.5	12.45	49.52
Forage Tapoa- Ecole	285	6.8	30.2	1.94	65.42
Forage Tapoa-Yériyangou	1730	6.4	31.5	49.3	78.54
Forage Tapoa-Barrage	570	6.8	30.2	3.01	66.05
Mare de Moussièmou	696	8.6	30.2		
Rivière Tapoa	874	7.1	28.3		2.11

Les analyses chimiques antérieures présentent des traces de nitrites dans les eaux souterraines. Cependant, bien que ces teneurs soient faibles, elles ne sont pas sans conséquence et une étude complémentaire est menée afin de déterminer l'origine des nitrites.

Les analyses complètes des points d'eau (forages) ainsi que les coupes lithologiques des forages ont apporté plus de précision sur les aquifères captés.

Une gamme assez large des métaux a fait l'objet d'analyses (tableau 20). Les cations majeurs sont essentiellement les ions calcium, magnésium, sodium et potassium. Dans la gamme des métaux analysés des fortes teneurs de calcium et de magnésium sont observées ainsi que des quantités élevées de manganèse et de soufre dans certains échantillons comparativement aux normes admissibles (tableau 17). Des traces des autres métaux se retrouvent également dans les échantillons analysés (Fe, Cu, B, etc). Par ailleurs la détermination de la dureté totale de l'eau et les sels totaux dissous (TDS) est un indicateur de potabilité.

La dissolution du calcium et du magnésium résulte généralement de l'infiltration des eaux de surface dans l'aquifère à travers les formations rocheuses calcaires et dolomitiques (Tardat-Henry, 1984). Cette réaction s'accentue en présence du CO_2 provenant de l'atmosphère et des couches superficielles du sol.

Les anions majeurs à considérer dans ce cas d'étude se limitent aux ions bicarbonates, sulfates, nitrates et chlorures. On note également la présence des nitrites et fluorures en faibles proportions et de quantités négligeables de bromures. Pour ce type d'analyse, les échantillons n'ont pas été dilués.

Tableau 12: Valeurs limites des paramètres chimiques pour l'eau potable (OMS, 2004)

Nom et nature des échantillons	Date d'analyse	Cond.	Oxygène dissous	pH	TDS	Turbi.	F^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	$NH4^+$	Fe^{2+}	NO_2^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	Mn	Ars
Unités		µS/cm	mg/l	~	mg/l	NTU	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Normes		2000	≥5	6,5 - 8,5	1000	<5	<1,5	100	50	200	0,5	<0,3	0,2	250	250	50	0,1	0,01

3.3.6.2. Géochimie isotopique

– Isotopes stables, mécanisme de recharge et origine de l'eau

La figure 28 montre la droite météorique locale (DML) définie à partir des points d'échantillonnage prélevés dans le Parc du W. Il y a toutefois peu de points pour définir cette droite et ces points comprennent à la fois de l'eau souterraine, de l'eau de surface et des précipitations. Normalement, la DML est établie à partir d'un échantillonnage des précipitations sur plusieurs saisons. La figure 31 montre aussi la comparaison entre la DML et la DMM. On constate que la DML est légèrement sous la DMM et pratiquement parallèle à la DMM.

L'eau de surface (rivière et mare) n'est pas affectée par l'évaporation, elle correspond donc essentiellement à l'eau des précipitations apportée par ruissellement. Ceci est possible parce que les échantillons ont été pris justes après la saison des pluies, ce qui n'a pas laissé le temps à l'évaporation de se produire de façon importante. Enfin, les échantillons d'eau souterraine tombent aussi sur la GMWL, ce qui indique que la recharge s'est produite sans évaporation significative de l'eau de recharge. On peut donc en déduire que l'infiltration est plutôt directe et diffuse et que la recharge ne s'est pas faite à partir de l'accumulation d'eau dans les dépressions, contrairement à ce qui avait été constaté dans le cadre du projet HAPEX (Leduc et al., 1997). Il faut noter que les échantillons ont été prélevés pendant la saison des pluies, ce qui explique l'absence d'évaporation.

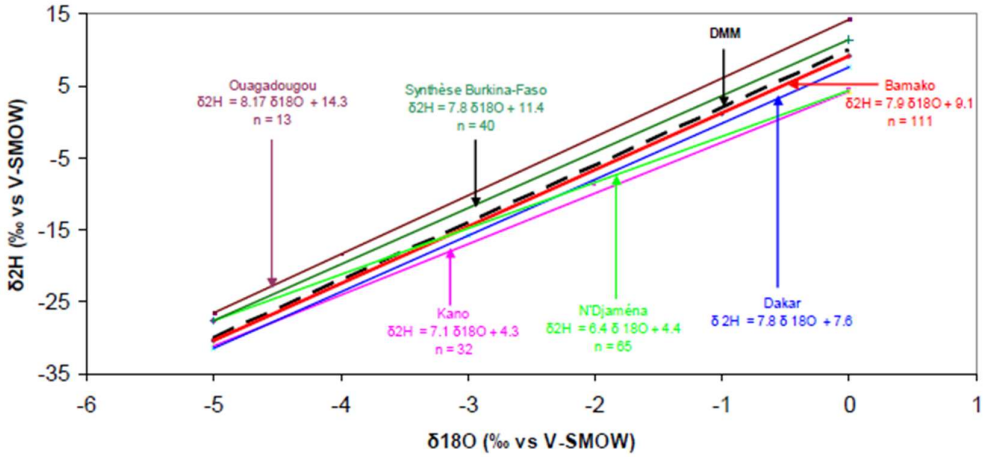


Figure 27 : Relation 18 O et 2H dans les précipitations en zone sahélienne de l'Afrique de l'ouest (Bamako, Dakar, Kano, N'Djamena, Ouagadougou), (Abdou, 2012)

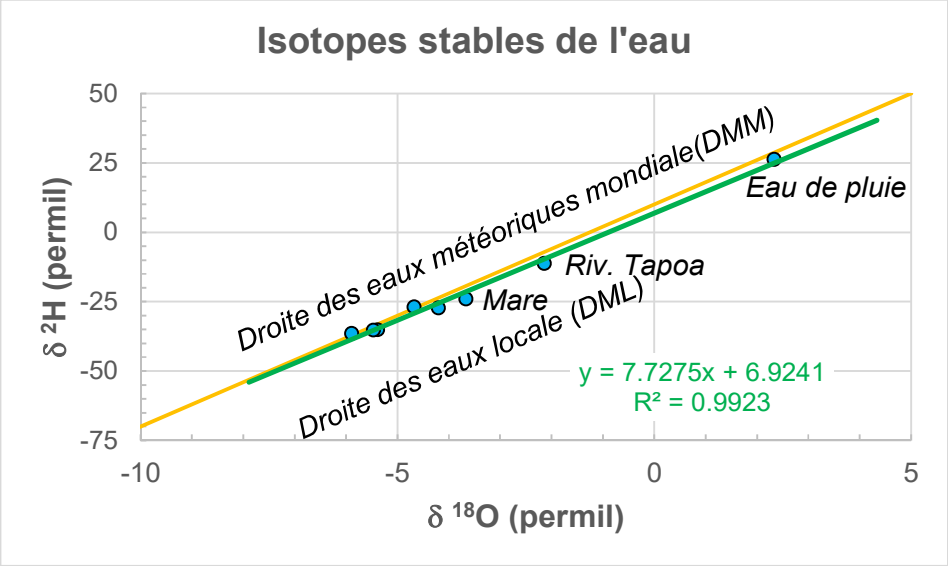


Figure 28: Répartition des isotopes stables dans l'eau échantillonnée en 2018 dans le Parc W du Niger

3.3.6.3. Datation des eaux au carbone-14

La figure 29 illustre les valeurs obtenues pour le pourcentage de carbone moderne (pmC) du ^{14}C pour les échantillons du Parc du W en fonction des valeurs de $\delta^{13}C$. Le ^{14}C est essentiellement "moderne" pour la rivière Tapoa et la mare de Moussièmou. Le ^{14}C est à moins de 20% pmC pour 4 des 5 forages du Parc du W. Le faible pmC des 4 puits correspond à des âges ^{14}C non corrigés de l'ordre de 15 000 à 20 000 ans. Le $\delta^{13}C$ de l'eau de surface et de recharge est de l'ordre de -15 permil (échantillons d'eau de surface et du forage de Bata) supérieur à la valeur "normale" du $\delta^{13}C$ qui est de -25 permil (fig. 29). La valeur du $\delta^{13}C$ des forages avec un faible pmC est faiblement inférieure à celle de l'eau de recharge. Il y a donc eu peu de dissolution des carbonates affectant ces échantillons. Les âges ^{14}C non corrigés peuvent donc être utilisés pour donner une bonne indication du temps de résidence de l'eau souterraine.

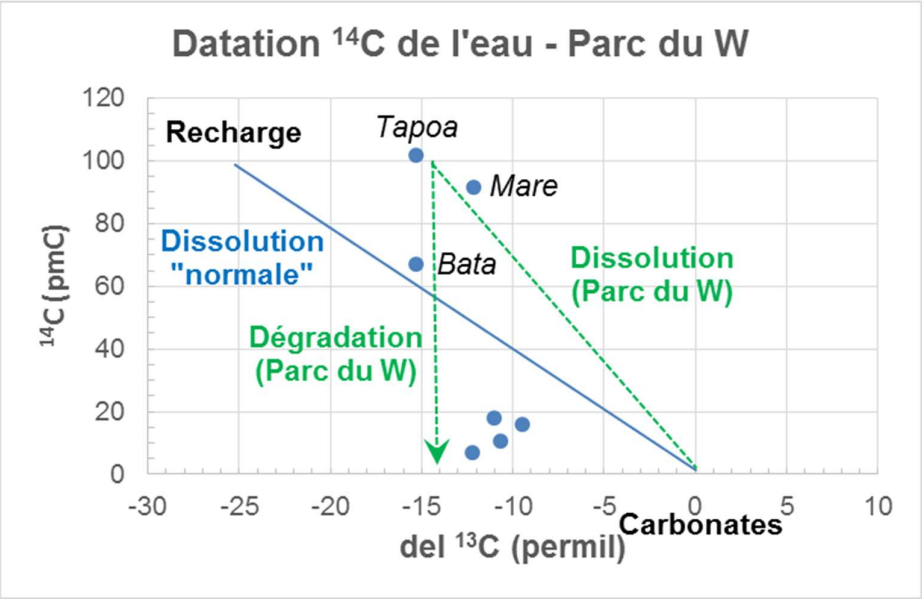


Figure 29: Valeurs de ^{14}C des eaux par rapport à $\delta^{13}C$

La figure 30 montre les concentrations en ^{14}C par rapport à celles en tritium. Les eaux contenant du tritium ont une composante d'eau jeune (moins de 50 ans). L'eau de surface (rivière Tapoa et mare) contient de fortes concentrations en tritium et est donc « moderne », comme on pourrait s'y attendre. Le forage Bata a du tritium et donc une

partie d'eau moderne, même s'il contient aussi de l'eau ancienne (pmc de 67 % pour un âge ^{14}C de 3227 ans). Ce forage contient alors un mélange d'eau jeune et d'eau ancienne. Les autres forages à faibles pmC du ^{14}C ne contiennent pas de tritium, et présentent des âges se situant entre 15 000 et 20 000 ans.

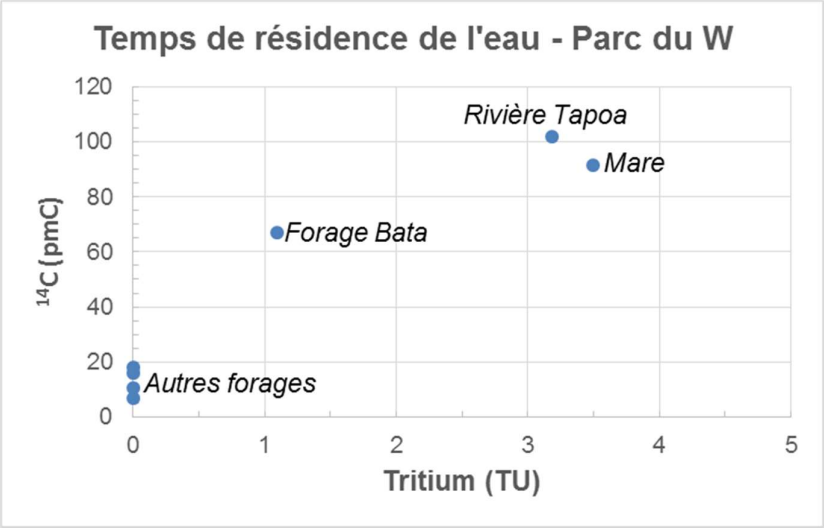


Figure 30: Relation entre les teneurs en tritium et le pourcentage en carbone moderne

3.3.6.4. Types d'eau

Les types d'eau ou faciès hydrochimiques servent d'indicateurs pour déterminer l'origine des eaux.

Le diagramme de Piper, (fig.31) est retenu pour ce cas d'étude pour mieux illustrer la relation entre les eaux de surfaces, les eaux de pluies et les eaux souterraines.

La composition géochimique est très variable dans les eaux souterraines du Parc W du Niger. Le triangle des cations montre des ions regroupés évoluant vers le pôle du calcium malgré le nombre limité des échantillons; alors que le triangle des anions présente une tendance évolutive concentrée vers le pole bicarbonaté. La projection dans le losange met en évidence trois types d'eau dans le Parc W. On distingue des eaux bicarbonatées calciques, des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, des eaux chlorurées, sulfatées calcique et magnésienne. Le type bicarbonaté calcique défini la majorité des échantillons. Ce faciès chimique est caractéristique aux nappes du socle nigérien en général (Ousmane, 2011). Le tableau 18 présente une synthèse des analyses géochimiques.

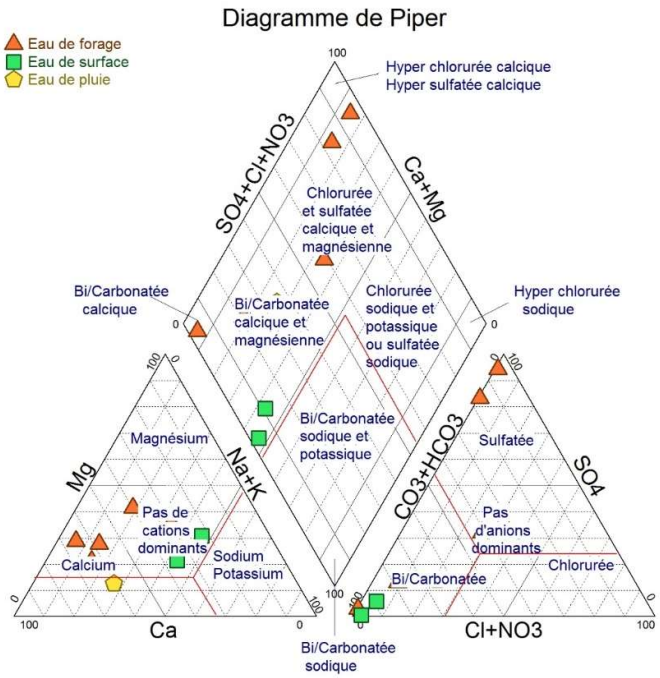


Figure 31:Représentation graphique des types d'eau sur le diagramme de Piper

Tableau 13: Synthèse des analyses géochimiques

Catégories	Paramètres	FO Moussièmou	FO.Bata	FO.Ecole	FO. Yériyangou	FO Tapoa-Barrage	Mare de Moussièmou	Rivière Tapoa	Eau de pluie
Paramètres physico-chimiques	PH	6.40	6.40	6.80	6.40	6.80	8.60	7.10	6.84
Ions majeurs (mg/L)	C (µS/Cm)	2420	307	278	1273	411	19	60	15
	TDS (mg/L)	2680.51	203.98	193.77	1177.89	297.19	34.95	63.84	10.82
	T°C	32.5	31.5	30.2	31.5	30.2	30.2	28.3	25
	Ca	394	41.9	14.9	167	33.7	1.13	4.64	1.09
	Mg	79.2	11.3	10.6	48.6	21.3	0.932	1.69	0.136
	Na	95.2	3.68	18.2	39.9	15.6	1.18	3.84	0.25
	K	18.9	1.45	2.14	13.3	4.4	2.56	4.54	0.51
	Cl	8.37	0.42	23.68	2.19	10.79	0.21	0.91	0.41
	SO4	1485	2.98	38.4	571	22.6	0.07	1.58	0.92
	HCO3	93.99	133.02	62.95	141.77	174.15	14.86	30.59	5.41
	NO3	3.65	0.02	0.03	0.25	0.05	0.068	0.19	1.07
Ions mineurs (mg/L)		S, Fe,Ba,Ni,F,NO2	S,B,Si,F,NO2	Mn,B,F,NO2	Fe,Mn,F,NO2	Fe,Mn,Co,F,NO2	Al,Fe,Mn, Cu,F,NO2	Al,Ba,Fe,NO2,F	Mn,Ba,Zn,NO2
Indicateurs géochimiques	δ18O (SMOW)	-4.20	-4.67	-5.39	-5.89	-5.47	-3.67	-2.14	2.33
	δ2 H (SMOW)	-27.21	-26.86	-35.03	-36.44	-35.15	-23.96	-11.12	-26.33
	3 H (T.U)	<0.8	1.1	<0.8	<0.8	<0.8	3.5	3.2	
	C13 (PDB)	-11.05	-15.29	-9.48	-10.67	-12.24	-12.12	-15.29	
	C14 (PmC)	18.16	66.92	15.84	10.484	6.761	91.75	101.83	
Caractérisation chimique		**Eau sulfatée calcique**	**Eau bicabonatée calcique**	**Eau bicabonatée sodique**	**Eau bicarbonatée calcique**	**Eau bicarbonatée calcique**	**Eau bicarbonatée potassique**	**Eau bicarbonatée calcique**	**Eau bicabonaté calcique**

3.3.6.5. Processus de minéralisation et qualité des eaux

Lorsque l'eau des pluies s'infiltre dans le sol ou le sous-sol, elle subit plusieurs processus qui modifient sa composition chimique en fonction de la nature des roches traversées, du temps de contact de l'eau avec les minéraux et du temps de renouvellement dans la nappe. Il peut ainsi y avoir un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle de la roche dans l'aquifère. De ce mécanisme réactionnel découle une minéralisation plus ou moins stable caractérisant le faciès hydrochimique ou type d'eau. La minéralisation dépend aussi de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol (Ousmane, 2011).

Les eaux de type bicarbonaté calcique ($Ca\text{-}HCO_3$) sont les plus fréquentes dans les régions du socle en milieu semi-aride (Oga et al., 2010) en occurrence dans les eaux du Parc W du Niger. Elles sont liées à la dissolution des carbonates et de la calcite (Coupe de sondage minier, MM/H, 1976). Les aquifères referment généralement des eaux moins âgées et moins minéralisées comme le cas du forage de Bata qui représente une zone de recharge locale ; du fait non seulement de la faible profondeur du forage (49 m) mais aussi la présence du tritium dans l'eau qui caractérise une eau jeune.

Plusieurs causes ou processus peuvent être à la base de l'altération de la qualité de l'eau. Cette altération peut être naturelle ou anthropique (Beaudry, 2013).

La qualité des eaux du Parc W a été établie selon les critères de dépassement des paramètres physico-chimiques admissibles par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Les dépassements ont été classés selon deux critères, soit les concentrations maximales acceptables pour la santé humaine et les critères d'ordre esthétiques reliés à la perception (odeur, goût, couleur/dépôt). En ce qui concerne la qualité physique, deux échantillons présentent des pH inferieurs à la norme OMS (6,4 < 6,5 admissible) et un échantillon d'eau souterraine qui présente une conductivité électrique de 2420 μs/cm supérieure à la norme OMS (2000 μs/cm).

Sur l'ensemble des huit (8) échantillons, deux échantillons d'eau souterraine présentent des concentrations très élevées en calcium et en magnésium ainsi que des teneurs élevées en soufre, sulfates et manganèse. Il semble y avoir une corrélation entre les fortes minéralisations et la profondeur des puits d'eau souterraine. Dans le Parc W, les fortes concentrations en minéraux sont observées dans les puits les plus profonds (Yériyangou ,78 m et Moussièmou, 91 m de profondeur).

L'origine des ions sulfatés dans les eaux souterraines résulte généralement de la dissolution du gypse ($CaSO_4$) ou de la pyrite en profondeur (Martelat et al., 1997 ; Abdou, 2012 ; Baudry, 2016,). Les fortes teneurs en sulfates retrouvées dans certains échantillons d'eau souterraine dans le Parc W s'expliquent par la présence des dépôts de pyrites des formations lithologiques issues des coupes de sondages miniers de la mission OFREMIG 200W dans le cadre de la prospection de phosphate dans la partie nord du Parc W (MM/H, 1976). Les dépôts pyriteux de se situent entre 42 et 45 m de profondeur dans les fissures et au-delà de cette couche entre 66 et 73 m avec présence de siltites argileuses et argilites noires.

Les eaux de type chloruré caractérisent le plus souvent des eaux anciennes et profondes pouvant tirer leur origine des activités anthropiques (Abdou, 2012 ; RQES, 2016).

La qualité de l'eau est bonne dans l'ensemble des échantillons en dehors des problèmes d'ordre esthétiques observés dans certains puits.

La dureté est due à la teneur en sel dissous plus particulièrement les ions magnésium et calcium contenus dans l'eau (tableau 19). Elle est exprimée généralement en mg/L de $CaCO_3$. Plus la concentration de ces ions est élevée, plus l'eau est dure. L'eau dure provoque des dépôts de tartres sur les canalisations d'eau et une consommation excessive de savon.

Selon la norme OMS les eaux caractérisées par une dureté totale équivalente à 200 ppm sont considérée de bonne qualité. Par ailleurs, les recommandations de Santé Canada en matière d'eau potable classent les eaux ayant une dureté égale ou supérieure à 500 ppm comme non admissible pour la consommation (Santé Canada, 1979). De ce fait, l'eau de puits de Moussièmou et Yériyangou est considérées non potable (dureté > 500 ppm).

Tableau 14: Calcul de Dureté de l'eau

Identication	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Dureté calcique (mg/L CaCO3)	Dureté magnésienne (mg/L CaCO3)	Dureté totale (mg/L CaCO3)
Forage Tapoa-Moussiemou	394	79.2	985	329.47	1414.47
Forage Tapoa-Bata	41.9	11.3	104.75	47	151.75
Forage Tapoa Ecole	14.9	10.6	37.25	44.09	81.34
Forage Tapoa Yériyangou	167	48.6	417.5	202.17	619.67
Forage Tapoa Barrage	33.7	21.3	84.25	88.6	172.85
Mare de Moussièmou	1.13	0.932	2.825	3.87	6.7
Rivière Tapoa	4.64	1.69	11.6	7.03	18.63
Eau de pluie	1.09	0.136	2.725	0.56	3.29

- **Facteurs contrôlant la minéralisation**

La minéralisation des eaux est liée à la nature géologique des roches traversées et des différentes réactions chimiques qui ont lieu lors de son parcourt (Ousmane, 2011).

Du point de vue géologique et hydrogéologique, l'essentiel des points d'eau échantillonnés reposent sur des formations infracambriennes dont les réservoirs sont constitués de schistes altérés et fracturés et des grès du Voltaien. Seul le forage de Gourfandou capte les altérites du continental terminal 1 (CT1), (coupe lithologique des forages, voir annexe électronique).

Tous les points d'eau échantillonnés renferment les sols de type regosol eutrique à l'exception des forages de Bata et Tchiba qui sont caractérisés par des sols Lixisol haplique (voir fig. Carte des sols). L'interprétation des coupes lithologiques des sondages miniers pour la prospection du phosphate dans la partie nord de la zone d'étude donne plus de détails lithologiques avec la présence de lits de calcite entre 30 et 34 m de profondeur et 60 à 100 m avec des intercalations des siltites plus ou moins carbonatées entre 36 à 40 m et 50 à 55 m. On note également un remplissage de calcite dans les fissures entre 76 et 79 m en profondeur (MM/H,1976).

3.4. Modélisation numérique

Un modèle numérique simplifié en 2D a été développé pour donner un ordre de grandeur possible des propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique) et de la recharge du système aquifère. Ce modèle représente une section verticale bidimensionnelle, élaborée sur la base d'une coupe topographique (fig. 32).

Le logiciel FLONET/TR2 conçu par Molson et Frind (2010) a été utilisé pour développer le modèle numérique. La figure 33 montre le maillage numérique et les conditions imposées du modèle numérique. Les simulations numériques ont été effectuées en régime permanent. La conductivité hydraulique de l'aquifère et la recharge ont été variées jusqu'à ce que la nappe phréatique simulée se trouve à une profondeur représentative (tableau 20). Le tableau 20 résume les conditions utilisées pour trois cas de simulations en utilisant une conductivité hydraulique uniforme pour l'aquifère. Les résultats montrent que la recharge pourrait se situer entre 10 et 20 mm/an et que la conductivité hydraulique serait relativement limitée et fort possiblement anisotrope (fig.34).

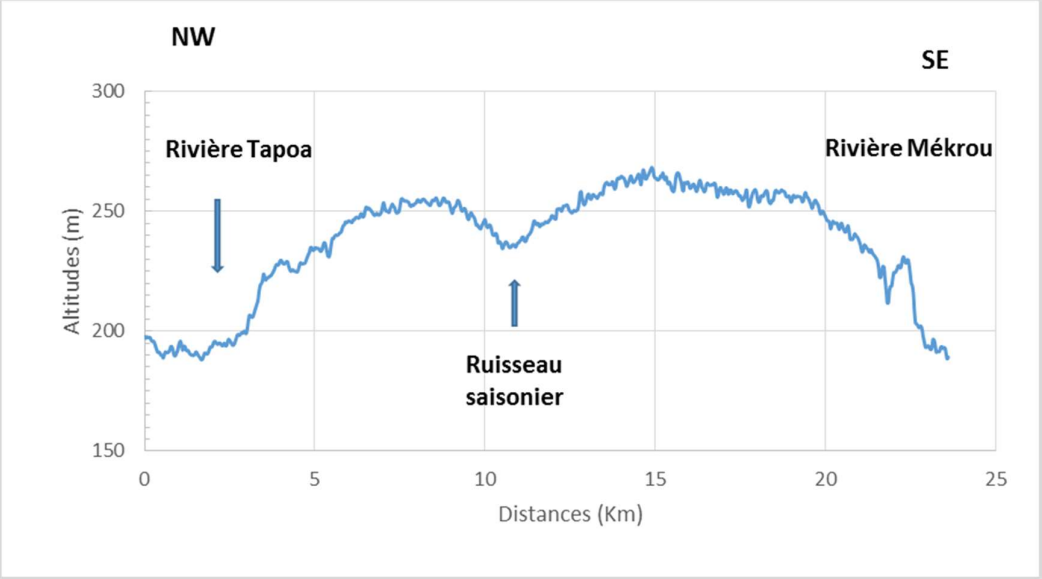


Figure 32:Section transversale topographique dans la partie nord-est du Parc national du W utilisée comme base pour le modèle numérique 2D (Localisation à la Carte I)

Tableau 15: Conditions des simulations numériques initiales utilisant des propriétés hydrauliques uniformes

Propriétés hydrauliques	Cas $_1$	Cas $_2$	Cas $_3$
Recharge (mm/an)	10	15	20
Conductivité hydraulique (m/s)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-5}
Porosité	0.02	0.02	0.02

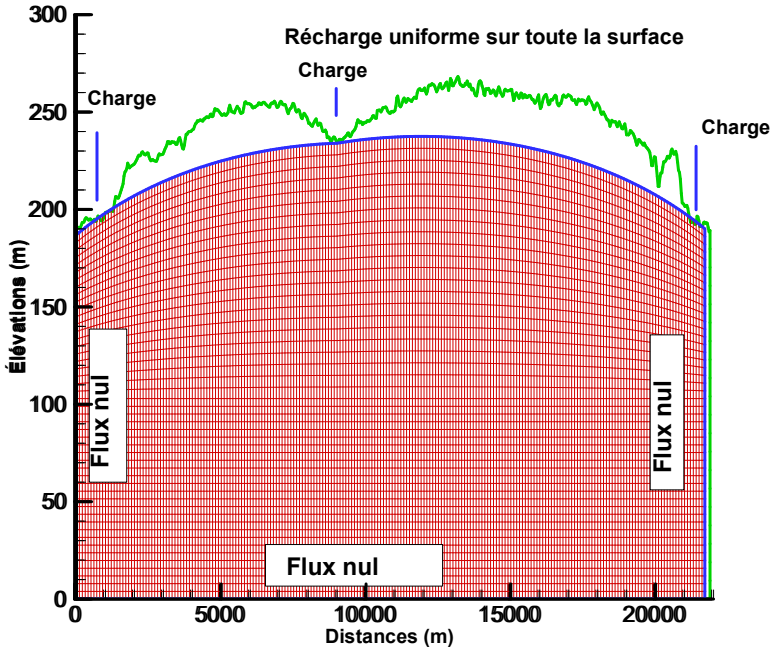


Figure 33:Maillages numériques et conditions limites utilisées pour les simulations numériques du système aquifère (La ligne verte représente la topographie de surface)

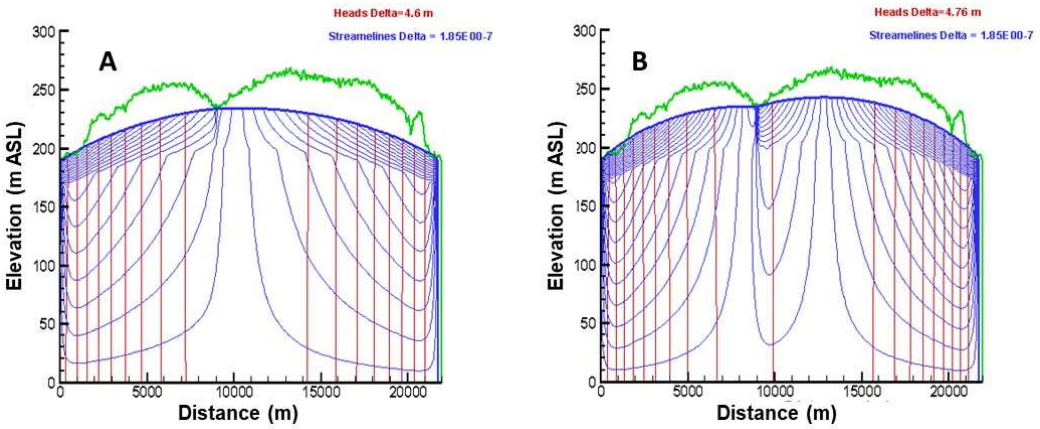


Figure 34:Résultats de simulation pour des conditions de modèle avec conductivité hydraulique anisotrope et une zone supérieure plus perméable (Kx = 10-5 m/s ;Kz = 10^{-6} m/s) représentant la roche fracturée altérée et une zone de perméabilité inférieure (Kx = 10^{-6} m/s ; Kz = 10^{-7} m/s) représentant le substratum rocheux non altéré. A) Recharge de 10 mm/an. B) Recharge de 20 mm/an.

3.4.1. Modèle conceptuel hydrogéologique

Considérant l'ensemble des conditions observées et mesurées dans le Parc du W, un modèle conceptuel hydrogéologique a été développé pour synthétiser nos conclusions sur le fonctionnement du système aquifère. Puisque relativement peu de données sont disponibles sur la région d'étude, un modèle analytique simple a été utilisé pour représenter le système aquifère. Chesnaux et al. (2005) ont développé la solution de Dupuit-Forchheimer afin de déterminer le temps de résidence de l'eau souterraine dans une nappe libre d'épaisseur constante bordée par des cours d'eau. La solution est appliquée pour un aquifère libre, homogène et isotrope en régime permanent. L'écoulement est horizontal et unidimensionnel. La solution de Dupuit-Forchheimer (équation 6) permet d'évaluer la charge hydraulique en fonction de la recharge (W) et de la conductivité hydrauliques (K) de l'aquifère (fig.35) :

$$h^2 = h_1^2 - \frac{(h_1^2 - h_2^2)\cdot x}{L} + \frac{w}{K}(L - x)\cdot x \quad . \qquad (6)$$

Où h : épaisseur de l'aquifère,(m) h1, h2 :l'élévation de la nappe (m) , L : longueur de l'aquifère (m) ; W : taux d'infiltration (recharge) (m/s), K : la conductivité hydraulique (m/s).

Les conditions aux limites sont des charges imposées par les niveaux des cours d'eau à chaque extrémité de l'aquifère: pour x = 0, h = h_1; pour x = L, h = h_2.

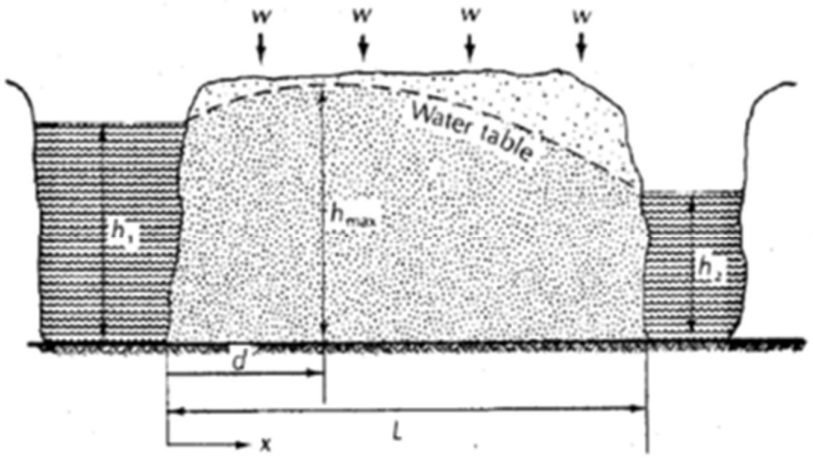


Figure 35:Conditions représentées par la solution de Dupuit-Forchheimer

Le tableau 21 présente une synthèse des données hydrogéologiques ayant servi à l'élaboration du modèle conceptuel hydrogéologique représentatif de la région d'étude. Le but de l'exercice est d'expliquer l'ensemble des observations avec un modèle simple. Les résultats de la solution de Dupuit-Forchheimer sont illustrés à la figure 36. La solution analytique utilise la même coupe topographique que le modèle numérique présenté à la section 4.7.

Tableau 16: Synthèse des conditions observées dans la région d'étude supportant le modèle conceptuel hydrogéologique du Parc du W

Condition	Description	Implications hydrogéologiques
Localisation et superficie	À 150 km au sud-ouest de la capitale Niamey superficie de 2200 km^2	
Topographie	Vaste pénéplaine avec des plateaux peu contrastés s'étendant entre 120 et 553 m d'altitude	Conditions peu propices à de la recharge localisées dans des bas topographiques ou des lits de cours d'eau
Hydrographie	Pas de cours d'eau permanents dans le Parc du W lui-même. Rivière Tapoa au nord, Mékrou	Selon la topographie et l'élévation de l'eau souterraine qui est plus élevée que le niveau des cours d'eau, l'écoulement de l'eau souterraine peut être présumé

	au sud et le fleuve Niger à l'est du Parc.	radial, soit à partir des plateaux vers les bas topographiques entourant le parc.
Géologie	Majoritairement formée par l'infracambrien constitué des grès du Voltaein, le Précambrien Supérieur marqué par la série de Buem, le Précambrien moyen représenté par l'Atakorien du W, le continental terminal (CT1) au nord et le quaternaire en bordures du fleuve Niger.	Ces lithologies mènent à des altérations relativement faibles (par rapport aux lithologies des roches granitiques) et une fracturation limitée.
Régolithe	L'aquitard a une épaisseur se situant en 10 à 30 m surmontant l'aquifère de fracture d'une épaisseur de 30 à 60 m. l'aquifère est semi-captif en général, mais peut être libre localement.	L'aquifère est semi-captif en général, mais peut être libre localement.
Propriétés hydrauliques	Conductivité hydraulique très faible : $2,4x10^{-7}$ à $7,6x10^{-6}$ m/s. Transmissivité: $7,1x10^{-5}$ à $2,5x10^{-4}$ m^2/s	Aquifère peu perméable. Le gradient hydraulique très faible et la K très modérée de l'aquifère devraient mener à de longs temps de résidence.
Profondeurs des forages et venues d'eau	La profondeur des puits varient entre 50 et 91 m. Les venues d'eau observées se situent entre 24 et 67 m de profondeur.	La fracturation relativement faible indiquée par quelques venues d'eau par puits expliquent la faible conductivité hydraulique de l'aquifère rocheux fracturé. La profondeur des puits peut laisser présumer un aquifère d'une épaisseur de l'ordre de 100 m.
Profondeur de la nappe	La profondeur du niveau d'eau varie entre 9,50 à 45 m (le forage Tapoa Barrage a son niveau d'eau à 1,10 m, puits près de la rivière Tapoa).	Le niveau d'eau dans l'aquifère est plus élevé que le niveau des cours d'eau autour du Parc du W. Ces cours d'eau servent donc d'exutoire de l'eau souterraine qui circule sous le parc. Ces cours d'eau ne peuvent pas ainsi recharger la nappe qui est plus élevée que le niveau des cours d'eau.
Géochimie	Pour la qualité, les eaux sont de bonne qualité dans leur ensemble du point de vue conductivité et pH par rapport à la norme OMS. Les eaux sont moins minéralisées à l'exception du forage de Moussièmou et Yériyangou qui présentent de fortes concentrations en calcium et magnésium et des concentrations anormalement	Les eaux sont relativement « évoluées » géochimiquement, même si la nature de l'aquifère (grès et schistes) ne mène normalement pas à des échanges importants entre les minéraux et l'eau.

	élevées en soufre (sulfates) et manganèse. La présence de sulfate serait reliée à la présence de pyrite.	
Isotopes de l'eau	Les fortes concentrations de tritium sont présentes dans les eaux de surface à cause de la présence de tritium dans les précipitations. Le forage de Bata contient du tritium, donc de l'eau jeune est mélangée avec une eau ancienne. Sa lithologie montre qu'il apparait libre et moins profond par rapport aux autres forages échantillonnés. Ce qui fait du forage de Bata une zone de recharge locale. Les autres forages ne contiennent pas du tritium et présentent des âges ^{14}C de compris entre 15000 et 20000 ans caractérisant des eaux anciennes. Les isotopes stables ne donnent pas d'indication d'une forte évaporation avant l'infiltration de la recharge.	Le mode de recharge est direct et le temps de parcourt de l'eau est très long avant d'atteindre l'aquifère à travers le régolithe et ensuite l'écoulement est très lent aussi dans l'aquifère.
Modèle analytique simple de l'écoulement et du temps de résidence (Chesnaux et al., 2005)	Ce modèle montre qu'il est possible d'obtenir des niveaux d'eau cohérents par rapport au site et un temps de résidence représentatif avec une valeur de K 1 $x10^{-6}$ ou $5x10^{-6}$ ou 5E-6 m/s, une épaisseur de 100 m et une recharge de 2.5 ou 15 mm/an (selon que la valeur de K est faible ou plus élevée).	Le système aquifère est très faiblement renouvelé par la recharge et a un écoulement très lent qui rend le temps de résidence très long (15 à 20 kan).

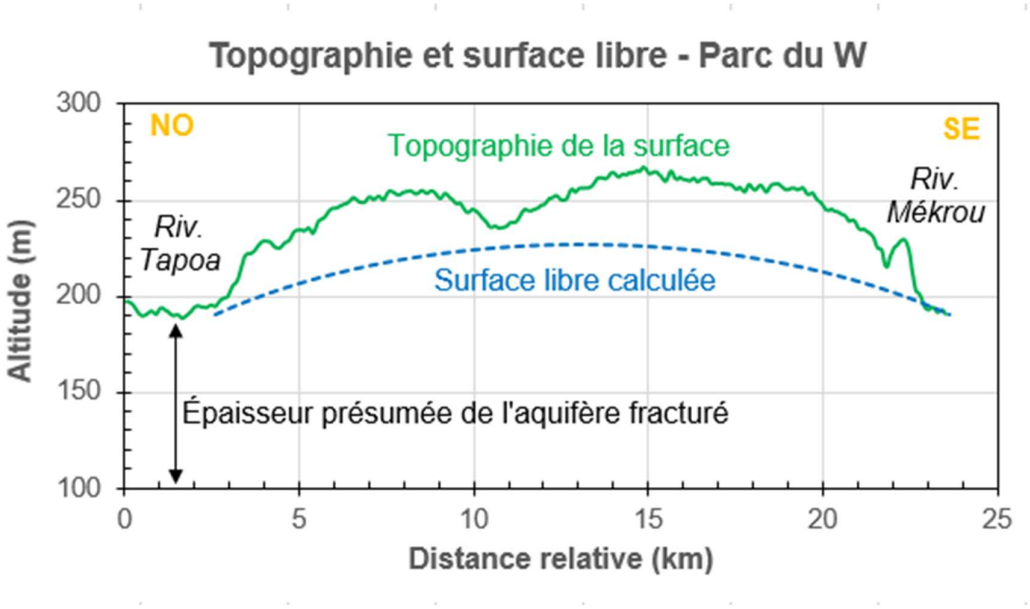


Figure 36:Solution de Dupuit -Forchheimer pour la surface libre. Recharge 2.5 à 15 mm/an pour K de 10^{-6} à $5x10^{-6}$ m/s

Tel qu'observé, le modèle montre que le niveau de la nappe est supérieur au niveau des rivières Tapoa et Mékrou (figure 38). Ce qui explique que ces rivières ne peuvent pas recharger l'aquifère et servent plutôt de zones de résurgence. Les points d'eau échantillons sont plus concentrés au niveau de la Tapoa. Les forages sont à la fin de la circulation de l'eau souterraine dans le système aquifère.

Pour définir les incertitudes des modèles analytiques utilisés, une analyse de sensibilité a été faite en variant certains paramètres qui permettent de reproduire adéquatement la position de la nappe. Les conclusions de cette analyse de sensibilité sont les suivantes :

- ✓ Une épaisseur de l'aquifère d'au moins 100 m (sous les cours d'eau) est nécessaire ;
- ✓ Utiliser la valeur maximale de conductivité hydraulique K, sinon la recharge serait très faible (Valeurs de K mesurées dans notre région d'étude et qui vont de 10^{-7} à 10^{-6} m/s, La valeur de 10^{-6} m/s pour la conductivité hydraulique est maintenue avoir une recharge représentative avec la solution analytique.
- ✓ La recharge va de 2.5 mm/an pour une épaisseur de 100 m à 5 mm/an pour 200 m d'épaisseur

- ✓ La recharge va de 2.5 mm/an à 15 mm/an avec des valeurs de K respectivement de 10^{-6} et de 5×10^{-6} m/s pour une épaisseur de 100 m d'aquifère.

En résumé, cette analyse de sensibilité basée sur la position de la nappe (fig.36) montre que l'épaisseur de l'aquifère pourrait être entre 100 et 200 m, que K pourrait être entre 10^{-6} et de 5×10^{-6} m/s et la recharge entre 2.5 et 15 mm/an.

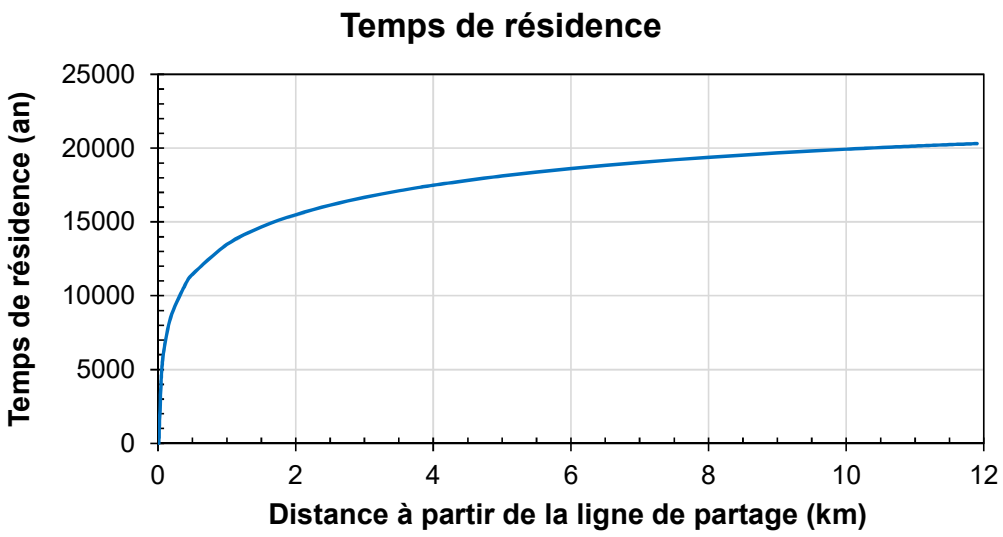


Figure 37:Solution de Chesnaux et al. (2005)

La figure 37 montre le temps de résidence estimé à partir de la solution de Chesnaux et al. (2005). La longueur du modèle correspond à la distance à partir de la ligne de partage qui est simplement la moitié de la distance entre les rivières Tapoa et Mékrou. Les valeurs des paramètres de la solution de Dupuit et de Chesnaux et al. (2005) ont été modifiées jusqu'à ce que l'élévation de la nappe (qui doit être sous le niveau du cours d'eau saisonnier sous la topographie) ainsi que le temps de résidence (indiqué par la datation au ^{14}C) soient cohérents avec les observations. Dans ce cas, une autre analyse de sensibilité a consisté à faire varier les paramètres porosité, conductivité hydraulique et recharge. La porosité a une forte incidence sur le temps de résidence. Une valeur de porosité de 0.05 doit être considérée pour obtenir un temps de résidence de l'ordre de 20 000 ans. Les valeurs de porosité de 0.01 et de 0.5 ont donné respectivement des temps de résidence trop faibles et trop élevés. Une recharge de 2.5 mm/an (cas de base) et de 15 mm/an a été appliquée pour avoir le bon niveau de

nappe en fonction des valeurs faibles ou élevées de la conductivité hydraulique (tableau 23) bien que ce paramètre K n'as pas d'influence significative sur le temps de résidence. Ce qui donne une bonne indication de la plage de valeurs plausibles de la recharge sur le long terme. Il faut tenir compte de la variabilité de la recharge en fonction des années (selon l'année on peut avoir plus ou moins de recharge).

L'analyse de sensibilité a montré donc que la plage plausible des paramètres du système aquifère n'est pas très étendue et que ces valeurs de paramètres sont cohérentes avec les valeurs mesurées dans le cas de K et les valeurs plausibles de porosité et de recharge pour lesquels nous n'avons pas de mesures indépendantes.

Le modèle fournis des âges entre 15000 et 20000 ans en cohérence avec les résultats analytiques.

3.5. Gestion durable des ressources en eau

3.5.1. Besoin en eau de la faune et capacité d'approvisionnement

Le besoin en eau est déterminé sur la base des données contenues dans le rapport du projet de réhabilitation des points d'eau dans la réserve de Biosphère du W du Niger (MESU/DD, 2015). La consommation journalière de toutes les espèces est estimée à 2,695 m^3 (tableau 22). Le besoin établi sur la base de ce chiffre sur huit (8) mois donne un estimatif de 646,8 m^3 (tableau 23). La capacité de production des ouvrages (mares et puits d'eau souterraine) peut couvrir ce besoin d'eau au-delà des prévisions.

Tableau 17: Besoins en eau des populations de faune du PRW (MESU/DD, 2015)

Espèces	Données Biologiques		Différents Taux de Charge			Superficie des Aires Utiles Autour des Points d'Eau 78,5 km2		
						Consomation Journalière:		
	Poids Vifs kg	Besoin jour litres	Densité km2 Actuelle km2	ROS km2	K km2	Besoins Actuels m3	ROS m3	K m3
Ongulés[1]:								
Céphalophe à f. r. **	11,0	0,4	0,06	0,08	0,11	0,002	0,003	0,004
Céphalophe de G.	13,1	0,5	0,28	1,07	1,53	0,012	0,044	0,063
Ourébi	12,4	0,5	0,57	1,62	2,31	0,022	0,063	0,090
Gazelle à flancs roux	18,8	0,8	0,00	1,34	1,92	0,000	0,079	0,113
Redunca	23,5	0,9	0,02	0,39	0,56	0,002	0,029	0,041
Guib	33,3	1,3	0,01	0,77	1,10	0,001	0,081	0,115
Phacochère	45,0	1,8	0,46	2,07	2,95	0,066	0,292	0,417
Cobe de Buffon	48,0	1,9	0,12	2,30	3,28	0,018	0,346	0,494
Damalisque	125,0	5,0	0,02	0,66	0,94	0,008	0,258	0,369
Cobe defassa	132,0	5,3	0,01	1,11	1,59	0,004	0,462	0,660
Bubale	142,0	5,7	0,11	0,78	1,11	0,048	0,346	0,495
Hippotrague	217,0	8,7	0,34	1,83	2,61	0,229	1,245	1,778
Buffle	359,0	14,4	0,23	0,70	1,00	0,260	0,789	1,127
sous-total			2,23	14,71	21,01	0,671	4,037	5,767
Pachiderme:								
Hippopotame	1500	60,0	0,00	0,05	0,069	0,008	0,227	0,325
Éléphant	2000	300,0	0,08	0,35	0,50	1,938	8,243	11,775
Total Herbivores			2,32	15,11	21,58	2,618	12,507	17,867
Autres Espèces[2]:								
Callitriche	4,7	0,2	0,12	0,35	0,50	0,002	0,005	0,007
Patas	10,0	0,4	0,08	0,24	0,34	0,003	0,008	0,011
Cynocéphale	25,0	1,0	0,44	1,32	1,89	0,035	0,104	0,148
Lion	150,0	6,0	0,01	0,03	0,05	0,005	0,015	0,021
Toutes autres espèces (1% des autres)						0,033	0,167	0,238
Total Autres Espèces			0,65	1,94	2,78	0,077	0,298	0,426
Total Toutes Espèces			2,97	17,05	24,36	2,695	12,805	18,293

1= sur la base d'une consommation moyenne de 4% du poids vif par jour

2= les densités des "autres espèces" sont estimés à 39% des densités du Complexe Arly (Lungren et al. 2004)

Tableau 18: Besoin en eau en fonction de la consommation journalière

Besoin en eau et capacité de production des mares			
Besoin journalier (m^3)	Besoin sur 8 mois (240 jours) (m^3)	Densité Espèces/km^2	Volume cumulé mares (m^3)
2,695	646,8	2,97	13370

Source : Direction de la faune (MESU/DD, 2015)

3.5.2. Rendement des installations hydrauliques existantes

Le rendement des installations hydrauliques existantes du Parc W est évalué par la réalisation des essais des pompages. Le rendement d'un forage est égal au quotient du rabattement théorique avec le rabattement réel. Le rabattement réel correspond à la différence entre le niveau mesuré et le niveau statique dans le puits de pompage et le rabattement théorique est la valeur obtenue graphiquement.

Les données des essais effectués sur les forages périphériques en 2004 (Commune rurale de Tamou) présentent des débits de forage très faibles de l'ordre de 0,9 à 2,3 m^3/h. Ces faibles valeurs pouvaient s'expliquer par le contexte hydrogéologique de la zone ou par l'ensablement ou la détérioration de l'équipement des forages (crépines colmatées), car les ouvrages sont anciens et n'ont pas fait l'objet d'une intervention pendant longtemps. Ces valeurs sont beaucoup plus significatives à l'intérieur du Parc avec des débits qui se situent entre 2 et 10 m^3/h selon les données inscrites sur les fiches techniques des forages du Parc W. En comparant les caractéristiques hydrodynamiques obtenues avec ceux du BRGM à la réalisation des puits, on a constaté une amélioration de la production vs rendement. Le forage de Moussièmou a un rendement de 52,58 %, celui de Bata, 30,79 % et le forage Tapoa Barrage a un rendement de 44,23 %. Les opérations de soufflage à l'air lift et le développement à la pompe ont permis de décolmater les crépines et aussi de débarrasser les puits de leurs impuretés notamment la présence de sable. L'équation (7) du rendement du forage se traduit par la formule :

$$\boxed{rendement\ du\ forage = \frac{rabattement\ théorique}{rabattement\ réel}} \qquad (7)$$

3.5.3. Programme d'exploitation durable

La proposition d'un plan d'exploitation des eaux souterraines est importante pour la conservation de l'écosystème du Parc national du W du Niger. Une étude réalisée en 2015 par le Ministère de l'environnement dans le cadre du projet de réhabilitation des points d'eau de la réserve de Biosphère du W du Niger montre que le type d'ouvrage qui répond au mieux au besoin d'approvisionnement de la faune sauvage, c'est les mares et que les puits (forages) interviennent à titre d'apport pour combler le déficit en eau pendant la saison sèche.

A l'état actuel toutes les mares semi-permanentes ne sont pas connectées aux puits (système de canalisation souterraine pour alimenter les mares à partir des puits) du fait que bon nombre de forages présentent des équipements défectueux. Un programme de suivi de la ressource a débuté en mai 2018 (fig.39) afin d'étudier le comportement des infrastructures dans le temps et la recharge qui va combler les pompages saisonniers pour alimenter les mares. Le résultat sera semblable à l'un des cas de figure illustrée à la figure 38.

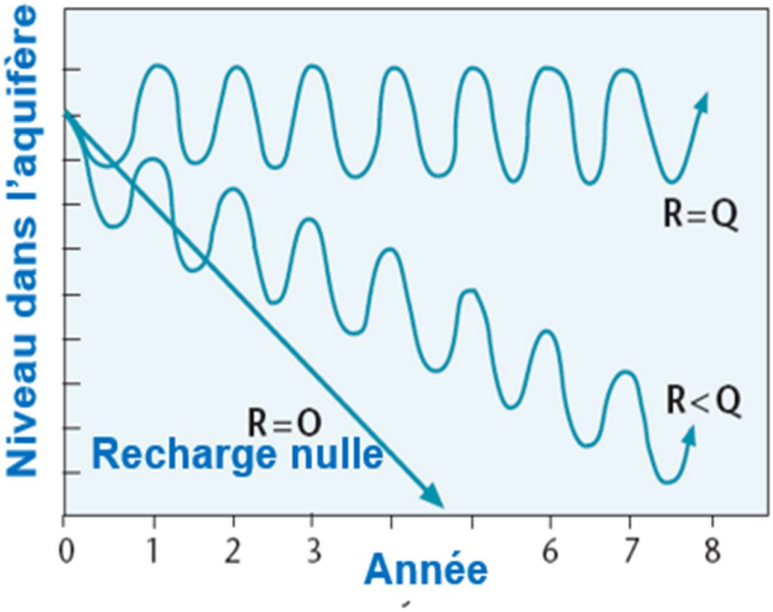


Figure 38:Modèle conceptuel du programme de monitoring pour l'exploitation durable de la ressource en eau souterraine

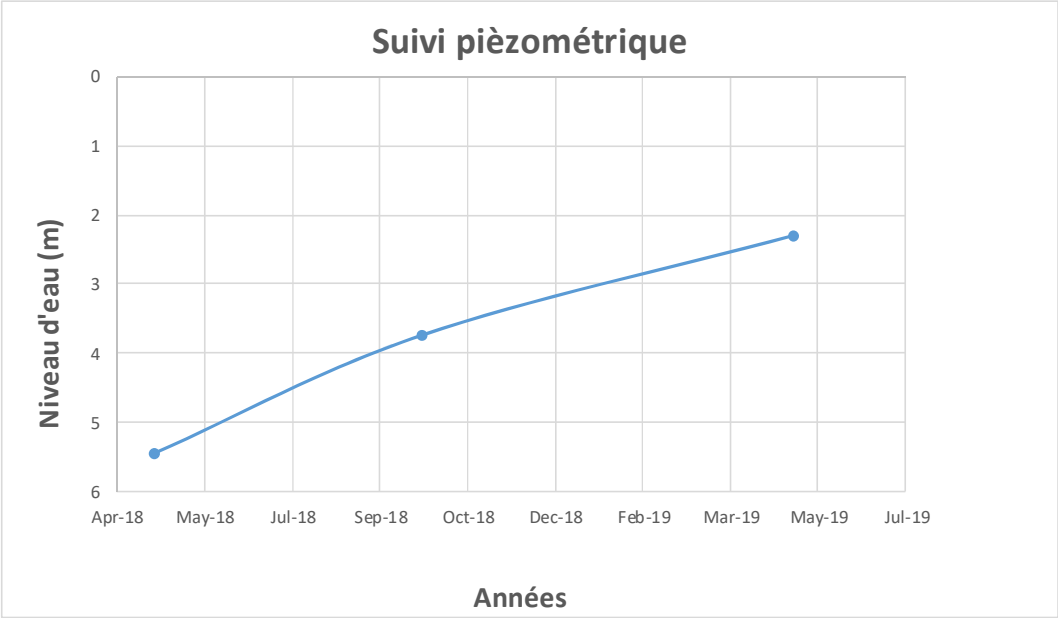


Figure 39:Programme de monitoring pour l'exploitation durable

Trois points de mesures de niveau d'eau ont permis de dégager la tendance des conditions de recharge dans la zone d'étude. L'allure de la courbe montre de bonne condition de recharge, mais ce programme doit être poursuivi sur plusieurs années afin de le valider.

IV. DISCUSSIONS DES RESULTATS

4.1. Essais hydrauliques

Le sous-sol du Parc W du Niger met en évidence des formations aquifères constituées de schistes fracturé, des grès et des altérites surmontées par des couches argileuses, des grès quartzites et de sables argileux (BRGM, 1990). Cette diversité lithologique comme en témoigne les coupes lithologiques des forages confirme l'existence de plusieurs types de nappes dont le socle, les grès et les altérites qui apparaissent plus ou moins confiner l'aquifère rocheux fracturé sous-jacent.

Les caractéristiques hydrogéologiques des ouvrages montrent que l'aquifère est plutôt semi-captif ou libre en bordure des cours d'eau principaux. Les données issues des pompages d'essai à la réalisation des forages donnent un bon ajustement au modèle de Theis (1935), d'où l'application de cette méthode dans notre contexte actuelle.

Dans les années 80, le BRGM a développé le logiciel ISAPE afin de faciliter l'interprétation des essais hydrauliques par la communauté des hydrogéologues. Ce modèle fut d'ailleurs utilisé pour interpréter les essais des forages réalisés dans le Parc en 1990. Cette version du logiciel devenue obsolète par le temps a ensuite évolué vers une version plus efficace, plus pratique et qui s'applique à des contextes bien déterminés ; d'où l'élaboration d'un nouveau outil d'interprétation par le BRGM (2015 b), nommé OUAIP.

Le modèle numérique OUAIP offre une interprétation plus rigoureuse des caractéristiques hydrauliques notamment le débit critique et des pertes de charges (Tableau 8) par rapport à la méthode de Jacob qui bien qu'elle est simple d'utilisation peut fournir des valeurs erronées. Ce qui explique une sous-estimation de cette valeur en comparaison avec la méthode d'interprétation graphique bien que cette dernière soit subjective.

Le modèle OUAIP propose une méthode de détermination de débit critique correspondant au point d'égalité entre les pertes de charges linéaires et non linéaires (BRGM, 2016) ; mais cette méthode présente certaines limites et est discutée par plusieurs auteurs. Ce concept de base n'est pas toujours envisageable comme dans le cas du forage de Bata où la valeur raisonnable est celle obtenue avec la méthode classique. Mais cette méthode dite du point d'égalité est celle qui définit le mieux le

débit critique d'un ouvrage. Cette condition établie à partir de la formule de Rorabaugh (1953) , équation (8) s'écrit :

$BQ_c = CQ_c^{\,n}$ où (8)

Q_c est le débit critique ;

B : coefficients de pertes de charges linéaires ;

C : coefficient de pertes de charges quadratiques

La droite caractéristique s/Q = f(Q) permet la détermination des pertes de charge linéaires (Coef. B) due à l'écoulement laminaire et les pertes de charges quadratiques dues à l'écoulement turbulent dans les crépines (coef.C).

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel OUAIP donne des valeurs sous-estimées des pertes de charges linéaires et quadratiques par rapport à l'interprétation graphique de la méthode de Jacob (Tableau 6) qui est moins rigoureuse qui donne la possibilité à l'hydrogéologue de mieux répondre aux besoins de sa clientèle.

Les paramètres hydrodynamiques déterminés lors des essais de nappe (tableau 9) mettent en évidence des transmissivités de l'ordre de 2,49 $x10^{-4}$ à 7,12$x10^{-5}$ m^2/s avec des coefficients d'emmagasinements de 1,16$x10^{-3}$ à 1,08$x10^{-1}$ comparativement aux résultats antérieurs (BRGM,1990) qui donnent une plage de transmissivités de 5,0$x10^{-4}$ à 2,1$x10^{-5}$ m^2/s et des coefficients d'emmagasinements se situant entre 2,3$x10^{-4}$ et 2,4$x10^{-8}$.Ces valeurs de transmissivités sont conformes à celles rencontrées dans le socle nigérien variant entre 10^{-6} et 10^{-4} m^2/s et pouvant atteindre exceptionnellement 10^{-2} à 10^{-1} (Abdou, 2012). Ousmane et al., (1988) proposent des valeurs de transmissivités se situant entre 5$x10^{-5}$ et 1,1$x10^{-3}$ m^2/s .

Les résultats obtenus montrent généralement une amélioration de la productivité des ouvrages notamment due aux opérations supplémentaires effectuées telles que le soufflage à l'air (air lift), le pompage subséquent et aussi la durée de pompage. Ce qui traduit une bonne perméabilité de l'aquifère rocheux fracturé. Par contre, certains forages (forage de Moussièmou) ont vu leur productivité diminuer. Cette situation pourrait s'expliquer surtout par la détérioration de l'équipement du forage et le colmatage des crépines.

Les conductivités hydrauliques obtenues restent dans la gamme des valeurs observées en zone de socle d'une grandeur de 10^{-6} à 10^{-7} m/s (tableaux 10 et 11).

4.2. Topographie des mares

Les résultats des travaux de levés topographiques (bathymétrie) effectués sur les cinq (5) mares permanentes et semi-permanentes du Parc W du Niger ainsi que les deux rivières (Mékrou et Tapoa) ont montré graphiquement une tendance évolutive de volume d'eau cumulé en fonction de l'altitude**.** Les plans d'eau observés étaient nettement inférieurs à la capacité de rétention d'eau des mares pendant les hautes eaux (tableau 14). Les volumes d'eau cumulés pendant la période d'étiage représentait environ 1/3 du volume d'eau que pourrait contenir ces ouvrages pendant la période des hautes eaux. Plusieurs recherches dans le sud-ouest nigérien ont étudié la dynamique de vidange des mares en relation avec l'alimentation des nappes phréatique (Desconnets, 1994 ; Fourcade, 2000). Fourcade a étudié le processus de vidange de plusieurs mares endoréiques temporaires de géomorphologie différente dans la région de Niamey. Les résultats ont montré une forte dynamique de vidange des mares peu profondes faisant ressortir une corrélation entre la hauteur d'eau et le volume d'eau stocké. Les mares de faibles profondeurs sont plus soumises au phénomène d'évaporation et à l'ensablement. Ce qui explique le tarissement de la plus part des mares du Parc W, réduites à quelques chapelets pendant la saison sèche. Les volumes d'eau cumulés au niveau des mares de Moussa Koira et Gnafarou sont plus importants par rapport aux autres mares. Cela s'explique par le faites que ces ouvrages ont fait l'objet d'aménagement (surcreusage, aménagement de protection des rives) afin d'augmenter leur capacité de rétention d'eau. Le rapport du ministère de l'environnement sur le projet de réhabilitation des points d'eau dans la réserve de biosphère du Parc W (MESU/DD, 2015) met plus l'accent sur la taille ou l'étendue d'un réservoir (mare), qui lorsqu'elle est plus importante, elle garantit la disponibilité de l'eau toute l'année et assure le stock d'eau en période d'assèchement (Lungren et al., 2006 ; Lungren et al.,2013). Une profondeur minimale de 3,75 m est requise lors des aménagements pour assurer la pérennité de l'eau même à la fin de la saison des pluies.

4.3. Géochimie isotopique

En contexte semi-aride, la recharge des aquifères provient des précipitations. La droite des eaux météoriques mondiale (DMM) (*Global Meteoric Water Line GMWL* ; Craig, 1961) représente la relation entre les isotopes stables de l'eau, soit le deutérium (δ^2H)

en fonction de l'oxygène-18 ($\delta^{18}O$). Pour ce qui est de la variation spatiale, la composition isotopique moyenne des précipitations tend à présenter un appauvrissement en isotopes lourds depuis les tropiques vers les pôles (*Bowen et al., 2002)*. Sur le plan temporel pour les régions à saisonnalité marquée les variations saisonnières, de la composition isotopique des précipitations dépend de la provenance des masses atmosphériques et de la température. Pour ce qui est de l'effet de la topographie, les données montrent généralement un appauvrissement en isotopes lourds pour les précipitations associées à des zones de haute altitude. La droite des eaux météoriques mondiale a pour équation (9):

$$\delta 2H = 8\ \delta 18O + 10 \quad (9)$$

La DMM est un outil de base pour toute interprétation sur l'origine des eaux et la détermination du mécanisme de recharge. Plusieurs études montrent une variation significative de la composition isotopique au cours d'une même saison. En général, un enrichissement en isotopes lourds est observé en début et en fin de saison de pluie lors que l'atmosphère se retrouve sous saturée tout en favorisant le phénomène d'évaporation (Abdou, 2012). Par contre en pleine saison où les pluies sont abondantes, la composition isotopique s'appauvri avec des températures très basses et une humidité relative élevée proche de la saturation.

Les valeurs d'excès en deutérium (" d ") mettent en évidence le caractère évaporé des eaux. Comme dans le cas des stations de Dakar (Sénégal) et Bamako (Mali), les valeurs d'excès en deutérium sont respectivement 7,6 et 9,1 traduisant une reprise évaporatoire caractéristique de l'aridité de la zone (Gaye, 1990 ; Dakouré, 2003 cité par Abdou, 2012).

Dans certains cas, les précipitations peuvent avoir un signal différent avec des droites de corrélations $\delta 18O$ vs $\delta 2H$ se situant au-dessus de la droite météorique des eaux (Yaméogo, 2008; Koussoubé, 2010). Ce qui pourrait expliquer que la composition isotopique des précipitations n'a pas subi de modification par les phénomènes atmosphériques (évaporation). Les valeurs d'excès en deutérium supérieures à 10 expriment une origine mixte des précipitations (continentale et océanique) alors que celles qui sont inférieures à 10 mettent en évidence des eaux de pluie ayant une origine issue du flux de la mousson de Golfe de Guinée, notamment les eaux de Niamey et les eaux du Parc W du Niger (Dansgaard, 1964; Clark et al., 1997) selon Abdou (2012).

Lorsque la pente de cette DMM est inférieure à 8, les précipitations sont légèrement évaporées au cours de leur chute (AIEA, 1993, Clark et Fritz, 1997,). Les précipitations des stations sahélo-soudaniennes (figure 30) présentent en général une pente égale à 7 issue de la droite $\delta^2H = 7.6\ \delta^{18}O + 7.1$ (Joseph et al., 1993). En particulier les eaux de l'ouest du Niger en occurrence celles de la région de Niamey rentrent dans cette gamme, ($\delta^2H = 7.7\ \delta^{18}O + 5.4$; Favreau, 2000) et Dosso ($\delta^2H = 7.1\ \delta^{18}O + 5.8$) (Abdou, 2012).

Les eaux du Parc W du Niger ($\delta^2H = 7.7\ \delta^{18}O + 6.9$) présentent également une pente légèrement inférieure à celle des eaux météoriques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les conditions générales présentes dans la région d'étude sont assez bien définies, mais les données hydrogéologiques disponibles sur le sud-ouest du Niger sont rares du fait de la difficulté d'accès (manque d'informations assez détaillées, problème d'archivage) et du contexte hydrogéologique de la zone étudiée (Favreau, 1996).

De sa création à aujourd'hui, plusieurs études ont été menées pour développer les connaissances sur le Parc régional du W du Niger, la conservation de sa biodiversité et sur les espèces fauniques et floristiques. Dans cette dynamique pluridisciplinaire, très peu d'informations disponibles traitent des ressources en eau souterraine de cette zone, véritable gage de la pérennité de la biodiversité de cet écosystème.

Les données hydrogéologiques relatives à la région du Parc W du Niger sont difficilement accessibles car les installations hydrauliques sont vieillissantes. L'accessibilité au site nécessite des dispositions sécuritaires et sanitaires (bottes, chaussettes, gants et si possible des pommades anti insectes pour une longue exposition dans la zone).

A l'issue de cette étude, les données hydrogéologiques montrent que l'aquifère productif est peu transmissif avec des débits faibles. Le mécanisme de recharge tel qu'indiqué par les isotopes stables et la solution de Dupuit met en évidence une recharge directe diffuse, très faible qui se fait lentement à travers la couche du regolites.

On note également une variabilité des types d'eau souterraine avec des eaux assez évoluées ayant un long temps de résidence. La qualité physico-chimique des eaux est dans l'ensemble bonne en dehors des eaux du forage de Moussièmou et Yériyangou qui sont très chargées en sels minéraux et exigent des traitements d'adoucissement pour être acceptable pour la consommation.

La capacité d'approvisionnement des ouvrages hydrauliques montre que leur production peut en principe bien couvrir le besoin eau de la faune.

Le programme d'exploitation durable proposé dans cette étude est un outil de suivi piézométrique et d'exploitation de la ressource en eau à long terme. Ce programme reste un outil de référence pour les gestionnaires du Parc.

En conclusion, le problème d'eau souligné au départ n'est pas lié à la ressource disponible, mais plutôt à la gestion et la répartition des points d'eau dans l'espace du Parc W du Niger.

L'étude a ainsi fourni des connaissances sur les ressources en eau souterraine du Parc national du W du Niger dans un contexte complexe des aquifères de socle en milieu semi-aride, connaissances qui seront exploitées pour évaluer le potentiel d'utilisation durable de l'eau souterraine pour soutenir la faune du Parc naturel.

Les perspectives sont surtout orientées sur la caractérisation de zones productives (fractures et fissures) par télédétection et confirmation sur le terrain par la géophysique pour localiser de nouveaux forages d'eau.

L'étude implique à la fois le développement des connaissances scientifiques et leur application à un enjeu environnemental original.

Quelques recommandations sont faites à l'endroit des autorités du Parc W :

- Poursuivre le programme de monitoring de l'exploitation durable de la ressource en eau sur plusieurs années (5 à 10 ans) pour sa validation.
- Rechercher des financements pour la réhabilitation des puits d'eau.
- Renforcer le dispositif de surveillance à l'intérieur du Parc pour la protection des installations hydrauliques et leurs sources d'énergie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdou, Babayé, M, S., Sandao. I., Saley .M.B., Wagani.I. , Ousmane. B. *(2016) : Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (sud – ouest du Niger).*

Abdou, Babayé, M, S*. (2012) : Evaluation des ressources en eau dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger), Thèse de doctorat de l'université de Liège (Belgique) en cotutelle avec l'université Abdou Moumouni (Niger).*

Abdourhamane, Daouda., Vieri, Tarchiani. Maurizio Tiepolo*. (2016) : Milieu physique, peuplement et exposition aux aléas hydro-climatiques dans la région Tillabéri, Niger.*

Ango, Habsatou. (*2012) : Contribution de la géophysique à l'amélioration de la connaissance des aquifères discontinus du socle : région de Torodi, cas du bassin versant de kobio, Niger (Inédit).*

Adam, Laura. *(2008) : Déterminants des déplacements des buffles dans le Parc régional W (Bénin, Burkina Faso –Niger) ,2007-2008, mémoire.*

Ardoin_Bardin. S*. (2004) : Variabilité hydro-climatique et impacts sur le ressources en eau de grands bassin hydrographiques en zone Soudano-Sahélienne, Thèse de doctorat de l'université de Montpelier II, 437 p.*

AIEA. *(2017): Integrated and Sustainable Management of Shared Aquifer Systems and Basins of the Sahel Region. RAF/7/011. Liptako Gourma and Upper Volta system.*

AIEA. *(1993) : Les Ressources en eau au Sahel ; Etudes Hydrogéologiques et Hydrologiques en Afrique de l'ouest par les techniques isotopiques.*

ANTEA Group et IMB_Consult*. (2012) : Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Niger, rapport de synthèse hydrogéologique.*

Autorité du Bassin du Niger.2007.Atlas du bassin du fleuve Niger.

Assemian, E, A., Kouamé, F, K., Saley, M, B., Kouadio Affian, K., Youan, M., Jourda, J.P.R., Biem, J. *(2013) : Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire.*

***AQUASTAT/FAO**. (2016) : Système d'information sur l'eau et l'agriculture.*

***Baali, Fethi.** (2007) : Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité d'un système aquifère karstique en zone semi-aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien*

***Benoit, Michel.** (1999): Statut et usages du sol en périphérie du Parc national du W du Niger, Tome 3, Introduction à l'étude des paysages du canton de Tamou (Périphérie du Parc National du << W >> du Niger.*

***Benoit, M.** (1998). Statut et usages du sol en périphérie du Parc national du W du Niger, Tome 1, Contribution à l'étude du milieu naturel et des ressources végétales du canton de Tamou et du Parc du << W >>*

***Bernert, G** (1981) : Hydraulique villageoise dans le Liptako, (Niger) : Exécution de 136 forages et mise en place de 110 pompes à motricité humaine.*

***Bowen, Gabriel, J.., Wilkinson, Bruce**. (2002): Spatial distribution of d18O in meteoric precipitation; Geology; April 2002; v. 30; no. 4; p. 315–318.*

***Bromley, J a*, Edmunds, W.M b, Fellman, E b, Brouwer, J c, Gaze, S.R a, Sudlow, J'a, Taupin, J.D** (1997) : Estimation des apports pluviométriques et recharge directe dans la zone insaturée profonde du sud du Niger à l'aide de la méthode du profil chlorure.*

***BRGM**. (1976) : Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau souterraine de l'Afrique Soudano-sahélienne.*

***BRGM.** (1987) : Actualisation de l'atlas des eaux souterraines du Niger, 148 p.*

***BRGM.** (1990) : Fiches des ouvrages, Projet Autorité du Liptako gourma (ALG).*

***BRGM.** (2005) : Projets Réseau SIG- Afrique ; Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million.*

***BRGM**. (2015a) : Méthode d'évaluation de la recharge des nappes ; complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines (Rapport final).*

***BRGM** (2015b). OUAIP: outil d'aide à l'interprétation des pompages d'essais.* https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/ouaip-outil-aide-interpretation-pompages-essais *[accédé en juin 2019]*

BRGM. *(2016) : Note sur la réalisation et l'interprétation des pompages d'essais par paliers ; Bonnes pratiques et exemple d'application avec le logiciel OUAIP, rapport final.*

BRGM*. (2017): An updated geological map of Africa at 1/ 10.000000 scale.*

Bromley, J., Edmunds, W.M., Fellman, E., Brouwer, J., Gaze, S.R., Sudlow, J., Taupin, J. *(1997). Estimation des apports pluviométriques et recharge directe dans la zone insaturée profonde du sud du Niger à l'aide de la méthode du profil chlorure.*

Carrier, M.A., Lefebvre, R., Rivard, C., et al. *(2013). Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines, Rapport final INRS R-1433, 283 p.*

Carrier, M.A., Aubut, R., Lefebvre, R., Racicot, J., Asare, E., Fontaine, R., Rivera, A. *(2011b): Hydrogeological Assessment of the northern regions of Ghana – Hydrogeological Atlas. SNC-Lavalin/INRS Consortium, Final Atlas, submitted to CIDA, November 2011, INRS Research Report 1326, 60 p., ISBN 978-2-89146-709-4.*

Carrier, M.-A., Lefebvre, R., Boyaud, C., Racicot, J., Asare, E., Aubut, R., Fontaine, R*. (2011a): Hydrogeological Assessment of the northern regions of Ghana. SNC-Lavalin/INRS Consortium, Final Technical Report, submitted to CIDA, November 2011, INRS Research Report 1325, 214 p., 15 appendices, ISBN 978-2-89146-708-7.*

Carrier, M.A., Lefebvre, R., Racicot, J., Asare, E*. (2008): Groundwater recharge assessment in northern Ghana using soil moisture balance and chloride mass balance. Proceedings, GeoEdmonton '08, 61th Canadian Geotechnical Conference and 9th Joint CGS/IAH Conference, Edmonton, Canada, September 21-24, 2008, Paper 218, 1437-1444.*

CENAGREF*. (2015) : Plan d'aménagement et de gestion participative (2016-2025).*

Chapuis, Robert. P*. (2007) : Guide des essais de pompage et leurs interprétations.*

CILSS. *(2016) : Les paysages de l'Afrique de l'ouest, une fenêtre sur un monde en pleine évolution.*

***Couteron, P**. (1992) : Parc National du « W » (Niger). Typologie et Cartographie de la végétation du Parc. ENGREF – UNESCO, Montpelier, 103p.*

***Craig, H.** (1961). Isotopic variations in meteoric waters, Science. 133 (3465): 1702–1703.*

***Dadoun, Jean François**. (2007) : Office international de eau ; Développer les compétences pour mieux gérer l'eau.*

***Delestre, M**. (2017) :Pré-étude du potentiel aquifère du Parc W du Niger, Rapport de stage de fin de cycle de maitrise a l'INRS.*

***Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns R., Maréchal, J.-C., Krishnamurthy** (2006): A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., 330, 260-284*

***Didier, R**. (1969) : Le Continental Terminal et son influence sur la formation des sols au Niger.*

***Desconnets, Jean, Christophe**. (1994) : Typologie et caractérisation hydrologique des systèmes endoréiques en milieu sahélien (degré carré de Niamey-Niger), Thèse de doctorat de l'université des Sciences et Techniques du Languedoc) ,326 p.*

***Desconnets et al. (**1997): Groundwater modelling in arid and semi-arid area.*

***ECOPAS**. (2003) : Recherche sur les aspects socio-territoriaux dans les zones périphériques du Parc W : Proposition de Zonage (5e mission).*

***ECOPAS.** (2004) : Plan d'Aménagement et de Gestion de la Réserve Transfrontalière de la Biosphère W – 2006-2010, Rapport provisoire, Volume II : Mise en œuvre du PAG, Août 2004, 36 p.*

***ECOPAS.** (2004) : Plan d'Aménagement et de Gestion de la Réserve Transfrontalière de la Biosphère W - 2006-2010, Rapport provisoire, Volume III, Stratégie, Août 2004, 52 p.*

***ECOPAS.** (2005) : Système de suivi-écologique pour le Parc Régional du W – Composante Niger, Rapport final, 19 p.*

***ECOPAS**. (2006) : Rapport d'activités, version finale, 2006, 101p.*

***ECOPAS**. (2007) : Mission d'évaluation finale Projet Régional WAP (W-Arly-Pendjari), version provisoire, 80 p.*

ECOPAS. *(2008a) : Accord relatif à la gestion concertée de la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W, 15 p.*

ECOPAS *(2008b) : Schéma Général d'Aménagement pour la Sécurisation des Habitats et des Parcours de la Faune du Parc Régional du W, version finale,*

ECOPAS*. (2008c) : Système de suivi-écologique pour le Parc Régional du W- Les paramètres et les protocoles de travail, Ouagadougou, 25 p.*

ECOPAS *(2008d) : Manuel de gestion du Parc Régional W du W, 192 p.*

Favreau, G *(1996) : Modélisation locale de la recharge de la nappe phréatique sur le site de Wankama (sud-ouest du Niger).*

Favreau, G., Leduc, C et Marlin, C*. (1999) : Représentativité de l'échantillonnage géochimique et hydrodynamique en nappe libre de milieu semi-aride (Reliability of geochemical and hydrodynamic sampling in semi-arid water table).*

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.*

Favreau, G., Leduc, C ., Marlin, C., Guéro, A*. (2002) : Une dépression piézométrique naturelle en hausse au sahel (Sud-Ouest du Niger) ; article, Géoscience 334 (2002) 395–401.*

Fourcade, J*. (2000): Hydrologie d'une zone endoréique sahélienne: Dynamique des vidanges des mares temporaires et alimentation de la nappe phréatique. (Région de Niamey-Niger).*

Gavaud, M*. (1965) : Etude pédologique du Niger occidental : rapport général. Dakar : ORSTOM, 2, 520 p*

Gavaud, M. (*1966) : Géologie du SO-Niger- L'environnement géologique dans l'ouest du Niger.*

Gavaud, M. *(1986) : Les recherches réalisées par l'ORSTOM sur les sols Africains.*

Girard, P*. (1993) : Techniques isotopiques (15N, 180) appliquée à l'étude des nappes des altérites et du socle fracturé de l'ouest Africain. Etude de cas : l'ouest du Niger.*

Gnamba, F, M., Oga, Y, M .S., Gnangne, T ., Lasm, T., Kouakou, Y,K*.(2014) : Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléo protérozoïque de la région de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire) .*

Greigert, J. *(1961) : République du Niger. Carte géologique de reconnaissance du Bassin des Iullemeden 1:1 Mio. BRGM, Niamey, Niger.*

Greigert, J*. (1978) : Atlas des eaux souterraines du Niger, Tome 1.*

Grégoire, J, M et al. *(2003) : Caractérisation de la dynamique des feux et de l'évolution du couvert dans le Parc du W : Burkina Faso, Bénin et Niger.*

GÉOHYDRAULIQUE. *(1981) : Méthode d'étude et de recherches de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'ouest (volume 3) ; Atlas de Photo-Interprétation.*

Halilou, H. *(2009) : Estimation des valeurs des biens et services produits par les aires protégées : Cas du Parc Régional W du Niger, mémoire, 102p.*

Halilou, H. *(2009) : La réserve de Biosphère transfrontalière du W (RBT/ W), (Bénin, Burkina Faso et Niger)*

Halidou, O, M. *(2009) : Planification et gestion intégrée des ressources en eau dans la réserve de Biosphère de W du Niger*

HYDROCONSEIL*. (2016) : Etude de la situation de référence et acquisition de données concernant la gestion intégrée des ressources en eau du bassin de la Mékrou, 83 p.*

HCP*. (2008) : Evaluation finale et prospective du Parc Régional Parc W/ECOPAS, Rapport définitif.*

Idé, O, A. *(2000) : La préhistoire dans la vallée de la Mékrou (Niger méridional) .Etude Nigérienne 58.Niamey IRSH, Nouakchott.*

Idé, O, A. *(2006) : Conservation et Développement du Patrimoine. Le Parc National du W du Niger (PNWN) : Une équation complexe.*

INS. *(2012) : Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2012,Niger.*

Issoufou , M. *(2018) : Evolution de l'occupation des sols dans la partie Nord du Dallol Bosso, départements de Filingué et Balleyara, région de Tillabéri-Niger .*

Jacobus, J. de Vries - Ian Simmers*. (2002) : La recharge des nappes phréatiques : un aperçu des processus et des défis à relever.*

Kattiellou, G, L., Maurizio, B., Moussa, M*. (2014) : Caractérisation climatique de la région de Tillabéri.*

Kouassi, M ,A., Ahoussi, E,K. ,Koffi,B,Y. , Ake ,Y, A.,Biemi,J. (2012) : *Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire) .*

Kombi. A. Boubacar. *(2004) : Présentation du site du Patrimoine mondial de l'UNESCO (Parc W du Niger), contribution à la formation des gestionnaires du site SENEGAL du 30 avril au 31 mai 2004.*

Lachassagne P.et al. *(2015) : Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques.*

Lachassagne P.et al. *(2005) : Eau souterraine, Revue HydroScience, N°25*

Lamarque, F. *(2004) : Dynamique des brûlis dans le Parc Régional du W, le Parc National de la Boucle de la Pendjari et la Reserve d'Arly.*

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) ,Elsevier, journal of Hydrology 188-189 (1997) 123-138,ORSTOM (France).*

Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P*. (2001): Reply to comment on long-term rise in a sahelian water table: the continental terminal in south west Niger. Journal of Hydrology 243, 43-54.*

Lompo, O*. (2005) : Dynamiques et enjeux de la gestion participative à la périphérie du parc régional W cas dans la zovic de kabougou / Burkina Faso. Mémoire de DEA, Université d'Abomey calavi/UAC, Faculté des lettres arts et sciences humaines /flash, 169 p.*

Lungren, Clark*., Bouché, Philippe. (2006) : Identification des sites d'aménagement des points d'eau pérennes le long des axes touristiques préferentiels du Parc régional du W, Rapport version finale 77 P.*

Lungren, Clark*., Lungren, Derek., Legma, Martin. (2013): Etude sur 5 sites d'aménagement hydraulique dans le Parc regional du W, secteur du Niger (Moussiemou, Moussa Kwara, Gnyafarou, Tapoa pont et Tapoa seuil) , 20 P.*

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». Mémoire du BRGM N°82, Éditions BRGM, Paris, ,167 p.*

MacDonald,A ,M and J Davies*. (2000): A brief review of groundwater for rural water supply in Sub-Saharan Africa.*

***MCD**. (1992) : L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest, Ministère de la coopération et du développement, 149p.*

***Mainassara, I**. (2010) : Ressources en eau dans la région de Tillabéri (Sud-ouest Niger) et leur potentiel de mise en valeur par l'agriculture irriguée.*

***Manceron, S**. (2011) : Intervenir en périphérie pour la conservation des aires protégées : réexamen d'un postulat, la situation du Parc du W et des éleveurs mobiles.*

***Martelat, A ., Foucher, J-C., Lachassagne P., Pauwels, H** . (1997): Processus de dénitrification au sein d'un aquifère de socle (schistes à pyrites) : caractérisation de fonctionnement hydrogéochimique à l'échelle locale dans le cadre d'un petit bassin versant breton. IAHS pub.no 241, pp 29-35.*

***Massuel, S**. (2005) : Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest du Niger. Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003.*

***Massuel, S.** (2006) : Calcul de l'ETP Penman Monteith à différents pas de temps sur quatre sites du haut Bassin de l'Ouémé.*

***M. A. Carrier et al**. (2011): Hydrogeological Assessment Project of the northern regions of Ghana (HAP), Final Technical report.*

***Machard DE Gramont H.** (2010) : Vers une gestion concertée des systèmes aquifères transfrontaliers.*

***Monfort, M** (1997) : Etude des relations entre les aquifères du Continental Terminal au Nord de Niamey (Niger). Approche géologique, géochimique et hydrodynamique.*

***Molson, J.** (2018) : Cours de Modélisation en hydrogéologie, GGL-7202 (Inédit).*

*Ministère de l'environnement, de la salubrité urbaine et du développement durable **(MESU/DD).** (2015) : Projet de réhabilitation des points d'eau dans la Reserve de Biosphère de W du Niger.*

***Michelot, A**. (2009) : Aires Protégées transfrontalières : Le cadre juridique de la réserve de biosphère transfrontalière du W (Bénin, Burkina Faso, Niger)*

***Ministère de l'eau, de l'environnement et de la lutte contre la désertification**. (2012) : Rapport journée mondiale des zones humides ,02 février 2012, Tapoa (Parc Régional W du Niger).*

Ministère de l'Hydraulique et de l'Environnement. *(2011) : Etat de la connaissance et la gestion des eaux souterraines au Niger ; RAF 7011.Gestion intégrée et durable des ressources en eau en Afrique axée sur les États membres de la région du sahel.*

Ministère de l'eau, de l'environnement et de la lutte contre la désertification*. (2010) : Stratégie nationale et plan d'actions pour la conservation durable des éléphants au Niger.*

Ministère de l'Hydraulique, de l'environnement et de la lutte contre la désertification*. (2005) : Cadre national de Biodiversité.*

Ministère des Mines et de l'Hydraulique*. (1976) : Mission OFREMIG. Coupe de sondage.*

Ministère de l'Economie Nationale*. (1964) : Bilan sommaire des études d'hydrologie de surface effectuées sur le territoire de la République du Niger.*

Napo, Boureima*. (2007) : Localisation et caractérisation des aquifères discontinus du Burkina Faso par la méthode géoélectrique des résistivités*

Ndiaye, P. *(2014) : Renforcer l'efficacité et catalyser la durabilité du système des aires protégées du W-Arly-Pendjari (WAP), Rapport.*

Namori,Keita*. (2006) : Programme Kandadji de Régénération des écosystèmes et de Mise en valeur de la vallée du Niger; Etude d'impact environnemental et social détaillée, Rapports Sectoriels ; 05-13489****.***

Oumarou, A. et al*. (2001) : Bilan et Analyse des aspects Hydro-Environnementaux, Ecologiques et socio-économiques du bassin du fleuve Niger au Niger.*

Olivry, Jean Claude. *(2002) : Synthèse des connaissances Hydrogéologique et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger.*

Oga, M, S., Gnamba, F, M., Lasm, T., Gnangne, T., D. Baka, D., Soro, N., Biemi, J. *(2010) : Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de Katiola (Centre-nord de la Côte d'Ivoire).*

Ousmane, B. et al. *(2010) : Etude préliminaire de la pollution bactériologique des eaux des aquifères discontinus du socle du département de Téra /Liptako nigérien, Afrique Science, Revue internationale des sciences et Technologie.*

Ousmane, B. *(2011) : Cours de Géochimie isotopique (inédit).*

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). *(2015) : Atlas des cartes d'occupation des sols, Niger.*

Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). *(2016) : OSS_occupation_sols_30 m _2014_2015_Niger_2016.*

ORSTOM. (*1966) : Étude pédologique du Niger occidental. Rapport général, Tome II*

PAPE*. (2013a): Inventaire des espèces rares de l'écosystème W Arly Pendjari, version provisoire, 20p*

PAPE. *(2014) : Plan d'Action d'Urgence de Lutte Contre le Braconnage (PAULAB), version finale, UEMOA, Ouagadougou, 35 p.*

PAPE. *(2014) : Plan d'Action pour la Conservation des Grands Carnivores au niveau du complexe WAPO, version définitive, UEMOA, Ouagadougou, 48 p.*

PAPE*. (2014b): Stratégie pour une pêche durable dans le complexe WAPO, Atelier Pêche dans le complexe WAPO, version définitive, UEMOA, Ouagadougou, 18 p.*

PAPE. *(2014) : Schéma Directeur Régional d'Aménagement et de Gestion concertée du Complexe WAPO (2014 – 2033). 117 p*

PAPE. *(2014) : Rapport de présentation : Bilan de réalisations des composantes 1, 2,3 du programme.*

PAPE*. (2014) : Inventaire des grands carnivores de l'écosystème W-Arly-Pendjari 2014.*

PAPE*. (2016) : Plan d'Aménagement et de Gestion du W Burkina 2016-2025, Version finale, 170 p.*

PAPE. *(2016) : Rapport d'évaluation de la mise en œuvre du Plan d'Aménagement et de Gestion de la RBTW, Bureau d'Etudes ACDD, Cotonou, 101.p*

PAPE*. (2016) : Rapport synthèse des principales insuffisances et lacunes des PAG/W nationaux existants, Bureau D'études ACDD, Cotonou, 10p. + Annexe*

PAPE*. (2016) : Proposition d'inscription du Complexe W-Arly-Pendjari, extension du Parc National du W au Niger, Ouagadougou, 116p.*

PAPE*. (2016) : Plan d'aménagement et de Gestion de la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W/ Burkina Faso 2016-2025, Ouagadougou, BF, 170 p*

Programme Parc W / ECOPAS*. (2001) : volet recherche.*

***Programme Régional Parc W / ECOPAS**. (2005) : Plan d'aménagement et de gestion de la Reserve de Biosphère Transfrontalière W-2006-2010, Volume 1 : Etat des lieux.*

***Programme Régional Parc W / ECOPAS**. (2008) : Résultats du Programme Parc W / ECOPAS, période 2001-2008.Présentation pour la restitution du 27 juin 2008.*

***Rabeil, T**. (2003) : Distribution potentielle des grands mammifères dans le Parc du W au Niger, Thèse, 451 p., disponible sur :*

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006931.

***Sandao, I.** (2011) : Notes de Cours UE 705. Essais de pompage dans les puits et forages d'eau.*

***Sandao, I. et al.** (2015): Ground water suitability for irrigation in the Korama Basin, Southern Zinder, Niger.*

***Saidou, S.** (2006). Etude de l'évolution du front agricole dans la Biosphère du Parc W et impacts sur la fertilité et pratiques de gestion de la fertilité des sols.*

***Siddo, S.** (2007) : Gestion des ressources naturelles des aires protégées : utilisation des produits de la télédétection pour le suivi des surfaces brûlées et des domaines vitaux des buffles dans le parc régional du W.*

***Santé Canada. (**1979) **:** Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique – la dureté*

***Toko, I et Sinsin, B.** (2008) : Les phénomènes d'érosion et d'effondrements naturels des sols (dongas) du Parc national du W et leur impact sur la productivité des pâturages.*

***Touré, A.** (2016): Impacts of climate change and population growth on groundwater resources: case of Klela basin in Mali, West Africa.*

***Thérrien , R**. (2016) : Notes de cours Hydrogéologie GGL 2600 (U. Laval).*

***UICN**. (2009) : Evaluation de l'efficacité de gestion du Parc National du W, Enchancing Our Heritage (EOH).*

***UICN**. (2010):Parcs et Réserves du Niger : Evaluation de l'efficacité de gestion des aires protégées.*

***UNESCO**. (2016) : Complexe W-Arly-Pendjari, Extension du Parc national du Niger, 2016.*

***UNESCO**. (2004): Managing shared aquifer resources in Africa.*

***USGS**. (2017a) : Étude de cas. La Réserve de biosphère transfrontière W-Arly-Pendjari. En Afrique de l'Ouest: Dynamique de l'utilisation et de la couverture des sols.*

***USGS**. (2017b). Climat en Afrique de l'Ouest: Dynamique de l'utilisation et de la couverture des sols.*

***VASSOLO S et al**. (2015) : Caractérisation des eaux souterraines de la région de Niamey, Niger.*

***WAP**. (2012) : Inventaire aérien de l'écosystème W-Arly-Pendjari, mai-juin 2012, version définitive, 39 p.*

***WAP.** (2013) : Mission d'évaluation finale Projet Régional WAP (W-Arly-Pendjari), version provisoire, 108 p.*

***WAP.** (2016) : Plan d'aménagement et de gestion du bloc transfrontalier*

W (2017-2026).

***Yves, Emsellem., Michel, Detay., Didier, Gaujous., André, Benamour**. (2015) : L'Hydraulique villageoise en Afrique subsaharienne (1968-1980).*

***Zouri, I.** (2003) : Impacts des pratiques pastorales sur la végétation de la périphérie du parc du w. Mémoire de fin d'étude pour de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Développement Rural. Université polytechnique de Bobo-dioulasso (UPB) et ECOPAS / Burkina Faso, 88 p.*

Lien réseau hydrographique : http://download.geofabrik.de/ Africa /niger.html

ANNEXES

Tableau 19:Nombre total de points d'eau sur les trois composantes (Rabeil, 2003)

Composantes	Localisation	Total	Période d'assèchement du point d'eau				Total
			déc.	jan	fév.	mars	à sec
Niger							
Points d'eau vérification,	A l'intérieur du Parc W	12		1		2	3
Année 2003	Zone périphérique	3	3				3
Total 2003		**15**	**3**	**1**		**2**	**6**
Bénin							
Points d'eau vérification,	A l'intérieur du Parc W	11		2		1	3
Année 2003	Zone périphérique	11	1	1	2	1	5
Total 2003		**22**	**1**	**3**	**2**	**2**	**8**
Burkina Faso							
Points d'eau vérification,	A l'intérieur du Parc W	16	2	3	3		8
Année 2003	Zone périphérique	3					
Total 2003		**19**	**2**	**3**	**3**		**8**

Tableau 20: Liste d'étude réalisées dans le cadre du projet ECOPAS, sur les parcs du complexe W -Arly -Pendjari (WAP) et dans le cadre du programme d'appui aux Parcs de l'entente (PAPE)

Source	Année	Titre
ECOPAS	2004	Plan d'Aménagement et de Gestion de la Réserve Transfrontalière de la Biosphère W - 2006-2010, Rapport provisoire, Volume III : Stratégie, Août 2004, 52 p.
		Plan d'Aménagement et de Gestion de la Réserve Transfrontalière de la Biosphère W – 2006-2010, Rapport provisoire, Volume II : Mise en œuvre du PAG, Août 2004, 36 p.
ECOPAS	2005	Système de suivi-écologique pour le Parc Régional du W – Composante Niger, Rapport final, 19 p.
ECOPAS	2006	Rapport d'activités, version finale, 2006, 101p
ECOPAS	2007	Mission d'évaluation finale Projet Régional WAP (W-Arly-Pendjari), version provisoire, 80 p.
ECOPAS	2008	Accord relatif à la gestion concertée de la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W, 15 p.
		Schéma Général d'Aménagement pour la Sécurisation des Habitats et des Parcours de la Faune du Parc Régional du W, version finale,
		Système de suivi-écologique pour le Parc Régional du W- Les paramètres et les protocoles de travail, Ouagadougou, 25 p.
		Manuel de gestion du Parc Régional W du W, 192 p.
WAP	2012	Inventaire aérien de l'écosystème W-Arly-Pendjari, mai-juin 2012, version définitive, 39 p.
WAP	2013	Mission d'évaluation finale Projet Régional WAP (W-Arly-Pendjari), version provisoire, 108 p.
PAPE	2013a	Inventaire des espèces rares de l'écosystème W Arly Pendjari, version provisoire, 20p
PAPE	2014	Schéma Directeur Régional d'Aménagement et de Gestion concertée du Complexe WAPO (2014 – 2033). 117 p
		Plan d'Action d'Urgence de Lutte Contre le Braconnage (PAULAB), version finale, UEMOA, Ouagadougou, 35 p.
		Plan d'Action pour la Conservation des Grands Carnivores au niveau du complexe WAPO, version définitive, UEMOA, Ouagadougou, 48 p.
PAPE	2014b	Stratégie pour une pêche durable dans le complexe WAPO, Atelier Pêche dans le complexe WAPO, version définitive, UEMOA, Ouagadougou, 18 p.
PAPE	2016	Plan d'Aménagement et de Gestion du W Burkina 2016-2025, Version finale, 170 p.
		Rapport d'évaluation de la mise en œuvre du Plan d'Aménagement et de Gestion de la RBTW, Bureau d'Etudes ACDD, Cotonou, 101.p
		Rapport synthèse des principales insuffisances et lacunes des PAG/W nationaux existants, Bureau D'études ACDD, Cotonou, 10p. + Annexe
		Plan d'aménagement et de Gestion de la Réserve de Biosphère Transfrontalière du W/ Burkina Faso 2016-2025, Ouagadougou, BF, 170 p
		Proposition d'inscription du Complexe W-Arly-Pendjari, extension du Parc National du W au Niger, Ouagadougou, 116p.

Photo 10:Damalisque (Damaliscus korringum) à gauche et Hippotrague à droite dans le Parc W du Niger (UNESCO,2016)

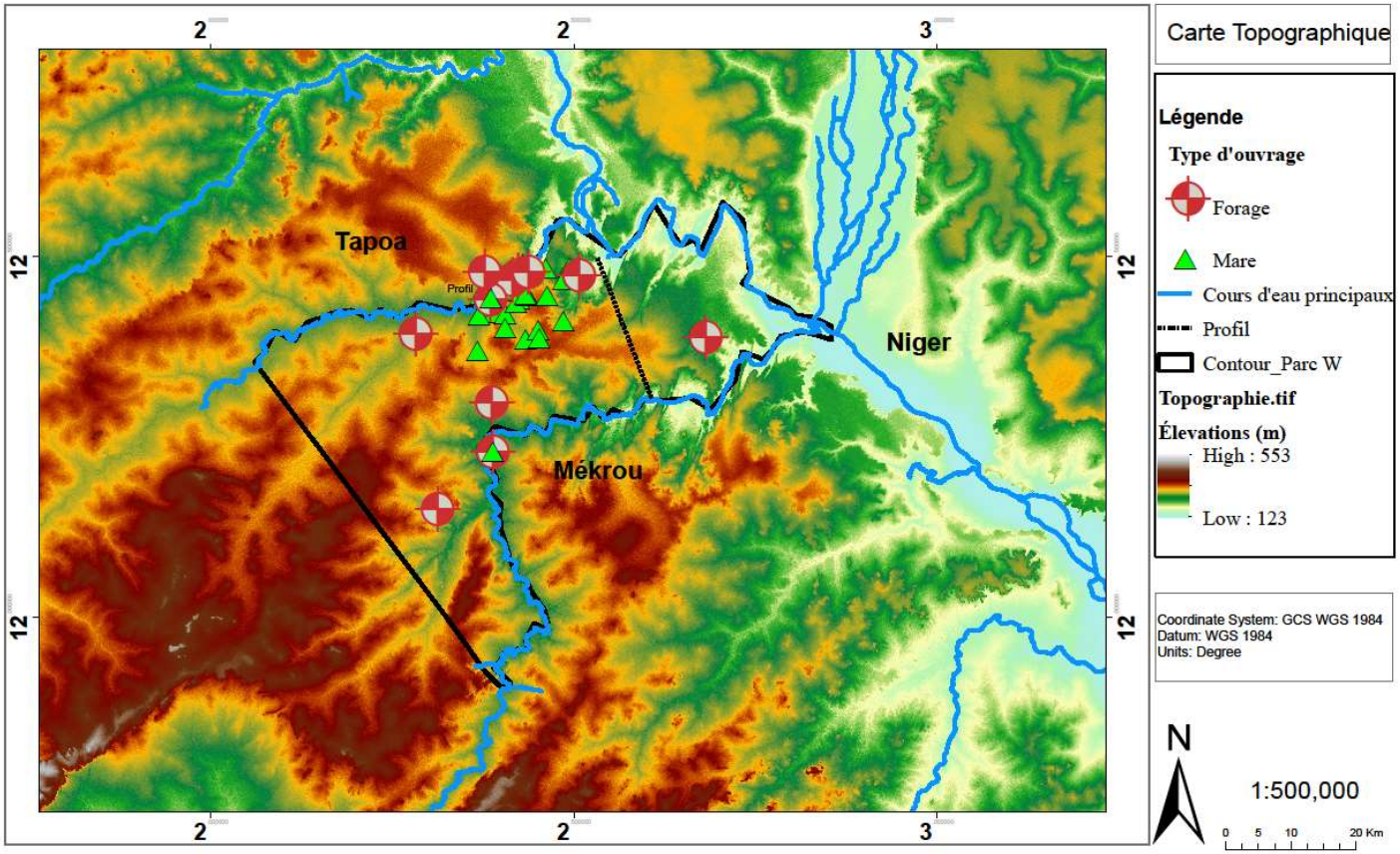
Photo 11:Cobe de Buffon à gauche, Cobe de Défassa à droite (Rabeil, 2013)

Photo 11:Mare de Moussa koira à gauche et ravinement causé par l'érosion à droite, Parc W (images prises lors de la mission ,2017)

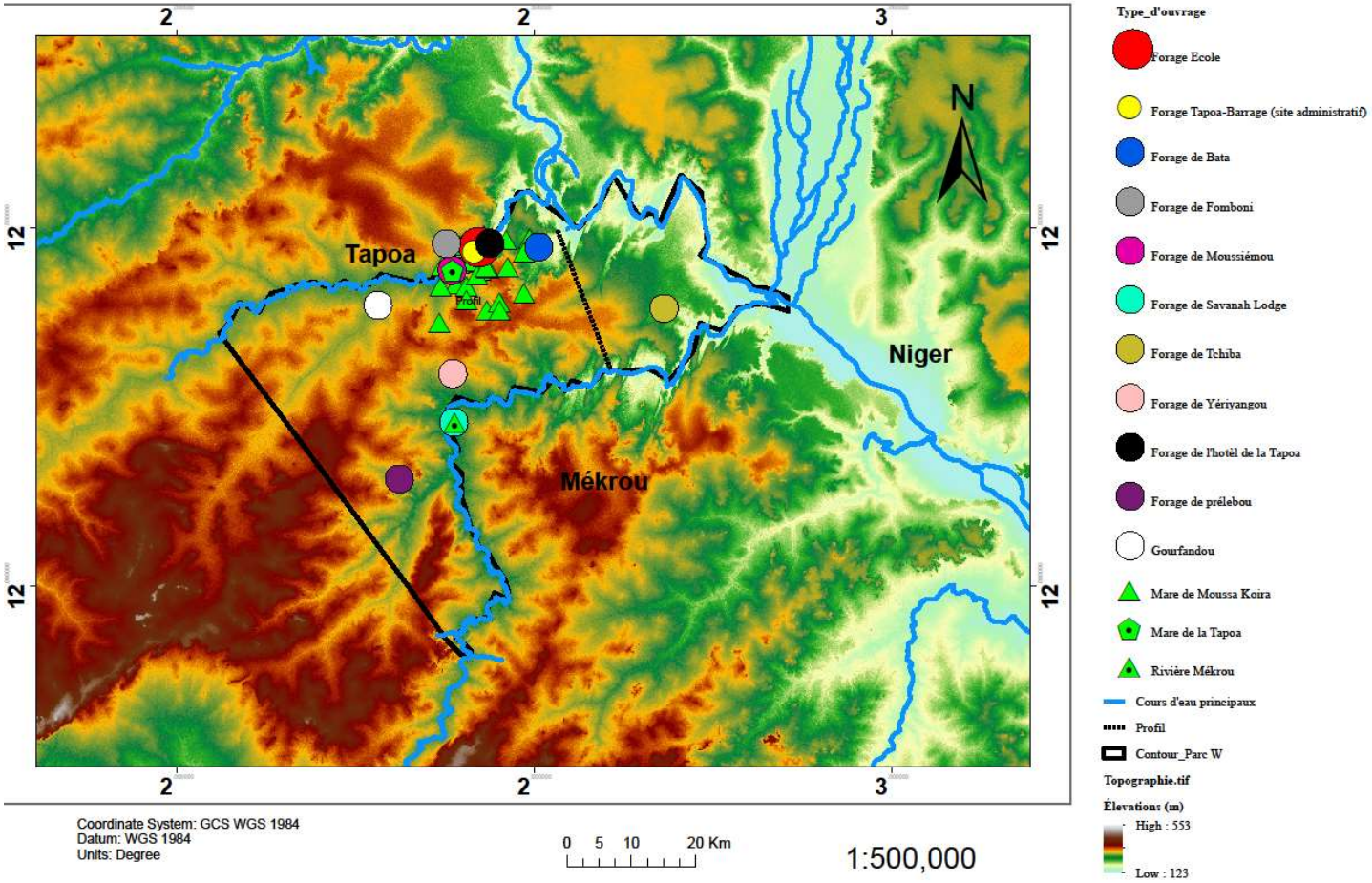
Photo 13: Equipements défectueux et panneaux solaires désinstallés

Photo 14:Baobab et gorge de la Tapoa à droite (Mission terrain.2017)

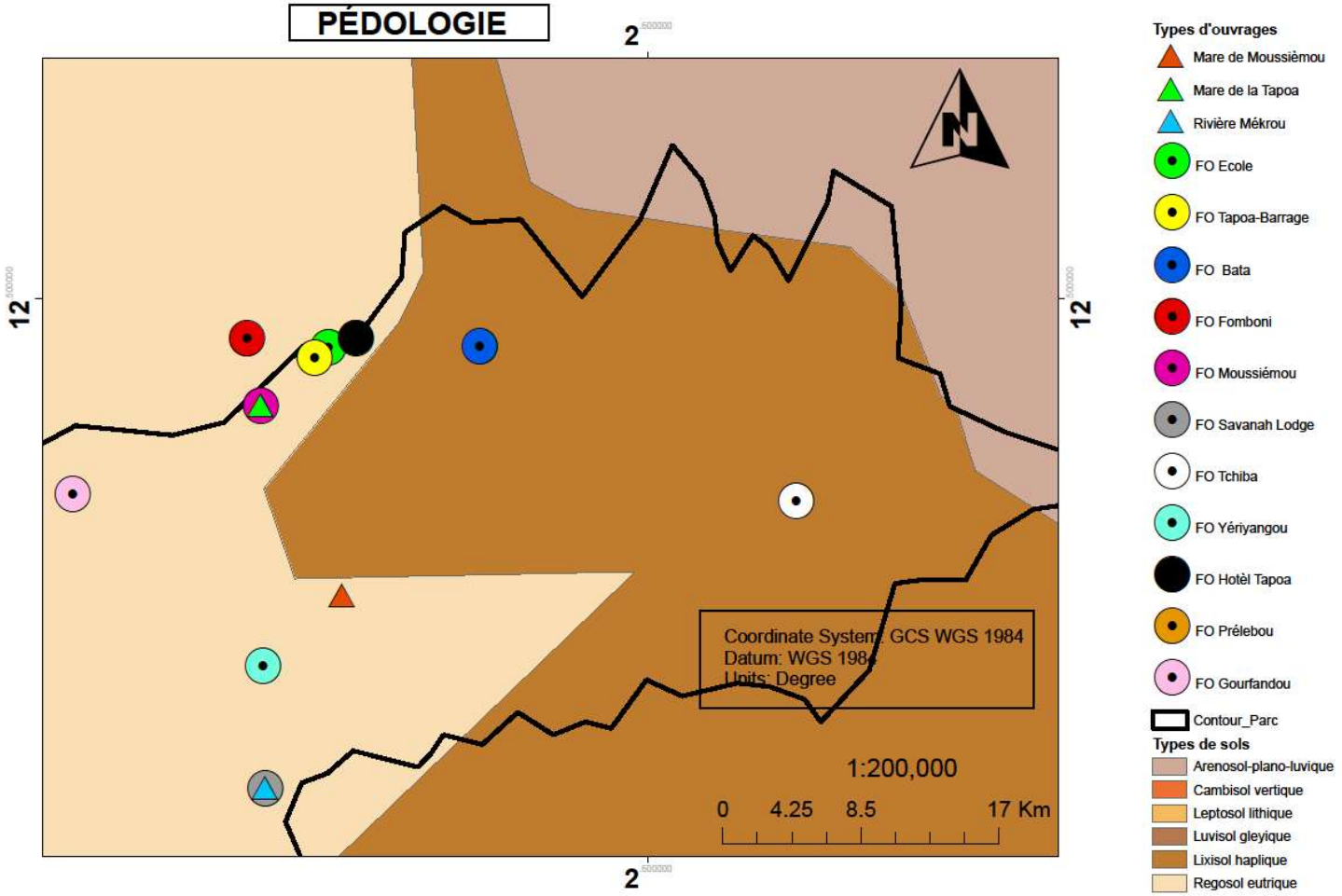
CARTES DE LA RÉGION D'ÉTUDE



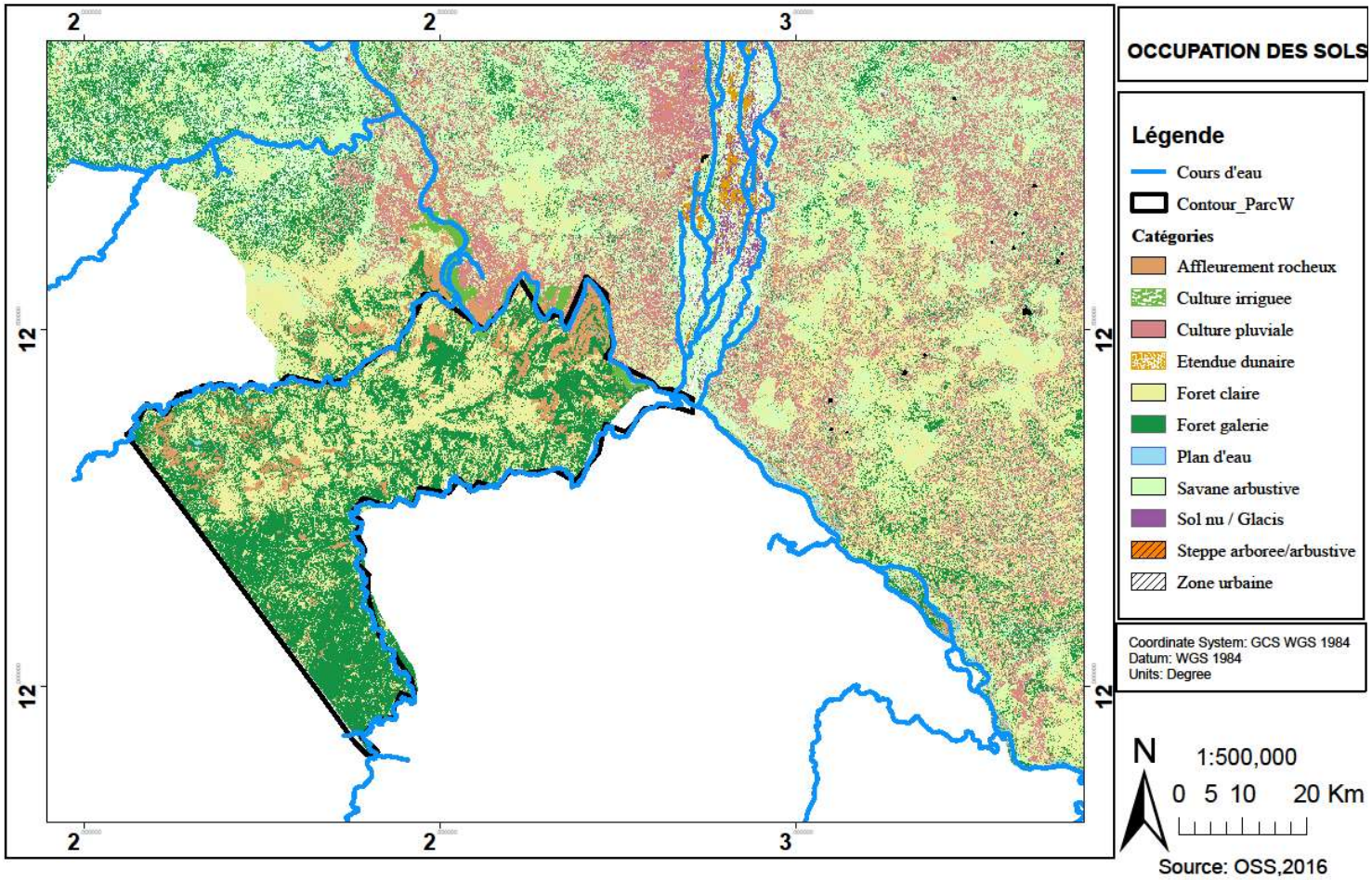
Carte 2 : topographie du Parc W du Niger (Source de données de la NASA)



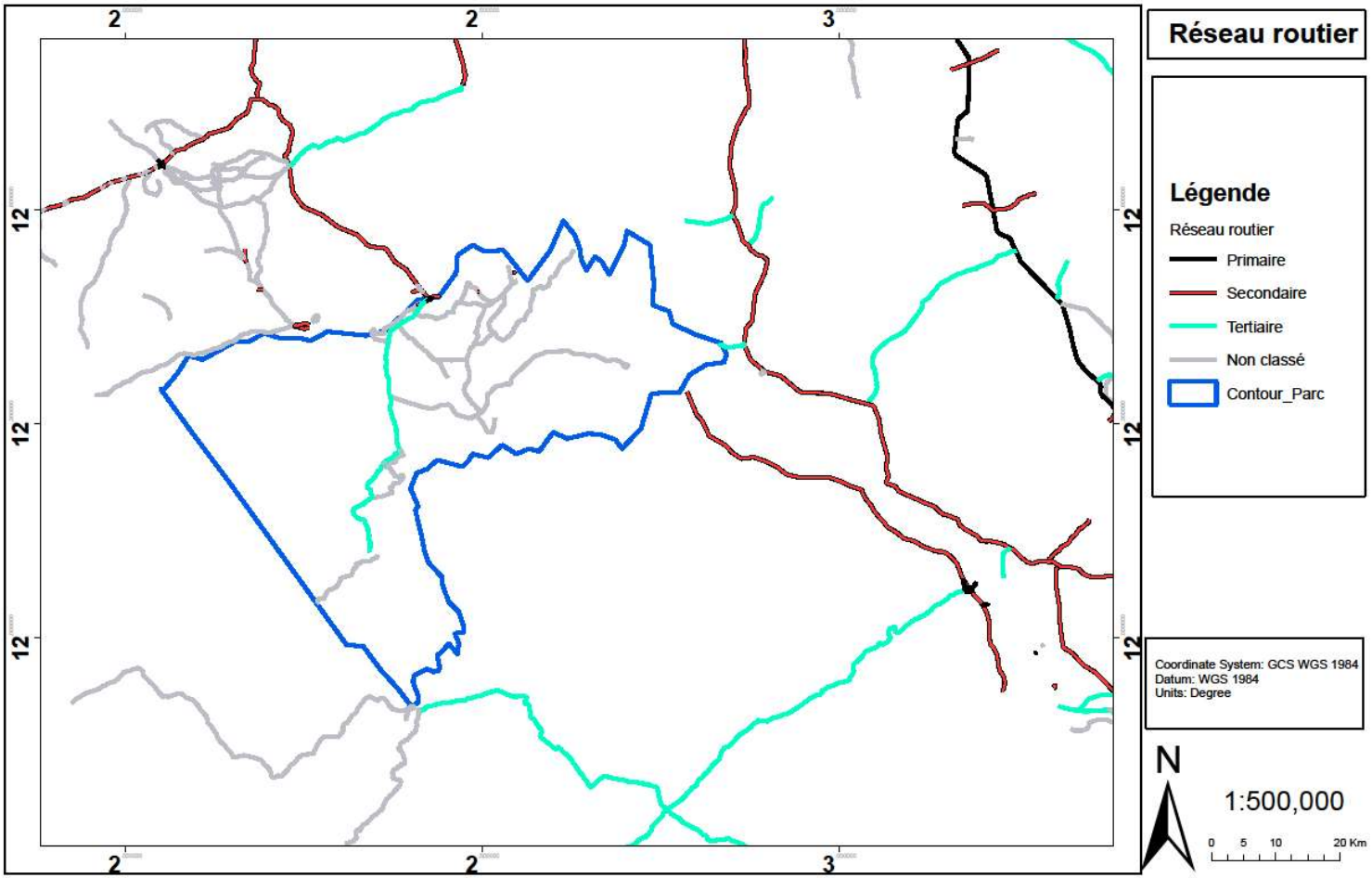
Carte 3: hydrographie et points d'eau à l'intérieur de Parc W du Niger



Carte 4: Pédologie du Parc W du Niger



Carte 5: Occupation des sols



Carte 6: Réseau routier à l'intérieur de Parc W du Niger