

Projet : Développement de synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologique de la zone Nord et Est du Burkina Faso

VILLES CONCERNEES : BOUROUM, BOURZANGA, DEOU, DJIBO, DORI, FADA, GORGADJI, TITAO

Rapport final version définitive

FINANCEMENT : RVO

OCTOBRE 2021

TABLE DES MATIERES

	Page
SIGLES ET ABREVIATIONS	3
LISTE DES FIGURES	4
I. CHAPITRE I : INTRODUCTION.....	6
I.1. Contexte.....	6
I.2. Les experts.....	6
I.3. Calendrier.....	6
I.4. La zone d'étude.....	7
I.5. Activités.....	8
CHAPITRE II : COLLECTE ET ACCESSIBILITE DES INFORMATIONS.....	10
II.1. General.....	10
II.2. Données de forages.....	10
II.3. Rapports et documentation.....	11
II.4. Cartes et images.....	11
II.5. Visites sur le terrain.....	12
II.6. Stockage de l'information.....	12
II.6.1. Données de forages.....	12
II.6.2. Documentation.....	12
II.6.3. Données numériques SIG.....	13
III. CHAPITRE III : ANALYSE DES INFORMATIONS COLLECTEES.....	14
III.1. Caractéristiques physiques générales.....	14
III.1.1. Climat.....	14
III.1.2 : La Pédologie.....	15
III.1.3 Géologie.....	16
III.1.4 : Topographie et hydrographie.....	18
III.1.5. Hydrogéologie générale.....	19
III.2. Forages.....	20
III.2.1. Taux de couverture des centres.....	20
III.2.2. Analyse statistique des données de forages.....	20
III.2.3. Statistiques descriptives.....	22
III.3. Traitement de données magnétiques : cartes de fracturation.....	23
III.4. Autres données d'entrées.....	25
IV. CHAPITRE IV : L'ANALYSE MULTICRITERE	26
IV.1. Approche générale.....	26
IV.2. Détails de l'approche.....	27
IV.2.1. Sélection des critères.....	27
IV.2.2. Détermination des poids.....	27
IV.2.3. Classification des valeurs des critères.....	29
IV.2.4. Attribution des scores aux classes.....	30
IV.2.5. Traitement et rasterisation des cartes de base.....	30
IV.2.6. Calcul de l'indice de formabilité.....	30
IV.2.7. Classement des indices de favorabilité en 3 catégories.....	30
IV.2.8. Validation des trois zones de favorabilité avec les forages existants.....	31
IV.3. Taux d'exploitation de l'eau souterraine.....	33

IV.4. Zones de recherche	33
V. CHAPITRE V : EXPLOITATION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES	37
V.1. Introduction	37
V.2 Eau souterraine et recharge	37
V.5 Conclusions	42
VI. CHAPITRE VI : RECOMMANDATIONS POUR L'IMPLANTATION DE FORAGES UTILISANT LA GEOPHYSIQUE.....	43
VI.1. Approche générale et plan étape par étape	43
VI.2 Introduction générale sur les méthodes géophysiques.....	45
VI.3. Méthodes géophysiques	49
VI.4. Mise en œuvre des travaux géophysiques.....	51
VII. CHAPITRE VII : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	56
ANNEXES	63

SIGLES ET ABREVIATIONS

Sigle	Signification
AEP	Approvisionnement en Eau Potable
AHP	Analytical Hierarchy Process
BERA	Bureau d'Études et de Recherches Appliquées (Eau et Environnement)
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina
DEIE	Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
GIS	Geographic Information System
MEA	Ministère de l'Eau et de l'Assainissement
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ONG	Organisations Non Gouvernementales
PDI	Personnes Déplacées Internes
PTF	Partenaires Techniques et Financiers
PV	Procès-Verbal
RVO	Netherlands Enterprise Agency
SIG	Systèmes d'Information Géographique
TdE	Taux d'Exploitation
TdR	Taux de Recharge
TDR	Termes De Référence
TOR	Terms Of Reference
UNICEF	United Nations Infant and Children's Emergency Funds
WASH	Water, Sanitation and Hygiene

LISTE DES FIGURES

.....	7
Figure 1.2: Localisation des villes	7
Figure 1.1: Localisation du Burkina Faso	7
Figure 3.1. Les zones climatiques du Burkina Faso.....	14
Figure 3.2: Carte géologique et minière du Burkina Faso	17
Figure 3.3: Coupe transversale d'un socle cristallin.....	19
Figure 3.4: Forages BD BUMIGEB dans la zone étudiée	21
Figure 3.7: Carte linéamentaire du bassin versant de Dori - Gorgadji.....	24
Figure 4.1: Box plot des poids déterminés par les experts de l'équipe UNICEF / RVO	28
Figure 4.2: Carte de Déou avec les zones et favorabilité et les taux d'exploitation.....	31
Figure 4.3 : Zone de recherche 1 (ZdR1) de Déou	34
Figure 5.1 : Hydrogramme des eaux souterraines et histogramme des précipitations quotidiennes observées	39
Figure 5.2: Pénurie d'eau par sous bassins au Burkina Faso (J. Groen, 2021).	40
Figure 6.1: Exemple de modèles conceptuels et d'ajustement dans les données de résistivité.....	48
Figure 6.3 Concept of recharge and aquifer systems zone Sahel.....	52
Figure 6.4: exemple d'emplacements suggérés de profils et de sondages	53
Figure 6.5 Exemple de modèles ERT avant 2D et 1 HEP (modèle généré à partir de l'ERT Wenner) à partir d'un concept hydrogéologique généralisé du Burkina Faso	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Liste des villes objet de l'étude	7
Tableau 1.2: Nombre de PDI (fourni par UNICEF) et calcul du taux d'approvisionnement et des besoins sur la base de 23l/c/j	8
Tableau 2.1: Liste des bases de données	11
Tableau 3.1: Caractéristiques des zones climatiques du Burkina Faso.....	14
Tableau 3.2: Taux de desserte des centres (INO 2020)	20
Tableau 3.3: Distribution des ouvrages par classe de débit par zone.....	23
Tableau 4.1: Exemple de sondage AHP avec 5 critères.....	28
Tableau 4.2: Poids, classes et scores pour l'analyse multicritère	29
Tableau 4.3: Validation des zones de favorabilité avec les débits des forages (Données DEIE)	32
Tableau 4.4: Besoin en eau dans les zones d'étude	34
Tableau 4.5: Caractéristique des zones de recherche.....	36
Tableau 5.1: Exploitabilité des eaux souterraines en fonction de la recharge	40
Tableau 5.2 Calcul de la capacité de recharge	41
Tableau 6.1 Aperçu des méthodes géophysiques et leur application.....	50

LISTE DES ANNEXES (EN FICHIERS SÉPARÉS)

Annexe 1.1:	Termes de référence (révisé)
Annexe 2.1 :	Rapport visite de Dori
Annexe 2.2 :	Rapport visite de Fada
Annexe 2.3 :	Rapport visite de Kaya
Annexe 3.1	Cartes de structures sur la base des données magnétiques aériennes
Annexe 4.1 :	Résumé des études de cartographie des eaux souterraines existantes à l'aide d'une analyse multicritère.
Annexe 4.2 :	Les cartes de favorabilité avec zones de recherche indiquées.
Annexe 6.1	Méthodologie et instrumentation géophysiques
Annexe 6.2	Rapports de liste de contrôle

I. CHAPITRE I : INTRODUCTION

I.1. Contexte

L'UNICEF coordonne, avec le Ministère de l'Eau et de l'Assainissement (MEA) du Burkina Faso, le Cluster WASH depuis 2019. En 2020, le Cluster WASH de l'UNICEF a indiqué que le manque de connaissances en hydrogéologie est une raison majeure pour laquelle les interventions de la de nombreuses ONG du secteur de l'eau au Burkina Faso affichent des résultats décevants. Ceci alors que la demande en eau a fortement augmenté en raison d'un afflux de déplacés dû à la détérioration des conditions de sécurité.

À la demande de soutien du Cluster UNICEF WASH Burkina Faso, RVO (acronyme de Netherlands Enterprise Agency) a engagé séparément trois hydrogéologues expérimentés des Pays-Bas dans le cadre du programme Dutch Surge Support (DSS) début janvier 2021 pour une étude hydrogéologique dans certaines régions du Burkina Faso. Voir les termes de référence (révisés) en annexe 1.

L'objectif de l'étude est d'améliorer la connaissance de l'hydrogéologie dans 8 villes où la demande en eau a fortement augmenté en raison de l'afflux de Personnes Déplacées Internes (PDI). Ceci devrait conduire à un meilleur taux de succès et à l'obtention de débits plus élevés d'une part et d'autre à une exploitation plus durable de la ressource.

Sur les conseils des hydrogéologues, l'étude est réalisée en étroite collaboration avec 2 experts d'un bureau d'études du Burkina Faso : le Bureau d'Etudes et Recherches Appliquées (BERA). BERA a été contracté séparément dans le cadre du programme de développement du secteur privé (PSD) de RVO.

I.2. Les experts

Les experts impliqués des Pays-Bas sont M. Groen, J. Groen et F. Dirks, tous trois hydrogéologues et ayant une expérience dans des projets hydrogéologiques au Burkina Faso. Les experts impliqués de BERA sont l'hydrogéologue Dr. B. Tyano et l'hydrogéologue expert en SIG R. Sanou.

I.3. Calendrier

L'étude a démarré en début janvier 2021 pour une durée de 6 mois et a été prolongée lors de sa mise en œuvre jusqu'au 31-10-2021. La réunion de lancement a eu lieu le 12-01-2021 et les réunions d'avancement ont eu lieu, via Zoom, les 04-03-2021 et 29-06-2021. Les 5 experts ont tenu des réunions de travail hebdomadaires animées par Zoom.

La date limite de soumission du rapport provisoire de l'étude (ce rapport) est le 30-07-2021. Une courte visite de 2 ou 3 des hydrogéologues néerlandais à Ouagadougou pour les ateliers finaux (pertinents pour le transfert de compétence) est provisoirement prévue pour fin août 2021.

En raison des restrictions liées à la pandémie du corona, les missions des experts néerlandais au Burkina Faso prévues au cours de l'étude n'ont pas été possibles et ont été remplacé par des réunions par visioconférence. Des problèmes de sécurité ont entravé les visites sur le terrain. Seuls Dori et Fada N'Gourma ont été visités sur les 8 centres prévus. Une visite à Kaya a été effectuée pour rencontrer la Direction Régionale du MEA du Centre Nord dont relèvent les Centres de Bouroum et de Bourzanga.

I.4. La zone d'étude.

La liste des villes faisant l'objet de cette étude est donnée ci-dessous dans le tableau 1.1. La plupart des villes sont situées au nord du Burkina Faso à l'exception de Fada N'Gourma qui est située plus à l'est de la capitale Ouagadougou. Voir la figure 1.1 et 1.2 pour la carte et l'emplacement des villes.

Tableau 1.1: Liste des villes objet de l'étude

Region	Province	Commune Departement	Population commune	Year	Population ville	Year	PDI *	Taux d'accès théorique BDD INO 2019 %
Centre Nord	Bam	Bourzanga	48545	2006	7088	2006	31125	59,8
Centre Nord	Namentenga	Bouroum	46232	2006	3115	2006	29196	54,5
Est	Gourma	Fada N'Gourma	187692	2019	73200	2019	32526	51,8
North	Loroum	Titao	104963	2019	18762	2006	23572	57,6
Sahel	Oudalan	Déou	25745	2006	8024	2003	12261	54
Sahel	Seno	Dori	180512	2019	46521	2019	42033	65,3
Sahel	Seno	Gorgadji	30630	2006	3988	2003	43651	59
Sahel	Soum	Djibo	83193	2019	61456	2019	166753	53,5

* Information Cluster WASH, M.R., 02-2021)



Figure 1.1: Localisation du Burkina Faso

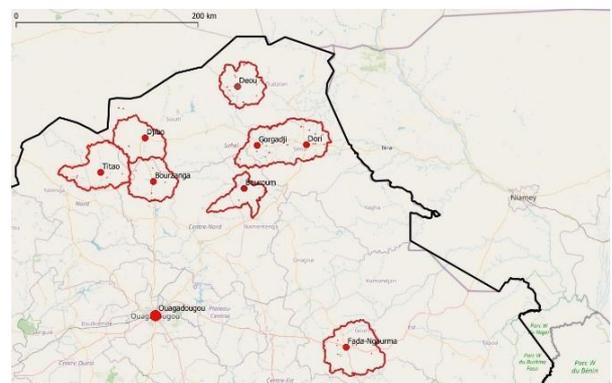


Figure 1.2: Localisation des villes

Le choix des villes a été fait sur la base des raisons suivantes :

- Les villes présentent toutes des conditions hydrogéologiques difficiles ;
- Les villes montrent toutes la présence d'un grand nombre de personnes déplacées ;
- Dans les villes, l'accès à l'eau (souterraine) est limité (d'après les informations du ministère MEA) ;
- Il n'y a pas ou peu d'études sur les eaux souterraines couvrant les villes.

I.5. Activités

Le Cluster WASH de l'UNICEF a indiqué que l'étude devrait se focaliser sur le besoin en eau dans les limites de la ville car les PDI y sont principalement installés. Dans la ville de Djibo, par exemple, la Direction Provinciale de l'Eau a indiqué que le secteur 4 était plus prioritaire.

Le Cluster WASH de l'UNICEF préfère avoir des ouvrages le plus près possible des villes et de préférence dans un rayon d'au plus 15 à 20 km autour des centres-villes. Pour l'étude hydrogéologique, les limites ont été choisies plus largement et incluent les bassins versants, qui forment une limite hydrologique significative. Pour Gorgadji et Dori, les zones d'étude ont été prises ensemble car les bassins versants individuels se chevauchent (voir Figure 1.2).

Étant donné qu'aucun inventaire des installations d'approvisionnement en eau existantes dans les villes n'est prévu par la présente étude, aucune estimation de la demande totale en eau supplémentaire n'a pu être faite. Par conséquent, le tableau 1.2 est utilisé pour calculer la demande en eau dans la présente étude.

Tableau 1.2: Nombre de PDI (fourni par UNICEF) et calcul du taux d'approvisionnement et des besoins sur la base de 23l/c/j

Centre	PDI	Taux d'approvisionnement	Besoin d'eau
	(nr)	(%)	(m3/an)
Bourzanga	31125	59.8	105040
Bouroum	29196	54.5	111521
Fada	35526	51.8	143752
Titao	23572	57.6	83904
Deou	12261	54	47348
Dori	42033	65.3	122445
Gorgadji	43651	49	186890
Djibo	166753	53.5	650950

L'étude n'a pas porté sur la qualité des ressources en eaux souterraines. Dans le cadre des réalisations (implantations et forages), la qualité de l'eau doit donc toujours être vérifiée. Au Burkina Faso, les niveaux de nitrate, de fluorure, d'arsenic et d'iode (carence) dans les eaux souterraines en particulier peuvent être un problème.

La mise en œuvre du projet a été retardée en raison de i) la discussion sur la zone du projet, ii) l'obtention des cartes géologiques, iii) la lettre de recommandation du ministère et iv) l'accès au terrain.

Les visites de terrain prévues ont nécessité une lettre de recommandation du Ministère MEA qui est devenue disponible le 05-02-2021 avec l'aide du Cluster WASH de l'UNICEF. Cependant, lors de la première visite sur le terrain à Dori, il est devenu évident que la situation sécuritaire était telle que les visites dans les autres villes (à l'exception de celle de Fada N'Gourma et Kaya) n'étaient pas recommandées.

La collecte des données s'est par la suite limitée à Ouagadougou, aux 3 villes visitées (Dori, Fada N'Gourma et Kaya) et au domaine public d'Internet. Des cartes géologiques à l'échelle 1:200 000, produites par le BUMIGEB, ont été achetées par l'UNICEF à la demande des consultants et sont devenues disponibles sous forme numérique le 15 avril 2021 avec l'aide de BERA.

Au cours de l'étude, les experts ont pris connaissance des études prévues financées par la Banque Mondiale (BM) dans le cadre du Programme d'Approvisionnement en Eau et d'Assainissement (PAEA). Une réunion zoom a également été organisée avec des représentants du projet RESOB (IRD, Aquaforall, a.o.) pour s'informer sur les activités menées.

Structure de ce rapport

On discerne généralement deux phases dans les études d'implantation de forages:

Phase 1.

Délimitation des zones favorables à l'aide des données existantes, des cartes, des données de télédétection, des enquêtes de reconnaissance régionales. De nos jours, les informations sont disponibles dans un format géo référencé numérisé, ce qui permet de traiter les données dans un environnement SIG. Ce processus est mentionné analyse de superposition ou analyse multicritère (Gumma & Pavelic, 2012). Ceci est présenté plus en détail dans le chapitre 4

Phase 2.

Localisation détaillée locale à base d'identification des linéaments avec des images aériennes et satellites à haute résolution, exploration hydrogéologique de terrain et mesures géophysiques pour préciser des zones fracturées. Nous avons fourni des directives générales pour cette partie, spécialement pour l'application de géophysique dans le chapitre 6.

Ce rapport comprend les chapitres suivants :

- ✓ -Chapitre 1 : Introduction ;
 - ✓ -Chapitre 2 : Collecte et présentation des données ; décrivant les données collectées et l'accès aux données sur Google Drive du Cluster WASH ;
 - ✓ -Chapitre 3 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude ; basé sur les données et la littérature existantes et complété par des informations de terrain ;
 - ✓ -Chapitre 4 : Analyses multicritères utilisant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ; description de la méthodologie en détail et des résultats ;
 - ✓ -Chapitre 5 : Durabilité de l'exploitation des eaux souterraines ; l'état de la durabilité de l'exploitation des eaux souterraines ;
 - ✓ -Chapitre 6 : Directives générales sur l'implantation des forages faisant appel à la géophysique ;
 - ✓ -Chapitre 7 : Conclusions et recommandations ;
- Annexes. (En fichiers séparés)

CHAPITRE II : COLLECTE ET ACCESSIBILITE DES INFORMATIONS

II.1. General

Cette activité consistait à rechercher les informations pertinentes et disponibles au niveau de tous les partenaires : l'Administration à travers ses services centraux et décentralisés, les PTF, les ONG et Associations.

Pour sa mise en œuvre, on a sollicité l'appui du MEA, à travers une correspondance circulaire officielle à l'intention des services.

Des visites des services ont été organisées aussi bien à Ouagadougou que dans les régions (visites terrain).

Les informations collectées sont de trois ordres : les données de forages, les rapports d'études et documentation et enfin les données numérisées en format SIG.

II.2. Données de forages

C'est auprès de trois structures que des données de forages structurées ont été obtenues : le Ministère de l'eau à travers la DEIE, le BUMIGEB et BERA.

Les informations contenues dans les bases de données de ces structures n'étaient pas homogènes entre elles notamment en ce qui concerne les caractéristiques techniques fournies (paramètres physiques, de géologie, de qualité des eaux etc.).

On pouvait aussi constater des disparités dans la saisie au sein d'une même base de données (point décimal ou virgule décimale, profondeurs mesurées en signe + ou en signes – à partir du niveau du sol, etc.). Cette situation a compliqué l'appréciation des données collectées tout comme leur regroupement et synthèse.

Au chapitre de l'Analyse des informations collectées ci-dessous nous présentons quelques statistiques tirées des données de forages du BUMIGEB.

Cinq bases de données ont été utilisées dans la présente étude. Il s'agit des bases de données ci-dessous :

Tableau 2.1: Liste des bases de données

Base de données	Structure de gestion	Types de données	Observations
INO	MEA / DEIE	Forages, AEP, latrines	Absences de données techniques sur les ouvrages. Absence de coordonnées
OMES	MEA / DEIE	Forages	Pas d'uniformisation du système de coordonnées, absence de données sur la qualité de l'eau
BEWAKO	MEA / DEIE	Forages	Pas d'uniformisation du système de coordonnées, absence de données sur la qualité de l'eau
BUMIGEB	BUMIGEB	Forages, Géologie, géophysiques	Absence de données sur la qualité de l'eau
BERA	BERA	Forages, Géologie, géophysiques	

Dans certaines BD (INO, eg.), les caractéristiques techniques ne figurent pas, cependant, elles apportent des informations précieuses quant à la desserte en eau potable des localités.

De manière générale, les informations sur la qualité des eaux sont moins suivies dans les différentes bases de données.

II.3. Rapports et documentation

Dans le cadre de cette étude des informations relatives à la littérature et à la documentation ont été collectées. Il y en a qui ont spécifiquement été consultées et référencés pour les analyses, tandis que les autres sont surtout indiquées comme informations générales en rapport avec l'étude ou les localités concernées.

Les informations sont listées dans une table Excel et celles qui ont été acquises, sont stockées sur le Google Drive du Cluster WASH.

II.4. Cartes et images

Les données de cartes numérisées ont été soit téléchargées à partir de sites internet du domaine public, soit par achat auprès du BUMIGEB.

Les données numériques téléchargées sur internet concernent :

- Les données numériques de terrain modèle SRTM 1 arc seconde (résolution 30 m)
- Les images satellitaires du capteur sentinel 2:

Ces données sont téléchargeables à l'adresse : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

L'acquisition auprès du BUMIGEB a porté sur les 10 degrés carrés couvrant les huit villes cibles. Il s'agit des données numériques d'hydrogéologie et de géophysique. Concernant les données géophysiques, il s'agit des données magnétiques et spectrométriques. Les degrés carrés concernés sont: 1 Fada N'Gourma, 2 Pama, 3 Sebba, 4 Pissila, 5 Téra, 6 Dori, 7 Djibo, 8 Kaya, 9 Ouahigouya et 10 Douentza.

II.5. Visites sur le terrain

L'objectif des visites de terrain est de collecter les données déjà disponibles localement qui ne seraient pas parvenues au niveau central à Ouagadougou.

La contrainte majeure qu'a rencontrée la mise en œuvre de cette activité a été l'insécurité qui a affecté l'accessibilité de certaines zones-cibles.

Trois Directions Régionales ont été visitées sur les quatre et deux villes cibles sur les huit. Malgré la non-couverture de toutes les Directions Régionales et des villes cibles, les enseignements tirés des sorties de terrain sont édifiants :

- La concentration des acteurs dans certaines localités aux dépens d'autres affectés au même titre par les problèmes de PDI,
- Le manque de synergie d'action entre les acteurs,
- L'insuffisance des capacités logistiques (système informatisé d'archivage des informations techniques des ouvrages et de qualité des eaux d'AEP, personnel, etc.).
- Le non archivage des données techniques des ouvrages (*on comptabilise surtout les ouvrages*)

Les rapports des différentes visites de terrain sont fournis en annexe avec quelques observations terrain.

II.6. Stockage de l'information

Le stockage des informations collectées est structuré comme suit : les données de forages, les rapports d'études et documentation et enfin les données numérisées sous forme de cartes et de données SIG.

Une bibliothèque "Google Drive" a été créée par l'UNICEF pour le stockage des informations.

Le 'Google Drive' du Cluster est accessible à l'adresse suivante : <https://drive.google.com/drive/folders/13Im29jRhNUBbuPV7kyXgTuNxjn29O2C?usp=sharing>

II.6.1. Données de forages

Ces données sont stockées dans des fichiers au format Excel. On y trouve les caractéristiques techniques telles que fournies par les bases de données source. Cette démarche a pour souci de ne pas manipuler et par conséquent de respecter l'intégrité des données acquises.

II.6.2. Documentation

Les divers documents sont d'abord listés et classés par titre, date, auteurs, type, objet, et localisation dans un fichier au format Excel. De cette liste, les documents acquis sont gardés dans le "Google Drive" dans leur format d'acquisition (traitement de texte, tableur, PDF, etc.)

Des références directes sont faites à certains des documents ainsi listés.

II.6.3. Données numériques SIG

Ces données sont classées en trois dossiers :

- Un dossier couvrant l'intégralité des acquisitions auprès du BUMIGEB. A cause du volume de ce dossier il n'est disponible que sur disque amovible à l'UNICEF;
- Un dossier d'informations générales (élevations, hydrographie, pédologie, etc.). Ce dossier est disponible sur le "Google Drive";
- Un dossier propre à chacune des zones de l'étude avec : 1) carte de faisabilité, 2) carte des élévations, 3) carte géologique, 4) carte des linéaments, 5) la carte pédologique, 6) la carte hydrographique et 7) la carte des épaisseurs d'altération. Ce dossier est disponible sur le "Google Drive".

rapport année décennale sèche sur année décennale humide est de l'ordre de 2,5 à 3, tandis qu'une variation de plus de 30 % dans la durée de la saison humide peut souvent être observée comme dans toute la zone sahélienne.

Le Sahel et notamment le Burkina Faso ont connu vers la fin des années 60 jusque vers 1980 une période sèche prolongée, les isohyètes annuels se déplaçant de près de 200 km vers le nord avec plusieurs épisodes de sécheresse. Depuis le début des années 2000 on observe une nouvelle tendance avec une succession d'années sèches et d'années humides. Ainsi les isohyètes 900 mm et 600 mm sont remontées vers le nord.

En conclusion, bien que les précipitations annuelles aient tendance à remonter depuis quelques années, les variations d'une année sur l'autre restent très fortes, l'évaporation très élevée et les températures de surface ont tendance à augmenter. Ces contraintes influent considérablement sur les ressources en eau de surface et souterraines du pays.

III.1.2 : La Pédologie

Les différents types de sols rencontrés dans les zones objet de la présente étude sont les suivants :

Les sols alcalins lessivés : Ces sols couvrent la partie Ouest de Déou et plus de la moitié du Bassin versant de Dori-Gorgadji avec une extension Est-Ouest. Ces sols concernent aussi plus du tiers des sols du bassin versant de Djibo. Par contre ces sols sont peu représentés dans les bassins versants de Titao, Bourzanga et Bouroum et inexistant dans celui de Fada. Il s'agit de sols sur matériau argilo-sableux issu de granites et sont des Sols de type Halomorphes

Les Sols d'érosion : Ils sont fortement représentés dans l'ensemble des bassins versants sauf celui de Djibo. Il s'agit de lithosols. Ces sols sont sur cuirasse ferrugineuse ou sur matériel gravillonnaire

Les sols lessivés ou appauvris : On les rencontre dans les bassins versants de Titao, et Fada avec une petite présence dans la partie Sud du Bassin versant de Bouroum. Ces sols à taches et concrétions sur matériau argilo-sableux et sont de type ferrugineux tropicaux.

Les sols non grumosoliques : Ils sont très peu représentés. Rencontrés dans le Bassin versant de Fada, Déou, Dori-Gorgadji, ces sols de type nodaux ou vertiques. Ils sont sur alluvions argileuses issues de granite à amphiboles et sur matériau argileux issu de granites et migmatites ou de roches basiques variés.

Les sols non ou peu lessivés : Ils sont présents dans l'ensemble des bassins versants sauf celui de Fada. A drainage interne limité en profondeur, ils sont sur sables éoliens (erg ancien)

Les sols peu humifères à gley ou pseudogley ; Ils sont présents dans les bassins versants de Titao, Bourzanga, et Djibo. Ce sont des sols sur dépôts de colmatage argilo-sableux à argileux issus de schistes argileux (Birrimien) ou de matériau d'altération.

Les sols bruns eutrophes : On les retrouve à Fada et Bouroum. Ils sont de type vertique, sur matériau argileux.

Les sols bruns subarides : Ces sols se rencontrent dans les bassins de Déou et Dori-Gorgadji et au centre du bassin versant de Djibo. Ils sont sur sables éoliens pauvres en argile et limon (erg récent) et sur matériau argileux.

III.1.3 Géologie

La géologie du Burkina Faso (voir figure 3.2) se partage entre : (1) les terrains cristallins (socle) de la dorsale de Man- Léo, qui occupent une partie centrale de près de 225 000 km² soit environ 80 % de la superficie du pays ; (2) l'extrémité sud-ouest du bassin sédimentaire ancien du Taoudéni, qui est représentée dans le pays par le bassin sédimentaire occidental s'étendant entre Banfora et la plaine du Gondo, mais aussi au nord par la bordure sud du bassin du Gourma qui en est la continuation ; et enfin (3) le bassin sédimentaire ancien des Volta à l'est du pays.

Certaines caractéristiques de la géologie du pays sont encore mal connues, notamment par exemple du bassin sédimentaire. Toutes les zones de cette étude sont situées sur le socle cristallin.

Le socle cristallin se compose principalement de roches volcano-sédimentaires et plutoniques birimiennes et roches granitoïdes éburnéennes. Le complexe précambrien de socle d'âge archéen et birimien, est constitué de ceintures de roches volcano-sédimentaires et plutoniques birimiennes recoupées par de grands batholites de roches granitoïdes éburnéennes. Il comprend du basalte, de l'andésite, de la rhyolite, de la rhyodacite, de la dacite, des tufs felsiques, du gabbro, de la diorite, des granites, des gneiss, des schistes, des schistes, des quartzites et des roches vertes (Réf. : Castaing et al. 2003b).

La zone cartographiée est constituée par une série de formations cristallines anciennes (Antébirimien et Birimien) recouvertes en discordance du nord à l'ouest par des matériaux sédimentaires.

- *L'Antébirimien ou Précambrien D*

C'est un ensemble de roches très variées. Il est essentiellement constitué de granitoïdes (granites, migmatites) et des formations métamorphiques à degré métamorphique élevé. Les ensembles métamorphiques se rencontrent essentiellement dans les sillons birimiens. L'Antébirimien est composé par: - des gneiss; - des schistes et micaschistes; - des métagabbros et métadolérites; - des migmatites qui forment l'enveloppement des formations basiques; - des granites.

- *Le Birimien ou Précambrien C*

Le précambrien C est représenté par un groupe de formations volcaniques et volcano-sédimentaires que sont l'unité de Djibo, l'unité de Dori et des roches plutoniques de l'orogénèse éburnéenne. Les formations métavolcaniques et volcano-sédimentaires se composent de: - volcanites basiques et ultrabasiques, laves diversifiées et rarement des termes acides (rhyolites et rhyodacites); - tufs, jaspes assez circonscrites; - les métasédiments présentant un faciès tarkwaïen. Les roches plutoniques, elles sont constituées d'un complexe magmatique post-tectonique alcalin composé de granites équants à gros grains et de gabbros noritiques grenus.

Réf. : DIRH, Ministère de L'Eau, 1993: Carte Hydrogéologique Feuille Dori 1 :500,000.

La Banque Mondiale a récemment proposé des actions lesquelles prévoient une activité de reconnaissance géologique pour améliorer ces connaissances, bâtir un modèle géologique, et contribuer ainsi à une meilleure évaluation des potentiels en eaux souterraines, et en particulier de la recharge.

III.1.4 : Topographie et hydrographie

Le relief se présente comme une pénéplaine dont les altitudes oscillent entre 230 et 500m. Certaines zones à relief vigoureux émergent de cette pénéplaine : les systèmes collinaires dont les hauts reliefs coïncident avec les roches du complexe volcano-sédimentaire birimien, et les divers massifs rocheux correspondant aux principaux massifs granitiques intrusifs. L'armature du relief est en grande partie constituée par des cuirasses étagées, témoignages de modelés ou de surfaces d'aplanissement anciens, dont les vestiges diminuent à mesure que l'on remonte dans le temps.

Les classes d'altitude suivantes sont rencontrées dans les zones objet de la présente étude :

230m à 320m : Cette tranche d'altitude se rencontre dans les bassins versant de Dori-Gorgadji, Fada, Bouroum et dans la partie nord et centre du bassin versant de Djibo.

320m – 360m : Elle se rencontre dans la partie centre et sud du bassin versant de Déou, dans le bassin versant de Bourzanga et Titao, la partie nord-ouest du Bassin versant de Fada.

360m- 500m : Cette tranche d'altitude se rencontre dans les centres des bassins versants de Bouroum et Déou ainsi qu'à l'ouest du bassin versant de Titao.

Sur le plan hydrographique, les zones d'études sont situées dans deux bassins internationaux à savoir le Niger (5) et la volta (2). Les bassins versants de Titao et Bourzanga font partie du bassin national de Nakanbé qui est un sous bassin de la Volta.

III.1.5. Hydrogéologie générale

Compte tenu des informations disponibles, l'étude actuelle n'a pas d'autre possibilité d'apprécier les réserves que contiennent ces aquifères discontinus que sur les bases des rapports existants. Nous décrivons ici le tableau général de l'hydrogéologie du socle. (Réf. : Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au Burkina Faso ; Rapport de synthèse, 2017).

La figure 3.3 montre une coupe transversale typique d'une zone de socle avec altération. Les aquifères sont constitués de roches fracturées et altérées à la transition entre la zone altérée et le socle. Ces aquifères sont discontinus et ondulent en fonction de la topographie et de la profondeur de l'altération. Les forages à haut rendement sont généralement positionnés dans des parties densément fracturées de l'aquifère ou de la zone de transition qui s'est altérée en une couche sablonneuse.

La part des précipitations qui s'infiltré jusqu'à l'horizon fissuré est bien entendu à l'origine des réserves exploitables. On sait par ailleurs que cette recharge pénètre les horizons superficiels altérés, généralement argileux et impropres à l'exploitation à gros débit, et que ces altérations agissent comme un réservoir « capacitif » où l'eau s'accumule, puis petit à petit s'égoutte plus bas vers la zone fracturée de la roche où il est alors possible de l'exploiter par forage.

Fig. n°25 MODE DE GISEMENT DES EAUX SOUTERRAINES DANS LE SOCLE CRISTALLIN DU BURKINA FASO

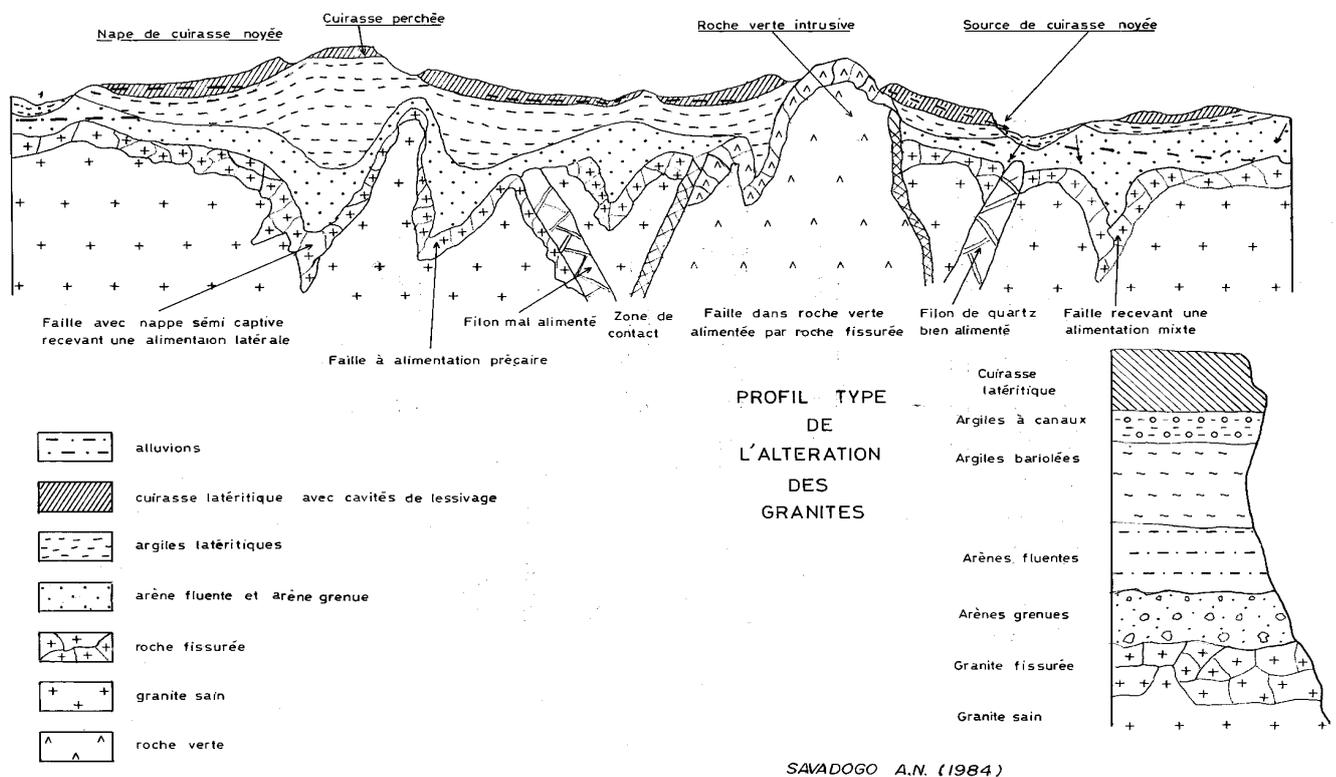


Figure 3.3: Coupe transversale d'un socle cristallin

Il est donc nécessaire que trois facteurs soient réunis : (i) une recharge annuelle par les précipitations (il semble qu'au-dessous de 600 mm/an cette recharge directe soit très faible) ; (ii) l'existence d'une couche argilo-sableuse pour stocker l'eau ; et (iii) la présence d'une roche intensément fracturée permettant son exploitation. On pense aussi qu'une trop grande épaisseur d'altérites peut empêcher l'eau infiltrée de parvenir à la zone fissurée, en favorisant les phénomènes de reprise évaporatoire.

Certaines roches cristallines sont plus favorables que d'autres au stockage et à l'exploitation d'eau, en particulier les roches cassantes. A l'inverse les roches qui s'altèrent en produisant une part importante de minéraux argileux ne sont pas favorables.

Ces éléments démontrent qu'on ne peut pas déterminer pour ces roches de coefficients d'emménagement globaux comme on le fait couramment dans les roches sédimentaires. Il semble donc plus indiqué, de parvenir à déterminer les secteurs les plus favorables à l'exploitation des eaux souterraines, plutôt que de calculer d'hypothétiques réserves.

III.2. Forages

III.2.1. Taux de couverture des centres

Le tableau ci-dessous fournit les données sur la situation des populations tels fournies dans la base de données de l'INO 2020.

Les taux de couverture sont calculés comme le rapport entre la population desservie et la population. On considère alors que la population PDI doit être ciblée en complément :

Tableau 3.2: Taux de desserte des centres (INO 2020)

REGION	PROVINCE	COMMUNE	CENTRE	Population 2020	Population PDI au 30/04/2021	Population desservie	Population non desservie	Taux d'accès
CENTRE-NORD	BAM	BOURZANGA	Bourzanga	10 001	31 218	7 665	2 336	76.6%
CENTRE-NORD	NAMENTENGA	BOUROUM	Bouroum	5 113	29 511	4 514	599	88.3%
EST	GOURMA	FADA	Fada					
NORD	LOROUM	TITAO	Titao					
SAHEL	OULDALAN	DEOU	Déou	7 111		4 817	2 294	67.7%
SAHEL	SENO	DORI	Dori					
SAHEL	SENO	GORGADJI	Gorgadji	6 542	43 651	2 393	4 149	36.6%
SAHEL	SOUM	DJIBO	Djibo					
CENTRES ONEA								
EST	GOURMA	FADA	Fada	66 919	44 708	66 919	0	100.0%
NORD	LOROUM	TITAO	Titao	28 981	35 263	19 746	9 235	68.1%
SAHEL	SENO	DORI	Dori	31 542	45 568	31 542	0	100.0%
SAHEL	SOUM	DJIBO	Djibo	47 060	166 753	28 413	18 647	60.4%

III.2.2. Analyse statistique des données de forages

Cette analyse a été effectuée sur les données de forages du BUMIGEB couvrant la zone d'étude. Les degrés carrés concernés sont : 1 Fada N'Gourma, 2 Pama, 3 Sebba, 4 Pissila, 5 Téra, 6 Dori, 7 Djibo, 8 Kaya, 9 Ouahigouya et 10 Douentza.

En tout, 4781 ouvrages sont concernés par cette analyse couvrant les 10 degrés carrés. Une approche par bassin de chacune des zones a été faite. Cependant, compte tenu du nombre restreint d'ouvrages décomptés dans ce cas, les analyses statistiques sont moins significatives

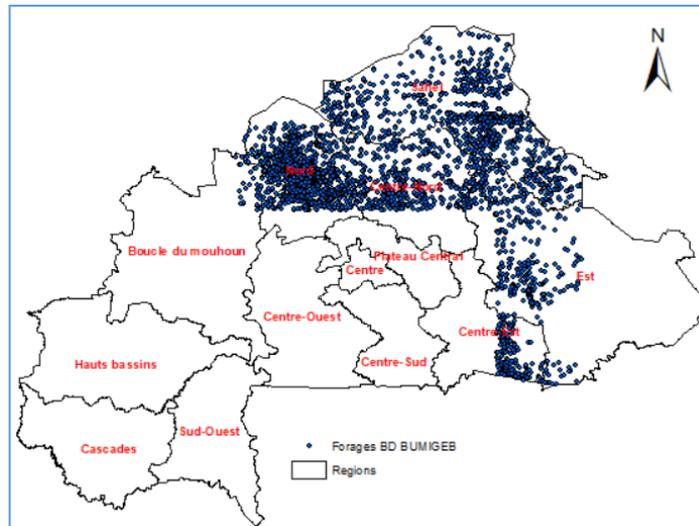


Figure 3.4: Forages BD BUMIGEB dans la zone étudiée

Ce choix des données du BUMIGEB, bien que restrictive se justifie par les observations suivantes :

- Les données sont suffisamment nombreuses pour des analyses statistiques ;
- Provenant de la même base de données une certaine cohérence interne peut être obtenue. En effet on a choisi de ne pas manipuler les données obtenues des différentes bases de données. En combinant les données de plusieurs sources, il y avait besoin de traitement préalable.

Le choix tranches de débits et d'épaisseur d'altération, des classes de formations géologiques et pédologique a fait l'objet d'un consensus au sein de l'équipe des experts.

À ce sujet notons que les tranches de débits sont caractérisées comme suit :

- $0 \leq Q < 0.4$ m³/h Forages négatifs
- $0.4 \leq Q < 0.7$ m³/h Forages acceptables pour les PMH dans des conditions difficiles
- $0.7 \leq Q < 1$ m³/h Forages généralement considérés comme positifs pour PMH
- $1 \leq Q < 2.5$ m³/h Forages pouvant être équipés en PEA
- $2.5 \leq Q < 5$ m³/h Forages appropriés pour être équipés en PEA
- $Q \geq 5$ m³/h Forages indiqués pour les équipements d'AEP

Tandis que la profondeur d'altération a été classée comme suit:

- <10 m
- [10 -30] m
- [30 -50] m
- ≥ 50 m

III.2.3. Statistiques descriptives

Les fréquences des observations relatives aux divers classements se présentent comme suit :

1. La plupart des forages se situent dans la classe d'altération de 10 à 30 mètres (52.1%);
2. Au niveau des tranches de débit, mis à part les forages négatifs, les forages pouvant être équipés en PEA viennent en tête avec plus de 25% des ouvrages;
3. Le taux de succès global (débit supérieur ou égal à 0.4 m³/h) est de 64.3 %. Seulement 38.6% ont un débit de 1 m³/h ou plus et 13.3% plus de 2.5 m³/h. Ceci dénote la faiblesse de la productivité des aquifères dans la zone d'étude

Les fréquences des observations relatives aux divers classements sont les suivantes :

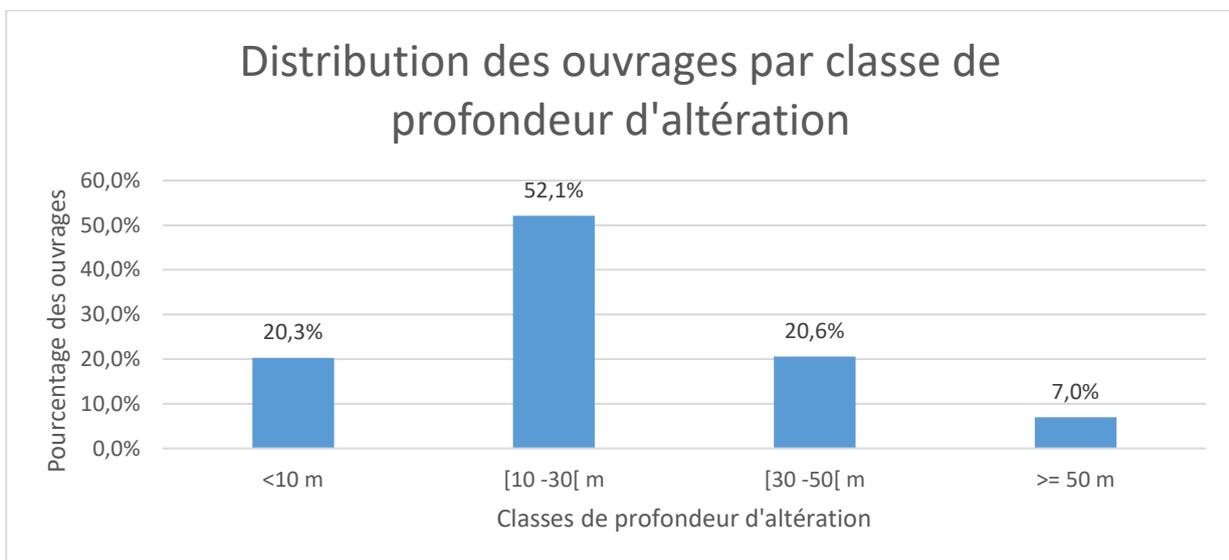


Figure 3.5: Fréquence par classe d'altération

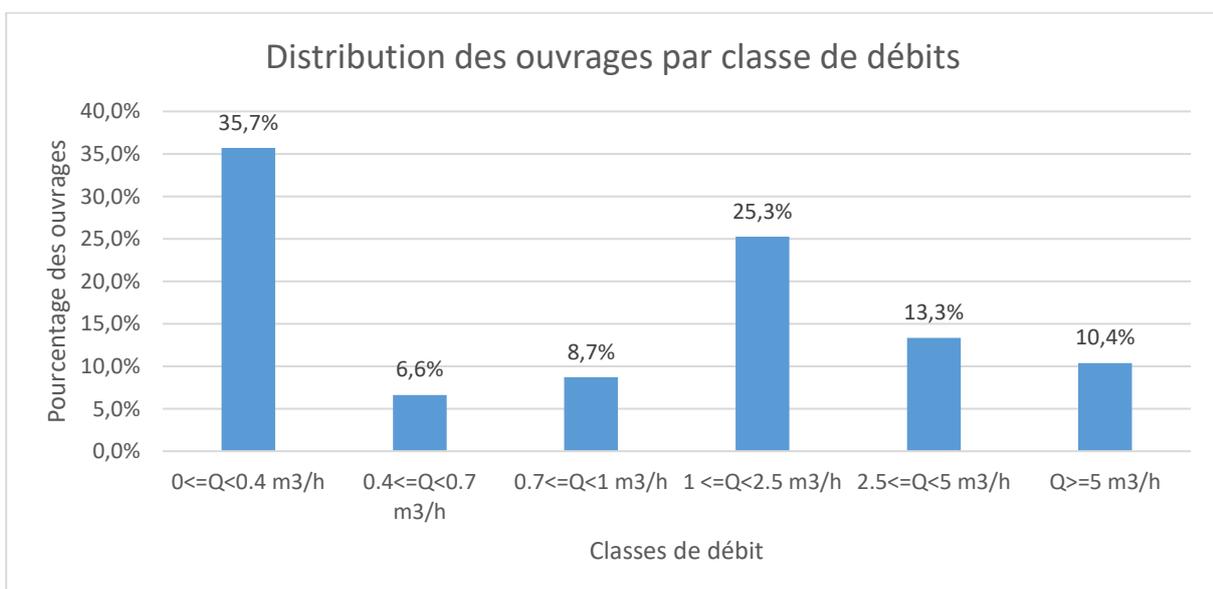


Figure 3.6: Fréquence de débit par classe de débit

Au niveau des 7 zones de l'étude, le tableau suivant peut être observé :

Observations	Débit : m3/h	Q <0.4	0.4<=Q<0.7	0.7<=Q<1	1<=Q<2.5	2.5<=Q<5	Q>=5	Q>=0.4
	Nombre d'ouvrages	Négatif	Acceptables pour PMH dans conditions difficiles	Généralment positifs pour PMH	Acceptables pour PEA	Forages appropriés pour être équipés en PEA	Forages indiqués pour les équipements d'AEP	Positif global
Boroum	33	12.1%	9.1%	15.2%	30.3%	27.3%	6.1%	87.9%
Bourzanga	70	38.6%	1.4%	2.9%	32.9%	15.7%	8.6%	61.4%
Déou	23	39.1%	17.4%	4.3%	17.4%	13.0%	8.7%	60.9%
Djibo	120	40.0%	7.5%	9.2%	25.0%	8.3%	10.0%	60.0%
Dori-Gorgadji	311	31.5%	9.0%	8.4%	23.2%	16.7%	11.3%	68.5%
Fada	208	38.0%	4.8%	7.2%	20.2%	16.8%	13.0%	62.0%
Titao	134	40.3%	11.9%	6.7%	24.6%	11.2%	5.2%	59.7%
Les 4781 ouvrages	4781	35.7%	6.6%	8.7%	25.3%	13.3%	10.4%	64.3%

Tableau 3.3: Distribution des ouvrages par classe de débit par zone.

On constate que toutes les zones sont semblables à l'exception de celle de Bouroum. Mais il faut y noter que seulement 33 ouvrages sont dans cet échantillon.

III.3. Traitement de données magnétiques : cartes de fracturation

Les données magnétiques aériennes qui permettent de voir au travers des couches superficielles telles que le sable, la végétation et l'eau, sont un outil puissant pour le traçage des socles cristallins et l'estimation des profondeurs des sources magnétiques ainsi que la cartographie des structures. Ces données ont été acquises auprès du BUMIGEB.

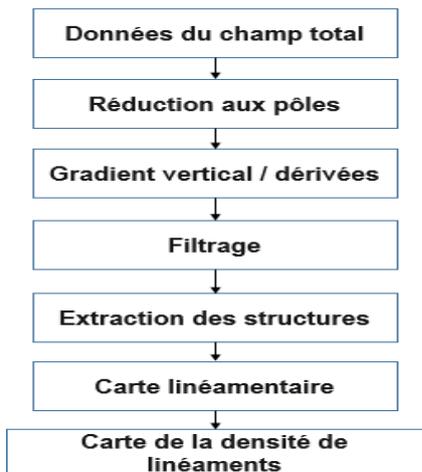
Afin de faciliter l'interprétation géologique et hydrogéologique, plusieurs techniques de filtrage ont été appliquées aux données magnétiques. Les données magnétiques ont été filtrées (réduites au pôle - RP) pour déplacer les anomalies au-dessus de leur source, définir les tendances et les limites des structures et séparer les anomalies à fréquences variables

Les traitements décrits ci-dessous ont été effectués sur les données magnétiques :

- **Signal analytique**

Le signal analytique combine les trois gradients directionnels de la gravité ou champ magnétique pour obtenir le gradient total. Il dépend de la force et pas de la direction du magnétisme d'un corps. Ce traitement est très efficace pour délimiter les limites géologiques.

• **Méthode de Gradient**



Afin d'identifier les contacts qui peuvent représenter des failles, des fractures ou des limites lithologiques, une fonction appelée gradient maximum horizontal est appliquée aux données magnétiques aériennes. La transformation des données magnétiques en pseudo-gravité facilite l'interprétation des anomalies magnétiques parce que les pics des anomalies de pseudo-gravité sont directement centrés sur les contacts séparant les roches de magnétisme différent, de même que les gradients horizontaux des anomalies de gravité se situent sur les contacts séparant les roches de densité différentes.

Les différentes cartes élaborées à partir de l'approche précédente sont présentées dans l'annexe 3.1. Un exemple pour Dori / Gorgadji est présenté dans figure 3.5. Ces cartes présentent les structures majeures ainsi que les directions structurales des bassins versant délimités.

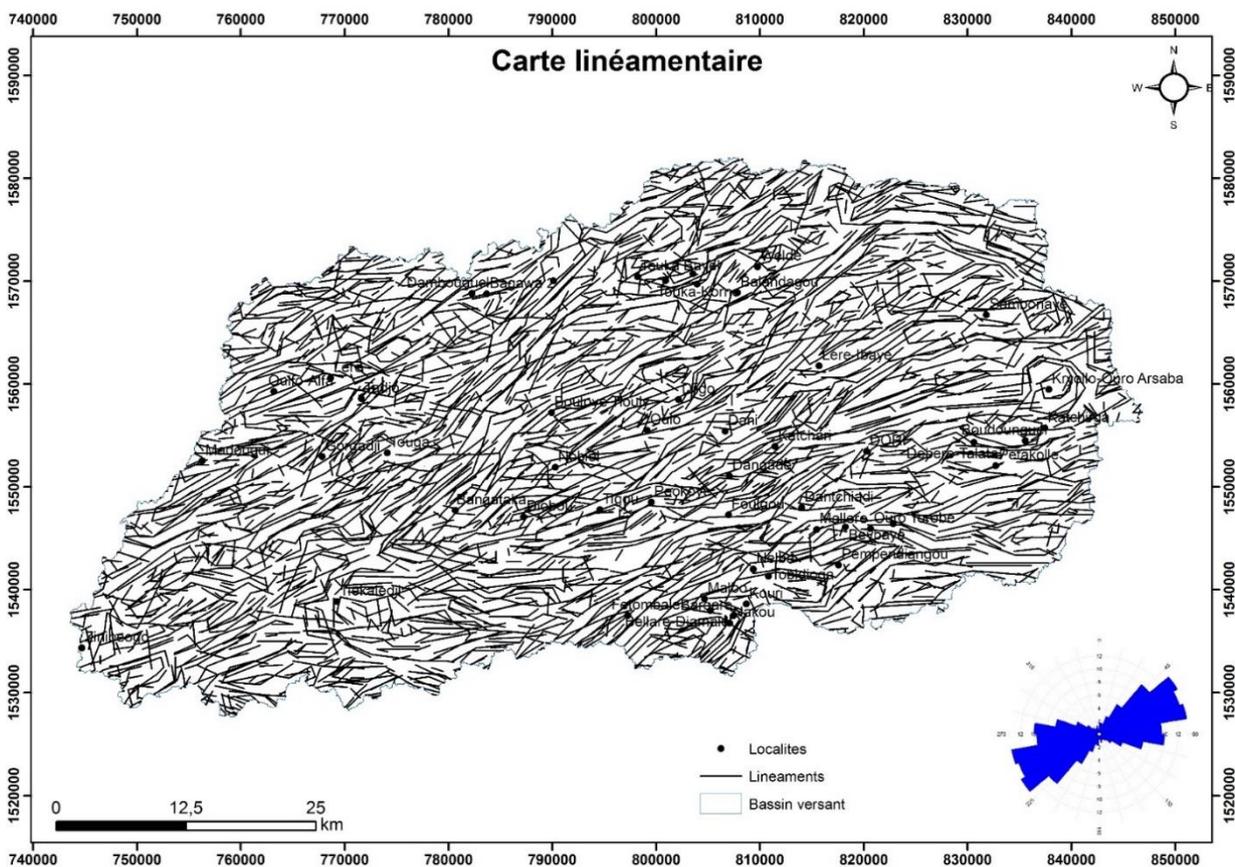


Figure 3.7: Carte linéaire du bassin versant de Dori - Gorgadji

III.4. Autres données d'entrées

Les autres données concernent la variation de l'épaisseur d'altération, la pente, la densité de drainage ainsi que la densité de linéament. Ces données sont disponibles dans le Google Drive en format SIG.

La carte de variation de l'épaisseur d'altération a été élaborée par interpolation des épaisseurs d'altération des différents forages issus de la base de données du BUMIGEB. La carte des pentes sont issues des traitements de données SRTM et celles de la densité de drainage de traitement des données du réseau hydrographique de l'IGB.

IV. CHAPITE IV : L'ANALYSE MULTICRITERE

IV.1. Approche générale

Il n'y a pas de moyen simple de trouver un site pour un forage durable à gros débit dans les roches cristallines du socle. Les aquifères sont constitués de roches fracturées et altérées à la transition entre la zone altérée et le socle. Ces aquifères sont discontinus et ondulents en fonction de la topographie et de la profondeur de l'altération. Les forages à haut rendement sont généralement positionnés dans des parties densément fracturées de l'aquifère ou de la zone de transition qui s'est altérée en une couche sablonneuse. La durabilité est mieux garantie si le forage est situé sur de méga fractures (grande zone d'influence) recouvertes d'une épaisse couche d'altération saturée (stockage) et bien sûr s'il y a une recharge relativement élevée dans la zone d'influence.

On distingue généralement deux phases dans les études d'implantation :

Phase 1.

Délimitation des zones favorables à l'aide des données existantes, des cartes, des données de télédétection, des enquêtes de reconnaissance locales. Au cours de cette phase, les différentes sources d'informations et les cartes sont combinées et comparées. Auparavant, cela se faisait en superposant et en dessinant des cartes. De nos jours, les informations sont disponibles dans un format géo référencé numérisé, ce qui permet de traiter les données dans un environnement SIG. Ce processus est appelé « analyse de superposition ou analyse multicritère » (Gumma & Pavelic, 2012).

Phase 2.

Localisation détaillée par l'identification des linéaments avec des images aériennes et satellites à haute résolution, l'exploration hydrogéologique de terrain et les mesures géophysiques pour préciser des zones fracturées (pas inclus dans cette étude hydrogéologique, voir aussi Chapitre 6).

Cette approche des implantations augmente les taux de réussite. Cependant les résultats peuvent être toujours décevants. Le forage étant coûteux, une légère augmentation du taux de succès justifie déjà les coûts des études hydrogéologiques des phases 1 et 2.

Avec cette approche, nous voulons augmenter le taux de succès en appliquant de nouvelles techniques tout en faisant revivre les anciennes connaissances et expériences. Il est à noter que dans les années 1980 les taux de succès des forages étaient relativement élevés, à savoir entre 70 et 80% (Ricolvi, 1987 et communication personnelle avec l'équipe UNICEF/RVO, qui a travaillé au Burkina Faso dans les années 1980). Ricolvi (1987) rapporte un taux de succès d'environ 80 % pour les forages avec des débits supérieurs à 0,5 m³/h. Selon la base de données actuelle de la DEIE, avec les nombreux forages plus récents dans les régions Nord, Sahel, Centre Nord et Est, le taux de réussite n'est que 61 % des débits supérieurs à 0,5 m³/h. Toutefois, il est à noter que dans les années 1980, il s'agissait de programmes d'hydrauliques villageoises pour lesquels la zone de prospection était beaucoup plus large. De nos jours, les projets se focalisent plus sur les quartiers, avec pour conséquence une restriction de la zone de prospection.

Cette étude hydrogéologique se concentre surtout sur la Phase 1 en délimitant les zones favorables à la disponibilité des eaux souterraines autour des 8 centres d'étude sélectionnés par UNICEF Cluster WASH. La technique d'analyse multicritère proposée ici a été appliquée dans plusieurs études de cartographie des eaux souterraines dans les

roches cristallines du socle en Afrique et en Inde (Abdou Babaye, 2012; Adeyeye et al, 2019; Arulbalaji et al 2019; Bashe, 2017; Fenta et al, 2015; Murthy & Mamo_2009; Owolabi et al, 2020; Gumma & Pavelic, 2012; Hyann et al, 2015; Mangoua et al, 2019; Yao et al, 2016; Acacia Water, 2020, voir annexe 4.1).

Pour cette analyse multicritères nous avons suivi les prochaines étapes:

1. Sélection des critères pertinents,
2. Détermination des poids des critères,
3. Classification des valeurs des critères,
4. Attribution des scores aux classes,
5. Traitement et rastérisation des cartes de base,
6. Calcul de l'indice de favorabilité,
7. Classer les indices de favorabilité en trois zones de favorabilité,
8. Validation des trois zones avec les forages existants.

IV.2. Détails de l'approche

IV.2.1. Sélection des critères

Dans le tableau en annexe 4.1, les critères et les pondérations de 12 études d'analyse multicritère, mentionnées ci-dessus, sont répertoriés. Le nombre de critères varie de 5 à 12 dans chaque étude. Le choix de 12 critères (Arulbalaji et al, 2019) est considéré comme très élevé. En excluant cette étude, le nombre moyen de critères est de 7. Généralement, il est conseillé d'avoir environ 5 à 7 critères (Mu & Pereyra-Rojas 2017). En tout, 23 critères différents ont été utilisés dans les études dans diverses combinaisons. Les 6 critères les plus souvent utilisés sont : la densité du drainage, la densité du linéament, la pente, la lithologie / géologie, les précipitations et la couverture du sol / l'utilisation du sol.

Sur la base des études mentionnées ci-dessus, de la disponibilité des données en Burkina Faso et de la pertinence pour les 8 zones, les hydrogéologues de l'équipe UNICEF/RVO ont choisis les critères suivants :

1. Lithologie
2. Proximité des linéaments
3. Proximité des cours d'eau
4. Sol (matériau sur lequel le sol s'est développé)
5. Epaisseur de la zone d'altération développée sur la roche mère.

IV.2.2. Détermination des poids

La méthode AHP (Analytical Hierachy Process) a été utilisée pour déterminer l'importance ou les poids des critères (Mu & Pereyra-Rojas, 2017). Cette méthode est aussi appliquée dans 9 des études mentionnées ci-dessus.

La méthode consiste à comparer l'importance des critères par paires. Chaque comparaison par paire se voit attribuer une valeur, comme indiqué dans le tableau 4.1. Finalement, une matrice est formée des valeurs de comparaison. Sur la base de cette matrice les "valeurs propres" des poids peuvent être calculées. En divisant les valeurs propres par la somme de toutes les valeurs propres, on obtient des poids compris entre 0 et 1. Le total des poids est égal à 1.

Criteres	Lithologie	Prox. lineaments	Sol	Prox. drainage	Epaisseur alteration	Valeur propre	Poid normalise	Cohérence	Scores à inscrire dans les cellules blanches de sondage AHP	
Lithologie	1.00	1.00	5.00	3.03	3.03	1.73	0.31	6.325	Le critère A est tout aussi important que B	1
Prox. lineaments	1.00	1.00	5.00	3.03	3.03	1.73	0.31	6.325	Le critère A est un peu plus important que B	3
Sol	0.20	0.20	1.00	0.33	0.33	0.46	0.08	3.730	Le critère A est clairement plus important que B	5
Prox. drainage	0.33	0.33	3.00	1.00	1.00	0.85	0.15	4.961	Le critère A est beaucoup plus important que B	7
Epaisseur alteration	0.33	0.33	3.00	1.00	1.00	0.85	0.15	4.961	Le critère A domine complètement B	9
Poid normalise	0.31	0.31	0.08	0.15	0.15				Le critère A est légèrement moins important que B	1/3
				Matrix dimension				5	Le critère A est clairement moins important que B	1/5
				Indice de coherence (< 0.2)				0.065	Le critère A est beaucoup moins important que B	1/7
									Le critère A est complètement dominé par B	1/9

Tableau 4.1: Exemple de sondage AHP avec 5 critères

Les experts hydrogéologues de l'équipe UNICEF/RVO ont rempli les sondages AHP. Figure 4.1 et Tableau 4.2 montrent les résultats. Les poids les plus importants sont attribués à la lithologie (0.30) et la proximité des linéaments (0.25), suivis par la proximité des cours d'eau (0.19), puis de l'épaisseur d'altération (0.13) et du type de sol (0.10).

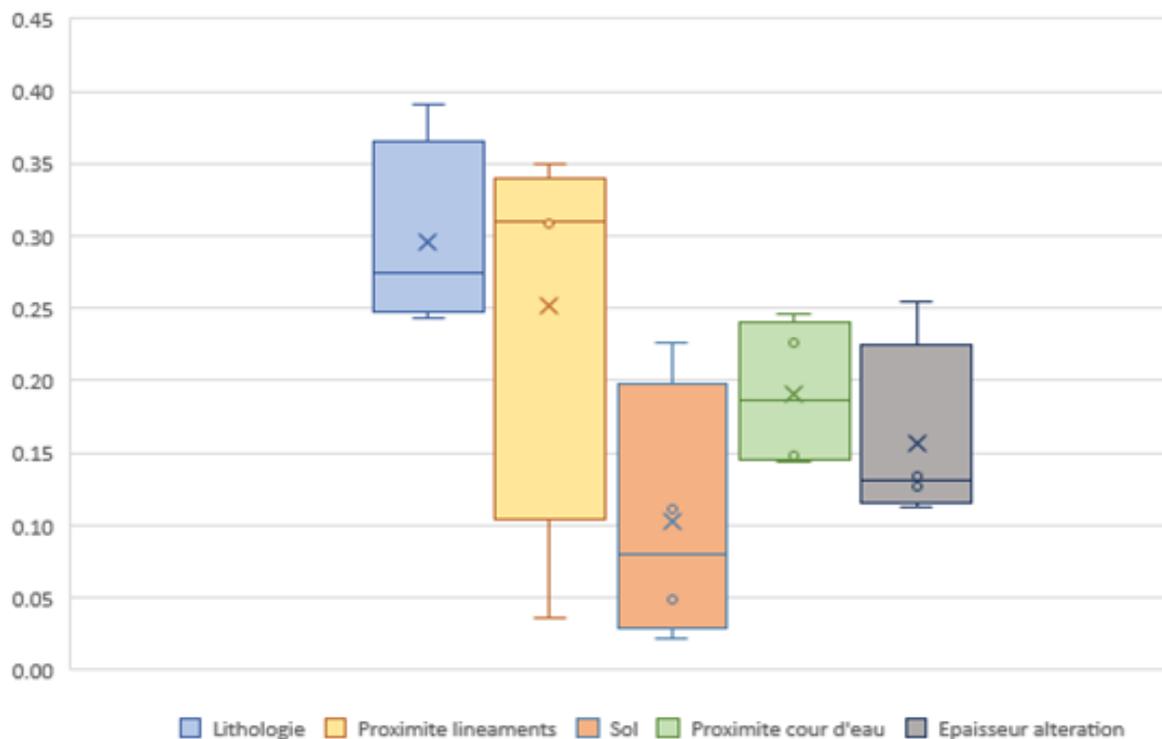


Figure 4.1: Box plot des poids déterminés par les experts de l'équipe UNICEF / RVO

IV.2.3. Classification des valeurs des critères

Pour le critère de la lithologie, nous avons utilisé les cartes géologiques PADSEM et SYSMIN à l'échelle 1 : 250 000. Ces cartes ont un grand nombre des classes lithologiques. Celles-ci sont reclassées en 4 classes principales : a) les roches granitiques anté Birimiennes, b) les roches sédimentaires Birimiennes, c) les roches basiques (Birimiennes) et d) les roches granitiques post-tectoniques (peu cassées).

Pour le critère du sol les classes nombreuses des cartes pédologiques FAO sont reclassées en 4 classes principaux : a) imperméable (argiles, affleurement rocheux, cuirasse avec sol érodé), b) peu perméable (matériaux argilo-sableux et argileux), c) perméable (matériau argilo-sableux issu de granites, sables éoliens un peu argileux), d) très perméable (sables éoliens, matériau gravillonnaire).

Les cours d'eau sont déterminés par des routines SIG "accumulation de flux" appliquées aux images satellitaires SRTM DEM. Concernant le critère de la proximité des cours d'eau on a distingué 5 classes : a) la zone à moins de 100 m à partir du cours d'eau, b) la zone entre 100 et 300 m à partir du cours d'eau, c) la zone entre 300 et 500 m à partir du cours d'eau, d) la zone entre 500 et 700 m à partir du cours d'eau et e) la zone plus de 700 m à partir du cours d'eau.

Les linéaments sont déterminés par des routines de traçage SIG appliquées aux cartes magnétométriques aéroportées de BUMIGEB (voir aussi chapitre 3). Pour le critère Proximité des linéaments les classes sont : a) la zone à moins de 50 m à partir du linéament, b) la zone entre 50 et 100 m à partir du linéament, c) la zone entre 100 et 300 m à partir du linéament, d) la zone entre 300 et 500 m à partir du linéament, e) la zone plus de 500 m à partir du linéament. A noter qu'il est question de méga fractures.

Tableau 4.2: Poids, classes et scores pour l'analyse multicritère

Critères	Poids	Classes et scores				
Lithologie	0.30	Roches granitiques	Roches Birimiennes (schistes)	Roches Birimiennes (roches vertes)	Granites post-tectoniques (batholite)	
		1.00	0.75	0.53	0.35	
Proximité Linéaments	0.25	< 50 m	50 à 100 m	100 à 300 m	300 à 500 m	> 500 m
		1.00	0.50	0.21	0.10	0.00
Proximité cours d'eau	0.19	< 100 m	100 à 300 m	300 à 500 m	500 à 700 m	> 700 m
		1.00	0.48	0.21	0.10	0.00
Epaisseur altération	0.16	< 10 m	10 à 30 m	30 à 50 m	> 50 m	
		0.16	1.00	0.69	0.43	
Sol	0.10	imperméable	peu perméable	perméable	très perméable	
		0.10	0.21	0.48	1.00	

L'épaisseur d'altération a été déterminée par interpolation des épaisseurs d'altération des forages de la base de données BUMIGEB. La méthode de krigeage a été utilisée pour l'interpolation. Les épaisseurs sont classées en 4 classes : a) moins de 10 m, b) entre 10 et 30 m, c) entre 30 et 50 m et d) plus de 50 m.

IV.2.4. Attribution des scores aux classes

Quant à la détermination des poids, les scores des classes de chaque critère sont déterminés selon la méthode AHP. Les experts de l'équipe UNICEF/RVO ont comparé et évalué toutes les classes par paires selon la favorabilité hydrogéologique. Ensuite, les valeurs propres ont été déterminées à l'aide de calculs matriciels. En divisant les valeurs propres par le maximum des valeurs propres, on obtient au final des scores compris entre 0 et 1. Évidemment, le score de classe le plus élevé est égal à 1. Tableau 4.3 contient les moyennes des scores des classes, déterminées par les experts.

IV.2.5. Traitement et rastérisation des cartes de base

Les fonds de carte ou fichiers des 5 critères ont été transformés en fichiers avec une distribution spatiale des scores de favorabilité. Les fichiers numériques sont des fichiers vectoriels, qui sont ensuite convertis en fichiers raster avec pixels de 30 sur 30 m. Ces fichiers raster sont nécessaires pour l'analyse multicritère. Les opérations ont été effectuées avec le programme QGIS.

IV.2.6. Calcul de l'indice de favorabilité

Dans le programme QGIS, les indices de favorabilité par chaque pixel (IF_i) ont ensuite été calculés à partir de la somme des scores des critères du pixel $S_{x,i}$ multiplié par les poids P_x des critères (moyenne pondérée).

$$IF_i = \sum_1^n S_{x,i} \cdot P_x$$

Comme les poids et les scores varient entre 0 et 1, les indices de favorabilité ont des valeurs entre 0 et 1.

IV.2.7. Classement des indices de favorabilité en 3 catégories

Les indices de favorabilité sont classés en 3 catégories (favorable, médiocre, défavorable). Les limites des catégories sont déterminées en organisant les valeurs de pixels pour les 8 centres par taille, puis en les divisant en trois. Les trois catégories que l'on distingue sont: favorable (indice > 0,60 : bleu), médiocre (indice entre 0,45 et 0,60 : orange) et défavorable (indice < 0,45 : rouge).

L'analyse multicritère a finalement abouti à des cartes de favorabilité des 8 centres montrant des zones bleues, oranges et rouges respectivement favorables, médiocres et défavorables au potentiel de forage durable à haut débit (> 2 m³/h). A titre d'exemple, la carte est présentée pour la zone autour de Déou (voir figure 4.2). Les limites de la zone suivent les lignes de partage des eaux entre les grands bassins versants. Le cercle autour de Déou indique la zone avec un rayon de 15 km. L'UNICEF Cluster WASH souhaite que

les nouveaux forages du PDI ne soient pas à plus de 15 km du centre. Toutes les autres cartes d'eau sont incluses dans l'annexe 4.2.

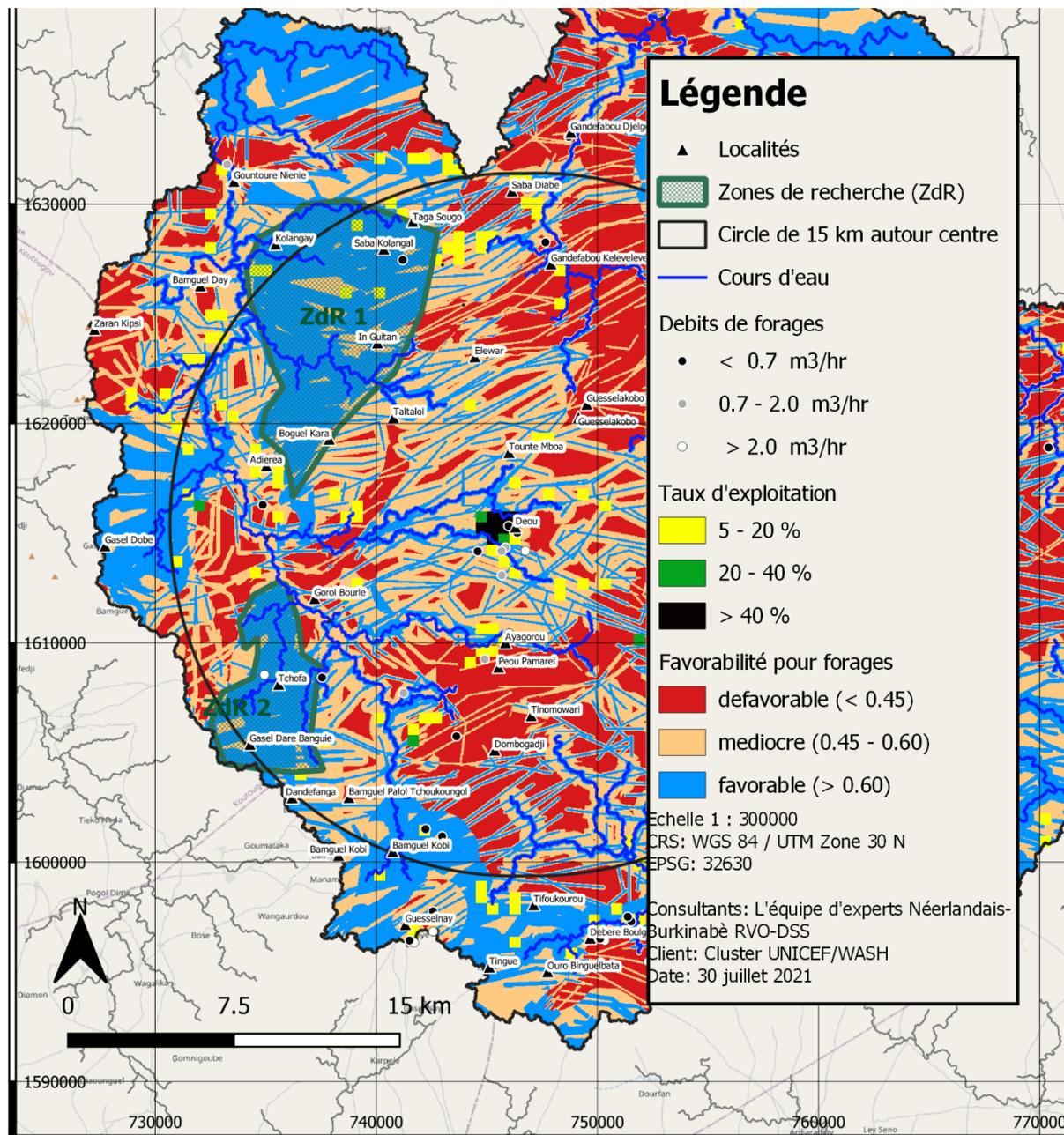


Figure 4.2: Carte de Déou avec les zones et favorabilité et les taux d'exploitation

IV.2.8. Validation des trois zones de favorabilité avec les forages existants

Les cartes de favorabilité ont été validées utilisant les débits des forages issus de la base de données DEIE. Cette méthode de validation de l'analyse multicritère a également été appliquée dans 4 des études mentionnées ci-dessus.

Pour chaque zone, le taux de réussite a été déterminé pour les forages avec un débit supérieur à 0,7 m³/h et 2,0 m³/h. Le tableau 4.3 montre les résultats pour toutes les zones ensemble et pour les zones individuellement.

La validation confirme qu'en effet, pour l'ensemble des centres, les taux de réussite sont les plus élevés dans les zones favorables (bleu). Ceci s'applique également à la plupart des centres pris individuellement. Les zones de Fada N'Gourma et de Bouroum forment une exception, parce que les taux de réussite sont relativement élevés partout. On note que presque toute la zone est favorable (bleu).

Tableau 4.3: Validation des zones de favorabilité avec les débits des forages (Données DEIE)

Centre	Zone de Favorabilité		Taux de réussite (%)	
	Zone	Nr de forages	> 0.7 m ³ /hr	> 2.0 m ³ /hr
Globale	Défavorable	438	44	23
	Mediocre	450	52	27
	Favorable	418	58	34
Djibo	Défavorable	78	45	19
	Mediocre	84	42	19
	Favorable	74	55	32
Fada N'Gourma	Défavorable	10	60	0
	Mediocre	53	62	38
	Favorable	131	58	35
Dori-Gorgadji	Défavorable	212	44	23
	Mediocre	147	58	31
	Favorable	99	62	37
Titao	Défavorable	63	52	25
	Mediocre	69	48	26
	Favorable	38	61	39
Deou	Défavorable	28	25	0
	Mediocre	31	39	23
	Favorable	28	54	32
Bourzanga	Défavorable	37	57	38
	Mediocre	38	45	13
	Favorable	30	67	43
Bouroum	Défavorable	10	70	40
	Mediocre	28	86	50
	Favorable	18	72	33

IV.3. Taux d'exploitation de l'eau souterraine

Les eaux souterraines sont la principale source d'eau potable en milieu rurale au Burkina Faso. Comme indiqué au chapitre 5, on parle de pénurie d'eau si le prélèvement d'eau souterraine dépasse 20% des ressources renouvelables. Dans ce cas les ressources renouvelables sont égales à la recharge des eaux souterraines (UNWater, 2018). Les aquifères du socle cristallin sont peu étendus et asymétriques. Les zones de captage des forages ne s'étendent probablement qu'à quelques centaines de mètres des forages. Il n'est donc pas très utile de déterminer le rapport entre le prélèvement et la recharge de l'eau souterraine pour de très grandes zones ou de grands bassins versants.

Dans cette étude nous avons déterminé ce rapport ou le "taux d'exploitation" pour des zones de 510 sur 510 m. La base pour cela est le fichier raster public de la population par pixel de 30 sur 30 m de 2018 (Facebook Data for Good, téléchargé en février 2020 à partir du lien : <https://dataforgood.fb.com/tools/population-density-maps/>). Cette carte est faite sur la base de données de recensement (2018), d'hypothèses sur la taille de la famille et d'une cartographie des maisons à partir d'images satellites utilisant des algorithmes informatiques. D'autres hypothèses sont une consommation d'eau souterraine de 23 litres par jour par habitant et une consommation en eau souterraine (recharge) de 30 mm/an (chapitre 5). A partir de ces données et hypothèses, les taux d'exploitation sont calculés et superposés en pixels colorés sur les cartes avec les zones de favorabilité. Les pixels jaunes indiquent un taux d'exploitation de 5 à 20 %, les verts pour un taux d'exploitation de 20 à 40 % et les noirs pour un taux d'exploitation de plus de 40 %. (Voir la Figure 2). Toutes les cartes avec le taux d'exploitation sont incluses en Annexe 4.2.

IV.4. Zones de recherche

Les cartes avec les zones de favorabilité pour les forages et le taux d'exploitation de l'eau sous-terrain (études de phase 1) ont été utilisées pour définir les zones de recherche pour les études d'implantation de phase 2. (visite de terrain, interprétation des linéaments, études géophysiques).

Les zones sont choisies autant que possible dans des zones favorables (bleu) et où le taux d'exploitation actuel est faible (en dehors des pixels colorés jaune, vert et noir). Dans tous les cas, la moyenne surfacique de l'indice de favorabilité doit être supérieure à 0,60 et celle du taux d'exploitation doit être inférieure à 5%.

Dans les centres étudiés, plusieurs zones de recherche ont été identifiées. Les superficies des zones sont telles qu'elles sont suffisamment grandes pour couvrir les besoins supplémentaires en eau des centres, à cause de l'augmentation des PDI.

Le besoin en eau est basé sur les informations de l'UNICEF Cluster WASH sur le nombre de PDI par centre et la couverture de l'approvisionnement en eau et l'hypothèse d'un besoin en eau de 23 litres par habitant et par jour. (Voir Tableau 3). Tableau 4.4 indique également la superficie nécessaire pour répondre à ce besoin en eau. Celle-ci est calculée sur la base de la recharge des nappes de 30 mm/an et d'un taux d'exploitation admissible de 5% de la recharge. Il a également été calculé combien de forages sont nécessaires sur la base d'une production durable de 2 m³/h ou 20 m³/jour (pompe motorisée pendant 10 heures par jour).

Tableau 4.4: Besoin en eau dans les zones d'étude

Donnees d'UNICEF			Calculations			Surfaces des zones de recherche							Rem.
Centre	PDI	Taux d'approvisionnement.	Besoin d'eau	Terrain pour captage	Nr de forages	Total	ZdR 1	ZdR 2	ZdR 3	ZdR 4	ZdR 5	ZdR 6	
	(nr)	(%)	(m3/an)	(km2)	(nr)	(km2)	(km2)	(km2)	(km2)	(km2)	(km2)	(km2)	
Bourzanga	31125	59.8	105040	70	14	77	47	30					
Bouroum	29196	54.5	111521	74	15	97	28	46	24				
Fada N'Gourma	35526	51.8	143752	96	20	155	69	86					
Titao	23572	57.6	83904	56	11	78	15	5	35	23		b	
Deou	12261	54	47348	32	6	97	69	28					
Dori	42033	65.3	122445	82	17	100	51	10	24	15		b	
Gorgadji	43651	49	186890	125	26	82	28	12	19	8	7	8	a
Djibo	166753	53.5	650950	434	89	89	51	38					a

a: ressources en eau souterrain pas suffisante
b: plus que 15 km du centre

Les zones de recherche sont indiquées sur les cartes de favorabilité. Un exemple est montré dans la Figure 4.3. Les autres cartes sont incluses dans l'annexe 4.2.

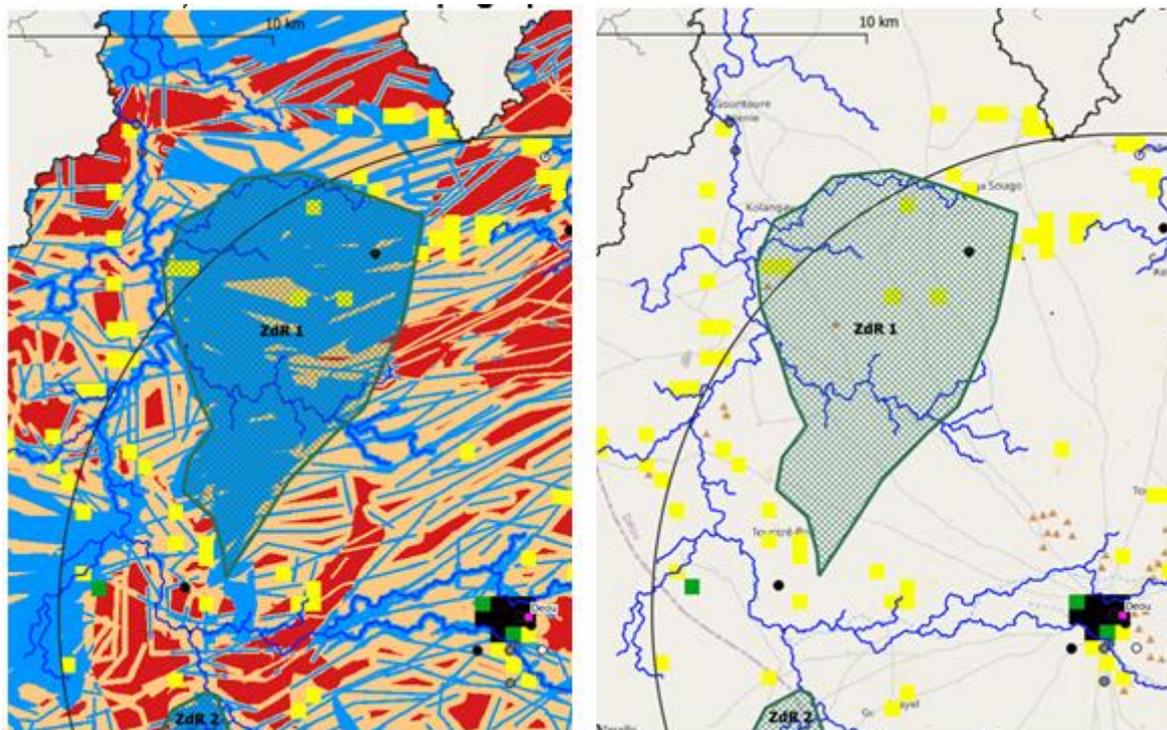


Figure 4.3 : Zone de recherche 1 (ZdR1) de Déou

L'ensemble des zones de recherche est suffisant pour tous les centres pour l'approvisionnement en eau supplémentaire prévu, à l'exception de Djibo. Le nombre de PDI et la quantité d'eau potable envisagée combinés à la situation hydrogéologique défavorable autour de Djibo font qu'il n'est pas possible d'extraire suffisamment d'eau souterraine dans un rayon de 15 km voire dans toute la zone de projet de Djibo. Dans ce cas, des alternatives devraient être explorées telles que l'extraction des eaux souterraines

à une plus grande distance, l'extraction des eaux de surface des réservoirs ou la relocalisation du DPI vers d'autres zones avec des conditions hydro(géo)logiques plus favorables.

Les caractéristiques de toutes les zones de recherche sont indiquées dans le Tableau 4.5. Ce tableau fournit également des recommandations spécifiques pour l'étude de phase 2. Cela concerne généralement la concentration de la recherche autour des réservoirs où il y a une recharge supplémentaire des eaux souterraines et où une extraction d'eau plus durable est possible.

Tableau 4.5: Caractéristique des zones de recherche

Centre	ZdR	Surf. (km2)	Lithologie	Sol	Village/fleuve	Favora- bilité	Taux d'explo- itation	Remarques
Bourzanga	1	47	Diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire	9 km a l'ouest de Bourzanga, entre Basse, Bouko et Barkana	0.69	0.42	La limite nord est le réservoir en amont et à l'ouest de Bourzanga. La zone le long du réservoir est favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir
	2	30	Diorite quartzifère	sur sables éoliens (au nord) sur matériau argilo-sableux (sud)	10 km a l'est de Bourzanga, autour Tebera; Entre Pissile, Boulli et Nafo	0.66	1.15	
Bouroum	1	28	Diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire	6 km au nord de Bouroum. Entre Bouroum, Bondibla, Foubando et Torgane	0.68	0.47	
	2	46	Diorite quartzifère	sur sables éoliens (ouest), sur matériau gravillonnaire (est)	11 km au sud-ouest de Bouroum. Autour villages de Nyangtibila, Kenesoumde et Kilema	0.69	0.31	
	3	24	Diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire	14 km au sud de Bouroum, entre Koulwoko et Gandraogo	0.69	0.75	
Deou	1	69	Granite et une petite zone d'amphibolites au milieu	sur matériau gravillonnaire	13 km au nord-ouest de Deou, entre Saba, Kolangay et Boguel Kara	0.68	0.44	
	2	28	Granite et petite zones sediments undifferencies a l'est	sur matériau gravillonnaire	14 au sud-ouest de Deou, entre Gorol Bourle et Gasal Dare Banguie	0.70	0.45	
Djibo	1	51	Diorite quartzifère (au milieu) et schistes (a l'ouest et l'est)	sur matériau argilo-sableux à argileux issu de schistes et sur sables éoliens (au milieu de la zone)	11 km au nord de Djibo entre Kolade et Neyba	0.61	1.42	
	2	38	Leucogranite	sur matériau argilo-sableux issu de granites	20 au sud de Djibo, entre Kabao et Gaskinde	0.61	0.80	
Dori	1	51	Méta-epiclastite et granulite mafique	sur sables éoliens	17 a l'ouest de Dori, entre Kasai, Yakouta, Winde Oulo et Djigo	0.64	1.6	La zone pres des réservoirs de Yakouta (a l'est) et Djigo (au nord) sont favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir
	2	10	Granulite mafique	sur matériau gravillonnaire (au nord) et sur matériau argileux issu de roches basique (au milieu) et sur sables éoliens (au sud)	13 a l'ouest de Dori, nord of Yakouta	0.66	0.17	
	3	24	Sable	sur sables éoliens et sur matériau argilo-sableux issu de granites (sud)	17 km au sud-est de Dori, entre Tonguel et Korja	0.59	0.98	
	4	15	Granulite mafique	sur matériau argilo-sableux à argileux issu de granites et migmatites	16 au nord de Dori, autour Felleol et Kalonga Nguina	0.62	0.08	
Fada	1	69	Migmatite et diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire	11 km au sud-est de Fada N'Gourma, entre Onyapalyangou, Tougourousambo et Bougui	0.70	0.47	La zone pres du réservoir de Bougui au nord est favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir
	2	86	Mylonite (a l'ouest) et granulite (a l'est)	sur matériau gravillonnaire (a l'ouest au-dessus de cuirasse)	10 km au nord-est de Fada N'Gourma, entre Komandougou, Mmba et Fada N'Gourma	0.69	0.22	
Gorgadji	1	28	Granite et granodiorite	sur sables éoliens et sur matériau argilo-sableux issu de granites (nord-ouest)	6 km au nord de Gorgadji, entre Oure Seno et Oulfo Alfa	0.63	1.1	La zone pres du réservoir de Oure Seno est favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir
	2	12	Diorite quartzifère	sur matériau argilo-sableux issu de granites	7 km au sud-est de Gorgadji, entre Gorgadji et Ouro Amadou Sibiri	0.67	0.77	
	3	19	Migmatite et granite)	sur matériau argilo-sableux issu de granites	13 km au nord de Gorgadji, entre Petegou et Gountoudie	0.66	0.26	
	4	8.3	Granite et granodiorite	sur sables éoliens (erg ancien)	11 a l'est de Gorgadji, entre Tonga et Pete Nyaki	0.7	2.2	
	5	7.3	Diorite quartzifère	sur matériau argilo-sableux issu de granites	13 au sud de Gorgadji, entre Safo et Kossogue	0.67	0.78	
	6	7.8	Diorite quartzifère	sur matériau argilo-sableux issu de granites	12 km au sud-ouest de Gorgadji, entre Madou Dien, Oulfare, Oundetane	0.69	1.4	
Titao	1	15	Diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire et matériau argilo-sableux (a l'est)	9 km au sud-est de Titao, entre Ouindigui Selbonga, et Dougouri-Ouidi	0.7	0.56	
	2	5.3	Schiste	sur matériau gravillonnaire et matériau argilo-sableux (a l'est)	8 km a l'est de Titao	0.68	0.65	
	3	35	Principalement diorite quartzifère (aussi gabbro-diorite et granite porphyroïde)	sur matériau gravillonnaire et sables éoliens (au sud-ouest de Toulfe)	18 km au nord de Titao, entre Nommo-Foulbe et Fogoute	0.7	1.2	Les zones pres de réservoirs ou bas-fonds de Nommo Foulbe et Toulfe sont favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir
	4	23	Diorite quartzifère	sur matériau gravillonnaire	17 km a l'est de Titao entre Nommo et Bouna	0.71	0.98	La zone pres de réservoir ou bas-fonds de Sirfou est favorable pour forages en raison de l'apport supplémentaire d'eau souterraine par infiltration du réservoir

V. CHAPITRE V : EXPLOITATION DURABLE DES EAUX SOUTERRAINES

V.1. Introduction

Les eaux souterraines sont d'une grande importance pour l'approvisionnement en eau potable au Burkina Faso. Les eaux souterraines sont généralement la seule source d'eau, surtout pendant la longue saison sèche. À la campagne, les eaux souterraines sont souvent la seule source d'eau, suffisantes pour répondre à la demande.

Les estimations dans la littérature indiquent que le captage actuel des eaux souterraines pour l'ensemble du pays ne représente qu'une très petite partie de la recharge : moins de 1% dans le bassin de la Volta et plus de 5% dans le nord.

Dans les villes la demande en eau est plus importante et les eaux souterraines sont insuffisantes pour répondre à la demande. C'est pourquoi l'eau de surface (barrage) est souvent utilisée comme source d'approvisionnement en eau potable comme à Dori et Djibo. Dans des circonstances normales, l'approvisionnement en eau dans ces villes est déjà critique à la fin de la saison sèche. Cette situation s'est aggravée avec l'augmentation de la demande en raison de l'afflux de PDI.

Dans les autres zones sélectionnées pour cette étude, les eaux souterraines sont généralement la seule source disponible

V.2 Eau souterraine et recharge

La géométrie et les processus de recharge des aquifères du socle cristallin sont mal connus. Les connaissances actuelles et les réseaux d'observation existants ne permettent de se prononcer ni sur l'existence, ni sur la mesure, et dans le cas des aquifères de socle, ni sur la localisation de cette recharge (BM, 2017).

La présence des eaux souterraines est largement déterminée par le climat, la morphologie et la géologie.

Concernant le climat : trois zones climatiques sont distinguées au Burkina Faso, voir encadré. Toutes les villes sélectionnées pour cette étude sauf une sont situées dans la zone climatique sahélienne. Seule Fada N'Gourma est située dans une zone différente : le Nord-Soudanien.

- La zone sahélienne : elle est au-dessus du parallèle 14°N et a une pluviométrie annuelle moyenne inférieure à 600 mm.
- La zone nord-soudanienne : elle a une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 600 et 900 mm et est située entre les parallèles 11°30' et 14°N
- La zone sud-soudanienne : elle a une pluviométrie annuelle moyenne supérieure à 900 mm et est située au sud du parallèle 11°30'N ;

Climat

La saison des pluies s'étale sur trois à sept mois selon les zones climatiques : dans la zone sahélienne, les précipitations durent environ 3 mois. Elles durent 4 à 5 mois dans la zone nord-soudanienne et 6 à 7 mois dans la zone sud-soudanienne avec une petite saison des pluies de décembre à mars. Avec les changements climatiques, ces durées ont tendance à se réduire.

Les zones climatiques du Burkina Faso

Type de climat	Pm (mm)	Jours de pluie	ETP (mm)	T °C
Sahélien	< 600	< 45/110	2 200 à 2 500	29
Nord soudanien	600-900	50 à 70/150	1 900 à 2 100	28
Sud soudanien	> 900	85 à 100/180 à 200	1 500 à 1 700	27

Source : DGM – Abréviations : Pm : Pluie moyenne annuelle ; ETP : Evapotranspiration potentielle ; T : Temperature

Source : Banque Mondial / WSP, 2017 Rapport de synthèse.

La géologie de près de 82 % de la superficie de Burkina Faso est constituée de roches cristallines, le socle dit précambrien (le socle). Les 8 villes sélectionnées pour cette étude sont toutes situées sur le socle.

Hydrogéologie: Une structure simplifiée du substrat se compose de trois couches :

- Une couche supérieure d'argile ou argile sableuse
- Une couche de socle plus ou moins altérée
- Socle cristallin avec ou sans fractures et de fois très légère altération.

Les eaux souterraines dans la majeure partie du Burkina Faso (socle) sont phréatiques et sont reconstituées pendant la saison des pluies par l'infiltration des eaux de pluie. Le niveau des eaux souterraines suit généralement la topographie (Réf.: IWACO: Bilan d'Eau, 1989) et reflète également les précipitations. Dans une étude de cas à Tougou au nord de Burkina Faso (Réf. M.Koïta, 2017), la fluctuation de la nappe a été mesurée sur plusieurs années (voir figure 5.1). Avec la porosité du substrat connue, la recharge peut être calculée.

Le calcul des réserves des aquifères cristallins est basé sur une méthode qui identifie « l'aquifère cristallin » à plusieurs couches superposées possédant des perméabilités différentes, réparties uniformément sur l'ensemble du territoire du bassin, ou de l'espace de compétence. L'eau souterraine y est ainsi « comptabilisée » au sein de trois strates comme

Géologie du socle

Le socle est constitué des formations suivantes: roches volcano-sédimentaires et plutoniques Birimiennes et roches granitoïdes Eburnéennes. La lithologie consiste en un complexe de sous-sol d'âge archéen et birrimien, constitué de ceintures de roches volcano-sédimentaires et plutoniques Birrimiennes intriguées par de grands batholithes de roches granitoïdes Eburnéennes. Il comprend le basalte, l'andésite, la rhyolite, la rhyodacite, la dacite, les tufs felsiques, le gabbro, la diorite, les granites, les gneiss, les schistes, les schistes, les quartzites et les roches vertes (Castaing et al., 2003b).

indiqué ci-dessus. C'est une hypothèse très simplificatrice qu'il est difficile d'adopter sans discussion, car ce sont les niveaux fissurés qui sont seuls exploitables (et dans une moindre mesure les niveaux d'arènes).

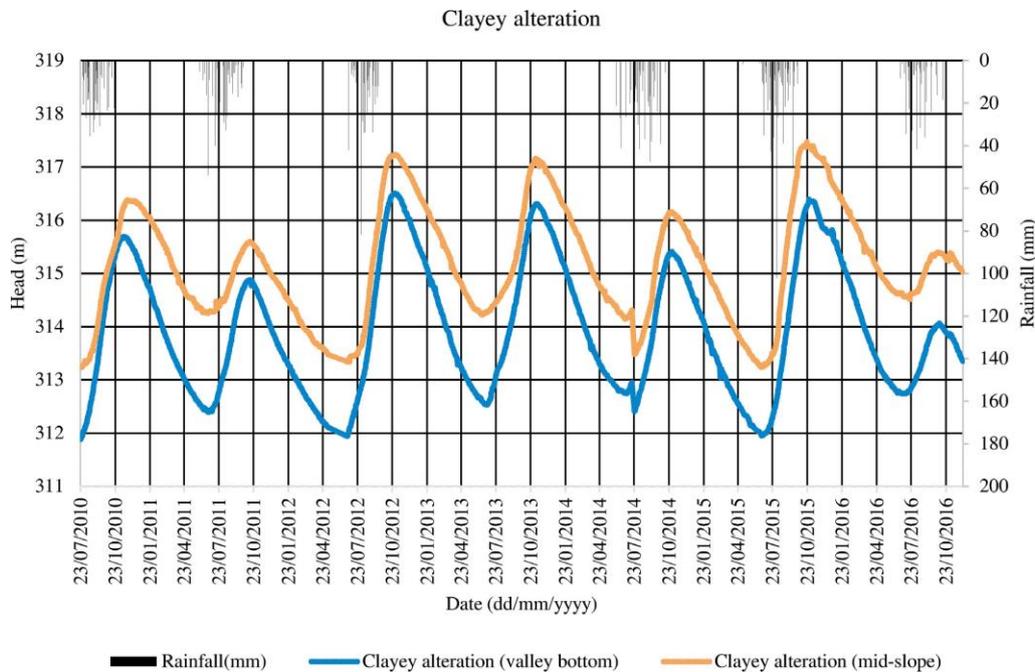


Figure 5.1 : Hydrogramme des eaux souterraines et histogramme des précipitations quotidiennes observées
 Observations dans le fond de la vallée et à mi- pente. (Après : M. Koïta, 2017).

Cette méthode ne tient pas non plus compte de la reprise évaporatoire qui se produit dans les milieux d'altérites argileuses, et qui peut agir jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Parallèlement, l'estimation des ressources renouvelables est calculée sur la base de la différence de niveau de la nappe entre hautes et basses eaux. Calculés de cette manière, les volumes de réserves totales du socle et de ressources jugées « renouvelables » sont probablement très incertains.

V.3 Durabilité :

L'exploitation des eaux souterraines se fait au détriment des réserves naturelles d'eau souterraine, qui sont reconstituées chaque année lorsqu'il pleut (recharge). Plus il y a de recharge, plus les eaux souterraines peuvent être extraites sans conséquences négatives. La durabilité de l'exploitation est donc liée à la recharge. Pour calculer le rendement durable d'une zone, la recharge est d'abord estimée. Pour cela, il est fait référence ici à l'étude de cas à Tougou (Réf. : M.Koïta, 2017).

Dans cette étude de cas, une estimation de la recharge des eaux souterraines est faite à l'aide du bilan hydrique et de la fluctuation du niveau des eaux souterraines (fluctuation de la nappe phréatique ou WTF). Ici la recharge est estimée à une moyenne de 6 à 9% des précipitations annuelles, ce qui est en ligne avec d'autres études (par exemple : IWACO, Bilan d'Eau, 1989). Avec une pluviométrie annuelle de 500 mm, cela correspond à une recharge de 30 à 45 mm par an.

Cependant, il y a des références (WB, 2017) qui prétendent qu'avec une pluviométrie annuelle inférieure à <600 mm, la recharge sera moindre.

La durabilité de l'exploitation des eaux souterraines est liée à la recharge comme indiqué dans le tableau 5.1 basée sur les définitions de l'ONU :

Tableau 5.1: Exploitableté des eaux souterraines en fonction de la recharge

Exploitation des eaux souterraines en % de la recharge	Durabilité de l'exploitation des eaux souterraines
<20%	Durable
20-40%	Moins durable
>40%	Non durable

La figure ci-dessous donne une indication en couleur de l'état potentiel de l'extraction des eaux souterraines par rapport à la recharge annuelle. Cela confirme l'idée que la pénurie de l'eau se produit dans les zones urbaines avec des concentrations plus élevées d'habitants occasionnant une demande en eau plus élevée.

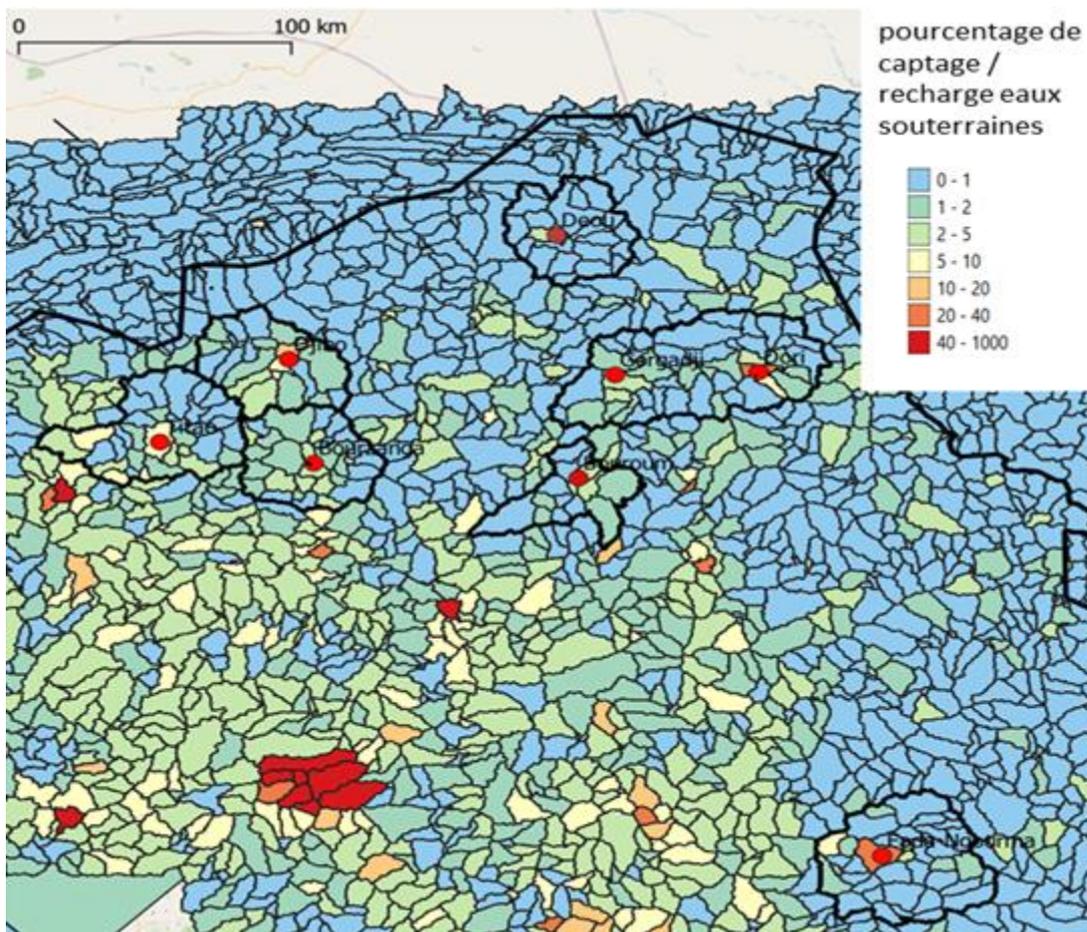


Figure 5.2: Pénurie d'eau par sous bassins au Burkina Faso (J. Groen, 2021). Basé sur i) une recharge de 20 mm / an et ii) l'extraction des eaux souterraines à partir de la densité de population (AKVO 2018) et une utilisation de 23 l/c/j) et à partir de l'hypothèse que les gens tirent toute l'eau des forages / puits de leur environnement.

Il ressort clairement de la figure 5.2 que le pourcentage de retrait / recharge passera bientôt à 20% ou plus autour des grands centres. (20 et 40% sont les règles empiriques concernant la pénurie d'eau et la pénurie d'eau grave, respectivement, réf.: ONU, Rapports sur le développement de l'eau dans le monde).

V.4 Capacité de charge

La capacité de charge des zones d'étude peut désormais être calculée sur la base des données suivantes :

- Précipitations : 500 mm / an
- Recharger 6-9% des précipitations
- Exploitation durable : max 20% de la recharge
- Exploitation moins durable : de 20% à 40% de la recharge

Pour la demande en eau potable est calculée comme suit (lpcpj = litre par capita par jour) :

- 20 lpcpj de l'eau potable, allocation minimale
- 02 lpcpj 10% supplémentaires pour les hôpitaux, les écoles, fuites, etc.
- 01 lpcpj 5% supplémentaires pour le bétail.
- 23 lpcpj demande totale

Sur la base de ces hypothèses, la capacité de charge pour des opérations durables est de l'ordre de 700-1070 personnes par km², calculée comme présentée dans le tableau 5.2. Si la précipitation est plus élevée, disons 700 mm/an comme est le cas à Fada N'Gourma, la capacité de charge est de 1000 à 1500 personnes par km² environ.

Tableau 5.2 Calcul de la capacité de recharge

500 mm/an precipitation			500 mm/an precipitation		
exploitation durable			exploitation moins durable		
6	9	% recharge/an	6	9	% recharge/an
30	45	mm recharge/an	30	45	mm recharge/an
20		% exploitable	40		% exploitable
6	9	mm exploitable	12	18	mm exploitable
16,4	24,7	m ³ /jr/km ² exploitable	32,9	49,3	m ³ /jr/km ² exploitable
23		l/jr/person demande total	23		l/jr/person demande total
715	1072	persons/km ²	1429	2144	persons/km ²
700 mm/an precipitation			700 mm/an precipitation		
exploitation durable			exploitation moins durable		
6	9	% recharge/an	6	9	% recharge/an
42	63	mm recharge/an	422	63	mm recharge/an
20		% exploitable	40		% exploitable
8,4	12,6	mm exploitable	16,8	25,2	mm exploitable
23,0	34,5	m ³ /jr/km ² exploitable	46,0	69,0	m ³ /jr/km ² exploitable
23		l/jr/person demande total	23		l/jr/person demande total
1001	1501	persons/km ²	2001	3002	persons/km ²

Le nombre de points d'eau exploitables durablement par km² dépend naturellement aussi du débit du forage et du nombre d'heures de pompage.

En supposant un débit de 2,5 m³ / h et 10 heures de pompage par jour, 1 à 1,5 forage d'exploitation par km² peut être installé de manière durable. Avec moins de durabilité, cela varie de 2 à 2,8 forages par km². En utilisant des pompes à main (débit maximum 1m³ / h), la densité des points d'eau peut être plus importante.

Il convient de noter ici que les aquifères de la zone d'étude ne sont pas homogènes, mais plutôt très asymétriques et discontinus. Les chiffres mentionnés ci-dessus sont donc indicatifs et peuvent varier localement.

V.5 Conclusions

L'eau souterraine est une bonne source d'eau potable dans de grandes parties du Burkina Faso. L'extraction durable des eaux souterraines est possible, à condition qu'elle soit limitée à 20% de la recharge annuelle ou, mieux même, moins que 5% de la recharge annuelle.

Cela signifie que, sur la base des hypothèses ci-dessus, la demande en eau d'un maximum de 700 à 1000 personnes par km² peut être satisfaite de manière durable avec des eaux souterraines dans les zones d'études. Cette limite peut être temporairement dépassée en situation d'urgence. Dans la zone autour de Fada N'Gourma, où il y a plus de précipitations, cela équivaut à doubler le nombre de personnes par km².

Dans la pratique, cela peut signifier aussi qu'avec des concentrations plus importantes de personnes, un camp pour les PDI devra être trouvé en dehors de la ville.

VI. CHAPITRE VI : RECOMMANDATIONS POUR L'IMPLANTATION DE FORAGES UTILISANT LA GEOPHYSIQUE

VI.1. Approche générale et plan étape par étape

Dans ce paragraphe, les différentes étapes d'une étude d'implantation seront brièvement discutées. Ces informations sont principalement destinées aux grands projets dans lesquels plusieurs ouvrages sont à réaliser pour répondre aux besoins des populations.

Au préalable, des problèmes importants tels que la distance maximale des productions, les rendements attendus (nombre d'ouvrages à réaliser) par rapport aux besoins en eau, doivent être connus et pris en compte dans cette approche par étapes. (Cette information devrait être livrée en phase 1). Les éléments mentionnés ci-dessous peuvent être décrits dans les termes de référence.

VI.1.1. Étude préparatoire (exécutée par le client ou le consultant)

- Collecte des données des forages existants (bases de données, inventaire...)
- Recherche documentaire : littérature, cartes (topographie, géologie, sol, etc.), images satellites haute résolution, photos aériennes, etc.
- Etude linéaire basée sur des images satellites, photos aériennes, cartes magnétiques, cartes géologiques, cartes topographiques...
- Réalisation d'une analyse multicritères (chapitre 4) ou une analyse en superposition (superposition et combinaison de plusieurs cartes) à l'aide des SIG
- Collecte des données géophysiques existantes (au sol ou aéroportées)
- Collecte des informations locales concernant l'utilisation des terres, les infrastructures (lignes électriques, routes secondaires, clôtures), la densité de population, les besoins en eau, les propriétaires fonciers....

Ces informations peuvent être combinées dans un concept hydrogéologique (voir figure 6.1, 6.2, 6.3) et sur la base de ce concept, un choix provisoire de la méthodologie et de l'instrumentation peut être fait. Les emplacements des lignes de profil et des sondages prédéfinis doivent être argumentés et présentés sur une carte.

VI.1.2. Première visite sur le terrain (exécutée par le client ou le consultant ou les deux)

Lors de cette première visite de terrain, une exploration hydrogéologique préliminaire et une première vérification du concept hydrogéologique peuvent être effectuées. L'utilisation de photos aériennes est fortement recommandée, un GPS de poche est indispensable.

- Une première étape importante est de contacter les autorités locales (impliquer également le partenaire en charge) et de discuter de questions telles que l'utilisation et les besoins en eau. Cela peut être un sujet sensible si les forages ne sont destinés qu'au profit des personnes déplacées dans les zones à pénurie d'eau. . Connaître et être informé des enjeux politiques, socio-économiques et fonciers
- Les zones favorables identifiées à partir de l'analyse de superposition doivent être visitées et inspectées. La géologie, les sols, l'utilisation des terres peuvent être vérifiés. Peut-être que des linéaments sont visibles dans les lignes de végétation, la texture et la couleur du sol. Inspectez les petits ruisseaux et les lits des rivières sur les affleurements et les marques d'inondation, décrire et enregistrer toutes les observations pertinentes avec un GPS.
- Inspecter les emplacements prédestinés des profils géophysiques et des sondages (enregistrer les emplacements avec un GPS), marquer l'emplacement sur le terrain. Vérifiez la profondeur d'exploration souhaitée. Vérifiez l'accessibilité du terrain, l'autorisation des propriétaires fonciers, l'emplacement des lignes électriques, les routes locales, l'urbanisation, les clôtures, le bétail. Prendre des notes, des photos et enregistrer les emplacements avec le GPS.
- Les forages existants doivent être inspectés et mesurés (année de construction niveau, apport d'eau statique et dynamique, qualité de l'eau (CE), profondeur de foration, profondeur et longueur du filtre, emplacement de la pompe, capacité de la pompe, heures de pompage etc.) parlez au propriétaire ou au technicien des fluctuations et du rendement.

VI.1.3. Prospection géophysique.

La prospection géophysique, la méthodologie et l'instrumentation seront présentées dans les 2 prochains chapitres et en détail dans les annexes 6.1 et 6.2.

Sur la base de l'étude préparatoire et de la première visite sur le terrain, un choix final pour la méthodologie et l'instrumentation doit être fait. Cela doit être basé sur de nombreux facteurs tels que la profondeur d'exploration, l'état du sol arable, le bruit artificiel (clôtures, lignes électriques, etc.), la résolution souhaitée, la géométrie de la cible et le contraste. Cela peut être vérifié avec des modèles avancés. Même ainsi, différentes méthodes peuvent être appliquées et combinées pour plus d'efficacité. Par exemple, une méthode rapide avec une faible résolution peut être utilisée pour optimiser les emplacements de profils avec une haute résolution mais qui prend plus de temps. Au cours de la campagne de terrain, la qualité des données brutes doit être vérifiée et de préférence interprétée puis intégrée au concept.

VI.1.4. Emplacements des forages

Après l'interprétation des données géophysiques par rapport au concept hydrogéologique, les emplacements et la profondeur des forages doivent être argumentés dans un rapport complet avec des cartes claires, des données brutes

et des données interprétées. Les emplacements de forage doivent être clairement argumentés, décrits et stockés sous forme de coordonnées GPS. Ces emplacements doivent bien sûr être accessibles pour l'atelier de forage.

VI.1.5. Deuxième visite de terrain

L'objectif de cette deuxième visite est la validation des emplacements des forages, de manière à ce que le foreur puisse facilement trouver l'emplacement et avoir accès à l'emplacement (à la fois physique et administratif). Il est recommandé de visiter les emplacements des forages avec le propriétaire foncier local et/ou les responsables locaux (gouvernementaux), les marques finales sur les arbres ou les pierres peuvent être faites et les points GPS peuvent être vérifiés.

Au-delà du cadre de cette étude :

VI.1.6 Forage, supervision, diagraphie de forage

Pendant la foration, un superviseur indépendant doit être présent sur le site. Des échantillons de sol et de roche doivent être prélevés, la vitesse et la profondeur de forage doivent être enregistrées. La longueur du filtre, le diamètre, la taille de la fente, le pack de gravier doivent être installés selon les spécifications et vérifiés par le superviseur. Une fois le filtre installé, le forage doit être directement nettoyé et développé selon les spécifications. Le trou de forage doit être scellé avec un tuyau métallique, un bouchon et verrouillé s'il n'est pas surveillé.

VI.1.7 Tests de pompage, test de qualité de l'eau

Un test de pompage est requis pour les spécifications optimales de la pompe à installer. Plusieurs échantillons d'eau doivent être prélevés lors du test de pompage et analysés (conductivité électrique, Ph, e. coli, chlorure, calcium, sulfate, nitrate, fluor, etc.)

VI. 1.8 Conception technique

De préférence, une pompe solaire doit être installée, bien que les coûts d'achat soient plus élevés, en raison du faible coût d'entretien et de fonctionnement, elle sera récupérée dans les 5 ans dans la plupart des cas. Les coûts de fonctionnement et d'entretien pour la communauté seront beaucoup plus faibles. La conception et l'installation doivent être effectuées par un entrepreneur certifié.

VI.2 Introduction générale sur les méthodes géophysiques

Ce paragraphe décrit les activités géophysiques de la phase 2 telles que mentionnées au chapitre 4.1. L'objectif principal de ce paragraphe est de donner des conseils à toute personne qui doit s'occuper de l'implantation de forages pour l'exploitation des eaux souterraines au le Burkina Faso : pour ceux qui ont besoin de juger sur une offre de

consultant, pour ceux qui doivent juger des rapports de consultance et pour ceux qui veulent encadrer leurs travaux pratiques sur le terrain et pouvoir se poser les questions essentielles. Ce texte peut être considéré comme une amorce pratique manquant dans la plupart des manuels. Des informations de base plus (scientifiques) peuvent être trouvées dans de nombreux manuels (par exemple, Telfort, 1990 : la géophysique appliquée, Reynolds 2011 : une introduction à la géophysique appliquée et environnementale) ou plus spécifiques aux instruments dans les manuels. La plupart des manuels sont disponibles sur Internet.

L'objectif ultime est d'obtenir les meilleurs résultats de tout travail de terrain géophysique. Avec les informations présentées dans ce chapitre et les annexes, avant le début de tout travail de terrain géophysique, les questions essentielles doivent être discutées avec le consultant de préférence avant de signer le contrat :

- 1) Existe-t-il un concept hydrologique sur lequel se base le choix de la méthodologie et des instrumentations ?
- 2) Toutes les données existantes sont-elles collectées et accessibles ? (Cartes géologiques, images satellites, MNT, forages existants (à la fois positifs et négatifs ?), comment ces données s'intègrent-elles dans le concept hydrogéologique ?
- 3) La méthodologie et l'instrumentation choisies sont-elles à la résolution et à la profondeur d'exploration souhaitées ? Cela a-t-il été testé avec une modélisation prospective (voir figures 3a et 3b) ? Le choix d'une certaine méthodologie et instrumentation est-il largement argumenté ?
- 4) De quelle manière les données de terrain seront-elles interprétées ? Quel logiciel sera utilisé ? L'ajustement du modèle est-il basé sur les données mesurées indiquées ? Et l'équivalence ?
- 5) Existe-t-il une carte SIG dans laquelle les informations existantes sont combinées, avec les profils géophysiques et les sondages proposés ?
- 6) Toutes les données brutes seront-elles présentées dans le rapport et sous forme de fichiers accessibles (txt) séparés ?
- 7) Y aura-t-il un rapport avec des commentaires détaillés sur les résultats liés au concept hydrogéologique et aux emplacements des forages proposés et à la profondeur de forage ?
- 8) Peut-on présenter un exemple de rapport récent ?

Dans ce chapitre et les annexes, les nouvelles techniques géophysiques relatives et l'application correcte des méthodes géophysiques conventionnelles connues sont expliquées. Ces informations aident à établir la communication et la compréhension mutuelle entre le client et l'entrepreneur et conduiront, espérons-le, à un meilleur concept des systèmes aquifères souterrains, de la pratique sur le terrain et du rendement. Ceci est essentiel pour une exploration durable des eaux souterraines. La valeur ajoutée des techniques géophysiques relativement nouvelles ou encore inexploitées dans l'exploration des eaux souterraines est discutée par rapport aux pratiques courantes d'utilisation de méthodes conventionnelles telles que le VES, (Vertical Electrical Soundings) et HEP

(Horizontal Electrical Profiling. Une attention particulière est accordée à la mise en œuvre VES et HEP car il s'agit toujours de la technique la plus couramment utilisée.

Le contenu de ce chapitre est en partie basé sur une étude réalisée au Kenya. Cette étude a été réalisée dans 3 types de géologie différents (Socle, Sédimentaire et Volcanique) : « Improving Sustainable Groundwater Exploration with Amended Geophysics » (ISGEAG), Le projet a été financé par le programme d'innovation néerlandais VIA Water. Dans cette étude, plusieurs méthodes ont été utilisées et évaluées (HEP/VES traditionnel, ERT (tomographie par résistivité électrique), TDEM (Time Domain Electro Magnetic) et AMT (Audio Magnetic Telluric)). En outre, FDEM (Frequency Domain Electro Magnetic) et MSR (Magnetic Spin Resonance) seront également abordés. Tous portent sur les aquifères du sous-sol comme au Burkina Faso.

Un aspect important de l'approche, à côté de l'application appropriée des techniques d'exploration géophysique, est de combiner toutes les informations et de construire un concept ou un modèle hydrogéologique (voir aussi les figures 6.1, 6.2 et 6.5)

Figure 6.1, Un exemple de développement d'un concept hydrogéologique pour une zone étudiée (Kenya, Kajiado) : Tout d'abord, un profil de résistivité simple a été construit sur la base des mesures VES existantes. L'emplacement de ce profil a été décidé sur une simple étude de Google Earth, du motif dendritique et des linéaments (voir aussi la figure 6.5). Une zone potentiellement intéressante pour l'exploration des eaux souterraines a été sélectionnée et des profils ERT supplémentaires et des sondages TDEM ont été planifiés. La combinaison de ces nouvelles mesures, images satellites et observations de terrain a abouti au modèle conceptuel : la combinaison d'une zone de fracture majeure et d'une vallée fluviale paléo enfouie, qui peut avoir un excellent potentiel pour l'exploitation durable des eaux souterraines. En raison du manque d'informations géologiques spécifiques provenant des forages, le concept est encore hypothétique. Or un existant (mal administré) hautement productif a bien confirmé ce modèle. La vérification par d'autres puits d'essai est nécessaire pour décider de la capacité d'exploitation de la zone pour un approvisionnement en eau durable.

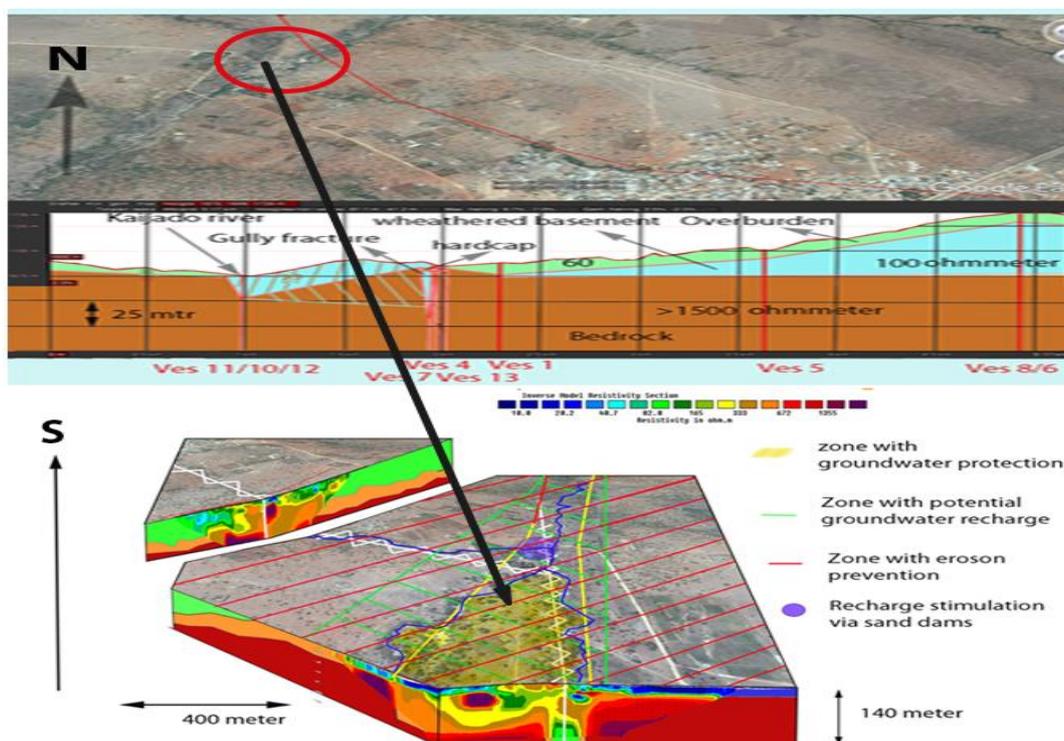


Figure 6.1: Exemple de modèles conceptuels et d'ajustement dans les données de résistivité. zone côtière Kwale (Kenya), (ISGEAG 2018)

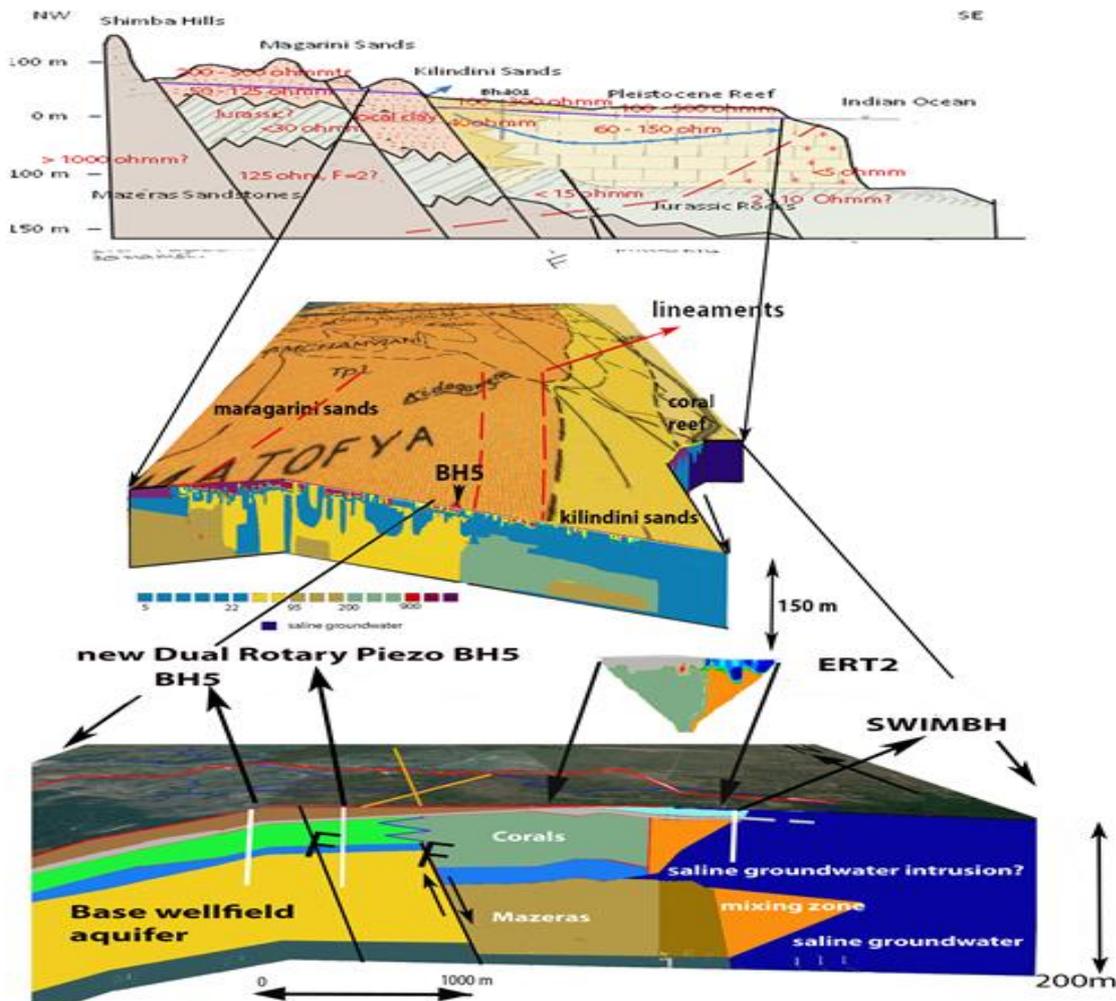


Figure 6.2, Un autre exemple de modèles conceptuels et d'ajustement dans les données de résistivité. zone côtière Kwale (Kenya), (ISGEAG 2018)

VI.3. Méthodes géophysiques

Dans l'annexe 6.1, les méthodes suivantes seront brièvement présentées ainsi que leur application (voir tableau 1) :

- mise en place de terrain,
- résistivité de la formation,
- méthodes conventionnelles VES (Vertical Electrical Sounding) et HEP (Horizontal Electrical profiling),
- ERT (tomographie de résistivité électrique)
- TDEM (TIME DOMAIN Electro Magnetics),
- FDEM (domaine fréquentiel EM),
- MSR (Spin de résonance magnétique)

En annexe 6.2, une liste de contrôle est présentée pour les appels d'offres et les rapports de levés géophysiques. L'Aperçu des méthodes géophysiques et leur application est présenté dans le tableau 6.1 et expliqué en détail en annexe 6.1.

Tableau 6.1 Aperçu des méthodes géophysiques et leur application

Méthode	Profondeur d'exploration	A= électrode distance (longueur de l'antenne de l'émetteur) / exploration profondeur	Résolution	La main d'œuvre	Evaluation des coûts	1D/2D	Paramètre
VES	80 - 100m avec procédure standard	~1/6	faible diminution avec la profondeur	Intensif, 4 personnes	faible/modéré	1D hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente et spécifique
HEB	comme VES	~1/6	Très faible	Intensif, 4 personnes	faible/modéré	Semi 2D	Résistivité apparente
ERT	~150 m	~1/6	Haut (latéral), décroissant avec la profondeur	intensif, 2-4 personnes) (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	2D/3D	Résistivité apparente et spécifique
FDEM	Limité, dépend du type d'instrument	~ distance Émetteur Récepteur dépend aussi de la fréquence	Bas vertical, relativement haut latéral	2 personnes	Modéré/élevé	1D (2D)	P, QP, certains cas résistivité apparente
TDEM	> 200 m	~3	diminue avec la profondeur. Les couches peu profondes, les couches à haute résistivité sont difficiles à détecter.	faible - modéré, 1 à 3 personnes selon la taille de la boucle et l'instrumentation (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	1D (2D) hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente et spécifique
AMT	> 400 m	N / A.	bas, diminue avec la profondeur	Bas, 1 -3 personnes (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	1D hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente, avec TDEM spécifique
MRS	100 – 150 m	~1	bas, diminue avec la profondeur	Bas, 2 -3 personnes (Instrument. compétences sont nécessaires)	Très haute	1D hypothèse de stratification horizontale	Teneur en eau porosité

VI.4. Mise en œuvre des travaux géophysiques

VI.4.1. Préparatifs, étude de bureau

L'information est aujourd'hui accessible même depuis les endroits les plus reculés. Les images satellites peuvent être téléchargées, les rapports peuvent être retracés, même les auteurs peuvent être contactés pour obtenir des informations. C'est probablement la partie la plus importante de l'exploration des eaux souterraines. À partir d'une étude documentaire, un concept hydrogéologique peut être dérivé, testé avec des modèles avancés (pour tester si une cible est visible avec la méthodologie proposée), à partir desquels la méthodologie et le choix des instruments peuvent être optimisés. Avec un tel concept, les mesures peuvent être plus efficaces et les résultats peuvent être comparés au concept, si nécessaire la stratégie de mesure et le concept peuvent être adaptés directement sur le terrain.

Il est très utile de charger toutes les informations dans un programme SIG comme QGIS qui est un logiciel gratuit, utilisé dans le monde entier et accepté en tant que programme SIG professionnel et peut être stocké sous forme de fichiers KMZ ou KML pouvant être chargés dans Google Earth.

Cette étude documentaire doit conduire à un choix argumenté du type de méthodologie et d'instrumentation géophysique avec les emplacements des sondages et profils proposés.

VI.4.2. Modélisation prospective

La modélisation prospective est une méthode très utile pour tester un concept hydrogéologique sur la profondeur et la résolution d'exploration. Dans la figure 6.5, à titre d'exemple, un concept hydrogéologique général du Burkina Faso est modélisé pour différentes configurations d'électrodes pour l'ERT. Un HEP a également été généré à partir de la configuration WENNER avec un $a=50$ m, qui est une configuration souvent utilisée avec HEP. Le HEP ne montre pas de résultats clairs. L'influence de la topographie est illustrée par l'inversion DIPOLE -DIPOLE.

S'il y a un fort effet topographique lié à la profondeur d'exploration, cela doit être pris en compte dans l'inversion. À partir de ces modèles synthétiques, il est clair qu'une instrumentation et une configuration d'électrode correctes ont une influence sévère sur les résultats. La modélisation prospective est également utile pour comprendre les données inversées et peut aider à traduire les données ERT inversées en un concept.

VI.4.3. Conditions de terrain

Une étape importante avant le travail de terrain réel consiste à vérifier les conditions de terrain liées à la méthode proposée. Des problèmes tels que l'accessibilité, l'autorisation des propriétaires de terrain, les problèmes sociaux locaux, les câbles électriques à proximité, les tuyaux, les clôtures, la période de la saison des pluies et l'état du sol végétal peuvent faire ou défaire une campagne sur le terrain. Un temps supplémentaire doit être prévu pour régler ce problème, dans une mission distincte ou au moins avant le début des mesures. C'est un gaspillage d'argent si - par exemple - une campagne de mesure coûteuse doit attendre l'obtention de l'autorisation d'accéder à des terres privées.

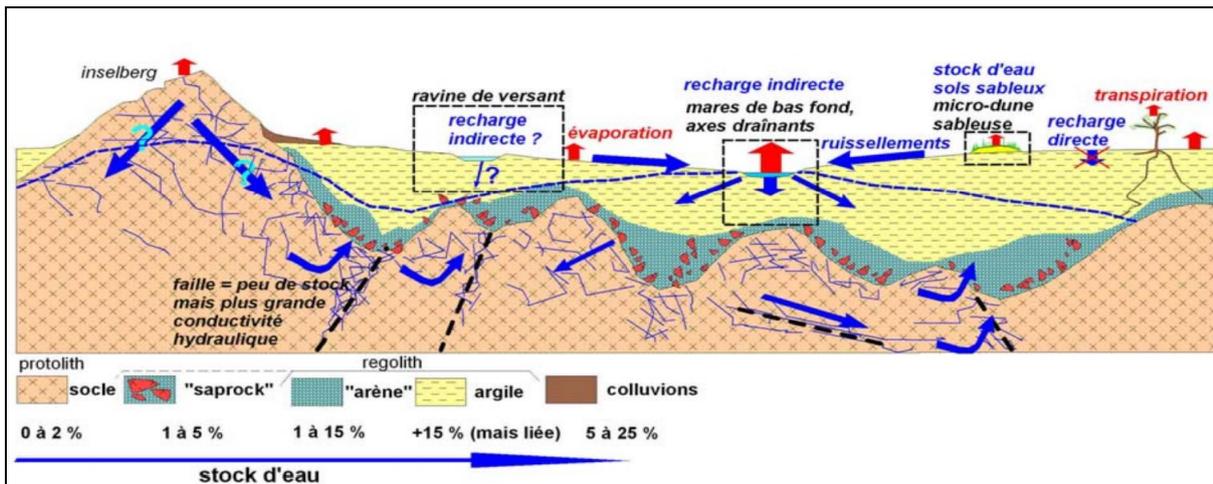


Figure 6.3 Concept of recharge and aquifer systems zone Sahel
(M. Descloitres, LTHE, 2010)

VI.4.4. Burkina Faso

Au Burkina Faso, une grande partie (environ 82%) du pays est située sur ce qu'on appelle la géologie du socle (socle). En général, les eaux souterraines seront concentrées dans la partie altérée de la roche, dans les failles et les vallées enfouies liées aux failles (provenant d'autres circonstances climatologiques). Ces systèmes de failles sont altérés plus profondément et drainent le sous-sol altéré et sont (occasionnellement) rechargés par les rivières, les ruisseaux et les ravins saisonniers. Certaines des roches du socle conviennent mieux à l'exploration des eaux souterraines que d'autres, car certains des sols supérieurs donnent une meilleure recharge (voir les figures 6.3 et 6.5). Il en est de même pour les directions de failles ou de contacts géologiques drainant et concentrant les nappes phréatiques. La longueur de ces systèmes est une mesure pour une zone de recharge potentielle. Les linéaments qui changent la direction des (petites) rivières saisonnières sont particulièrement intéressants, tout comme les croisements de linéaments. Un terrain mis en place, des préparations et des interprétations pour ce type de géologie différera d'une zone dans des bassins sédimentaires comme dans le sud-ouest du Burkina Faso (région de Bobo Dioulasso-Orodara).

VI.4.5. Remarque sur l'instrumentation :

Pour toutes les méthodes décrites dans l'annexe-6.1, il existe de nombreuses marques et encore plus de types d'instruments différents. Au sein d'une même méthodologie, les marques et les instruments diffèrent énormément en termes de prix et d'applications, de paramètres mesurés, d'enregistrement de données, de réduction du bruit, de filtrage, de puissance, d'empilement.

Certains instruments sont conçus pour être conviviaux et sont capables d'effectuer une inversion sur l'instrument (par exemple, ABEM WalkTEM). D'autres n'enregistrent même pas les données ou n'ont pas de GPS intégré. Le temps d'intégration (temps de mesure) sera également différent ou peut être ajusté. La profondeur d'exploration et la résolution peuvent différer considérablement et dépendent fortement des spécifications de ces instruments.

Il est fortement recommandé de demander à un entrepreneur les spécifications de l'instrument qu'il a choisi pour la cible proposée ou de le préciser dans la mission. Certains entrepreneurs n'ont qu'un seul instrument spécifique et prétendent qu'il fonctionnera dans

tous les cas. La modélisation prospective et l'estimation de la profondeur d'exploration avec des approximations simples peuvent être très fructueuses. Informations de base telles que l'année de construction, le type et les spécifications de l'instrument, le certificat d'étalonnage. La longueur du câble ou la taille de la boucle émetteur/récepteur, les distances des électrodes, la quantité de points de données par cycle de mesure et les spécifications de puissance sont des indicateurs importants et essentiels pour estimer la profondeur et la résolution de l'exploration.

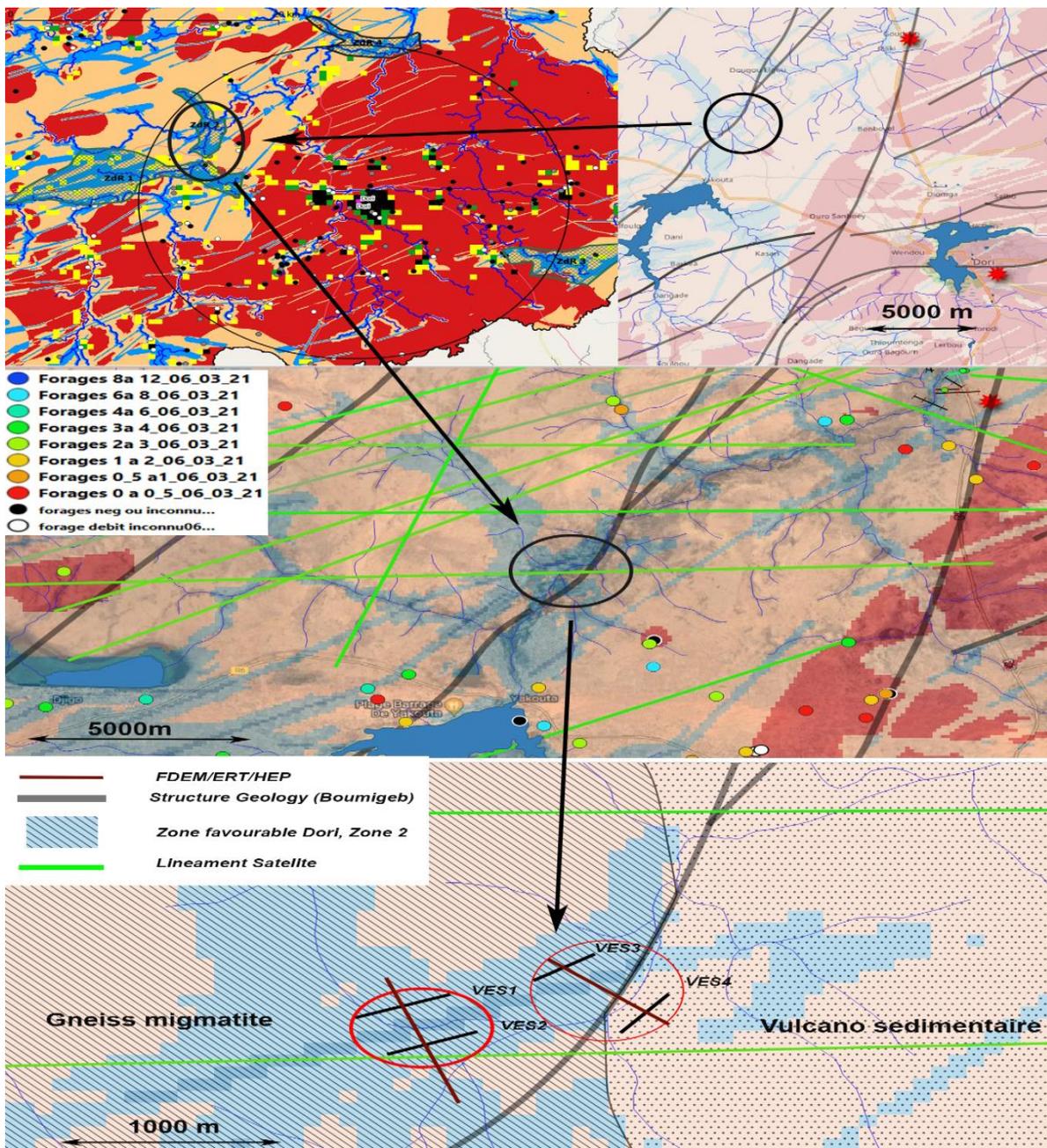


Figure 6.4: exemple d'emplacements suggérés de profils et de sondages sur la base des résultats d'une étude documentaire avec des analyses de superposition, les fragments présentés des différentes cartes sont composés dans Qgis

Les manuels peuvent également aider et sont faciles à trouver sur Internet. Ils peuvent donner des informations générales qui peuvent être utilisées pour discuter du choix de l'instrument avec l'entrepreneur. Dans la plupart des cas, avec l'augmentation de la

profondeur d'exploration, la résolution diminue et des informations potentiellement essentielles à faible profondeur seront perdues. L'instrument qui a la plus grande profondeur d'exploration n'est pas forcément le meilleur choix.

VI.4.6. Remarques sur les rapports

Les rapports et les termes seront également discutés dans les annexes 6.1 et 6.2. Ils doivent être complets, avec les données brutes et les emplacements de mesure d'une manière que d'autres peuvent utiliser, réinterpréter et comparer les résultats avec de nouvelles données. Ce qui est encore plus important, c'est que les rapports peuvent être facilement trouvés et utilisés dans des recherches futures. Au moins tous les rapports d'implantation réalisés pour les ONG devraient être faciles à trouver dans une base de données publique centrale, de préférence sur une carte interactive. Les emplacements de mesure peuvent être « cliqués avec la souris » pour télécharger les rapports directement par n'importe quelle partie. L'implantation et les forages, réalisés pour les ONG sont souvent financés par des fonds publics, il est également dans leur propre intérêt de bien les organiser.

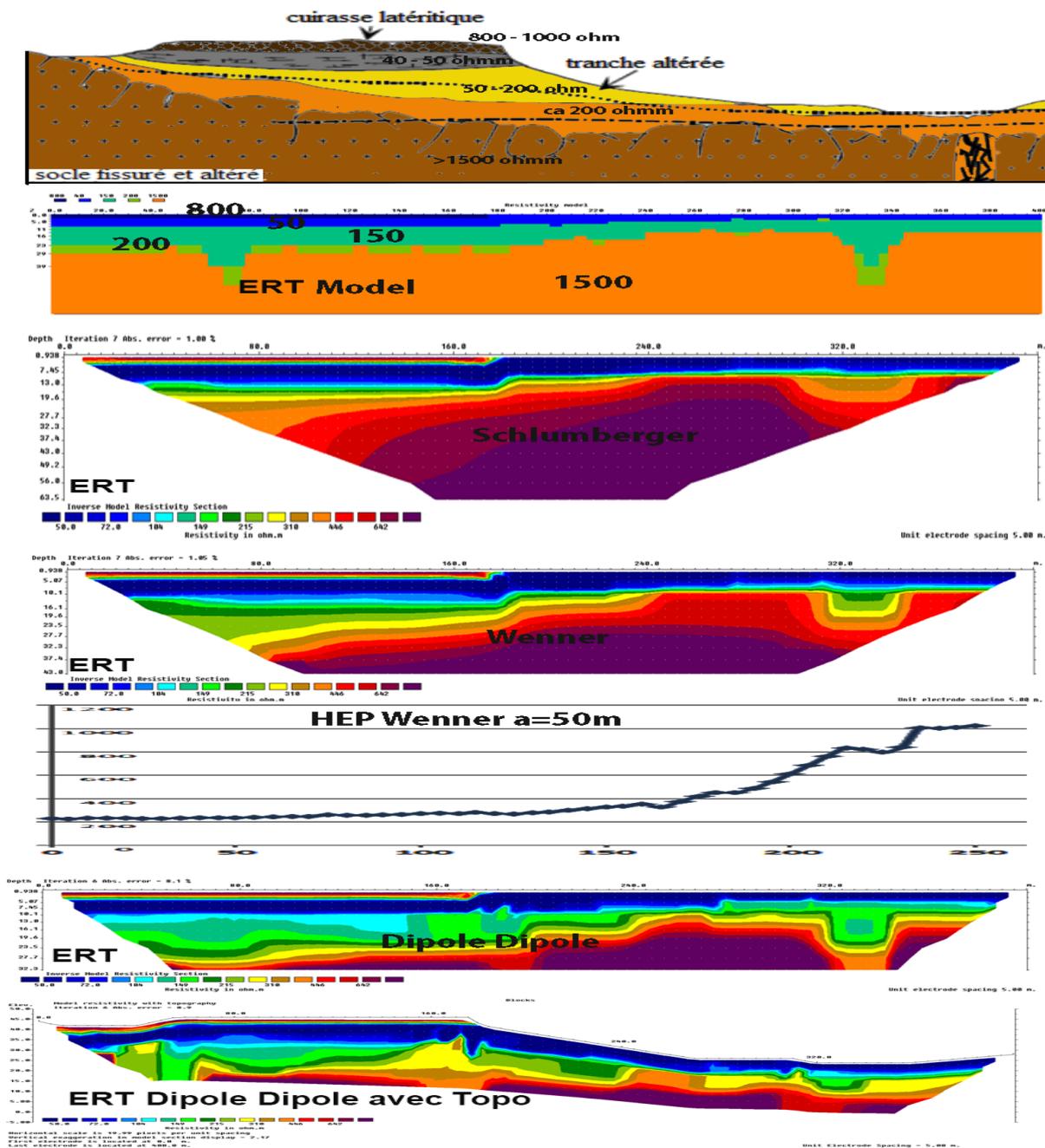


Figure 6.5 Exemple de modèles ERT avant 2D et 1 HEP (modèle généré à partir de l'ERT Wenner) à partir d'un concept hydrogéologique généralisé du Burkina Faso. Notez les différences de profondeur d'exploration et de résolution des différents modèles ERT ainsi que le manque de résolution du modèle HEP de résistivité apparente. Le dipôle Le dipôle a également été inversé avec la topographie. L'inversion a été calculée avec un script mettant davantage l'accent sur les changements verticaux. (Concept modifié d'après M. Ouedraogo, 2016)

VII. CHAPITRE VII : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Limites de l'étude

Les limites de l'étude sont en grande partie inhérentes aux TDR. Selon les TDR, il était plus question, dans une première phase de faire une cartographie des zones aquifères potentielles à travers une analyse multicritère et dans une phase non comprise dans les présentes prestations, de procéder aux implantations à proprement parler sur la base des indications de la présente étude.

En conséquence, les mobilisations (financières, humaines, matérielles et de temps) nécessaires à l'identification de sites à forer n'étaient pas prévues.

Chapitre 1 : Introduction

- À la demande de soutien du Cluster UNICEF WASH Burkina Faso, RVO (acronyme de Netherlands Enterprise Agency) a engagé séparément trois hydrogéologues expérimentés des Pays-Bas dans le cadre du programme Dutch Surge Support (DSS) et deux experts Burkinabé début janvier 2021 pour aider à une étude hydrogéologique en certaines régions du Burkina Faso.
- L'objectif de l'étude est d'améliorer la connaissance de l'hydrogéologie dans 8 villes où la demande en eau a fortement augmenté en raison de l'afflux de Personnes Déplacées Internes (PDI) en raison de la détérioration de la situation sécuritaire.
- L'amélioration des connaissances devrait conduire à des forages plus réussis à l'avenir, les forages auront un débit plus élevé et les eaux souterraines pourront être exploitées de manière plus durable.
- L'étude a démarré début janvier 2021 pour une durée de 6 mois et a été prolongée lors de sa mise en œuvre jusqu'au 31-10-2021.
- Des problèmes de sécurité ont entravé les visites sur le terrain dans certaines villes cibles.
- La liste des villes faisant l'objet de cette étude est donnée ci-dessous :

Region	Province	Commune Departement	Population commune	Year	Population ville	Year	PDI *	Taux d'accès théorique BDD INO 2019 %
Centre Nord	Bam	Bourzanga	48545	2006	7088	2006	31125	59,8
Centre Nord	Namentenga	Bouroum	46232	2006	3115	2006	29196	54,5
Est	Gourma	Fada N'Gourma	187692	2019	73200	2019	32526	51,8
North	Loroum	Titao	104963	2019	18762	2006	23572	57,6
Sahel	Oudalan	Déou	25745	2006	8024	2003	12261	54
Sahel	Seno	Dori	180512	2019	46521	2019	42033	65,3
Sahel	Seno	Gorgadji	30630	2006	3988	2003	43651	59
Sahel	Soum	Djibo	83193	2019	61456	2019	166753	53,5

* Information Cluster WASH, M.R., 02-2021)

- L'UNICEF a indiqué que l'objectif principal de l'étude devrait être la demande en eau dans les limites de la ville car les PDI y sont installées. Pour l'étude hydrogéologique, les limites ont été choisies plus larges et incluent les bassins versants, qui forment une limite hydrologique significative.
- Le tableau est utilisé pour calculer la demande en eau pour les secours immédiats. Cela ne signifie pas que les résultats de l'étude ne peuvent être utilisés que pour répondre à la demande en eau du PDI.
- L'étude n'a pas porté sur la qualité des ressources en eaux souterraines.
- La mise en œuvre du projet a été retardée en raison de i) la discussion sur la zone du projet, ii) l'obtention des cartes géologiques, iii) la lettre de recommandation du ministère et iv) l'accès au terrain.
- On discerne généralement deux phases dans les études d'implantation de forages:
Phase 1.
Délimitation des zones favorables à l'aide des données existantes, des cartes, des données de télédétection, des enquêtes de reconnaissance locales. Au cours de cette phase, les différentes sources d'informations et les cartes sont combinées et comparées. Auparavant, cela se faisait en superposant et en dessinant des cartes. De nos jours, les informations sont disponibles dans un format géo référencé numérisé, ce qui permet de traiter les données dans un environnement SIG.

Phase 2.

Localisation détaillée par l'identification des linéaments avec des images aériennes et satellites à haute résolution, l'exploration hydrogéologique de terrain et les mesures géophysiques pour préciser des zones fracturées.

Chapitre 2 : Collecte et accessibilité des informations

- L'étude consistait à rechercher les informations pertinentes à l'étude et disponibles au niveau de tous les partenaires : l'Administration à travers ses services centraux et décentralisés, les PTF, les ONG et Associations.
- Des visites des services ont été organisées aussi bien à Ouagadougou que dans les régions (visites terrain)
- Le stockage des informations collectées est structuré comme suit : les données de forages, les rapports d'études et documentation et enfin les données numérisées sous forme de cartes de SIG.
- Une bibliothèque "Google Drive" a été créée par l'UNICEF pour le stockage des informations.
- Le 'Google Drive' du UNICEF Cluster WASH est accessible à l'adresse suivante : <https://drive.google.com/drive/folders/13Im29jRhNUBbuPV7kyXgTuNxi-n29O2C?usp=sharing>

Chapitre 3: Analyse des informations collectées.

- Toutes les zones de cette étude sont situées sur le socle cristallin. Le socle cristallin se compose principalement de roches volcano-sédimentaires et plutoniques birimiennes et roches granitoïdes éburnéennes.

- Les aquifères sont constitués de roches fracturées et altérées à la transition entre la zone altérée et le socle. Ces aquifères sont discontinus et ondulent en fonction de la topographie et de la profondeur de l'altération.
- Certaines roches cristallines sont plus favorables que d'autres au stockage et à l'exploitation d'eau, en particulier les roches cassantes. A l'inverse les roches qui s'altèrent en produisant une part importante de minéraux argileux ne sont pas favorables.
- Ces éléments démontrent qu'on ne peut pas déterminer pour ces roches de coefficients d'emménagement globaux comme on le fait couramment dans les roches sédimentaires.
- Une analyse statistique a été effectuée sur les données de forages du BUMIGEB couvrant la zone d'étude.
- Le choix tranches de débits et d'épaisseur d'altération, des classes de formations géologiques et pédologique a fait l'objet d'un consensus au sein de l'équipe des experts.
- La plupart des forages se situent dans la classe d'altération de 10 à 30 mètres (52.1%);
- Au niveau des tranches de débit, mis à part les forages négatifs, les forages pouvant être équipés en PEA viennent en tête avec plus de 25% des ouvrages ;
- Le taux de succès global (débit supérieur ou égal à 0.4 m³/h) est de 64.3 %. Seulement 38.6% ont un débit de 1 m³/h ou plus et 13.3% plus de 2.5 m³/h. Ceci dénote la faiblesse de la productivité des aquifères dans la zone d'étude
- Les données magnétiques aériennes sont un outil puissant pour le traçage des socles cristallins et l'estimation des profondeurs des sources magnétiques ainsi que la cartographie des structures. Ces données ont été acquises auprès du BUMIGEB.
- Afin de faciliter l'interprétation géologique et hydrogéologique, plusieurs techniques de filtrage ont été appliquées aux données magnétiques. Les données magnétiques ont été filtrées (réduites au pôle - RP) pour déplacer les anomalies au-dessus de leur source, définir les tendances et les limites des structures et séparer les anomalies à fréquences variables
- A base de ces données, des cartes sont faits qui présentent les structures majeures ainsi que les directions structurales des bassins versant délimités.

Chapitre 4 : L'analyse multicritère

- Au début de l'étude, des zones de projet ont été identifiées pour les 8 centres, qui correspondent aux bassins versants autour des centres. L'UNICEF a indiqué qu'en vue de la logistique et des coûts, la zone jusqu'à environ 15 km autour des centres est la plus importante (voir cartes de l'annexe 4.2).
- La méthode de l'analyse multicritères a été appliquée pour délimiter des zones favorables aux forages à débits élevés. Plusieurs facteurs ont été combinés pour cette méthode qui influencent le degré de favorabilité. Ces facteurs comprenaient la lithologie, la proximité des linéaments, la proximité des cours d'eau, l'épaisseur de la zone d'altération et le type de sol.
- Cette méthode a été réalisée à l'aide d'un programme informatique qui comprend un Système d'Information Géographique (SIG). Des fichiers raster ont été créés, dans lesquels un score de favorabilité a été déterminé pour chaque pixel de 30 sur

30 m. Sur la base de ces scores, trois zones de favorabilité ont ensuite été cartographiées : favorable, médiocre et défavorable. (voir cartes de l'annexe 4.2.

- Il apparaît que les zones favorables sont les plus répandues autour des centres de Fada N'Gourma et Bouroum, suivis de Déou, Bourzanga, Titao et Gorgadji. Il existe peu de zones favorables autour de Djibo et Dori.
- Les trois zones de favorabilité ont été validées à partir des forages de la base de données du Ministère de l'Eau et de l'Approvisionnement (DEIE). Ceci a montré que les forages avec des débits élevés de plus de 0,7 et de plus 2,0 m³/h se produisent significativement plus souvent dans les zones favorables, sauf dans les secteurs de Fada N'gourma et Bouroum. Les conditions sont généralement favorables dans ces zones et les forages avec des débits élevés sont courants.
- Un autre aspect qui a été étudié à l'aide du programme SIG est la durabilité de l'exploitation des eaux souterraines. On a déterminé le taux d'exploitation (TdE) pour des pixels de 510 par 510 m. Ce TdE est le rapport de l'extraction d'eau souterraine à la recharge dans un pixel. La recharge de 30 mm/an est dérivée de la recherche scientifique dans ce domaine. L'extraction d'eau souterraine est calculée à partir de la population en un pixel (à partir de cartes de population à haute résolution) multipliée par leur consommation quotidienne d'eau potable de 23 l/c/j (qui se compose presque entièrement d'eau souterraine). Les TdE sont inclus dans les cartes ci-dessus de l'annexe 4.2. Les cartes montrent les pixels TdE dans trois classes : 5 à 20 %, 20 à 40 % et plus de 40 %. En dehors des pixels colorés, le TdE est inférieur à 5%.
- Pour la gestion de l'eau, la règle empirique est souvent appliquée qu'au-dessus d'un TdR de 20 %, il y a pénurie d'eau et donc concurrence entre les utilisateurs et les écosystèmes. Les cartes montrent qu'autour des centres et des grands villages il y a pénurie d'eau, parfois même grave pénurie d'eau de plus de 40 %.
- L'UNICEF a fourni des informations sur le nombre de PDI dans les centres et la couverture de l'approvisionnement en eau pour le PDI. Les besoins en eau potable sont calculés à partir de cela, en supposant une consommation d'eau de 23 l/c/j (voir tableau 4.4). Par la suite, le nombre de forages nécessaires a été déterminé, en supposant qu'il s'agisse de forages motorisés d'une capacité de 20 m³/an (2 m³/h pendant 10 heures). Le nombre de forages varie de 6 pour Déou à 89 pour Djibo.
- La surface requise de l'extraction d'eau a également été calculée sur la base que le TdR, à cause de l'extraction de ce projet, ne peut pas dépasser 5 % (tableau 4.4.). Ces surfaces varient de 32 km² pour Déou à 434 km² pour Djibo.
- Cela signifie que 4 à 5 km² sont disponibles pour chaque forage. En d'autres termes, la distance entre les forages est d'environ 2 km. Si, on prend un TdR admissible plus élevé, par exemple 20 %, la densité devient 1 forage par 1 km² et les forages sont distants de 500 m.
- La raison de TdR conservatrice de 5%, choisi pour ce projet, est qu'à l'avenir l'eau doit également être disponible pour d'autres secteurs (approvisionnement en eau potable de la population locale, irrigation, industrie).
- Sur la base des cartes avec les zones de favorabilité et les pixels de taux d'exploitation, des zones de recherche ont été désignées pour la recherche en phase 2 (donc, dans les zones bleues et en dehors des pixels colorés). Ces zones

se trouvent autant que possible dans un rayon de 15 km, selon le souhait de l'UNICEF. Les zones sont indiquées sur les cartes en annexe 4.2.

- Le nombre de zones de recherche pour les 8 centres varie de 2 à 6. La surface cumulée des zones de recherche d'un centre doit être supérieure à la surface nécessaire à l'extraction selon le critère 5 % TdR (tableau 4.4.). La condition est remplie dans la plupart des centres, à l'exception de Gorgadji et Djibo. La superficie des zones de recherche à Gorgadji est de 82 km², alors que 125 km² sont nécessaires. A Djibo, cette différence est encore plus grande. Il y a 89 km² disponibles et 434 km² seraient nécessaires.
- Les hypothèses de TdR admissible et les hypothèses de capacités de forages et de recharge sont quelque peu arbitraires. Néanmoins, on peut conclure que l'extraction des eaux souterraines est possible pour le PDI dans la plupart des centres si les forages sont placés à une distance assez grande.
- Il est peu probable que la zone autour de Gorgadji réponde à la demande. C'est certainement le cas pour Djibo. Dans ces zones, il peut également être nécessaire de rechercher en dehors de la zone de 15 km du centre. Peut-être faudrait-il envisager l'extraction des eaux de surface ici.
- Le nombre de PDI et les besoins en eau à Djibo sont si importants qu'il faut se demander s'il serait préférable de délocaliser les PDI dans des zones avec une plus grande disponibilité en eau.
- Avec cette forte demande en eau de PDI et d'autres secteurs, la surexploitation des eaux souterraines approche partout. Néanmoins, les eaux souterraines restent la ressource première préférée aux eaux de surface. Alors, il est recommandé d'étudier les possibilités d'infiltration artificielle. Un exemple de ceci est simplement réaliser des forages autour d'anciens et de nouveaux réservoirs. La recherche au cours de la phase 2 devrait initialement se concentrer sur ces zones proches de réservoirs existants.

Chapitre 5: Exploitation durable des eaux souterraines

- Les eaux souterraines sont d'une grande importance pour l'approvisionnement en eau potable au Burkina Faso. À la campagne, les eaux souterraines sont souvent la seule source d'eau, suffisante pour répondre à la demande.
- Les estimations dans la littérature indiquent que le captage actuel des eaux souterraines pour l'ensemble du pays ne représente qu'une très petite partie de la recharge: moins de 1% dans le bassin de la Volta et plus de 5% dans le nord. À proximité des villes et des grands villages le ratio captage/recharge est bien supérieur à 5% (chapitre 4)
- La géométrie et les processus de recharge des aquifères du socle cristallin sont mal connus.
- Les eaux souterraines dans la majeure partie du Burkina Faso (socle) sont phréatiques et sont reconstituées pendant la saison des pluies par l'infiltration des eaux de pluie.
- L'exploitation des eaux souterraines se fait au détriment des réserves naturelles d'eau souterraine. Plus il y a de recharge, plus les eaux souterraines peuvent être

extraites sans conséquences négatives. La durabilité de l'exploitation est donc liée à la recharge.

- Dans la littérature la recharge est estimée à une moyenne de 6 à 9% des précipitations annuelles. Avec une pluviométrie annuelle de 500 mm, cela correspond à une recharge de 30 à 45 mm par an.
- La durabilité de l'exploitation des eaux souterraines est liée à la recharge comme indiqué dans le tableau suivant basée sur les définitions de l'ONU :

Exploitation des eaux souterraines en % de la recharge	Durabilité de l'exploitation des eaux souterraines
<20%	Durable
20-40%	Moins durable
>40%	Non durable

- Dans la région du nord de Burkina Faso, la capacité de charge pour des opérations durables est environ de 700-1070 personnes par km². En supposant un débit de 2,5 m³ / h et 10 heures de pompage par jour, 1 à 1,5 forage d'exploitation par km² peut être installé de manière durable.
- Si la précipitation est plus élevée, disons 700 mm/an comme est le cas a Fada N'Gourma, la capacité de charge est de 1000 à 1500 personnes par km² environ.

Chapitre 6: Recommandations pour l'implantation de forages utilisant la géophysique

- Brièvement les différentes étapes d'une étude d'implantation sont discutées. Ces étapes sont :
 - Étude préparatoire (cela peut être exécuté par le client ou le consultant)
 - Première visite sur le terrain (cela peut être exécuté par le client ou le consultant ou les deux)
 - Prospection géophysique.
 - Emplacements des forages
 - Deuxième visite de terrain
- Au-delà du cadre de cette étude :
 - Forage, supervision, diagraphie de forage
 - Pompage ou test de puits, test de qualité de l'eau
 - Conception technique
- Les méthodes suivantes ont été présentées ainsi que leur application :
 - mise en place de terrain,
 - résistivité de la formation,
 - méthodes conventionnelles VES (Vertical Electrical Sounding) et HEP (Horizontal Electrical profiling),
 - ERT (tomographie de résistivité électrique)
 - TDEM (TIME DOMAIN Electro Magnetics),
 - FDEM (domaine fréquentiel EM),
 - MSR (Spin de résonance magnétique)

- Une liste de contrôle est présentée pour les appels d'offres et les rapports de levés géophysiques.
- Pour l'implantation des forages les activités suivantes sont recommandées :
 - Tout d'abord vous déterminez la capacité des zones le besoin de densité de population, et donc le nombre de forages nécessaire (par exemple 2 -3 m3/h) par surface en fonction de la recharge
 - Puis sur la base d'une analyse multicritère, vous déterminez les zones de recherche (surface nécessaire et nombre de forages) de manière large.
 - Dans les zones de recherche vous tracerez des photos aériennes et des linéaments et vous les rechercherez sur le terrain
 - Avant une décision finale sur la méthode et l'instrument qui seront utilisée, son application en fonction de la profondeur d'exploration attendue et du contraste de la cible doit être évaluée avec une modélisation prospective.
 - Le plus approprié serait une combinaison de FDEM avec ERT, FDEM pour voir où vous devez être, puis continuez avec ERT, éventuellement et une bonne combinaison de HEP et VES.
 - De plus, qu'une méthode ne peut pas tout faire (une taille unique ne convient pas à tous), que des connaissances sont nécessaires pour appliquer et interpréter correctement une méthode et que les rapports doivent être complets et récupérables.



ANNEXES

(En fichier séparé)