



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

Spécialité : **EAU**

Présentée et soutenue publiquement

par

Moussa Diagne FAYE

le 14 Juillet 2022

Réf : 2iE/2022-04

**CARACTERISATION ET MODELISATION DU TRANSFERT DE POLLUANTS
DANS UN AQUIFERE FRACTURE EN MILIEU DE SOCLE
(Sous bassin versant de la Sissili – Burkina)**

JURY

M. Samuel NAKOLENDOUSSE, <i>Professeur Titulaire, U. J.K-Z, Burkina Faso</i>	Président
M. Yalo NICAISE, <i>Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi, Benin</i>	Rapporteur
M. Marc YOUAN TA, <i>Maître de Conférences, UFHB, Côte d'Ivoire</i>	Rapporteur
M. Saidou NDAO, <i>Maître de Conférences, Université de Thiès, Sénégal</i>	Examineur
M. Mahamadou KOÏTA, <i>Maître de Conférences, Institut 2iE, Burkina Faso</i>	Examineur
M. Hamma YACOUBA, <i>Professeur Titulaire, Institut 2iE, Burkina Faso</i>	Directeur de Thèse

Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA), 2iE

DEDICACE

À la mémoire de mes grands-parents et de mon cher oncle feu Mamadou FAYE,
À mes parents Cheikh et Khady toujours présents et disponibles,
À mes sœurs Aissatou, Amina, et Jeanne pour la fierté qu'on peut lire dans leurs yeux,
À mon épouse Khady pour la patience et le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse,
À mes merveilleuses filles,
Qu'Allah vous donne la santé et le bonheur
« Si Barkep SERIGNE BETHIO Diamou SERIGNE SALIOU »
Pour le soutien indéfectible et les sacrifices qu'ils ont manifestés à mon égard.
Avec l'espoir que ceci ne sera que l'un des plus modestes résultats de leurs sacrifices.
Voyez l'hommage que je vous rends.

Je vous dédie cette thèse

REMERCIEMENTS

Dire merci n'est pas toujours simple. On dit souvent que « vouloir remercier certains, c'est accepter d'en oublier d'autres ».

Avant tout propos, j'exprime ma reconnaissance à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). C'est à cet Institut que je dois ma formation initiale d'Ingénieur (2010-2012), et c'est toujours dans ce cadre que j'ai évolué professionnellement en tant qu'Enseignant et Assistant de Recherche, depuis 2013 affecté au Cameroun puis en fin 2014 de retour à Ouagadougou. C'est en 2016 que j'ai été positionné de thèse. C'est l'occasion d'adresser aussi ma reconnaissance au Projet de Centre d'Excellence (de la Banque Mondiale), à travers lequel le financement des présents travaux de thèse a été acquis.

Je remercie sincèrement mon Directeur de thèse, le Professeur Hamma YACOUBA secrétaire général de 2iE, qui a assuré la direction de ces travaux, pour la confiance et l'autonomie que vous m'avez accordées. Vous m'avez toujours ouvert les portes de votre bureau et n'avez jamais hésité à me fournir les documents dont j'avais besoin. Vous êtes pour moi un modèle de rigueur scientifique, d'esprit critique, de clairvoyance. Trouvez en ce document l'aboutissement de vos efforts. Merci professeur.

Je voudrais exprimer une grande partie de ma gratitude à l'équipe d'encadrement, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail souvent pas facile. Un grand merci à « *mon beau* » le Professeur Mahamadou KOÏTA, pour ses critiques et apports scientifiques, merci pour votre bonne humeur et les nombreux conseils que vous m'avez prodigués. Une très grande reconnaissance à « *mon mentor* » Pr Angelbert Chabi BIAOU qui m'a formé en ingénierie de l'eau, c'est avec beaucoup de gratitude que je me rappelle des moments passés sur le terrain sous le soleil de Kada, et sous la pluie de Sissili Mossi afin d'acquérir les données. Aux Dr Babacar LEYE « *mon Imam* », et Dr Dimitri SORO « *mon hydrogéologue et conseiller* », leurs démarches scientifiques et surtout leurs grandes « *qualités humaines* » ont été d'une grande aide tout au long de ces travaux.

Mention spéciale à Salfo MAIGA, ainsi qu'à Bouraima TIONO et Aime DOULKOM « *mes frères* » qui ont été d'un appui technique de haut niveau pour la collecte des données, durant les missions de terrain ! Merci à toi, MAIGA, pour ton investissement dans le travail.

Mes remerciements vont également au Pr Harouna KARAMBIRI Directeur de la Recherche, Pr Yacouba KONATE, responsable du Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA), au Pr Igor OUEDRAOGO, responsable de l'Ecole Doctorale de 2iE (ED-2iE) dont je relève.

Je remercie particulièrement « *mes grands frères* » Pr Dial NIANG, Pr MESSAN, Pr Harinaivo, Dr DJIM, Dr ZOROME et Pr LAWANE pour leur soutien, leurs encouragements, et pour m'avoir toujours poussé à aller vers la fin de cette thèse.

Je souhaite adresser quelques lignes particulières aux amis et camarades, du laboratoire LEHSA à 2iE, avec qui nous avons cheminé et nous sommes réjouis pendant nos travaux respectifs de thèse. Je pense à Radegonde, Gnenakantanhan, Richard, Axel, Lae Titia, Marie Thérèse, Ousmane, Amidou, Christian, Ibrahim, Moussa Bruno, Philomina... Ceux qui ont terminé la thèse, Césaire, Roland, Decroly, Bouraima, Gomna, Neya, Boly, Christian, Patrick, Arnaud... Merci.

Merci à tous les collègues de 2iE plus particulièrement à Boukary, Bassirou, SOSSOU, Mounirou, Tazen, MADOUGOU, BASSOLE, Salia, François, ceux du service transport etc.

Un remerciement à toutes « *mes tatis* » de 2iE en FPL, comptabilité, directions... particulièrement à Mme NDIAYE, Mme ZEBA, Mme BADOLO, Mme OUATTARA, Mme DIASSO, Mme NEBIE, Mme OUEDRAOGO Sylvie et Victorine.

Une ligne particulière à mes compatriotes SENEGALAIS de 2iE, ma grande famille au Burkina pour le soutien, plus particulièrement à Madieumbe GAYE qui a joué le rôle de FRERE depuis 2010, merci grand.

Je remercie aussi les amis et proches Modou, Sadikh, Tidiane, Latyr, Mor, Pape Amadou, Ousmane... mes compagnons de lutte depuis la nuit des temps. A Apha, Ignace, Penda, Ndiaga, Bamba Dramé, Sall Ndiaye, Mbagnick, Pape Mory etc je ne pourrais oublier le « *gari* » et le « *Tangana* » de BAMBEY.

Je ne saurais dire merci « *au grand frère que j'ai toujours rêvé d'avoir* » et qui est spécial pour moi, Djibril FAYE, qui a su me représenter durant mon absence du SENEGAL. *Diarama* « *Sama BAYE FALL bi* ».

Je voudrais exprimer toute ma gratitude aux membres du jury, pour leur présence, leur lecture attentive de ma thèse ainsi que les remarques afin d'améliorer mon travail.

À toutes et à tous de près ou de loin, qui m'ont aidé, encouragé, soutenu, je vous adresse un sincère merci !

Diagne FAYE

SOMMAIRE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
SOMMAIRE	IV
RESUME	V
ABSTRACT.....	VI
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE ET LEUR MODE DE TRANSFERT DE POLLUANTS	7
I.1 ETAT DE L'ART SUR LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE	7
I.2 ETAT DE CONNAISSANCE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU DE SOCLE	25
I.3 GEOPHYSIQUE EN HYDROGEOLOGIE ET MODELISATION POUR LES SITES POLLUES	26
I.4 CONCLUSION PARTIELLE	31
CHAPITRE II. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.....	33
II.1 : LE CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DE LA SISSILI	33
II.2 GEOLOGIE DU BURKINA ET DU BASSIN VERSANT	46
II.3 HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	51
II.4 CONCLUSION PARTIELLE	54
CHAPITRE III : ETAT DES LIEUX ET COMPREHENSION DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU SOUS-BASSIN VERSANT DE LA SISSILI AU BURKINA-FASO	56
III.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	57
III.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	64
III.3 CONCLUSION PARTIELLE.....	82
CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ET DE LA GEOMETRIE DU SYSTÈME AQUIFERE - INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES.....	84
IV.1 MATERIELS ET METHODES.....	84
IV.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS	98
IV.3 CONCLUSION PARTIELLE.....	125
CHAPITRE V : MODELISATION NUMERIQUE HYDROGEOLOGIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT DANS LES EAUX SOUTERRAINES	127
V.1 DEMARCHE, INTERET ET OBJECTIF DE CETTE MODELISATION NUMERIQUE.....	127
V.2 CONSTRUCTION DE MODELE HYDRODYNAMIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT.....	129
V.3 MODELE DU TRANSPORT DE POLLUANT	147
V.4 CONCLUSION PARTIELLE.....	153
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	155
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES	162
TABLE DES MATIERES	174
LISTE DES FIGURES.....	178
LISTE DES TABLEAUX.....	181
ANNEXES	181

RESUME

Le sous-bassin de la Sissili connaît une pollution de ses eaux souterraines à travers les activités qui y sont menées. Les études antérieures n'ont pas permis une meilleure connaissance des aquifères du sous-bassin en raison de leur complexité. Celle-ci rend difficiles la représentation et l'évaluation du comportement hydrodynamique des aquifères et du transport de polluants qui s'y trouvent. C'est dans ce contexte que la présente étude a été initiée. Elle vise à comprendre l'évolution du transfert de polluants et d'en appréhender le devenir dans ce type de milieu. Pour atteindre cet objectif, l'approche méthodologique adoptée a consisté dans un premier temps en une analyse physico-chimique et hydrogéochimique pour la caractérisation du polluant et la compréhension des processus physico-chimiques. En second lieu, la caractérisation de la géométrie et de la structure du système aquifère a été réalisée en utilisant les outils de la télédétection couplés à la prospection géophysique et aux lithologs. Et enfin, les résultats issus de ces prospections ont permis de concevoir un modèle numérique pour simuler l'écoulement souterrain par la démarche continu équivalent. Par la suite le modèle du transport de polluant a été élaboré. Le résultat des analyses physico-chimiques montre que les eaux sont agressives, très fortement corrosives et présentent une saturation en calcites. Les valeurs de la conductivité électrique nous conduisent une forte minéralisation, et se traduisent par une indépendance des poches d'eau les unes des autres. Ce qui est en concordance avec la présentation et l'organisation générale des roches du sous bassin. On note aussi que les éléments de cations et d'anions augmentent en fonction de la distance du chemin parcouru par percolation. La minéralisation est gouvernée par le lessivage des sols, les activités anthropiques et l'hydrolyse acide des minéraux de la roche. Les résultats du traitement des images Landsat et d'investigations géophysiques ont montré des directions préférentielles NE-SO, suivie des directions NO-SE et les directions N-S. Ce qui a permis également de mettre en évidence l'existence de failles et de couloirs fracturés qui constitueraient des couloirs privilégiés pour le transport de polluant vers la nappe d'eau souterraine. Le profil d'altération présente 3 couches : la saprolite, la couche fissurée et la roche saine. Il s'allie aux modèles conceptuels d'un profil d'altération présentés ces dernières années qui maintiennent que la conductivité hydraulique des milieux de socle est due à l'altération et non aux fractures tectoniques. Enfin, les résultats découlant des investigations ont admis l'exécution d'un modèle hydrodynamique monocouche en régime permanent. Les résultats des simulations du transport ont montré pour certains forages, une pollution significative étendue avec abondance et sa propagation converge selon le sens de l'écoulement. Tandis que pour d'autres forages la pollution diminue ou est stable.

Mots clés : Géophysique, Hydrogéochimie, hydrogéologie, modélisation hydrogéologique et de polluant, Socle cristallin, Sous bassin de la Sissili, Télédétection

ABSTRACT

The Sissili sub-watershed is experiencing groundwater pollution from the activities that take place there. Previous studies have not allowed for a better understanding of the aquifers of the sub-watershed because of their complexity. This complexity makes it difficult to represent and assess the hydrodynamic behaviour of the aquifers and the transport of pollutants in them. It is in this context that the present study was initiated. It aims to understand the evolution of the transfer of pollutants and to apprehend the fate in this type of environment.

To achieve this objective, the methodological approach adopted consisted firstly in a physicochemical and hydrogeochemical analysis to characterise the pollutant and understand the physicochemical processes. Secondly, the characterization of the geometry and structure of the aquifer system was carried out using remote sensing tools coupled with geophysical prospecting and lithology. Finally, the results of these surveys will be used to design a numerical model to simulate the groundwater flow using the equivalent continuum approach. Subsequently, the pollutant transport model will be developed. The results of the physicochemical analyses show that the water is aggressive, very strongly corrosive and saturated with calcite. The electrical conductivity values suggest a strong mineralization, and translate into an independence of the water pockets from each other, which is consistent with the deposit mode. We also note that cation and anion elements increase with distance from the percolation path. Mineralization is governed by soil leaching, anthropogenic activities and acid hydrolysis of rock minerals. Results from Landsat images and geophysical investigations show preferential NE-SW directions, followed by NW-SE and N-S directions. This also revealed the existence of faults and fractured corridors that would constitute privileged corridors for the transport of pollutants towards the groundwater. The weathering profile shows 3 layers: saprolite, fractured layer and sound rock. It is in line with the models presented in recent years which maintain that the hydraulic conductivity of the basement environments is due to weathering and not to tectonic fractures. Finally, the results of investigations allowed the execution of a single-layer steady-state hydrodynamic model. The results of the transport simulations showed that significant pollution is spread abundantly and its propagation converges to the flow direction. While for other boreholes the pollution decreases or is stable.

Keywords: Geophysics, Hydrochemistry, hydrogeology, hydrogeological and pollutant modelling, Crystalline basement, Sissili sub-watershed, Remote sensing

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

% : Pourcentage

°C : Degrés Celsius

$\Omega.m$: Ohm mètre

1D : Une dimension

2D : Deux dimensions

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

3D : Trois dimensions

ACP : Analyse en composantes principales

AEP : Adduction en eau potable

Al : Aluminium

As : Arsenic

BDOT : Base de données d'occupation des terres

Ca^{2+} : Ion Calcium

CE : Conductivité électrique

Cl^- : Ion chlorure

CN: Cyanure

Cr: Chrome

DEIE : Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau

EC-AEN : Espace de l'agence de l'eau du Nakambé

ED : Ecole Doctorale

F: Fluorure

FeT: Fer total

HCO_3^- : Ion bicarbonate (ou hydrogénocarbonate)

Ha : Habitant

Hp : Champ primaire

Hs : Champ secondaire

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie

IP : Inphase

IS : Indices de saturation

K^+ : Ion Potassium

Km : Kilomètre

Km^2 : Kilomètre carré

km/h : Kilomètre par heure

LEHSA : Laboratoire Eaux, Hydro-Systèmes et Agriculture
m/s : Mètre par seconde
m³/h : Mètre cube par heure
m : Mètre
MEAHA : Ministère de l'Eau, des Aménagements hydrauliques et de l'Assainissement
Mg²⁺ : Ion Magnésium
mg/l : Milligramme par litre
mm : Millimètre
Na⁺: Ion Sodium
NH₄⁺: Ion ammonium
Ni: Nickel
NO₃⁻: Ion nitrate
NO₂⁻: Ion nitrite
SNI Eau : Système national d'Information sur l'Eau
SO₄⁻: Ion sulfate
SOM : Self-Organizing Map
TRE : Tomographie de résistivité électrique
OLI: Operational Land Imager
OP: Outphase
P: Phosphore
PADSEM : Projet d'appui au développement du secteur minier
Pb: Plomb
pH : Potentiel Hydrogène
PMH : Pompe a motricité humaine
PO₄: Orthophosphate
RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RMS : Root Mean Squared
RMP : Résonance magnétique protonique
RSI : Indices de Ryznard
TDS : Total dissolved solid (Solides dissous totaux)
Zn : Zinc

INTRODUCTION GENERALE

La résolution des problèmes liés à l'amélioration de l'accès à eau dans le monde reste toujours en discussion. « Le droit à une eau potable, est un droit fondamental, essentiel à la vie et de tous les droits de l'homme » ; telle est la résolution adoptée par l'assemblée générale de l'ONU de 2010 (Clemenceau, 2018). La situation universelle des ressources en eau a connu une évolution délicate par un accroissement accru de la contamination. Soit le tiers de la population mondiale sera confronté à un problème d'accès en eau d'ici 2025 selon le forum des Nations Unies en 2006 ceci conduisant à l'effort d'évaluation et de suivi de la gestion des ressources en eau par les pouvoirs publics ou privés. La répartition de l'eau dans le monde ne favorise pas sa valorisation. En effet, les ressources en eau représentent 97,5% d'eau salée au niveau planétaire difficilement valorisable pour les activités humaines. La partie valorisable, constituée d'eau douce représente 2,5% et est essentiellement composée d'eau de surface et d'eau souterraine (Gadelle, 1995). Cette partie d'eaux souterraines se raréfie dans beaucoup de régions du monde, notamment en Afrique subsaharienne et la dégradation de sa qualité n'est pas facilement perçue. Cependant, dans un contexte de changement climatique, cette ressource reste rare et sa demande se fait ressentir de plus en plus fortement (Paturel et al. 2010 ; Koïta et al. 2010 ; Soro 2017).

L'eau souterraine en milieu de socle en Afrique représente un atout majeur en termes d'eau de boisson pour les populations rurales, étant donné que les eaux de surface ne sont pas pérennes en plus de leur qualité souvent impure (Carter et Parker, 2009). Le privilège qu'offrent les aquifères de socle est de procurer une ressource en eau généralement bien répartie géographiquement du fait qu'il provient de l'eau de surface et circule entre les fractures interconnectées (Courtois et al. 2010). L'accès à cette ressource en eau souterraine est effectif à travers des ouvrages de captages (puits ou forages) qui captent les eaux présentes dans les altérites pour les zones cristallines ; et des eaux des aquifères fissurés se trouvant sous les altérites. L'exploitation des eaux souterraines a vu le jour dans les années 50 en Afrique dans le but de localiser les nappes ayant une meilleure productivité. Ce repérage s'était limité au niveau des altérites car elles présentaient une structure très complexe par ignorance des zones de discontinuités au niveau de la roche saine. C'est seulement dans les années 70 que le repérage des fractures sous les altérites a vu le jour. La complexité structurale et l'hétérogénéité de ces aquifères résultent sur la connaissance de la géométrie, car elle dévoile une dissemblance horizontale et verticale consécutive à une modification spatiale. Ce qui rend difficile la reproduction et l'évaluation du comportement hydrodynamique de ces aquifères. De nombreux travaux avaient pour but l'étude de la tectonique afin de cartographier le réseau de fracture pour une exploitation

des eaux souterraines en milieu de socle. En revanche, la méthodologie utilisée était plus la photographie aérienne qui présentait certaines limites. Ces limites renvoient à l'importance du couvert végétal, de l'épaisse couche d'altération qui masquent la roche saine et les conditions nuageuses qui rendent relativement impossible la détection des linéaments, etc. De cette situation résulte la difficulté de corréliser les linéaments au couloir de circulation préférentiel des eaux, de rechercher l'eau dans les localités de taille réduite présentant une forte occupation des sols (Savado, 1975). D'après Vouillamoz et al., (2015), l'utilisation d'une approche couplée hydrogéologie/géophysique peut pallier le manque de données et réduire considérablement les éventualités liées à la connaissance des aquifères. Ainsi, avec l'apport de nouveaux outils et de nouvelles techniques de recherche en zones de socle, il est constaté un intérêt par les chercheurs de l'utilisation ajustée des modèles conceptuels hydrogéologiques. Par conséquent, pour mieux déterminer l'aspect hydrodynamique des aquifères en zones de socle, il est nécessaire de comprendre la structure géométrique et la structuration des parties des systèmes aquifères (Wyns et al., 2004 ; Dewandel et al., 2006 ; Maréchal et al., 2004).

Les eaux souterraines fournies à la population sont de mauvaise qualité du fait des activités anthropiques, des sources de pollution ponctuelle, etc. Cette source de pollution a un impact négatif aussi bien sur la quantité que sur la qualité de cette ressource précieuse. Il faut donc une meilleure connaissance des aquifères de socle et de leurs processus de contaminations. Beaucoup d'auteurs se sont intéressés à la recherche de solution durable pour le problème de contaminant mais aussi pour la prédiction de l'évolution spatio-temporelle de cette contamination. On peut citer entre autres, Schwartz (2009) qui a montré au Botswana une contamination qui persisterait au-delà de 6000 ans du fait de rejets nucléaires à travers une modélisation de la contamination des eaux souterraines. Yazicigil et al., (2009), en Turquie, ont travaillé sur la conception d'un modèle de transport de polluant d'un aquifère multicouche et ont démontré une réduction de 20% de la pollution des rejets miniers. Les travaux réalisés par Lghoul et al., (2014) au Maroc et Gandy, Younger, (2003) en Angleterre, Sako et al. (2016), Bamba et al. (2013) au Burkina Faso ont porté sur l'impact de la pollution en eau suite à l'exploitation des ressources minières. Mais cependant, la principale limite est la compréhension du système géométrique et des paramètres qui gouvernent l'écoulement. A cela s'ajoute l'obstacle de joindre les discontinuités au passage de déplacement privilégié des eaux, pour en appréhender l'origine et les mécanismes des différents types de pollution identifiés.

Au Burkina Faso, comme la plupart des pays africains au sud Sahara dont la géologie est dominée par des formations de socle, la recherche et l'exploitation des eaux souterraines dans ces types de formations sont restées au stade prospectif. Dans ce pays, le volume moyen de l'eau disponible

est de 850 m³ par an et par habitant, légèrement en dessous de la marge du seuil de pénurie d'eau qui est de 1000 m³/an /hbt (Valfrey-Visser et Rama, 2012). Les activités anthropiques et les formations rocheuses en forte teneur en arsenic dans les formations de socle sont principalement les sources de pollutions dans ce contexte (Abdou Babaye et al., 2017; Mahamane et Guel, 2015; Faye et al., 2020; Eba et al., 2016). La qualité des eaux peut en être affectée, ce qui peut rendre difficiles et plus complexes les études hydrochimiques de ces milieux du fait de ses fortes teneurs en contaminant. Elle est préoccupante dans le sous-bassin de la Sissili, vu qu'on assiste à la fermeture ou à l'abandon de certains points d'eau dans le cas des eaux riches en arsenic soit 40% en 2015. Les populations se plaignent de maladie liée à la consommation des eaux de forages. De nombreux problèmes sont à la base de la non-maîtrise des ressources en eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif (Rabilou et al., 2018). Il s'agit de la maîtrise des capacités de stockage, la maîtrise des potentialités et des systèmes des aquifères, et la maîtrise de la qualité de l'eau à l'échelle des sous-bassins. Il se pose alors la question de savoir comment appréhender le devenir des polluants dans ce type de milieu ? Cela nous permettra de définir des périmètres de protection de la ressource en eau souterraine dans ce type de milieu.

Pour donner des réponses aux questions formulées, il est adapté pour cette étude une approche qui fait intégrer les images satellitaires, les travaux de terrain qui font appel aux campagnes de géophysique et aux traitements de ces données, à des analyses hydro-chimiques, et enfin à la modélisation de l'écoulement et du transport de polluant.

C'est dans ce contexte qu'a été initiée cette étude qui a pour objectif de contribuer à une meilleure gestion qualitative de la ressource en eau souterraine en milieu de socle. Le choix du sous-bassin de la Sissili s'est basé sur le fait que depuis les études menées par Savadogo, (1984), à cela s'ajoute les programmes d'hydrauliques villageoises, les études de l'agence de l'eau du Nakambé ; une étude de modélisation hydrogéologue et du transfert de polluant n'a jamais vu le jour. Pour le déroulement de cette thèse, il sera effectué des travaux qui intègrent plusieurs approches (chimique, microbiologique, géologique...). Ce déroulement permettra de définir les risques de future pollution pour en prédire l'évolution.

Mais pour atteindre cet objectif général, on se pose la question à savoir : quelle est la contribution des mesures géophysiques dans la conception d'un modèle d'écoulement et de transport dans un milieu de socle ? Les sous-questions de recherches qui en découlent sont les suivantes :

1. Comment appréhender l'origine et les mécanismes des différents types de pollution identifiés pour en évaluer leur évolution ?

2. Quelle est la meilleure approche pour caractériser la géométrie de l'aquifère tout en regardant son action sur les propriétés hydrodynamiques ?
3. Quel est l'apport des mesures géophysiques pour l'élaboration du modèle numérique d'écoulement et de transport ?

Ces questions sont sous-tendues par l'hypothèse générale à savoir que les investigations géophysiques sont appropriées pour la caractérisation de l'aquifère. Les sous-hypothèses de recherche sont les suivantes :

1. L'évolution et l'origine des eaux de forages polluées sont en relation directe avec les faciès.
2. Les méthodes électriques sont appropriées au contexte géologique, elles mettent en relation l'épaisseur et la nature de l'altération.
3. Le modèle numérique d'écoulement hydrogéologique permet-il de simuler le transfert de polluants.

Les objectifs spécifiques de cette thèse se présentent comme suit :

1. Caractériser l'hydrochimie et déterminer la qualité des eaux des aquifères de socle par une étude de la minéralisation. Cela permettra d'apprécier l'évolution de la qualité de l'eau, l'ancienneté ou leur âge et d'identifier l'origine des polluants des forages du socle par l'utilisation des différentes méthodes.
2. Caractériser l'aquifère de socle. Cela renvoie à la connaissance du comportement hydrodynamique de ces aquifères de socle fracturés, qui nécessite une meilleure connaissance de la géométrie, en vue de la conception d'un modèle hydrogéologique.
3. Incorporer les résultats de la géophysique dans un modèle numérique d'écoulement et de transfert de polluant.

Ce document comprend une introduction générale, une présentation de la zone d'étude, un état des lieux de la pollution des eaux, une caractérisation de l'aquifère par levées géophysique, une synthèse de modélisation, une conclusion générale et des perspectives, suivi d'annexes et des articles.

**CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE ET LEUR
MODE DE TRANSFERT DE POLLUANTS**

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE ET LEUR MODE DE TRANSFERT DE POLLUANTS

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique sera faite sur l'état de l'art concernant la caractérisation d'un aquifère, les modèles conceptuels des aquifères de socle et la modélisation numérique hydrogéologique et des transferts de polluants. Une synthèse sur l'état de connaissance de la qualité des eaux souterraines est également faite. Par la suite la synthèse des méthodes géophysiques et leurs applications est faite pour faire un choix judicieux sur la méthode la mieux adaptée pour caractériser un système aquifère.

I.1 ETAT DE L'ART SUR LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE

On différencie couramment deux types de nappes : les aquifères d'altérites (superficiels) et les aquifères fracturés (plus profonds). Au début des années 1950, seuls les aquifères d'altérites sont exploités par des puits, du fait de la méconnaissance des aquifères fracturés. Dans la zone granitique du sous-bassin de la Sissili, ces aquifères ne sont pas productifs. Leur exploitation est en nette diminution du fait de leur profondeur et de la faible épaisseur de la zone saturée. De nos jours, les formations de socle recherchés lors de la prospection géophysique sont les aquifères fracturés. Ces aquifères discontinus composent des retenues plus abondantes que ceux des altérites et se localisent à des profondeurs importantes dépassant parfois 60 m dans la zone de socle (Soro 2017).

I.1.1 SOCLE ET MILIEUX FRACTURES

Les formation de socle sont généralement opposées aux roches sédimentaires du fait de leurs hétérogénéités (Singhal et al. 2008 ; Soro 2017). Elles sont définies comme des formations cristallines, non volcaniques, et non carbonatées ayant une porosité primaire et une perméabilité insignifiantes pour l'extraction de l'eau souterraine, cette définition exclut les sédimentaires (Lictevout, 2018). La fracturation et l'altération représentent l'essentiel des propriétés hydrauliques de l'écoulement dans un sous réseau de fracture. Les aquifères de socle sont présents sur tous les continents, avec une occupation entre 20% et 35%. Son occupation dans le continent africain varie entre 35% et 40% par rapport au globe terrestre (Wright et Burgess, 1992). La figure 1 est une représentation géographique de l'occupation des aquifères de socle en Afrique. Ces formations ont une porosité secondaire et une perméabilité qui donnent des propriétés à la roche (Lachassagne et al., 2011). La présence des ressources souterraines découle

soit de la percolation des eaux de pluie, des échanges aquifères-rivières, ou aquifères-aquifères. Les vides sont remplis à saturation entraînant ainsi une humidité du sous-sol et donne à la roche un réservoir d'eau souterraine. Il arrive souvent que le contenant échange des minéraux avec l'eau et vice versa. Ainsi ces aquifères sont d'un grand intérêt pour les scientifiques comme le montre la figure 2 concernant le nombre de publications allant de 1998 à 2017 d'après la base de données Web of Knowledge. Ces milieux sont d'un avantage certain, ainsi ils ont fait l'objet d'étude suivante : l'adduction en eau ; l'approvisionnement des canaux d'irrigation; l'exploitation et l'utilisation en géothermie ; la prospection réseau de gaz et de pétrole ; la construction de cavités souterraines pour le stockage d'eau, d'huile, de gaz et le passage de tunnels ; la stabilité de versants montagneux ou les infiltrations au sein de barrages ou de tunnels ; la connaissance des migrations de polluants (qui fait l'objet de cette étude).

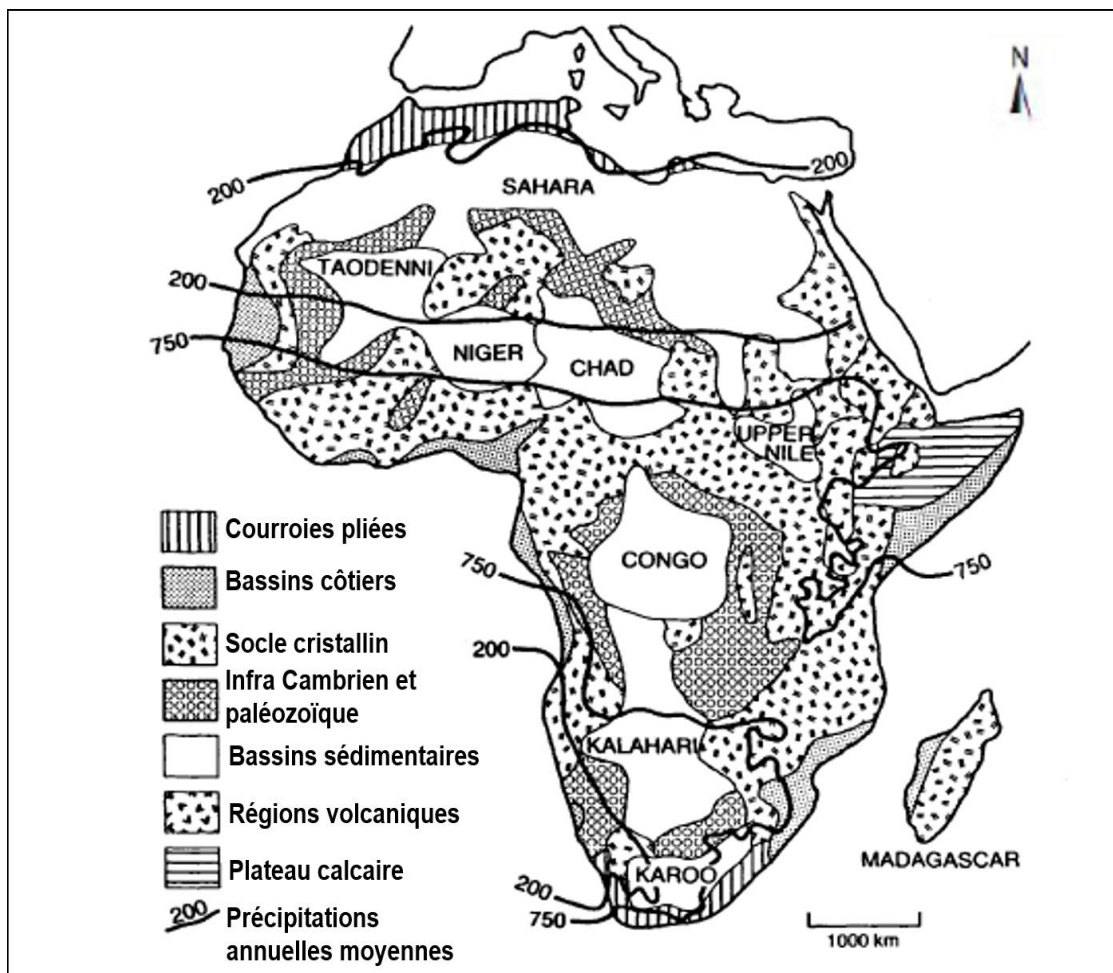


Figure 1: Situation des milieux de socle en Afrique (Wright and Burgess, 1992)

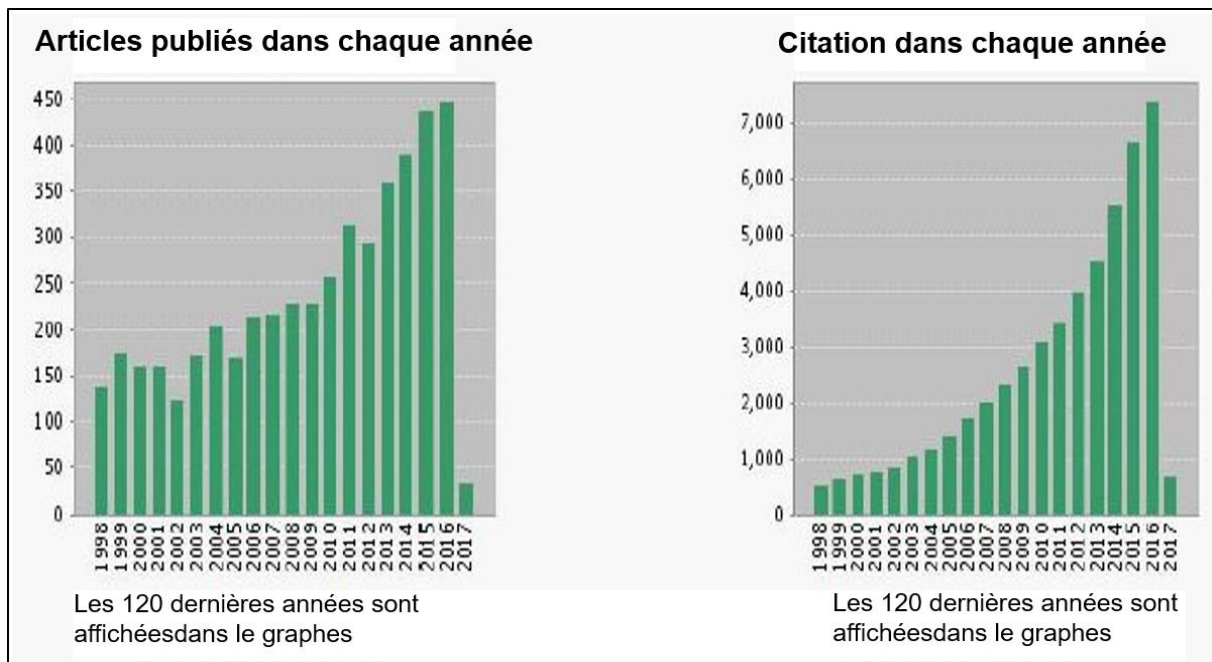


Figure 2: Histogramme du nombre de publications et du nombre de citations de 1998 à 2017 ayant pour sujet « hard rock » dans la base de données Web of Knowledge

I.1.2 ALTERATION ET MODELES CONCEPTUELS DES AQUIFERES DE SOCLE

Au niveau de la littérature, plusieurs profils d'altération reposant sur le socle cristallin sont décrits à partir des logs de forages, basées soit sur des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et géodynamiques (Dewandel et al., 2006; Taylor et Howard, 2000). Depuis l'étude de Savadogo (1975), période à laquelle les premiers profils d'altération sur granite sont décrits dans notre zone d'étude, jusqu'à nos jours, la zone est restée stérile du fait que peu d'étude y est menée. Il existe plusieurs profils d'altérations et de modèles conceptuels des aquifères de socle. Les roches cristallines, une fois exposées à la surface du sol, sont soumises aux processus d'altération chimique et physique (Koïta et al. 2010 ; Soro 2017). Le processus de dilatation de la roche entraîne l'altération des minéraux de la roche mère favorisant le développement d'un profil d'altération. Plusieurs facteurs affectent cette altération à savoir la nature de la roche mère, le type de climat, le gradient hydraulique, le pH et la température de l'eau, la biosphère et le temps d'exposition de la roche (Roques, 2013). Plusieurs descriptions des horizons du profil d'altération ont été faites à partir de différents critères tels que la composition minéralogique et chimique des différents horizons, la structure du profil, les propriétés hydrodynamiques et le paléoclimat (Wright et Burgess, 1992; Le Borgne et al. 2006 ; Ewodo et al. 2018).

Dans les années 1970, deux modèles conceptuels ont été établis suivant des auteurs comme le montre la figure 3. Le premier modèle indique que la perméabilité des aquifères de socle est

liée aux fractures d'origine tectonique (Lachassagne et al., 2011; Savadogo, 1975). Le second modèle dans le même intervalle a réformé cette idée et décrit que la décompression statique de la roche saine est à l'origine de la perméabilité. Dans la mesure où on assiste à une érosion en surface, on a des fissures qui sont issues de la décompression (Engalenc, 1975). Ainsi Chilton et Foster, (1995) ont mis en place un modèle hydrogéologique avec des variations verticales de conductivité hydraulique et des porosités efficaces à travers des mesures quantitatives de distribution de la perméabilité au Zimbabwe et au Malawi. Ainsi, ils démontrent que la décompression lithostatique est à l'origine de la perméabilité. Ce même modèle a été adapté par Dewandel et al., (2006) et Lachassagne et Wyns, (2005) en Inde, notamment en termes d'hydraulique pour les profils de conductivité.

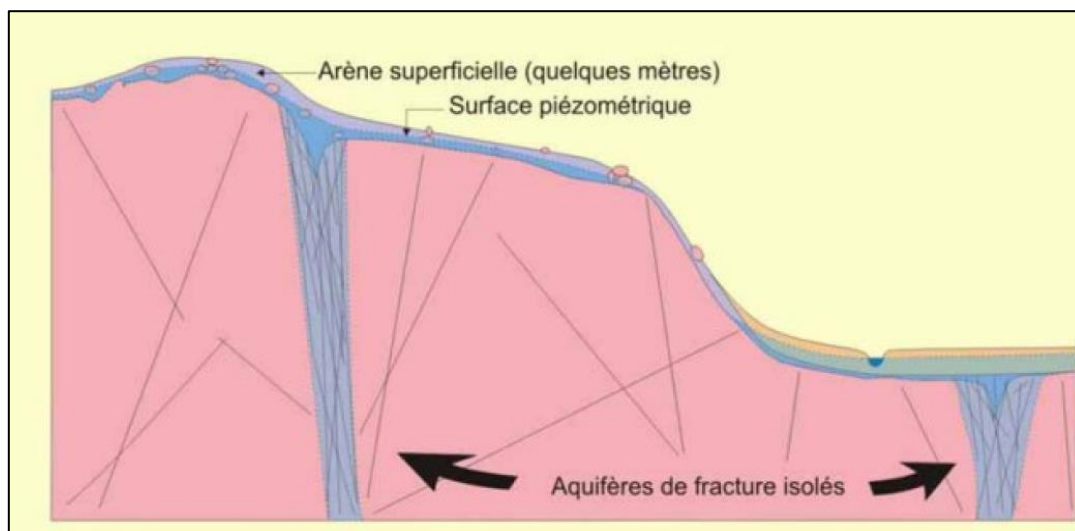


Figure 3 : Ancien concept Ressource en eau localisée dans les fractures tectoniques ou de décompression (Lachassagne and Wyns, 2005)

Lachassagne et al., (2011) démontre que la perméabilité des aquifères de roche dure n'est due ni à la tectonique, ni au déchargement, mais aux processus d'altération, donc le réseau de fractures secondaires et la conductivité ne peuvent en aucun cas provenir de la roche mère. En effet, la décompression nécessiterait une contrainte horizontale ou un différentiel de contrainte très élevé. Et il propose un modèle lié au processus d'altération en se basant sur la perméabilité, comme l'ont défini divers auteurs qui ont travaillé sur l'altération sur granite, et conclus que la fissuration est induite par l'hydrodynamique, tout en montrant que la conductivité est héritée du profil d'altération. La figure 4 montre le profil d'altération typique développé sur roche dure cristalline. En effet, la zone de la saprolite a une perméabilité plus faible tandis que sa porosité est importante. La roche saine est moins poreuse et imperméable. De ce fait, sa transmissivité serait liée à la présence de fracture (Guihéneuf, 2014). Des études plus récentes ont réfuté

l'hypothèse dans laquelle les fractures sont d'origines tectoniques. Ainsi ces études ont démontré un nouveau modèle conceptuel adopté qui est celui à trois types de réservoir comme le montre la figure 5.

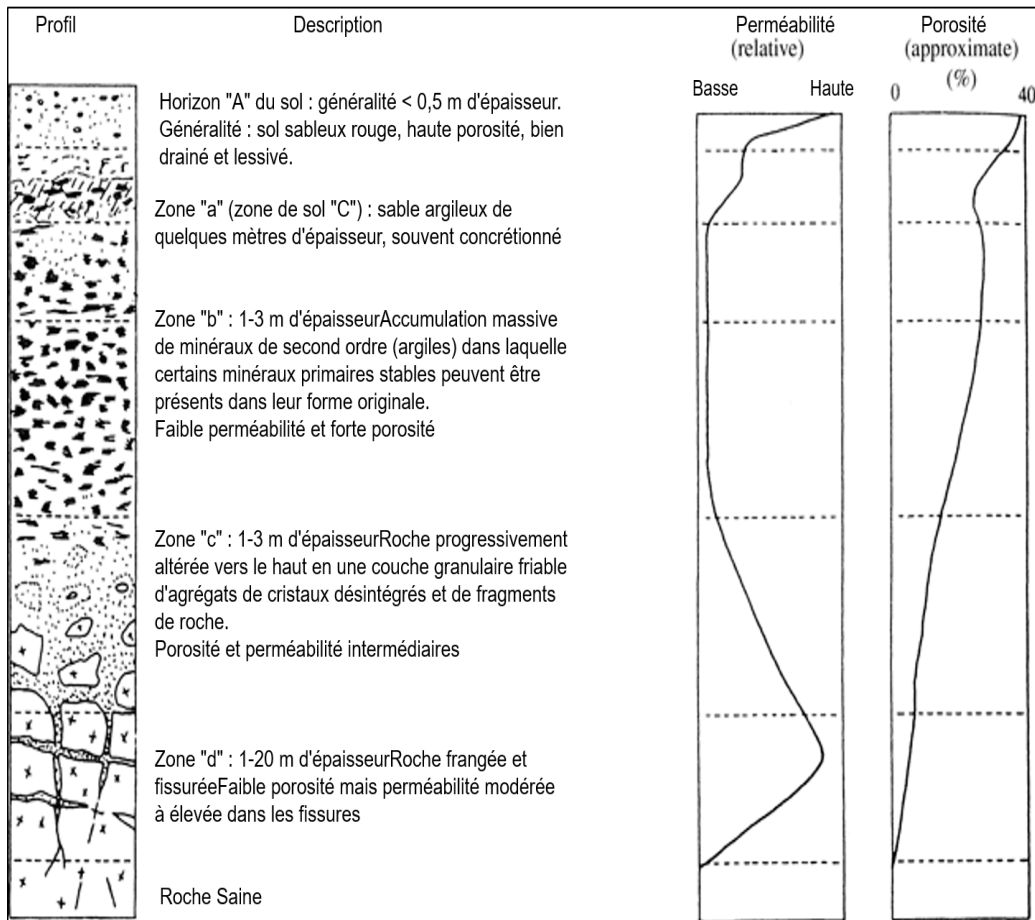


Figure 4: Profil d'altération typique développé sur roche dure cristalline (Acworth, 1987)

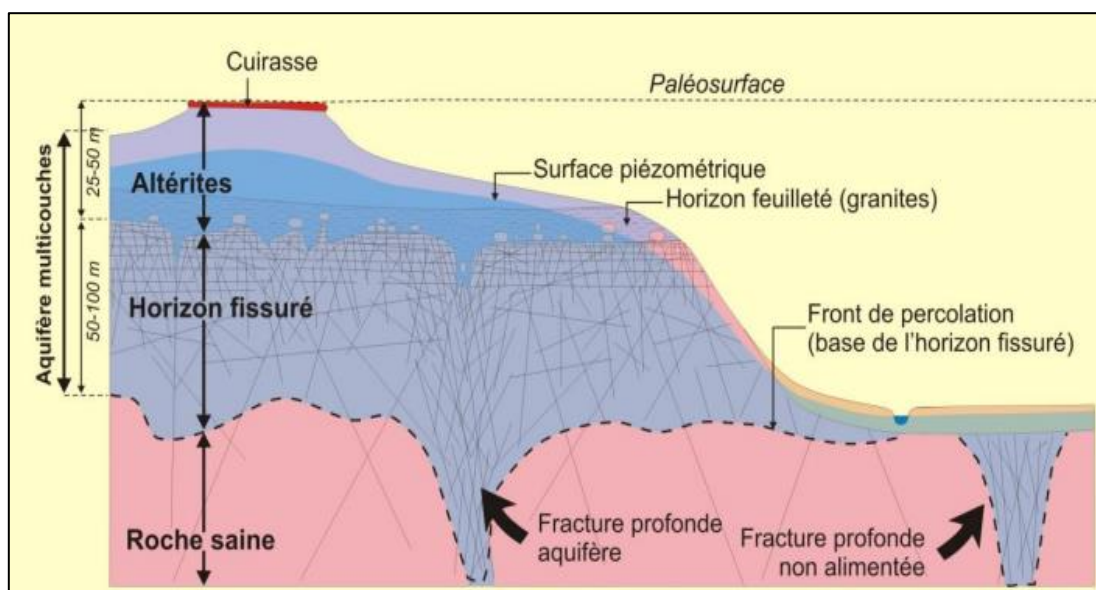


Figure 5 : Nouveau concept : Ressource établi dans les profils d'altération (Wyns et al., 2004)

D'autres arguments sont émis, à savoir la non présence des sources d'oxydation dans la zone de roche dure alors que les principales fractures actives présentent automatiquement plusieurs de ces sources. En effet, Renac et al., (2009) en France et Chenevoy et Piboule, (2007), montrent dans leurs travaux une interaction des eaux de surface et des fluides hydrothermaux en utilisant la géochimie. Il en conclut que le rapport isotopique à une profondeur indique une dissolution des calcites dans l'argilo-calcaire fournissant sa signature isotopique Sr. Il suggère comme origine de la recharge à l'échelle du bassin, une interaction eau-roche entraînée par le flux de chaleur plutôt que par des fractures profondes. Cet argument a été vérifié par Lachassagne et al., (2011) par l'oxydation des micas en particulier la biotite qui produit des chlorites, cela participe à un accroissement du volume du cristal tout en provoquant un intense réseau de microfissures. D'autres auteurs aussi émettent des arguments à savoir : la fracture de la roche mère est loin d'être perméable, elle est ancienne et fermée ; l'apparition des fractures tectoniques est très rare à la fois dans le temps et l'espace. On aura dans ce cas trois compartiments : (1) la saprolite, (2) la roche fissurée et (3) la roche mère saine.

Au niveau des modèles conceptuels, une remarque concernant la terminologie pour identifier les différents horizons a été établie, et les descriptions varient d'une étude à une autre. L'ensemble du profil d'altération présentera des propriétés hydrodynamiques variables latéralement et verticalement en fonction de la position des différents horizons (Comte et al., 2012) (figure 4). Courtois et al., (2010) ont établi au Burkina Faso une méthode basée sur l'épaisseur utile et les propriétés hydrodynamiques en utilisant un modèle conceptuel qui relie les paramètres hydrodynamiques à la lithologie et à la géométrie. Roques (2013) en Bretagne, a proposé un modèle en quantifiant les interactions entre la faille à travers les essais de pompages en utilisant la solution de (Paillet, 1998). Soro (2017), démontre au Burkina Faso que les fractures tectoniques sont situées à plusieurs kilomètres dans le sous-sol et ne peuvent pas être captées par les forages standards qui sont à une centaine de mètres. Koïta et al., (2010) mettent en exactitude en Côte d'Ivoire la dissemblance entre le modèle de profil d'altération monophasé et le modèle d'altération polyphasé. En effet, dans le premier modèle, les couches sont horizontales significatives attribuées aux variations lithologiques tandis que dans le second modèle les couches sont stratiformes et suivent la topographie comme la montre la figure 6 (Dewandel et al. 2006).

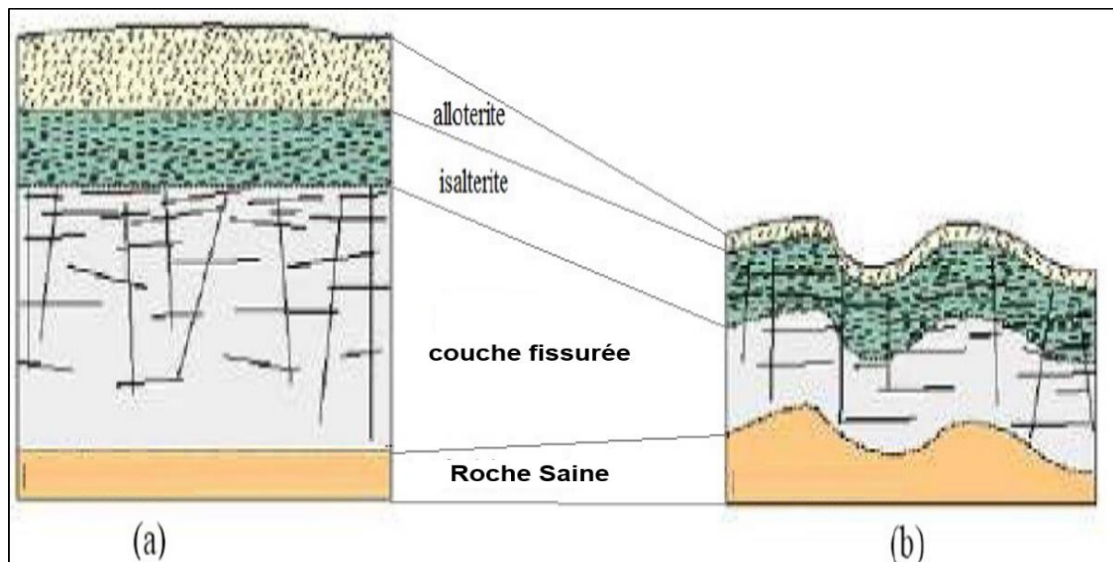


Figure 6:(a) Profil d'altération monophasée sur granite et (b) profil d'altération polyphasée sur granite (Dewandel *et al.*, 2006)

I.1.3 ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION NUMERIQUE

I.1.3.1 MODELISATION EN MILIEUX FRACTURES

Dans un milieu de socle, l'approche retenue pour la modélisation des écoulements est souvent contrainte par la géométrie. L'estimation des propriétés hydrodynamiques reste difficile en milieux fissurés, ce qui contraint la simulation des paramètres hydrauliques. Les approches de modélisation les plus utilisées sont : les modèles de réseaux de fractures discrètes pour les milieux à matrice imperméable, les modèles des milieux poreux hétérogènes fracturés, les modèles continus équivalents et les modèles multi porosité pour les milieux poreux fracturés.

La représentation d'un modèle doit être le plus proche possible en conformité du mécanisme et processus simulé. La résolution d'un modèle mathématique peut se faire soit analytiquement (solution exacte) ou numériquement (différences finies, éléments finis) (Dassargues, 1990). Le modèle mathématique est de deux types : soit déterministe, associant une relation unique avec des paramètres à la valeur unique sur la cause d'un phénomène et les résultats, soit stochastique, pour lequel les paramètres et les variables indépendantes sont des variables aléatoires possédant des fonctions de probabilité connues (Cesar, 2012). En hydrogéologie, les modèles les plus utilisés sont de types physiques déterministes, car ils sont fondés sur l'application des lois physiques générales (comme la loi de Darcy et la loi de continuité). Cependant, on peut distinguer dans un aquifère de socle deux parties à savoir : la matrice représentée par la roche, elle se caractérise par de très faibles porosités et perméabilités ; et le réseau de fractures qui est un système composé de fissures simples et des zones d'interconnexions. Au sein de la fracture,

l'écoulement en chenaux est induit par l'irrégularité et la rugosité des surfaces (figure 7), tandis qu'à l'échelle d'entrecroisement, la conductivité hydraulique dépend de l'arrangement des fractures et, plus particulièrement, de leur degré d'interconnexion (Tsang et Tsang, 1987). De ce fait pour comprendre l'écoulement, il faut déterminer le rôle et l'importance de chaque partie. Cependant, il faut faire le bon choix, car dans la littérature certains auteurs décrivent la difficulté à cerner ces types de roche. Puisque le modèle pas du tout ajusté montre une évaluation inexacte des éléments caractéristiques des formalités d'écoulement, et engendre des erreurs majeures sur leur quantification (Soro, 2017).

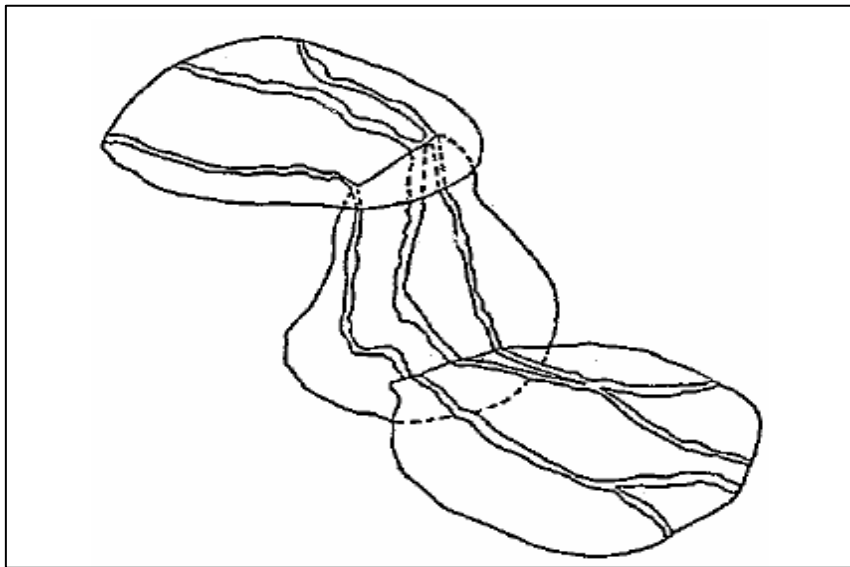


Figure 7: Diagramme schématisant l'écoulement en chenaux dans les fractures (Tsang and Tsang, 1987)

I.1.3.1.1 Approches existantes

Les approches utilisées en modélisation d'écoulement souterrain et de transfert de solutés peuvent être classées en trois catégories. Les modèles « boîtes noires », à compartiments, ou physiquement basés et spatialement distribués (Orban et al., 2011). Ces modèles sont simples d'utilisation et ne nécessitent peu de données (entrée-sortie). Cependant, étant donné qu'ils n'utilisent pas d'information sur la distribution spatiale et l'évolution temporelle des paramètres, ils n'ont qu'une faible capacité de prédiction (Cesar, 2012). Ceci explique qu'ils ne sont généralement pas employés en modélisation hydrogéologique, éventuellement pour la modélisation des systèmes karstiques pour lesquels la représentation des mécanismes est complexe (Goderniaux et al., 2011). A l'inverse, les modèles s'appuient sur des relations découlant des lois physiques tout en tenant compte de la variabilité spatiale des données. Ils sont scindés en mailles dont chacune détient des particularités supposées uniformes sur l'intégralité de la maille (conductivité, porosité effective, coefficients de dispersivité...). Ce qui

rend le modèle performant en termes de prédiction et de distribution spatiale. Cependant, ils nécessitent des données précises et des informations détaillées sur l'hydrogéologie, et dès lors, une paramétrisation avancée (Carrière, 2013). Ils s'appuient sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres les coefficients de perméabilité, d'emménagement et d'infiltration (Dassargues, 1990). La résolution se fait à travers l'équation différentielle si les paramètres sont spécifiés, les sollicitations extérieures précisées et les conditions aux frontières imposées. Le modèle se base sur une représentation des niveaux piézométriques. On distingue deux grandes approches de modélisation suivant la prise en compte des fractures : approche continue et approche discrète. Elles sont représentées dans un domaine déterministe ou stochastique.

1.1.3.1.2 Approche de type continu équivalent

L'intensité de la fracturation dépassant fréquemment une fracture par mètre cube, les calculs d'écoulement dans un modèle chenalisé restent limités à des domaines dont l'extension n'excède pas la centaine de mètres (Koïta et al., 2010). Cette approche est largement appliquée du fait de son simplicité en termes de données requises et de son efficacité digitale via l'emploi de grilles de grandes dimensions. Dans une approche continuum, il s'agit donc d'une représentation équivalente du milieu (aucune distinction n'est faite entre les fractures conductrices et les blocs de matrices) et pas une reproduction conforme de la réalité. Dans ce cas la fracture est un ensemble contenant un nombre important de fractures et pour lequel la relation entre le flux et le gradient de charge peut s'exprimer par la loi de Darcy. De ce fait deux modèles se distinguent : le modèle simple continuum et le modèle double-continuum comme la montre le figure 8. La différence de ces deux modèles réside sur la manière de traiter le réseau de fractures, séparément ou non de la matrice poreuse. La reproduction du système de discontinuités a été faite soit sous la configuration d'un espace simple, soit par deux milieux distincts, dissociant ainsi la matrice et le réseau de fissures (Soro, 2017).

Dans certaines études, le modèle continu équivalent à une représentation monocouche, il est adopté compte tenu de la non-disponibilité de données du domaine à modéliser. Cela passera par une représentation impartiale de la piézométrie et de la conductivité, tout en faisant la moyenne des propriétés hydrauliques. Cela sous entendant qu'il n'y aura pas de différenciation entre la zone de discontinuité et la matrice d'écoulement. Cette démarche a longtemps été adoptée et donne de meilleurs résultats (Billaux et Dedecker, 2018; Cañamon Valera, 2006; Cheikh, 2016; Darcel, 2002; De Dreuzy, 2000; Delorme, 2015; Rafini, 2008). Cependant, ce type d'approche présente des limites du fait qu'il est parfois difficile d'apprécier l'évolution du

transfert de pollution dans la matrice et la discontinuité, à cela s'ajoute l'évaluation fiable des paramètres hydrauliques dans certaines parties du domaine.

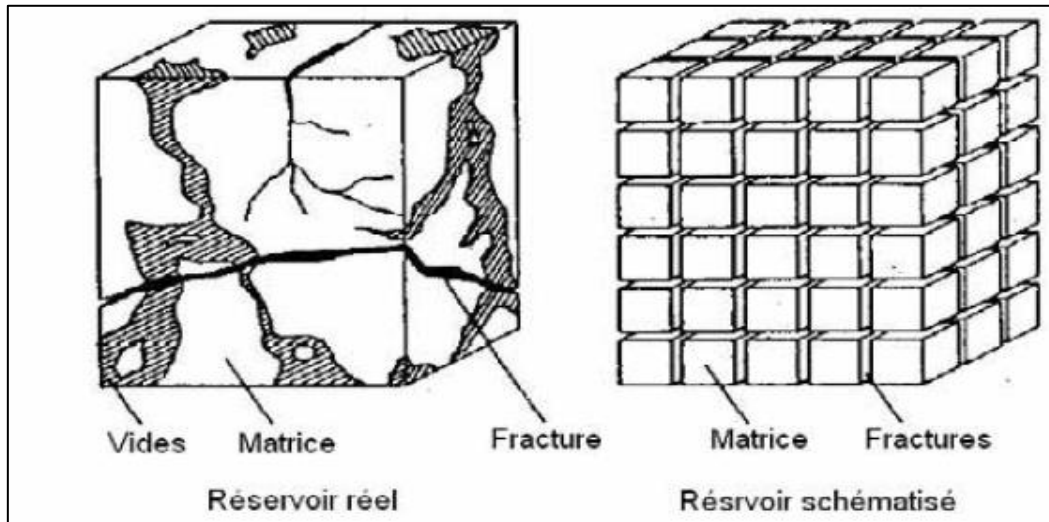


Figure 8 : Schématisation d'un réseau de fractures par un modèle de type double porosité (Warren and Root, 1963)

1.1.3.1.3 Approche discrète

L'approche discrète cible la représentation précise des réseaux de fractures avec plus d'information possible, ce qui la diffère du modèle continu équivalent. Mais sa limite réside sur la maîtrise de la géométrie du système aquifère et de la matrice (Samardzioska et Popov, 2005). Elle évalue une bonne compréhension des différences sur la composition du milieu de la géométrie des discontinuités et de leurs propriétés hydrauliques individuelles (Soro, 2017). Ce modèle donne de meilleurs résultats dans la mesure où il reproduit fidèlement la réalité de l'aquifère. De plus, cette méthode s'avère très coûteuse numériquement en termes de mémoire et de temps de calcul. D'autres approches existent à savoir des approches dites hybrides continues discrètes, des approches stochastiques et des approches fractales (Koïta et al., 2010).

1.1.3.1.4 Types de données et étapes de la modélisation

La consistance des données est indispensable dans la modélisation. Pour ce faire, les besoins sont : des éléments sur la géométrie du système à simuler, des valeurs des propriétés hydrodynamiques, des données sur le prélèvement et la recharge, des données sur la piézométrie (Cesar, 2012). D'après Orban et al., (2011) les étapes à suivre pour un modèle passent par : le but que l'on se fixe, l'élaboration du modèle conceptuel, la reproduction du modèle mathématique. Ensuite il faut faire la sélection d'un modèle numérique par un maillage de la zone à modéliser, l'implémentation traduisant le modèle conceptuel sous une forme

utilisable pour la modélisation. Par la suite il faudra optimiser les paramètres pour reproduire les mesures, l'étude de sensibilité, donnant l'influence des valeurs des paramètres sur les résultats obtenus. Cela passera par une validation, similaire à la calibration, mais utilisant d'autres mesures, l'application du modèle et l'analyse des résultats par rapport aux buts poursuivis. La figure 9 ci-dessous montre les différentes étapes d'une modélisation.

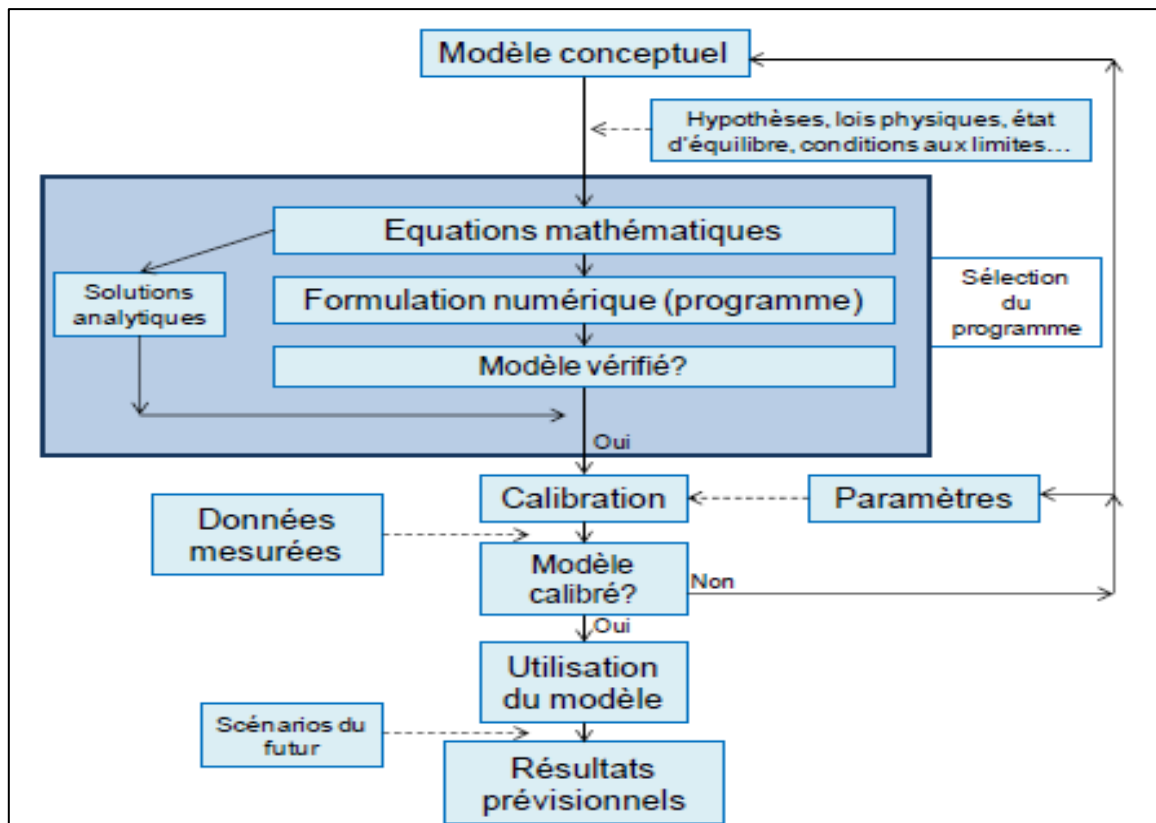


Figure 9: Etape de la modélisation hydrogéologique (d'après Dassargues, 2011)

I.1.3.1.5 Difficultés rencontrées en modélisation

La difficulté réside en premier lieu sur les mesures de terrain. En effet, les paramètres hydrogéologiques peuvent être mesurés, mais les enquêtes de terrain ne sont pas toujours effectuées raisonnablement. Par la suite, les données obtenues à une échelle locale ne peuvent pas toujours être considérées à l'échelle régionale. En effet, la zone à modéliser est souvent caractérisée par une grande variété de contextes géologiques et hydrogéologiques (Orban et al. 2011). En particulier, ce sont les formations aquifères productives qui sont généralement mieux connues que les formations moins productives. Ensuite, le calibrage du modèle est souvent difficile si certains points de référence ne sont connus avec exactitude. Aussi, la grande quantité de données requiert une phase de gestion relativement longue et fastidieuse (Cesar, 2012). On peut aussi noter l'instabilité des approches numériques du fait de la lenteur du temps de calcul.

En effet, plus la zone étudiée est grande la résolution est importante. Enfin, des difficultés sont rencontrées pour décrire les processus à l'échelle régionale, au niveau des concepts mathématiques et numériques à considérer pour résoudre ces problèmes.

I.1.3.2 MODELE NUMERIQUE POUR LE TRANSFERT D'EAU ET DE POLLUANT

I.1.3.2.1 Transfert de fluide en milieu fracturé

Un aquifère est une formation géologique composée d'une partie d'eau ce qui désigne sa porosité et d'autre part cette eau peut être sollicitée désignant sa perméabilité (Fleurant, 2016). La pollution anthropique ou naturelle des aquifères est connue de nos jours. Pour mieux préserver la ressource en eau disponible, il faut appréhender le processus de transport de ce contenant. La géométrie de ce système va guider la dynamique du fluide que caractérise ce milieu.

Les modèles de transfert en milieu de socle sont mis en place essentiellement à travers la prospection hydrogéophysique dans le but d'une gestion durable des eaux souterraines. Ainsi cette combinaison de la géophysique et de la modélisation a été mise en œuvre par beaucoup d'auteurs pour les études de contamination ou transfert de polluants. L'étude de Guyot (2002) a porté sur l'utilisation des sondages électriques et de l'hydrogéochimie des eaux souterraines pour tracer l'extension du panache de pollution. Khemgani et Baelhadj, (2010) ont étudié la structure d'une nappe alluviale en utilisant les sondages électriques. L'étude faite par Luo et al., (2012) a permis d'établir une bonne relation entre les concentrations du polluant calculées par le modèle et la conductivité électrique obtenue par la méthode électromagnétique. Lghoul et al., (2014) a mis en évidence un modèle de transfert de rejet minier grâce aux mesures géophysiques. Soro (2017) a caractérisé la géométrie de l'aquifère de socle grâce à la résonance magnétique protonique (RMP) et à la tomographie de résistivité électrique. Par la suite Bouteraa et al., (2018) ont employé les sondages électriques combinés à l'hydrogéochimie pour déterminer les zones sources de contamination des eaux souterraines.

Le passage de la mesure géophysique aux paramètres hydrodynamiques est un des objectifs de ces études hydrogéophysiques. L'application de l'hydrogéophysique à l'étude des sites pollués, passe par la combinaison de mesures, d'analyses géophysiques et de simulation numérique des différents phénomènes et types de transports. Certains modèles de transport de fluides dans les milieux fracturés prennent en compte cette géométrie complexe pour simuler les écoulements (Atteia et al., 2011; Boronina et al., 2003; Fleurant, 2016; Hunt et Gee, 2002; Jin, 2015; Koïta et al., 2010; Leray et al., 2013; Soro, 2017).

Pour conceptualiser un modèle, des équations mathématiques sont établies. On fait appel aux modèles mathématiques qui sont soit déterministes (ces modèles considèrent que toutes les variables du système ont une valeur bien définie : les modèles mécanistes et conceptuels) ; soit stochastiques (fait appel aux variables spatiales de transport des éléments du milieu). Les modèles stochastiques prennent en compte les phénomènes aléatoires. L'application de ses modèles est possible grâce à la résolution de l'équation aux dérivées partielles par la loi de Darcy tout en fixant les variables. Néanmoins, la difficulté majeure réside à la représentation conforme de la structure à modéliser, et les modèles de transports sont basés sur l'équation classique de convection-dispersion (Goblet, 1981). Si le problème est bien posé, on utilise les méthodes de différences finies, éléments finis ou volumes finis pour le résoudre numériquement.

I.1.3.2.2 Apport de la modélisation hydrodynamique et de transport de polluant

L'importance de l'eau souterraine n'est plus à démontrer surtout dans les zones sous climat infructueux. L'une des nécessités est la mise en évidence d'éléments chimiques nocifs (arsenic, mercure, cyanures, plomb, chrome, cadmium, thallium, fluorure, pesticides, nitrates...) en fortes teneurs dans les eaux de certaines localités. Il en est de même pour les eaux fortement minéralisées pouvant entraîner entre autres des calculs rénaux pour les populations. L'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière, et l'industrie constituent les principales activités de développement du Burkina Faso. Le suivi de la qualité des eaux dans les différentes zones d'activités s'impose pour connaître l'état des concentrations des éléments chimiques dans les eaux ; ce qui permettrait de prendre des mesures préventives au cas où ces concentrations dépasseraient les normes en vigueur au Burkina Faso. Beaucoup d'auteurs se sont intéressés à la détermination de solution durable pour le problème de contaminant afin de prédire l'évolution spatio-temporelle de cette contamination. L'étude de Schwartz et Kgomanyane, (2008) au Botswana, a démontré par la modélisation, la diminution -de la contamination des eaux souterraines par les métaux lourds. Par la suite Schwartz (2009) a montré une contamination qui persisterait au-delà de 6000 ans par des rejets nucléaires à travers une modélisation de la contamination des eaux souterraines. Yazicigil et al., (2009) en Turquie ont travaillé sur la conception d'un modèle de transport de polluant d'un aquifère multicouche et ont démontré une réduction de 20% de la concentration initiale. Les travaux faits par Lghoul et al., (2014) au Maroc et Gandy et Younger, (2003) en Angleterre ont porté sur la contamination sur plusieurs siècles dus au rejet minier. Sako et al. (2016), Bamba et al. (2013) ont étudié au Burkina Faso, l'impact de la pollution de l'eau suite à l'exploitation des ressources minières. Ouandaogo-

Yameogo et al. (2013) indiquent qu'une variation des niveaux piézométriques de la nappe de la ville de Ouagadougou est à l'origine de la contamination des eaux souterraines à travers les fosses septiques.

I.1.3.2.3 Modèle numérique pour le transfert de soluté

Un soluté est une substance soluble dans l'eau, leur regroupement se fait par transport convectif et diffusif qui peut aussi interagir avec le milieu dans lequel la solution se déplace. Les modèles à bases physiques simulant les transferts d'eau sont nombreux, et sont basés selon leurs champs d'application sur l'approche déterministe des phénomènes pris en compte. On peut citer en autres : MARTHE, DEDALE, **MODFLOW**, ROCKFLOW, FEFLOW, TOPMODEL, ANSWERS, MIKE SHE, SIMUSCOPP, SUTRA. À cela s'ajoutent d'autres programmes pour les transports de soluté : ISMAP, RESCOPP, PNETOX etc.

Pour l'atteinte des objectifs fixés, et dans la mesure où cette modélisation se limite seulement dans la zone saturée ainsi qu'au transport de soluté, il est prévu l'utilisation du code **MODFLOW** pour l'hydraulique, les codes **MT3DMS** et ART3D pour le transport de soluté, le code PEST pour l'estimation de paramètres et les codes PMPATH ou **MODPATH** pour le transport de particules au besoin.

Ce choix porté sur MODFLOW est conditionné par le fait que le logiciel a une qualité modulaire en déduction de ses formules élémentaires, de sa composition différentiable et de son progiciel contraire pour résoudre des difficultés hydrogéologiques singuliers. En effet, il dénombre les écoulements d'eau et les élévations piézométriques à partir de la loi de Darcy et de l'équation de diffusivité. Ces écoulements sont ultérieurement utilisés par MT3DMS afin de contrôler le transfert de pollution par rapport aux conditions aux limites relatives au modèle. L'accouplement suppose que les concentrations ne simulent pas les propriétés hydrodynamiques. Ce modèle dit mécaniste permettra de simuler le transfert de soluté dans la nappe en trois dimensions par la méthode des différences finies. Il comporte également des modules permettant de simuler les échanges entre la nappe, les phénomènes de recharge et d'évapotranspiration, l'impact de conditions limites et la rivière et les écoulements dans les drains. Ces codes sont largement utilisés en hydrogéologie par les chercheurs (Kania 2006; Langevin et Guo 2006; Singhal et al. 2008 ; Courbet 2009 ; Iskandar et Koike 2011 ; Zghibi et al. 2011 ; Ashraf et al. 2012; Ghoraba et al. 2013). Ils prennent en compte les phénomènes de charge hydraulique variable spatialement ou dans le temps, panache de pollution, etc. comme la montre la figure 10. L'utilisation du code MODFLOW prend en charge les phénomènes à démontrer, à travers la méthode de résolution des différences finies pour le calcul de la charge

après un maillage du domaine à modéliser (Harbaugh et al. 2000 ; Hill et al. 2000). Les codes MT3DMS utilisées par (Lghoul et al., 2014; Zheng et Wang, 1999) et les codes ART3D utilisées par Cesar, (2012) sont établis pour une résolution de l'équation de dispersion par une approche eulérienne-lagrangienne tout en s'appuyant sur la simulation obtenue par MODFLOW. Dans ce cas, on estime que la variation de la masse ne perturbe pas le champ de l'épanchement. L'équation différentielle sans MODFLOW ci-après donne une mobilité en 3D de la densité constante à travers un milieu poreux (l'équation 1) de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux suivante :

$$\frac{d}{dx} \left[k_{xx} \frac{dh}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[k_{yy} \frac{dh}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[k_{zz} \frac{dh}{dz} \right] + W = S_s \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

où K_{xx} , K_{yy} et K_{zz} sont les conductivités hydrauliques suivant les axes x, y et z,

h est le potentiel de pression [L],

W est le flux volumique par unité de volume,

S_s est le coefficient d'emménagement spécifique du milieu poreux,

t est le temps.

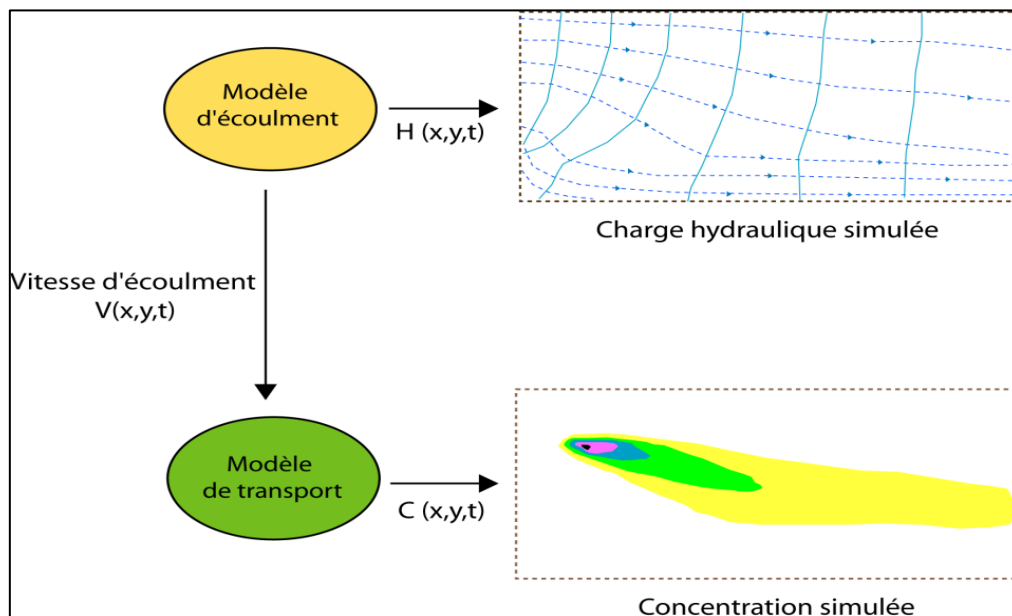


Figure 10: Relation entre le modèle hydrodynamique et le modèle de transport du polluant (Lghoul, 2014)

I.1.4 MODELISATION NUMERIQUE : EQUATIONS ET TECHNIQUES DE RESOLUTION RÉGISSANT LES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS

I.1.4.1. EQUATIONS REGISSANT LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

En milieu non saturé, les transferts d'eau sont le plus souvent verticaux par l'infiltration de la recharge. En milieu saturé les écoulements sont essentiellement latéraux et d'origine différente,

sous l'effet du gradient de charge (Stamm et al., 2002). Enfin, il peut découler d'une surélévation du niveau des écoulements souterraine due au changement local des gradients hydrauliques, elle-même engendrée par des contrastes de conductivité hydraulique ou des variations de la section d'écoulement. Les différents types d'écoulements souterrains sont gouvernés par un certain nombre de lois et d'équations (Todd et Larry, 2005). L'infiltration et le transfert de l'eau dans un aquifère en milieu perméable dépendent de la gravité qui dirige la charge hydraulique, exprimée mathématiquement par la loi de Darcy. Cependant, il faut différencier le transfert dans la zone saturée de ceux dans la zone non saturée, pour ce faire il existe des lois et relations qui permettent de symboliser les apports entre teneur en eau et conductivité hydraulique. De ce fait, les variations piézométriques sont correctement prises en compte.

- **Loi de Darcy**

La loi de Darcy admet de déterminer l'écoulement d'un fluide à travers un espace perméable. Dans un problème à une dimension, elle s'exprime par l'équation (2) de la façon suivante :

$$q = -K \text{ grad } h \quad (2)$$

q est le flux à travers un milieu poreux, h (m) exprime la charge hydraulique, et K la conductivité hydraulique (m/s).

- Lois du transport en solution des éléments conservatifs : quand les solutés entrent dans le sol, ils sont transportés par l'eau avec un mouvement convectif, dispersif et diffusif affectant la migration du polluant en milieu saturé comme le montre la figure 11. L'équation du transport de masse s'écrit suivant l'équation (3) comme suit :

$$\left[\text{div}(D \text{ grad } C - CU) \right] = \Phi R \frac{C}{t} + \frac{C(\text{chimie})}{t} \quad (3)$$

(Sous-entends le modèle de transport)

U : vitesse de Darcy,

R : le facteur de retard du composé dissous dans l'eau est égal à 1

Φ : la porosité et de la masse volumique des grains solides du milieu poreux

C : concentration de soluté en milieu saturée

T : temps de transport

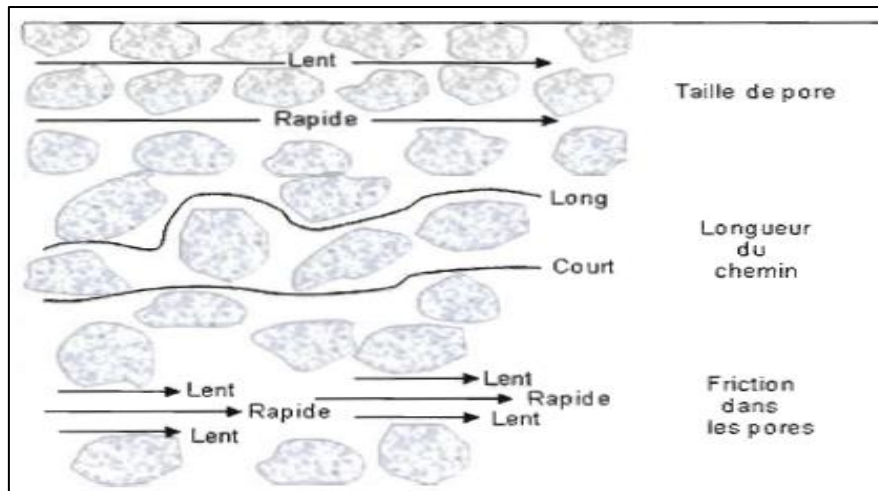


Figure 11: Facteurs influençant la dispersion longitudinale à l'échelle du pore (adaptée de Fetter, 2001)

I.1.4.2. CONCEPTUALISATION DE LA MODELISATION DES TRANSPORTS DE MASSE :

MODFLOW et MT3DMS sont utilisés pour faire une large gamme de prédictions sur le système d'écoulement des eaux souterraines y compris la distribution de la concentration de soluté descendant d'une source de contaminant à un point d'intérêt, et beaucoup plus. MT3DMS peut être utilisé pour modéliser l'advection en dispersion anisotrope complexe, à l'état d'équilibre et aux champs de flux transitoires. Cela permet de faire des multi espaces réactions et simuler ou évaluer l'atténuation naturelle de contaminant. On suppose que le polluant et le transport dans les eaux souterraines sont contrôlés par le processus d'advection-dispersion. Les flux advectifs sont définis aux sources d'écoulement, à la tête constante et aux limites de la rivière. Pendant la simulation, la fonction « conjugué généralisé Gradient Solver" est sélectionné et le fini implicite la méthode de différence avec pondération en amont est appliquée au terme d'advection. Les méthodes des différences finies et la méthode des éléments finis sont les plus utilisées en modélisation, présentant chacun des avantages et des inconvénients.

- La méthode des **différences finies** : il faut un maillage du système en cellules rectangulaires. Ainsi, elle accepte de désigner une ample variété de difficultés. Toutefois, elle est difficile à mettre en œuvre pour des géométries très complexes, et n'est pas adaptée au problème pour lesquels des tenseurs de conductivité, hydraulique non diagonaux sont définis et très hétérogènes.
- La méthode des **éléments finis** : le maillage consiste en une représentation par des cellules polygonales quelconques (Diersch et Kolditz, 2002), ce qui le rend plus flexible sur le plan géométrique. En effet, les conditions limites, l'hétérogénéité et

les sollicitations externes sont représentées de façon plus précise. Mais l'un des inconvénients réside dans la non-conservation de la masse.

I.1.4.2.1 CONDITIONS AUX LIMITES

Elles admettent les interactions de flux ou de solution les domaines à spécifier et les domaines environnants. Les écoulements d'eau dans les aquifères sont basés sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité qui régit les écoulements. Le fonctionnement d'un modèle numérique dépend de la définition des conditions aux limites. En effet, le modèle est conditionné par le fait que l'eau rentre ou sort à ces limites (Philippe, 2011). Les conditions aux limites pour le transfert d'eau peuvent être de types potentiels imposés ou de types flux imposés selon la condition de Dirichlet comme le montre la figure 12 selon Hacini (2006). Les conditions aux limites pour le transfert de solutés possible peuvent être de types : injection d'un débit d'eau à concentration constante, pompage de la nappe soumis à une pollution.

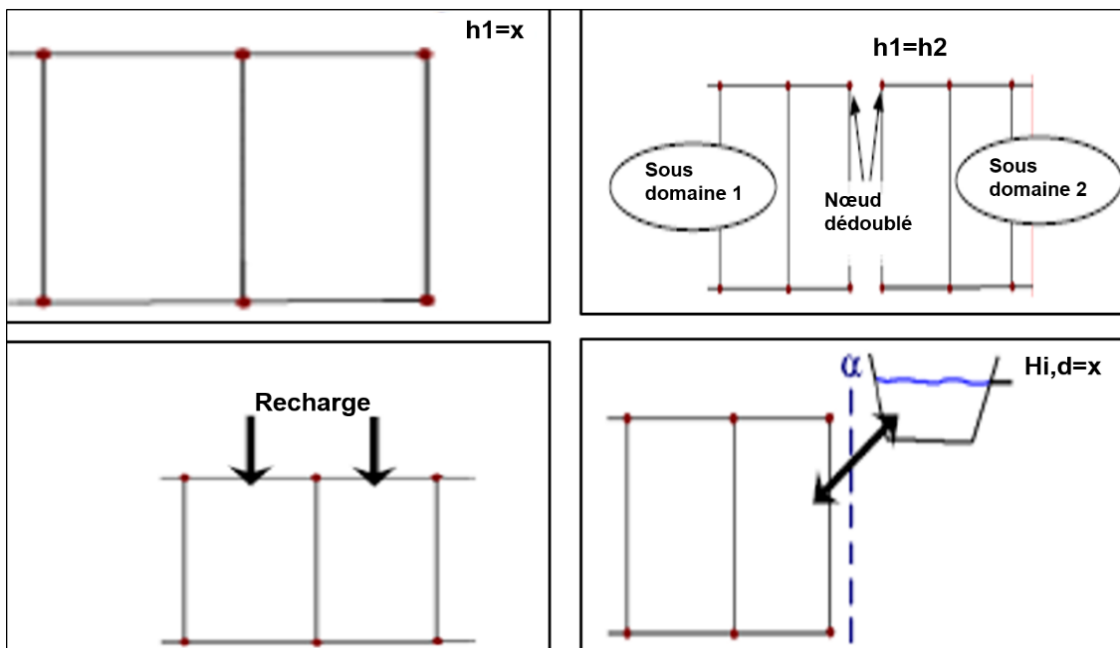


Figure 12: Synthèse des conditions aux limites (Hacini, 2006)

I.1.4.2.2 CALIBRATION DES MODELES HYDROGEOLOGIQUES

Le calibrage consiste à réduire l'intervalle ou l'écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Pour ce faire, on utilise la méthode manuelle dite de « l'essai erreur », il suffit d'octroyer manuellement des valeurs aux différents paramètres pour atteindre une calibration satisfaisante. Et ainsi, on tracera la droite de corrélation R^2 pour en apprécier l'intervalle. L'autre méthode consiste à utiliser des algorithmes qui permettent de minimiser une fonction objective de manière automatique. Cette méthode est également appelée modélisation inverse.

I.2 ETAT DE CONNAISSANCE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU DE SOCLE

L'eau souterraine est la seule source d'approvisionnement en eau potable de la population rurales, est donc vitale pour le développement de ces pays. Les ressources en eau tant à être polluées suivant les activités menées aux alentours des ouvrages de captages de ces eaux. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation ou à la pisciculture (Mahamane et Guel, 2015). La présence de polluant dans l'eau représente d'abord une nuisance organoleptique et esthétique que peuvent ressentir les consommateurs (Raveendran et al., 2001). Donc la protection des eaux souterraines contre la pollution peut se réaliser à partir de plusieurs thèmes. Parmi ces thèmes, « la caractérisation et le transfert de polluants dans le bassin de la Sissili » est établi pour l'élaboration des outils de gestion et de protection des eaux souterraines contre la pollution générée par les activités anthropiques et/ou naturelles. Ainsi, de nombreux pays ont développé leurs propres méthodes, adaptées aux conditions locales en s'inspirant éventuellement de l'une ou l'autre méthodes existantes. On peut en citer : Noronha et al., (2000) au Portugal qui ont développé un modèle d'écoulement de fluide en trois étapes pour la métallogénèse de l'or. Aboyeji et Eigbokhan, (2016) ; Ikem et al., (2002) ; Majolagbe et al., (2017) ; Oluseyi et al., (2014) ; Osibanjo et Majolagbe, (2012) au Nigéria se sont plus penchés sur les modèles des sites de déchets ou décharges abandonnés. Penant, (2016) a fait son étude au Bénin sur les sources de contamination par le nitrate, etc. L'état de connaissance des eaux souterraines en Afrique de l'Ouest plus particulièrement au Burkina demeure faible. L'état de pollution des aquifères n'est pas clairement défini ni maîtrisé du fait de la discontinuité du réseau de fracture. Pour la caractériser beaucoup d'auteurs utilisent des approches différentes dont des méthodes d'analyses statistiques multi variées. Penant, (2016) utilise l'approche statistique à travers la matrice de corrélation couplée à la matrice auto-organisante pour les relations entre les différents paramètres d'un système dans lequel l'évolution de la composition chimique de l'eau dépend de plusieurs processus qui peuvent ou non interférer entre eux. D'autres utilisent l'algorithme « Self-Organizing Map » ou « SOM » développé par Kohonen et al., (2001) il s'agit d'un modèle d'un réseau neuronal artificiel. Le modèle Bayésien aussi permet de déterminer les sources de nitrates. Cette méthode statistique définit l'incertitude sur les paramètres. De plus en plus les méthodes de caractérisation des polluants sont basées sur les méthodes hydrochimiques qui utilisent des logiciels (pour déterminer les différents faciès hydrogéochimiques, déterminer l'origine de la minéralisation, et les faciès chimiques des eaux) et qui donnent de très bons résultats. On peut citer entre autres (Ahoussi et al., 2012;

Chemseddine et al., 2010; Dakoure, 2003; Faye et al., 2020; Ikem et al., 2002; Larissa Eba et al., 2016; Lasm, 2000; Loukman et al., 2017; Mahamane et Guel, 2015; Mahamat et al., 2015; Mfonka et al., 2015; Nkhuwa, 2003; Rabilou et al., 2018; Soncy et al., 2015; Soro et al., 2011; Souley Moussa et al., 2019; Vadde et al., 2018; Wu et al., 2017; Zerhouni et al., 2015; Zhang et al., 2019). Ces éléments dévoilent que la pollution des eaux souterraines est majoritairement anthropique. Malheureusement, la plupart des points d'eau ne sont pas contrôlés périodiquement et la population s'approvisionne dans les ouvrages dont la qualité d'eau est mauvaise.

I.3 GEOPHYSIQUE EN HYDROGEOLOGIE ET MODELISATION POUR LES SITES POLLUES

La pollution des aquifères reste un problème dans les pays de l'Afrique subsaharienne. Ainsi les scientifiques se sont intéressés à la caractérisation, ainsi qu'à leur modélisation et à la prédiction de l'évolution de cette contamination. Pour ce faire la géophysique reste un atout.

La géophysique permet à partir du sol, d'avoir une imagerie des formations dépendant de la géologie. Souvent aussi elle est mise en œuvre pour déterminer le degré de pollution des sites miniers. Elle s'applique suivant trois cas : la recherche des sources de pollution, la recherche de fuites dans un système d'étanchéité, la détection de pollutions des sols ou des eaux souterraines afin d'en délimiter la localisation. Ces techniques géophysiques sont utilisées aussi dans l'industrie de la gestion des déchets pour cartographier la pollution. Les informations sur les failles, contacts géologiques, etc., sont essentielles pour bien connaître la structure et la stratigraphie des sites contaminés. Il est important pour une délimitation de la zone de protection de connaître ou de localiser les zones fracturées et les points d'infiltration préférentielle. La combinaison des méthodes géophysiques donne plus de renseignements sur les types de pollution ainsi que des données indirectes sur la trajectoire d'infiltration. Pour pouvoir caractériser un aquifère, il faut auparavant définir les fractures au niveau de l'aquifère qui véhicule l'eau souterraine (par la télédétection et/ou la photographie aérienne...). Cela revient à l'orientation des campagnes de reconnaissance en définissant des zones potentiellement favorables, et la sélection de sites ponctuels pour l'implantation de forages. La première étape consiste à définir les structures rectilignes suivant les images et la seconde phase revient à confirmer ces structures comme des fractures. Plusieurs validations existent à savoir la validation par les cartes déjà existantes (Savadogo, 1984) et la validation par la géophysique (Soro, 2017).

Parmi les méthodes géophysiques, celle des résistivités est plus employée au Burkina depuis les années 1957. La facilité de sa mise en œuvre a justifié son utilisation. Les méthodes sismiques sont très rarement utilisées. On distingue la méthode électromagnétique et la méthode électrique. La comparaison entre les différentes méthodes s'est faite sur la base des études au Burkina dans un même environnement de socle granitique dans le souci de dégager les avantages et inconvénients. Les anomalies signalées par la méthode électromagnétique sont très molles et ne sont donc pas très pratiques si elles ne sont pas couplées à d'autres méthodes d'investigations latérales. La résistivité électrique représente la référence du point de vue de la position de l'anomalie conductrice, car elle a l'avantage de caractériser la résistance à la conduction du courant électrique au point de mesure représenté par le centre du dispositif. On note un décalage de résistivités entre les méthodes. Il apparaît nécessaire de confirmer la position des anomalies conductrices par des traînés électriques. D'après Koussoubé (1996), les autres méthodes de prospection ne sont pas adoptées au contexte géologique.

I.3.1 METHODE ELECTROMAGNETIQUE

Ce type de dispositif a été expérimenté sur le bassin de la Bibi au Burkina. Il existe plusieurs méthodes basées sur le principe d'induction électromagnétique. Un champ magnétique primaire associé à un champ électrique alternatif crée des courants de type Foucault au voisinage des corps conducteurs enfouis. Ces courants secondaires ainsi créés provoquent un champ secondaire, en déphasage avec le champ primaire et qui entre en interférence avec lui. L'intensité de ce champ magnétique secondaire est d'autant plus grande que la résistivité est basse, la susceptibilité plus forte et la fréquence élevées. Le champ résultant comprend une composante dite réelle qui est en phase avec le champ primaire (H_p) et une composante imaginaire en quadrature de phase avec le champ primaire. On appelle Inphase (IP) ou composante réelle le ratio H_s/H_p en phase et Outphase (OP) ou composante imaginaire, le ratio H_s/H_p , lorsque le champ résultant est en quadrature de phase avec le champ primaire. Le récepteur donne la valeur du rapport H_s/H_p correspondant à une onde vibrant en phase ou en quadrature par rapport au champ émis.

I.3.2 METHODE ELECTRIQUE

Cette méthode a vu le jour depuis les années 1920 en France et aux États-Unis par Frank Wenner et Conrad Schlumberger. Depuis un certain temps, cette méthode a connu des mutations dans sa mise en œuvre. Selon Nakolendousse et al., (2009) c'est une méthode fiable qui ne prend pas en compte les éléments apparents. Cette méthode consiste au moyen d'électrodes métalliques

plantées en surface d'injecter du courant dans le sol pour en mesurer la puissance induite. On en distingue le potentiel spontané de la polarisation provoquée et de diagraphie électrique (Soro, 2017). Il mesure la réaction par résistance notée R du sol qui répond au courant électrique injecté (figure 13). Si l'on considère par exemple un échantillon homogène de sol, de longueur L (exprimée en m) et de section S (exprimée en m^2), disposé entre deux plaques conductrices reliées à un générateur délivrant un courant électrique d'intensité I (exprimée en A) et de différence de potentiel ΔV (exprimée en V), la résistivité électrique de l'échantillon ($\Omega.m$) vaut alors : $\rho=R(S/L)$ avec R d'après la loi d'Ohm= V/I .

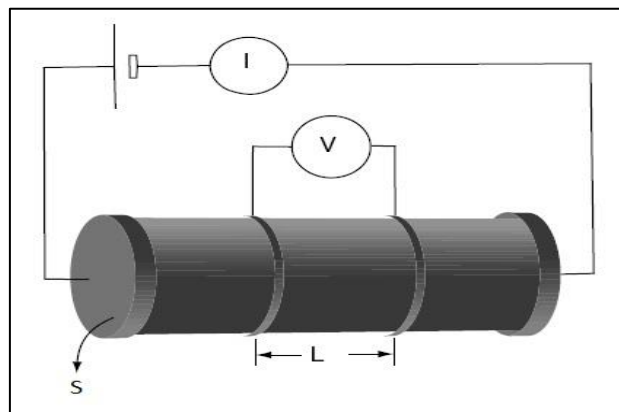


Figure 13: Mesure expérimentale de la résistivité (Chouteau and Giroux, 2006)

I.3.2.3 Les différentes techniques électriques

I.3.2.3.1 Traîné ou cartographie électrique

Au niveau du trainé électrique, les mesures consistent à maintenir l'espacement des électrodes du quadripôle fixe tout en déplaçant sur la longueur dans un sens dans le cas de la cartographie. Contrairement au sondage, le trainé cherche la détection de variations latérales de résistivités électriques apparentes. Cette méthode a été utilisée dans les travaux antérieurs à notre zone d'étude : Sagastzki (1933 à 1939) reconnaissances de la feuille de Tenkodogo pour l'AOF, (1960) détections de la faille à Djobo, BONARD (1967) reconnaissances de la feuille de Léo, Langenberg et Haarbrink (1968) cartes de reconnaissance du ranch de Léo, Sawadogo (1975) Hydrogéologies du bassin, et de nos jours par des campagnes d'hydrauliques villageoises. Son avantage est d'être rapide à mettre en œuvre et ne nécessite aucun sondage mécanique. Ces limites sont entre autres son manque de précision et la prise en compte des risques d'erreur d'interprétation non négligeables. La difficulté opérationnelle dans le socle est que la cuirasse latéritique de très forte résistivité rend difficilement traversable le courant. Souvent il faut décaler le tronçon de profil en arrosant les piquets d'eau salée.

I.3.2.3.2 Sondage électrique

La méthode de sondage électrique a pour but d'accroître l'intervalle des électrodes du quadripôle au milieu du dispositif afin d'augmenter la profondeur d'investigation, il permet de faire un profil vertical. Le sondage est plus utilisé pour déterminer le changement de résistivité perpendiculaire depuis la surface, sinon les mesures sont anormales. Il ne prend en compte le changement que dans une dimension « 1D » comme le montre la figure 14. Son avantage est d'être flexible et d'avoir de bonne résolution des terrains superficiels. Son défaut majeur est son déploiement qui est assez lourd, et son obstacle à injecter le courant dans une roche dure (Berné et al., 2002).

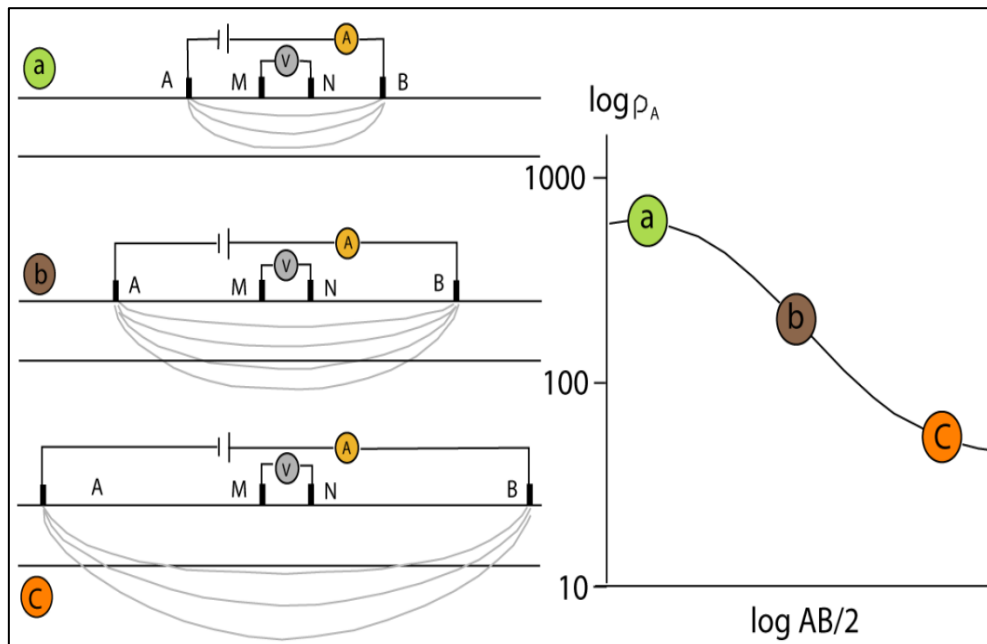


Figure 14: Schéma illustrant le principe de mesure dans le cas d'un sondage électrique avec le dispositif Schlumberger

I.3.2.3.3 Tomographie de résistivité électrique

Cette méthode apparue dans les années 1990 doit son développement au progrès en informatique. Elle tend à devenir l'outil indispensable pour les problèmes en géologie, hydrogéologie, génie civil, etc. L'atout majeur est la rapidité de traitement. D'après Chalikakis (2006) cette méthode est mise en place pour cartographier un milieu à partir de suites de mesures réalisées autour et à l'intérieur de celui-ci. Elle est établie pour préciser l'aptitude du courant dans le milieu naturel en vue d'en estimer la résistivité apparente du sous-sol selon un plan vertical (2D) ou dans un volume de sol (3D). Les données de résistivités de la roche renseignent et permettent de proposer une explication lithologique d'un pair de résistivités.

Comme toutes méthodes, la TRE a des limites : hétérogénéités se traduisant par des résistivités plus faibles que l'encaissant (par exemple si les cavités sont noyées). Le procédé est moins actif si la différence de la cible a une résistivité davantage forte que le recevant, le sol à identifier nécessite un contraste, pour pouvoir être distingué. On doit avoir moins de bruit pour son application, car ceci limite l'emploi de ce procédé en milieu urbain.

I.3.2.3.4 Interprétation des pseudo-sections et modèles de résistivité

L'interprétation des données débute par la construction de pseudo-section comme représenté à la figure 15 et l'acquisition des données est montrée par la figure 16.

Cela consiste à élaborer une représentation des valeurs de résistivités apparentes chiffrées à partir de la disparité de potentiel mesurée aux limites de deux électrodes ainsi que de la valeur du courant introduite entre les deux électrodes d'infiltration. La couleur d'un point sur la pseudo-section représente donc la valeur de la résistivité apparente en ce point.

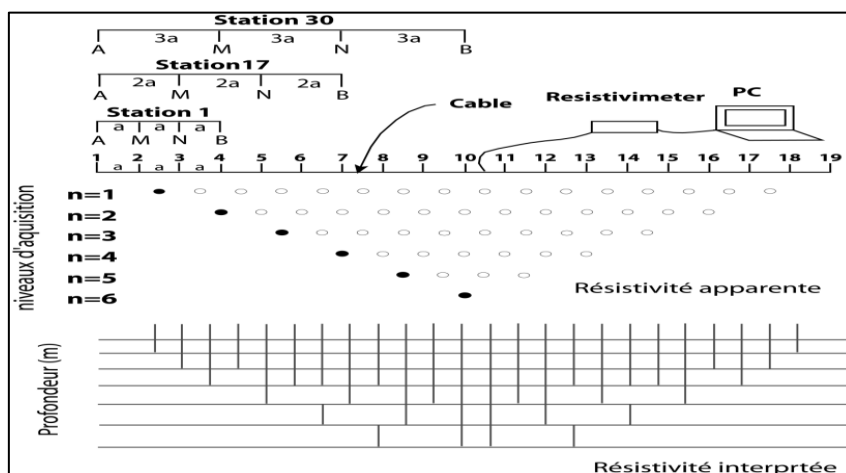


Figure 15 : Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner- α (Loke, 2004)

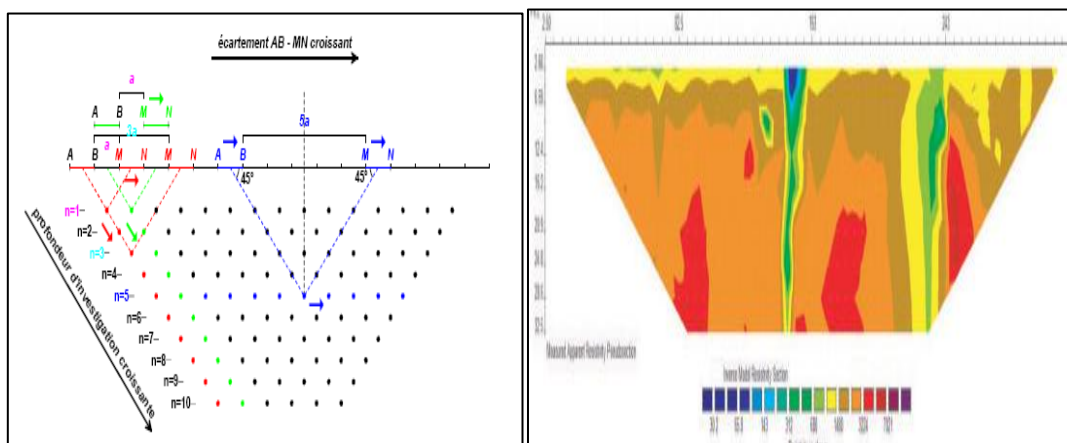
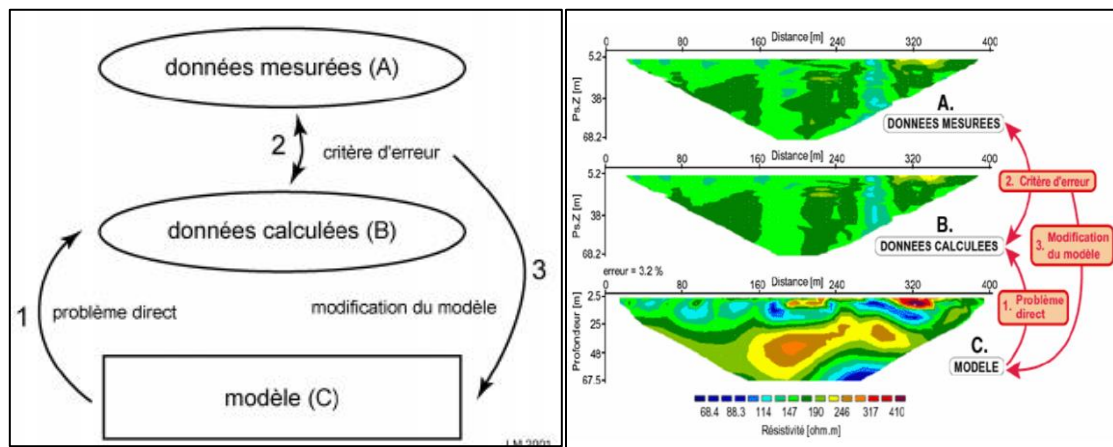


Figure 16: Schéma d'acquisition d'un panneau électrique et d'une pseudo-coupe. Cas d'un dispositif dipôle-dipôle (Boucher, 2007)

I.3.2.3.5 Inversion

L'inversion essaie de reproduire un modèle de subsurface qui s'accorde au mieux des mesures faites sur le terrain (figure 17). Plusieurs configurations existent, mais les plus utilisées en milieu de socle sont le Wenner-Schlumberger, et le Dipole-Dipole ; ces dispositifs ont des avantages et inconvénients. Donc le choix du logiciel est déterminant selon les compositions géologiques que l'on recherche à identifier. En effet, le logiciel accepte d'effacer les données aberrantes issues des mauvaises mesures, dans le but de les éliminer dans le calcul. Les données aberrantes sont soit systématiques soit aléatoires.



a) Inversion par méthode itérative Maescot, 2008

b) Inversion par méthode itérative en tomographie 2D (Hacini, 2006)

Figure 17: Méthodes d'inversion pour déterminer un modèle de subsurface

I.4 CONCLUSION PARTIELLE

La compréhension du fonctionnement des formations de socle passe forcément par une bonne connaissance structurale. Les eaux souterraines que renferment ses aquifères restent un atout majeur pour la population consommatrice. Hélas, le phénomène de pollution cette ressource, ou d'abandon de certains points d'eau demeure, dans un pays où on constate presque une pénurie. Pour une meilleure gestion, cela nécessite la connaissance de la géométrie de ce type d'aquifère. Dans cette étude, on se propose l'approche géophysique et hydrochimique en vue d'une modélisation du transport de polluant pour participer à cette connaissance de ces types de milieux.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

CHAPITRE II. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Dans ce chapitre, il est fait la présentation du cadre physique de la zone d'étude et des travaux antérieurs qui y ont été effectués. Ensuite, il est donné quelques caractéristiques sur la dynamique de développement et pressions sur les ressources en eau souterraine et de surface. Les caractéristiques du milieu biophysique et du réseau hydrographique ont été abordés. Et enfin, la géologie du Burkina et celle du sous-bassin versant de la Sissili sont décrites. Les synthèses qui seront faites dans cette partie sont basées sur la littérature existante, mais également sur des données acquises au cours de cette thèse.

II.1 : LE CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DE LA SISSILI

II.1.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le Burkina Faso se situe dans la zone Sahélo-Soudanienne en Afrique de l'Ouest de coordonnées GPS 11° 54' 20.592" N et 1° 17' 35.718" W. Les altitudes s'échelonnent de 125 à 749 m. Le territoire est divisé en plusieurs bassins versants, dont le Nakambé qui couvre une superficie de 84.000 km² comme illustré à la figure 18. Le bassin du Nakambé est constitué de trois sous bassin, à savoir le sous-bassin versant du Nakambé ; le sous-bassin versant du Nazinon ; et le sous-bassin versant de la Sissili qui fait l'objet de cette étude. Le sous-bassin versant de la Sissili couvre une superficie de 7559 Km² et est de forme triangulaire. Il est compris entre les longitudes 1° et 2° Ouest et les latitudes 11° et 12° Nord comme présenté à la figure 19. Il est traversé par la rivière de la Sissili qui prend sa source dans la localité de Thyou au nord du bassin, et s'écoule vers le Sud pour finir sa course dans le département de Tô au Burkina Faso avant de continuer vers le Ghana. Il est à noter que la Sissili a des affluents hydrauliquement indépendants sur le territoire national du Burkina Faso, mais qui rejoignent le cours d'eau principal du Nakambé en territoire Ghanéen. Le bassin couvre entièrement ou partiellement 12 communes à savoir Thyou, Bougnounou, Dalo, Bakata, Cassou, Gao, To, Sapouy, Leo, Bieha, Guiaro, Po et 3 provinces à savoir Boulkiemdé, Sissili, Nahouri.

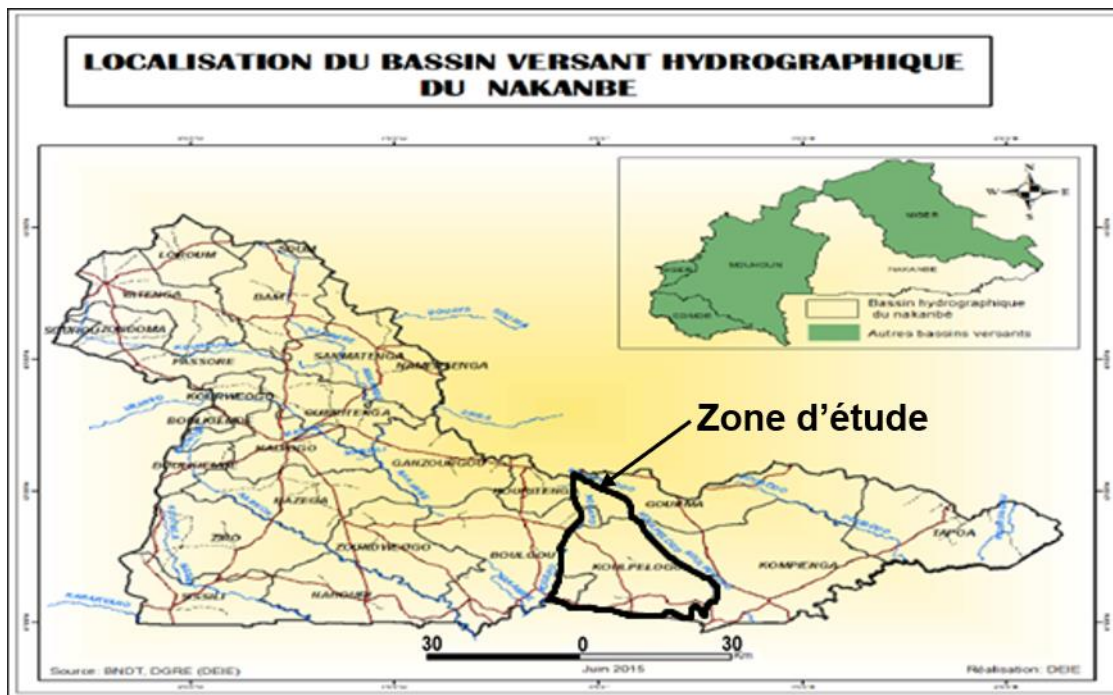


Figure 18: Situation administrative du bassin du Nakambé (source DEIE 2014)



Figure 19: Localisation de la zone d'étude (source DEIE 2014)

II.1.2 DYNAMIQUE DE DEVELOPPEMENT ET PRESSIONS SUR LES RESSOURCES EN EAU

II.1.2.1 Situation démographique et densité de la population

La population du Burkina Faso est estimée à 20 505 155 habitants (INSD, 2020) , dont 8 217 864 habitants dans l'espace de l'agence de l'eau du Nakambé (EC-AEN). Elle comprend

une soixantaine d'ethnies, avec un taux d'accroissement annuel qui varie dans l'espace de 4,42 % à 2,6 %. Selon le rapport EC-AEN, la population résidente totale peut être estimée à 1 695 863 habitants pour le sous bassin de la Sissili. La population active représente environ 50,98 %. Les jeunes de moins de 15 ans constituent 44,81% de la population. Quant aux personnes âgées, elles représentent 3,68% de la population résidente totale. La population de la zone d'étude est généralement mixte, on rencontre le groupe des Gourounsi (composé de Nouna et Kasséna), les Bissa et les Yana qui sont apparentés aux Mossis et sont surtout présents dans le sud de la région du Centre Est. Ces différents groupes ethniques organisent l'utilisation de l'espace en fonction des niveaux de structuration sociale existants. La densité de la population est estimée à 100 hab/km² dans l'espace de l'EC-AEN contre 79 hab./km² dans le sous-bassin de la Sissili. Ce qui implique une forte demande au niveau de la population d'où un recours à l'utilisation des ressources naturelles. Le tableau 1 donne les caractéristiques démographiques générales de l'évolution de la population de 2006 à 2020.

Tableau 1: Variation de la population de 2006 à 2020

Régions	Sexe	2006	2012	2015	2020
Centre	Hommes	866 833	1 118 511	1 270 553	1 489 512
	Femmes	860 418	1 110 234	1 261 151	1 540 872
	Total	1 727 390	2 228 925	2 531 908	3 030 384
Centre Est	Hommes	394 662	469 876	512 699	734 885
	Femmes	452 481	538 714	587 811	845 623
	Total	847 143	1 008 590	1 100 510	1 580 508
Centre Nord	Hommes	393 105	465 301	506 229	887 414
	Femmes	448 217	530 535	577 201	987 255
	Total	841 322	995 836	1 083 430	1 874 669
Centre Ouest	Hommes	241 603	283 813	307 608	768 587
	Femmes	279 501	328 332	355 859	891 548
	Total	521 104	612 145	663 467	1 660 135
Centre Sud	Hommes	302 859	354 733	383 913	374 238
	Femmes	338 584	396 577	429 199	414 493
	Total	641 443	751 310	813 112	788 731
Nord	Hommes	454 626	529 701	571 766	822 742
	Femmes	519 109	604 832	652 864	899 373
	Total	973 735	1 134 533	1 224 630	1 722 115
Plateau Central	Hommes	317 403	369 169	398 137	458 587
	Femmes	363 111	422 331	455 471	520 027
	Total	680 514	791 500	853 607	978 614
Total AEN	Hommes	2 971 091	3 572 509	3 917 438	5 535 965
	Femmes	3 261 421	3 921 609	4 300 243	6 099 191
	Total	6 232 651	7 494 286	8 217 864	11 635 156
Ensemble Burkina	Total	1 417 262	1 683 580	18 449 779	20 505 155

(Source : D'après hypothèses de projections INSD 2006 – INSD 2020)

II.1.2.2 Urbanisation

Une dominance des activités distinctes que ceux du milieu rural est dominante en milieu urbain. Les activités menées dans la zone urbaine ont tendance à accentuer le développement de la zone visant à transformer la vie dans l'agglomération. Cela induit d'autres activités entraînant l'augmentation de la population. Selon l'étude Burkina Prospective, (2025), le phénomène d'urbanisme est en plein essor et comporte en lui-même beaucoup d'incertitudes. En effet, il faut une prise en compte du danger que peut engendrer une urbanisation incontrôlée, pour en prédire ses conséquences sur l'accroissement de l'obligation urbaine et sur l'organisation et le développement économique. Le nombre de villes du Burkina Faso passe de 26 en 1996 à 49 villes en 2019 (RGPH 2019). L'EC-AEN compte 22 villes (chefs-lieux de communes urbaines). Cela abrite 44,90% du nombre de villes du pays avec des taux d'urbanisation qui se sont fortement accrus comparativement au taux national, passant de 6,4 % en 1975, à 12,1 % en 1985, à 15,5 % en 1996, à 22,7 % en 2006 pour atteindre 26,1 % en 2019. Les caractéristiques de l'urbanisation sont synthétisées dans la figure 20 ci-dessous.

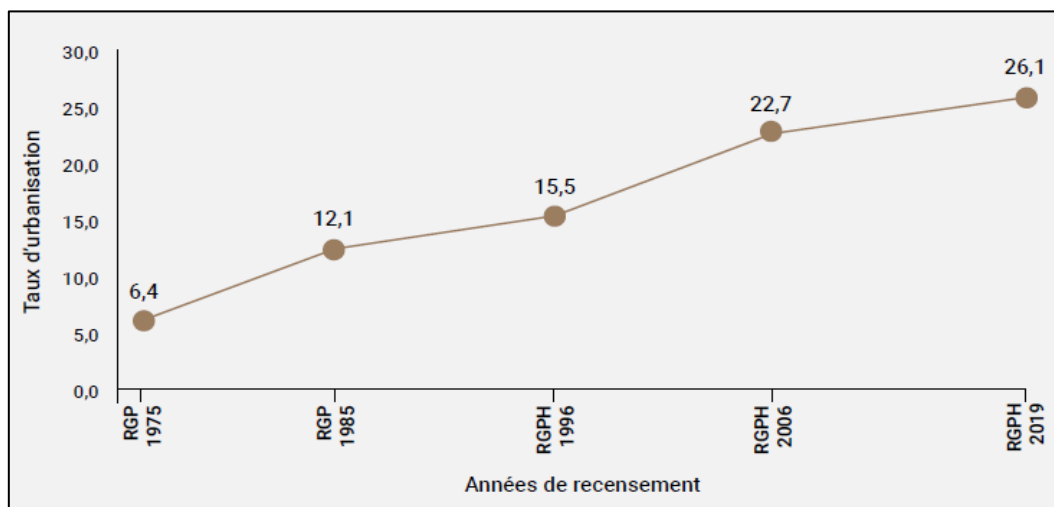


Figure 20: Taux d'urbanisation (%) du Burkina de 1975 à 2019
(Source : RGP 1975 et 1985 ; RGPH 1996, 2006 et 2019)

II.1.2.3 Approvisionnement en eau potable

Dans certains pays de l'Afrique Subsaharienne, les indicateurs dans le domaine de l'eau sont ceux des directives de l'OMS. L'accessibilité à l'eau potable suppose en outre une eau de bonne qualité disponible à une distance d'environ de 1 km de l'utilisateur. En milieu rural, la desserte en eau est assurée dans la zone d'étude au moyen de puits modernes de 90,9 % en 2021, et d'AEPS 87,1 % en 2021 (MEEEA, 2022). On note aussi par des forages équipés d'une pompe à motricité humaine (PMH) au moins 200 PMHS recensés. En général, une PMH ne peut délivrer que 1

m³/h, alors que le forage a très souvent une potentialité bien supérieure (DGEP, 2018). En milieu de socle cristallin, des forages à débit supérieur à 10 m³/h peuvent être découverts au droit des failles. Une amélioration de 4,68% est observée pour la population desservie dans l'espace. Le taux moyen d'accès à l'eau potable était en 2015 de 64% en 2012 et 67,8% en 2015 (région du centre-Ouest). Il était aussi de 77% en 2015 et 79,4% en 2015 (région du Plateau Central), avec une moyenne de 71,2% pour l'EC-AEN. Le taux d'accès nationale est de 76,2 % en 2021. La figure 21 précise par région le taux d'accès à l'eau potable des populations.

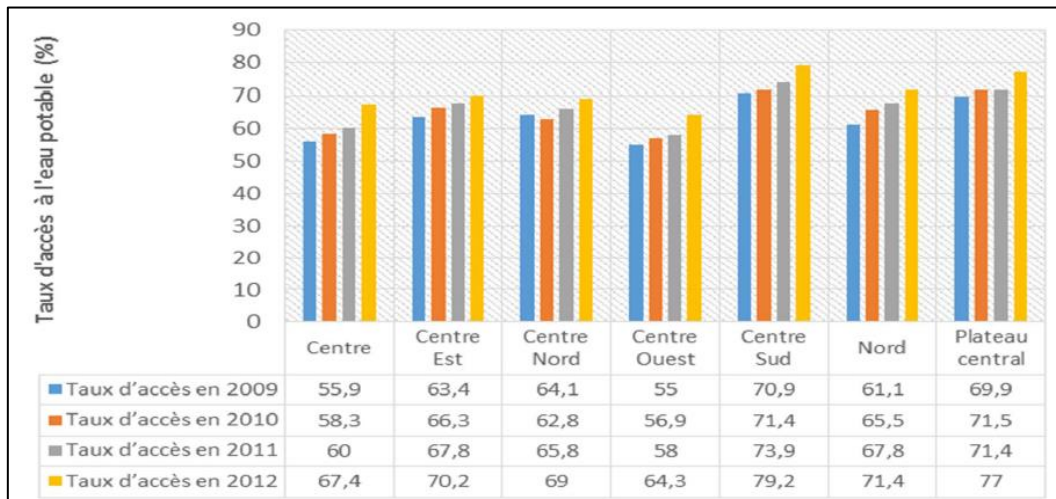


Figure 21: Taux d'accès à l'eau potable en milieu rural (Annuaire statistique MEAHA)

II.1.3 CARACTERISTIQUES DU MILIEU BIOPHYSIQUE

II.1.3.1 Occupation des terres

Le sous-bassin de la Sissili regroupe 3 types d'occupations. On remarque que les zones agricoles sont les plus importantes du point de vue de l'occupation spatiale (les cultures pluviales, les cultures sous parcs agroforestiers ou territoires agroforestiers, les mosaïques cultures jachères et espaces naturels importants et les plantations forestières et irriguées). Ensuite les zones pastorales ou naturelles sont de vastes étendues de formations naturelles (savane ou steppe). Ce sont les zones de pâtures où sont gardés surtout les petits ruminants en saison hivernale. Et enfin, nous avons les zones humides. D'après la base de données nationale, on note une évolution de l'occupation des terres en % de 1982 à 2011 (figure 22) la savane arbustive est l'unité dominante en 2002 et couvre 40,65 % de la superficie totale. Et Yameogo et al., (2020) propose à travers les images Landsat une occupation des terres de 2012 à 2018 (figure 23) ou les champs représentent en 2018 plus de la moitié du bassin versant, soit 57,84 %. L'EC-AEN était occupé en 1992 par 3 585 000 ha de cultures, 2 318 120 ha de formations

naturelles, 147 130 de zones humides et 130 580 ha par les habitations humaines, les roches et les sols nus.

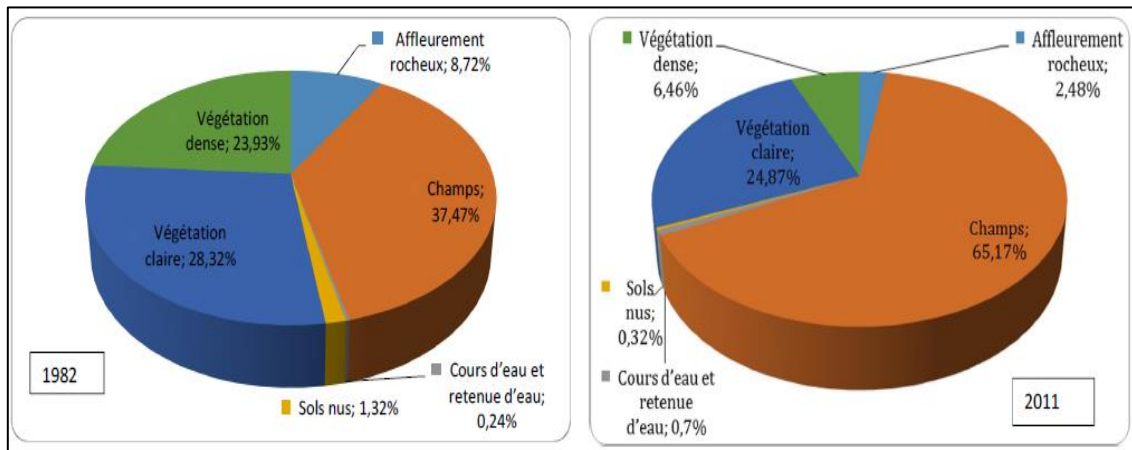


Figure 22: Répartition spatiale de l'occupation des terres du sous-bassin

Source (DONNEES BDOT 2012)

Unité	Champs	Formation ripicole	Habitat	Plan d'eau	Savane arborée	Savane arbustive	Zone nue /érodée	Total 2018
Champs	71946,93	1800,92	598,87	23,40	43498,14	66557,16	2530,89	186956,32
Formation ripicole	78,30	650,37	10,80	2,34	1826,92	830,56	31,17	3430,46
Habitat	780,77	40,69	279,29	1,26	166,29	320,29	7,74	1596,32
Plan d'eau	39,51	11,95	6,66	47,52	136,59	68,02	4,34	314,59
Savane arborée	6811,71	1757,92	131,29	1,71	18219,22	18379,22	707,17	46008,25
Savane arbustive	4812,79	2461,89	262,79	1,17	27788,81	42228,20	1768,92	79324,59
Zone nue /érodée	213,39	367,18	1,71	0,00	1511,94	3012,87	476,38	5583,47
Total 2002	84683,40	7090,94	1291,41	77,40	93147,93	131396,31	5526,61	323214,00

Figure 23 : Matrice de l'occupation des terres du sous-bassin de la Sissili de 2012 à 2018

II.1.3.2 Caractéristiques pédologiques

Le sol constitue un réservoir d'eau et de nutriment pour les plantes d'une part, et un espace de passage des eaux superficielles vers les domaines rocheux plus profonds, d'autre part. Il influe de ce fait, sur le ruissellement, l'infiltration et le stockage des eaux de pluie. La majeure portion du pays régional est couverte de sols ferrugineux tropicaux. Dans notre zone d'étude, d'après le schéma directeur d'aménagement (EC-AEN, 2010) et de gestion des eaux de l'espace de compétence de l'agence de l'eau du Nakambé datant de 2015, on rencontre 3 classes de sols comme le montre la figure 24 il s'agit :

- Des sols peu évolués d'apport alluvial hydromorphes. Ce sont des sols profonds (>120cm), à drainage interne déficient, constitués d'alluvions. La texture est limono-sableuse en surface, argilo-limoneuse en profondeur.
- Le groupe des sols minéraux bruts (sols squelettiques, très peu épais (<10cm), pas de capacité de rétention d'eau).
- Le groupe des sols hydromorphes (sols profonds, limon sableux en surface, argileux en profondeur, capacité de rétention en eau bonne).

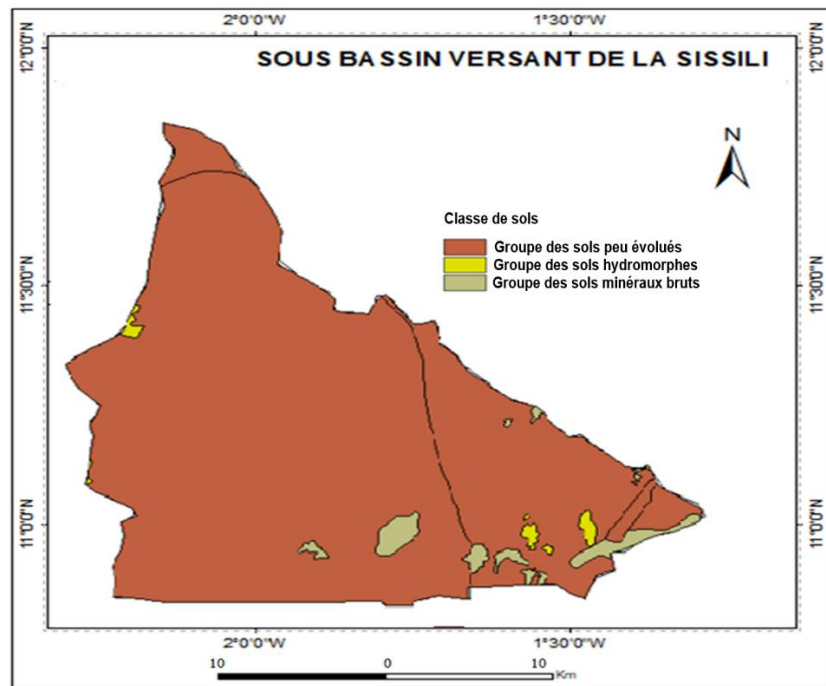


Figure 24: Répartition des classes de sols du sous-bassin de la Sissili

Source (DONNEES BDOT 2012)

II.1.3.3 Paramètres climatiques

Les ressources en eau sont fortement dépendantes du type de climat et des paramètres climatiques que sont principalement la pluviométrie, les températures, l'humidité de l'air, les vents, l'évapotranspiration et l'évaporation. Les conditions climatiques du bassin ont une importance capitale dans le rôle hydrologique des cours d'eau. Mais ce sont les précipitations qui constituent le facteur essentiel tout en restant variables et aléatoires dans le temps. Les écoulements des eaux de pluie constituent les principales sources d'alimentation des ouvrages de captage de l'eau de surface tandis que les infiltrations et les écoulements souterrains constituent les principaux vecteurs de l'alimentation des aquifères. Le climat est caractérisé par deux (2) saisons : une saison sèche de novembre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre. Son climat de type Soudanienne (sud soudanien) situé au sud du parallèle 11°30'N, couvre la totalité du sous-bassin de la Sissili. Elle est caractérisée par une pluviosité annuelle moyenne

supérieure à 900 mm ; une saison des pluies qui dure plus de 6 mois de l'année, des amplitudes thermiques annuelles assez faibles.

II.1.3.3.1 La pluviométrie

La pluviométrie a une tendance à la baisse au cours de ces deux dernières décennies. Cela a été confirmé par l'étude menée par la Direction de la Météo, (2001) concernant la variabilité du climat des années normales au moyen de 140 stations météorologiques tous types confondus dont 49 environ sont installées (EC-AEN, 2010). Cette étude couvre la période de 1931-2010, et a globalement mis en exergue une migration vers le sud des isohyètes 600 mm et 900 mm au cours de la période 1931 à 2000 soit environ 100 km à 150 km. Les dernières décennies 1981-2010 montrent cependant une légère remontée de ces isohyètes, mais qui ne contrarie pas la tendance globale. Elle est variable de 612,13 mm à 1037 mm. On en tire une pluviosité journalière de 151 mm pour une période de retour de 10 000 ans. La variabilité de la pluviométrie en zone soudanienne sur les pluies annuelles donne une tendance évolutive sur la période 1955-2012 qui est représentée par la figure 25 et l'indice de pluie annuelle standardisé en zone soudanienne (figure 26).

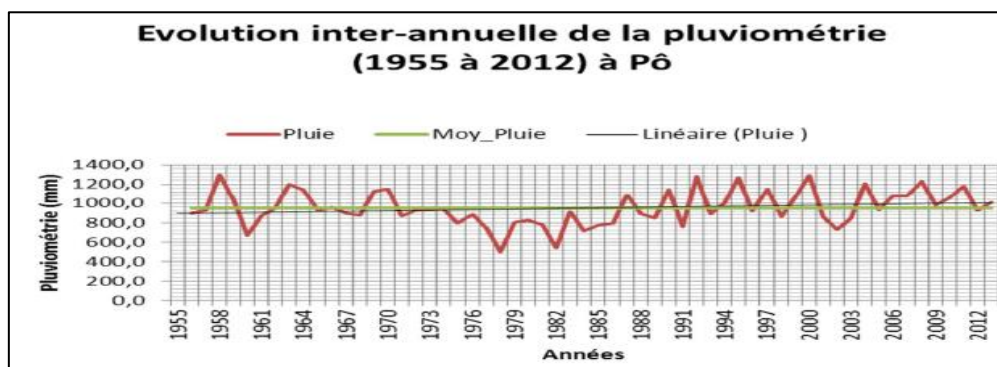


Figure 25: Evolution inter-annuelle de la pluviométrie-zone soudanienne
(Source : Donnée DGM 2012)

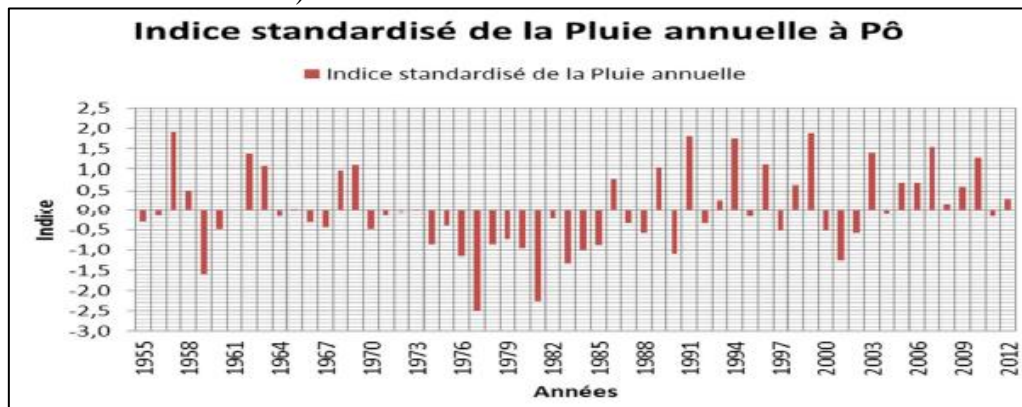


Figure 26: Indice de pluie annuelle standardisé-zone soudanienne
(Source : Donnée DGM 2012)

Il ressort de l'analyse des graphiques que la pluie annuelle oscille entre 503,3 mm et 1297,1 mm avec une moyenne interannuelle de 953,9 mm ; une légère tendance à la hausse est observée. Quatre périodes distinctes sont observées :

- Une période humide de 1955 à 1969 avec quelques poches de sécheresse ;
- Une période sèche de 1970 à 1985 ;
- Une alternance d'années humides et d'années sèches de 1985 à 2001 ;
- Une période très humide de 1986 à 2012 avec une poche de sécheresse de 2000 à 2002.

II.1.3.3.2 La température

La température dans le sous-bassin varie de 29°C à 33.3°C (figure 27). Les températures minimales et maximales annuelles issues des variations quotidiennes se situent entre 16°C et 39°C. L'observation de l'évolution annuelle et interannuelle des températures de stations de référence des 3 zones climatiques (stations de Ouahigouya, de Ouagadougou et de Pô) laisse apparaître une tendance générale à la hausse. Cette tendance est confirmée par l'étude de la variabilité de la température, réalisée par la Direction de la Météo couvrant la période 1971-2010. Elle montre au niveau national une migration des isothermes de la température moyenne (27,5°C ; 28°C ; 28,5°C ; 29°C) vers le sud à partir de la normale 1981-2010, signe d'un réchauffement progressif de l'espace EC-AEN (2012).

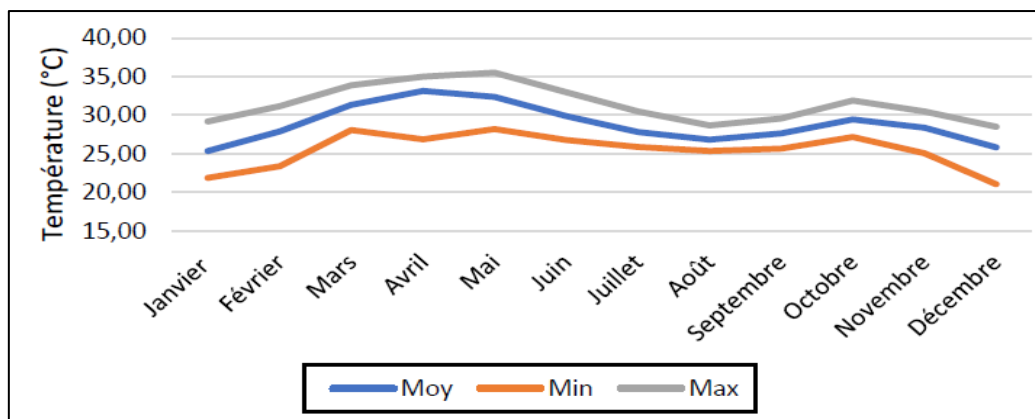


Figure 27: Variation mensuelle de la température à la station de Po de 1971 à 2010
(Source ANAM, AEN, ITXPERTS, 2018)

II.1.3.3.3 Les vents

Ils sont principalement orientés sud-ouest, nord-est en saison des pluies où on note des vents humides. En saison sèche, il s'agit de l'harmattan, vent sec de direction nord-est, sud-ouest avec une vitesse moyenne annuelle de 2,1 m/s. Le mois de juin on enregistre une vitesse du vent avec 3,3 m/s. Les minima de vents sont observés de septembre à novembre, avec une vitesse de

l'ordre de 1,7 m/s. Les vents observés sont relativement faibles sauf en début et en fin d'hivernage où ils peuvent atteindre des vitesses de 33,33 m/s lors des tornades avec comme conséquences des chutes d'arbres et des toitures des maisons emportées (AEN, 2018). De manière générale et pour l'ensemble de l'année, les vents sont calmes avec de faibles variations d'une période à l'autre ou d'un mois à l'autre. L'évolution de la vitesse du vent selon les zones climatiques à la station de Pô montre une tendance à la baisse (ITXPERTS, 2018). Les vents constituent des accélérateurs de l'évaporation des plans d'eau de surface.

II.1.3.3.4 Humidité

Les humidités relatives montrent des valeurs maximales pendant les mois pluvieux, soit en juillet, août et septembre et sont minimales pendant le mois le plus sec, soit en février. Les valeurs extrêmes notamment les maxima dépassent 90% pendant les mois pluvieux et les minima fluctuent entre 9% et 15% de janvier à mars. (Figure 28).

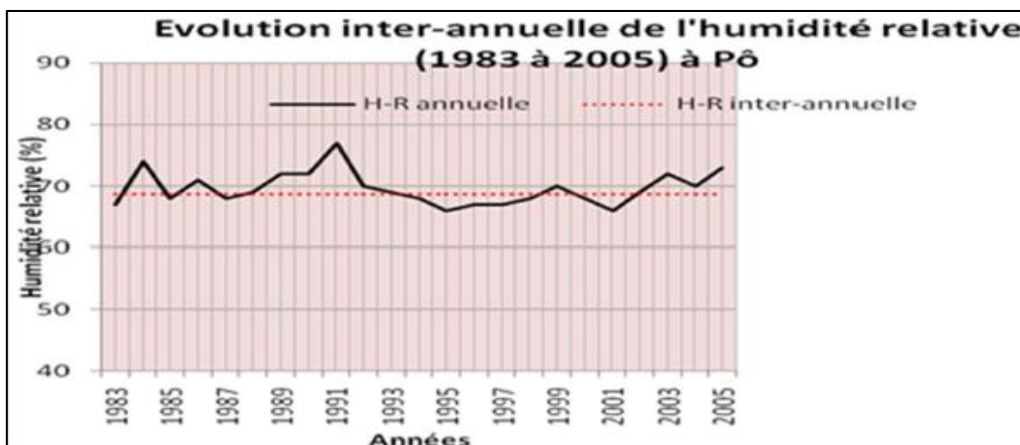


Figure 28: Evolution de l'humidité relative-zone soudanienne (selon ITXPERTS, 2018)

II.1.4 RESEAU HYDROGRAPHIQUE

L'hydrographie porte sur l'eau de surface. L'eau de surface coule abondamment dans la province du fait de son relief et de la grande pluviométrie dans la région (DEIE, 2014). Celle-ci est parcourue par une rivière Sissili (affluent du Nazinon) qui donne son nom à la province. Elle prend sa source dans la province du Boulkiemdé et coule vers le sud-est vers le Ghana en prenant une direction vers le sud, avec une densité de drainage de 0,74 km⁻¹. Elle est longue de 322 km avec une pente en moyenne de 1,48m/km sur les 42 premiers km et s'adoucit sur les 125 km jusqu'à la station de Nebou. Par la suite, sa pente est de 0,663 m/km avant de se déverser au Ghana (DGRE, 2014). Le long des cours d'eau, les conditions du milieu permettent la présence de galeries forestières et de forêts claires. Sa densité de drainage est de 0,74 km avec

un temps de concentration de 73,53 heures (Annuaire hydrologique 2014). Sa partie la plus importante où l'eau est permanente toute l'année est située à l'extrême Sud-Est dans le département de Tabou. Il existe également quelques barrages intermittents à Boura et à Pissai et des retenues d'eau à Zoro, à Bieha, à Danfina, à Boala, à Benaverou et à Côcô. La station hydrologique de la Sissili à Kounou a été créée en 1965 et renseigne sur le volume.

Le volume d'écoulement moyen interannuel des eaux à la station de Kounou sur le Sissili, pour la période 1965-2012, est de 2,81 millions de m³ tandis que le débit moyen interannuel est de 2,81 m³/s. Cette évolution est représentée par la figure 29. On observe :

- Une période humide de 1965 à 1969 ;
- Une période globalement sèche de 1970 à 2012, avec quelques années exceptionnellement humides (1977, 1986, 1994 et 2003).

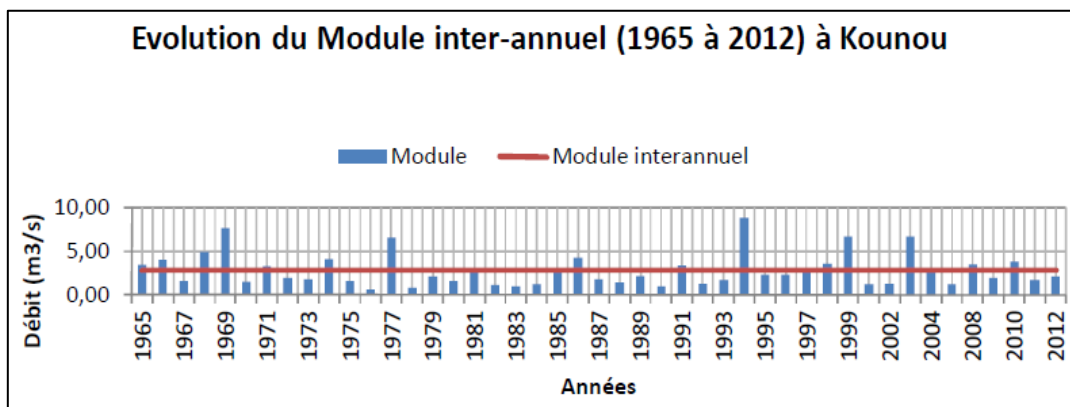


Figure 29: Evolution du module hydrologique de la période de 1965 à 2012 du Sissili
Source : DEIE/DGRE (Annuaire hydrologique 2014)

II.1.5 VEGETATION

La grande sécheresse des années 1970, les mauvaises pratiques culturales et le piétinement du sol par le bétail ont entraîné une dégradation importante et rapide du couvert végétal (DIEE, 2014). Il a fait place à une érosion des sols et à leur appauvrissement ; de plus, les plans d'eau sont envahis par le phénomène d'ensablement. La couverture végétale du sous-bassin est de type savane arbustive avec des parcs agroforestiers et des forêts galeries le long du cours d'eau. Les savanes sont des formations comportant un tapis herbacé dense, continu d'au moins 80 cm de hauteur. En fonction de la présence d'arbres et arbustes, les savanes sont classées en savanes herbeuse, arbustive ou arborée comme le montre la figure 30. Les forêts galeries sont des formations forestières tributaires de cours d'eau à écoulement temporaire ou permanent. On rencontre quelques forêts claires et forêts. Les espèces ligneuses fréquentes sont le *Parkia biglobosa*, *Adansonia*, *Bombax costatum*, et au niveau des savanes on a entre autres une

diversité de combrétacées et d'Acacia. La strate herbacée terrestre est dominée par les graminées parmi lesquelles *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*. (AEN, 2011).

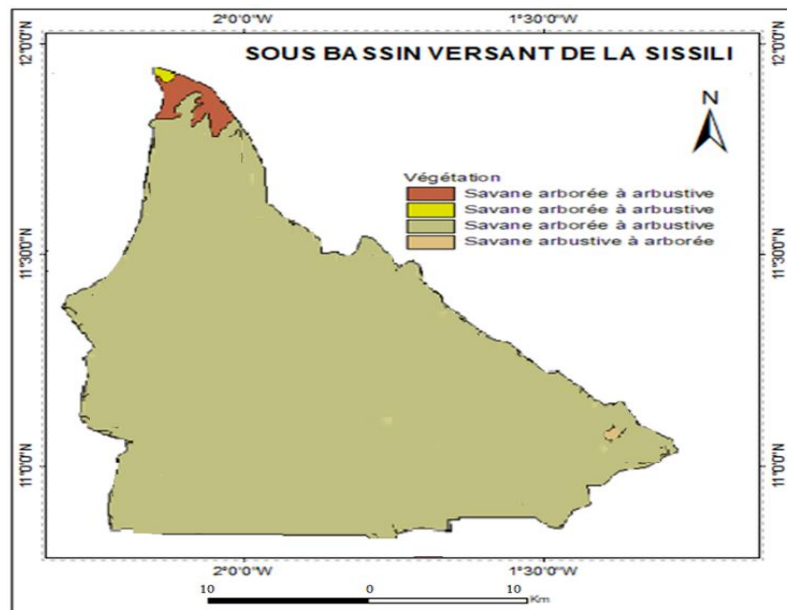


Figure 30: Répartition de la végétation du sous-bassin de la Sissili
Source (données BDOT 2012)

II.1.6 RELIEF

La Sissili se caractérise par endroit de petits massifs rocheux. On y rencontre également des petites mornes (dos d'éléphant), des chaos de boules (granite) et des croupes à peine marquées. Elle est une vaste plaine peu accidentée ou domine les plaines et les plateaux (It Expert-ANC, 2018). La province de la Sissili est couverte par une savane principalement arborée avec toutes ses variantes liées aux conditions édaphiques. Elle est légèrement perturbée dans la partie ouest par des élévations collinaires variant de 249 à 425 mètres au-dessus de la mer et orientées généralement Nord-Sud. L'hydrologie est fortement influencée par l'altimétrie. Dans la partie élevée, on recueille une grande quantité de pluies tombées. La Courbe hypsométrique à la figure 31, fournit une vue de la pente (assez forte) en fonction de la répartition de la surface et de son altitude (altitude à pente modérée).

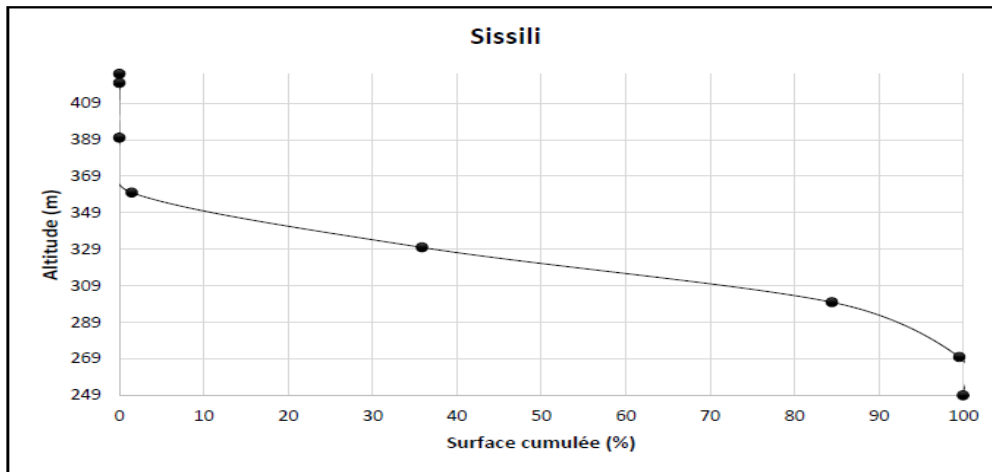


Figure 31: Courbe hypsométrique du sous-bassin Sissili

(Source : It Experts, AEN ; 2018)

L'analyse de la courbe donne des pentes assez fortes, selon AEN cela favorise l'érosion dans la partie supérieure. Les altitudes minimales représentent les altitudes des entités talweg, bas-fonds, etc. Les altitudes maximales représentent les pics du bassin notamment les grandes élévations. Le sous-bassin de la Sissili se trouve à une altitude minimale de 249 m et maximale de 425 m. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variation influence le débit maximal observé. Cette pente favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce donne à l'eau le temps de s'infiltrer. Le sous-bassin de la Sissili présente une altitude moyenne de 321,43 m et une pente moyenne de 2,03 m/km, d'où un indice global de pente de 0,42 m/km. Le cours d'eau suivant son profil comme le montre la figure 32 s'étend sur une distance de 120 km.

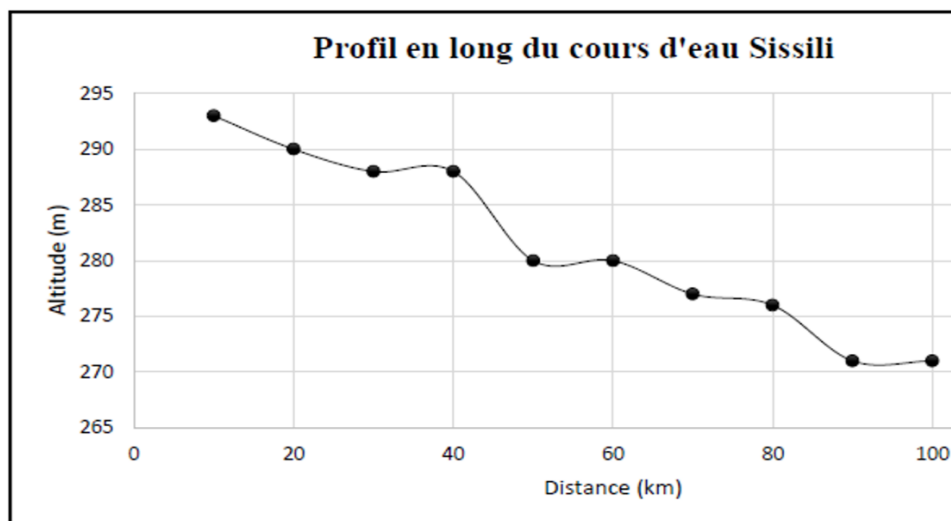


Figure 32: Profil en long du cours d'eau de la Sissili

(Source : It Experts, AEN ; 2018)

II.2 GEOLOGIE DU BURKINA ET DU BASSIN VERSANT

II.2.1 GEOLOGIE DU BURKINA EN AFRIQUE DE L'OUEST

Les eaux souterraines, étudiées sont fortement liées pour leur qualité, aux roches aquifères qu'elles drainent ou qui les contiennent. D'où l'intérêt d'examiner les principales formations géologiques que l'on rencontre dans le bassin.

L'histoire de la géologie du Burkina s'intègre dans celle du continent Africain. Les travaux antérieurs ont consisté particulièrement au craton Ouest africain (figure 33), dont les grandes lignes ont été esquissées par des auteurs tels que Ducellier, (1963) sur la synthèse géologique du Burkina ; Hottin et Ouedraogo, (1975) pour la feuille de Tenkodogo ; Bessoles, (1977) et Savadogo, (1984, 1975) sur la géologie du Burkina.

La connaissance géologique du Burkina Faso a progressé de nouveau ces dernières années grâce à la réalisation du projet d'appui au développement du secteur minier en 2018 (PADSEM) qui comprend des levés géologiques sur 13 feuillets cartographiques à l'échelle 1/200 000, des levés géologiques sur trois feuillets cartographiques à l'échelle 1/50 000, la réalisation d'une base de données géologiques et structurales et une nouvelle édition de la carte géologique et minière du Burkina Faso à l'échelle 1/1 000 000 (Giovenazzo et al., 2018). Le continent africain est occupé par quatre cratons : le craton Ouest africain, le craton du Congo, le carton nilotique et le craton de Kalahari, séparé les uns des autres par des zones plissées. Les roches du Burkina Faso appartiennent au domaine Baoulé-Mossi du craton ouest-africain. Ce dernier comprend trois principaux domaines géologiques : le socle paléoprotérozoïque couvrant la majeure partie du territoire, la couverture sédimentaire néoprotérozoïque recouvrant les limites ouest, nord et sud-est du pays et, les terrains cénozoïques du Continental terminal occupant des surfaces réduites aux confins nord-ouest et extrême est. Pendant l'orogénèse éburnéenne, la phase majeure est marquée par une fracturation suivant deux directions prédominantes NE-SW et NNE-SSW (volcano-sédimentaires et plutoniques de l'ouest) (Dahl et al., 2018).

En effet, 80% de la superficie est recouverte par des formations cristallines (figure 34). Ces faits tectoniques ont déchaîné des altérations telles que schistosité et foliation qui déterminent les roches métamorphiques.

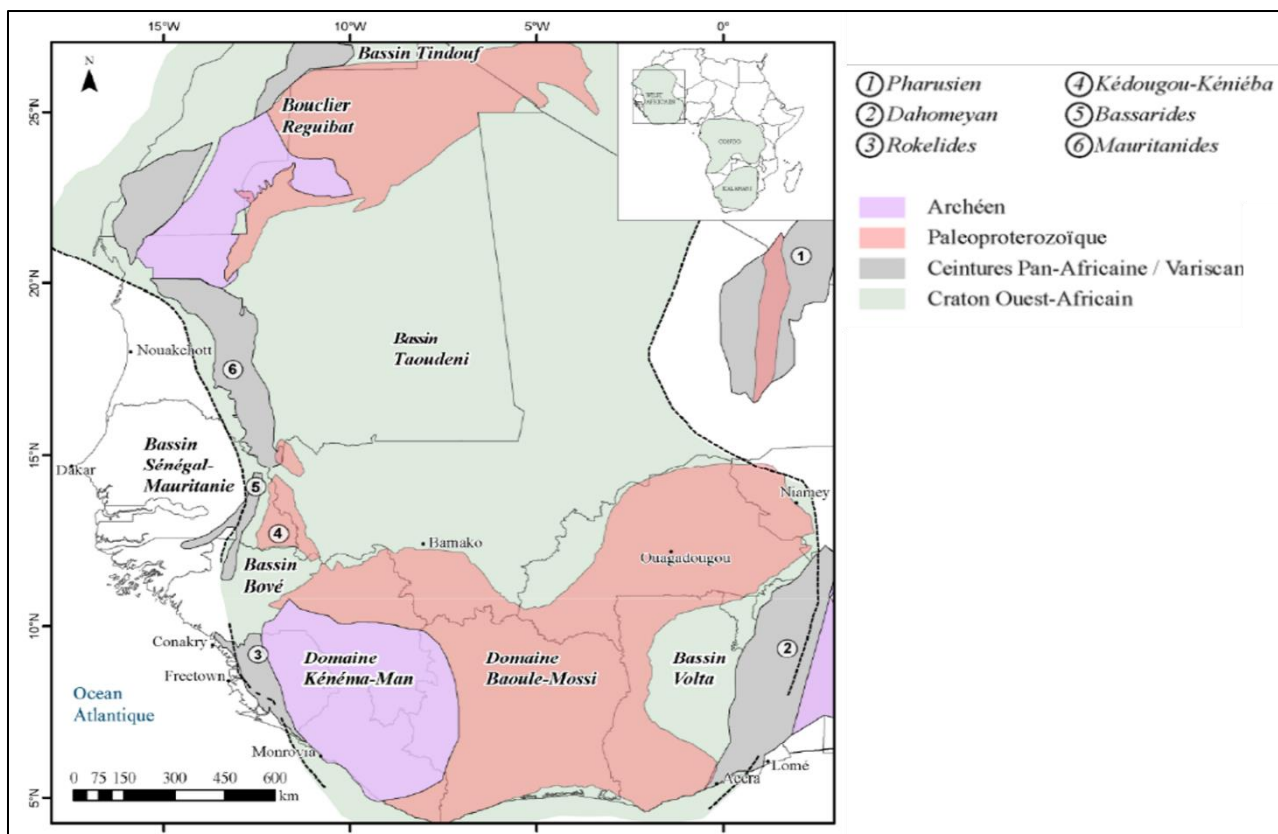


Figure 33: Carte géologique simplifiée du craton ouest-africain (adapté de WAXI, 2013)

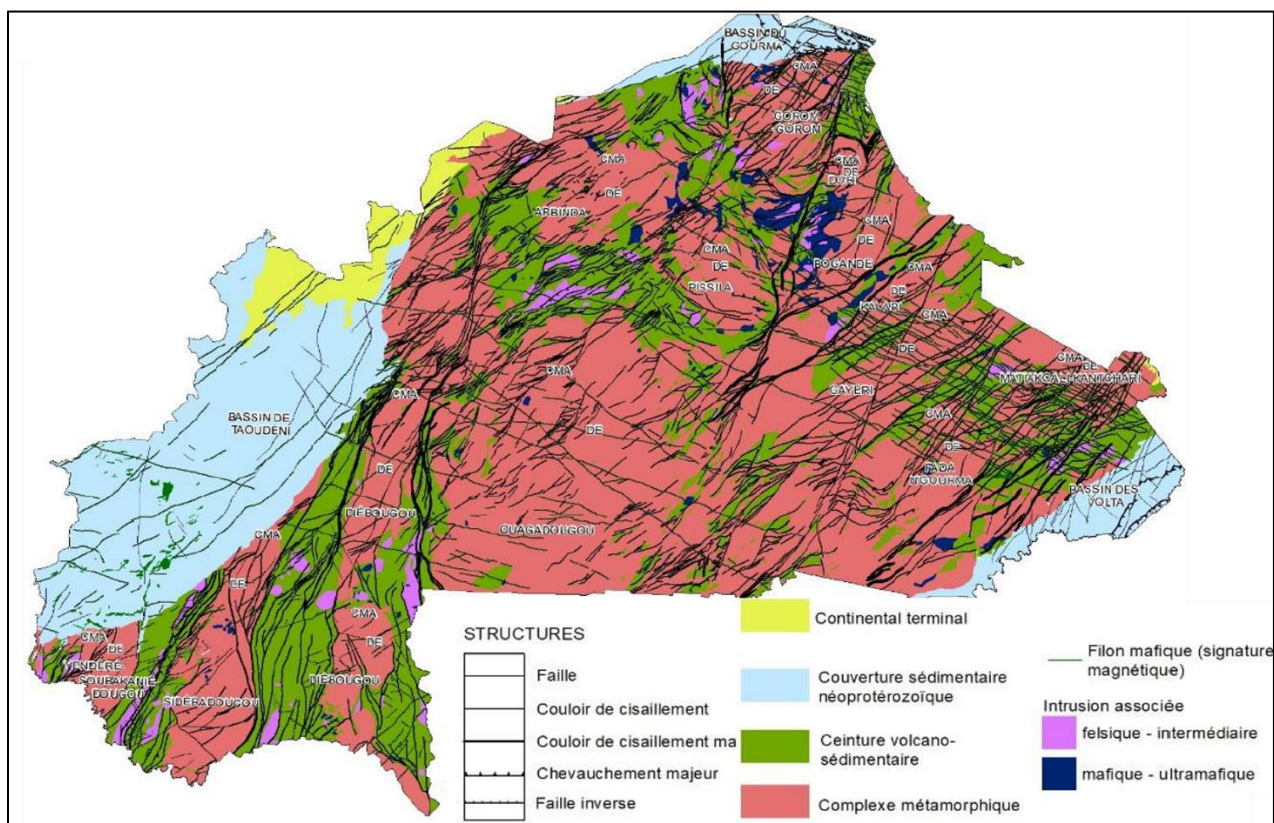


Figure 34 : Carte du schéma structural montrant les principaux domaines structuraux, les cisaillements et les couloirs de déformation.

II.2.2 GEOLOGIE DU SOUS-BASSIN DE LA SISSILI

Le premier auteur dont l'étude a porté sur le bassin de la Sissili fut Sagatzky, (1950) dans le cadre de la reconnaissance de la feuille de Tenkodogo. Les formations géologiques rencontrées sont variées et peuvent être regroupées en deux grands ensembles géologiques d'âges protérozoïques : l'ensemble plutonique et l'ensemble volcan sédimentaire.

Cependant, la Sissili se distingue en trois types de formations géologiques productives en termes de ressources en eau comme la montre la figure 35 qui illustre la géologie situation des milieux de socle et la figure 36 qui illustre la coupe des différentes formations géologiques dans le sous bassin de la Sissili (Savadogo, 1984) :

- Les migmatites composées de mélange intimes d'artérites, nébulites dépourvues de stratifications ; les mélanges de gneiss ou de micaschistes et de granites que l'on peut distinguer à l'œil nu ; et les gneiss ayant le facies feldspathique.
- Les granites sont très variés en fonction de leurs degrés de fissuration ainsi qu'à la taille de leurs minéraux.
- Les roches basiques et les filons de quartz qui comprennent des amphiboles, des granodiorites et des dolérites.

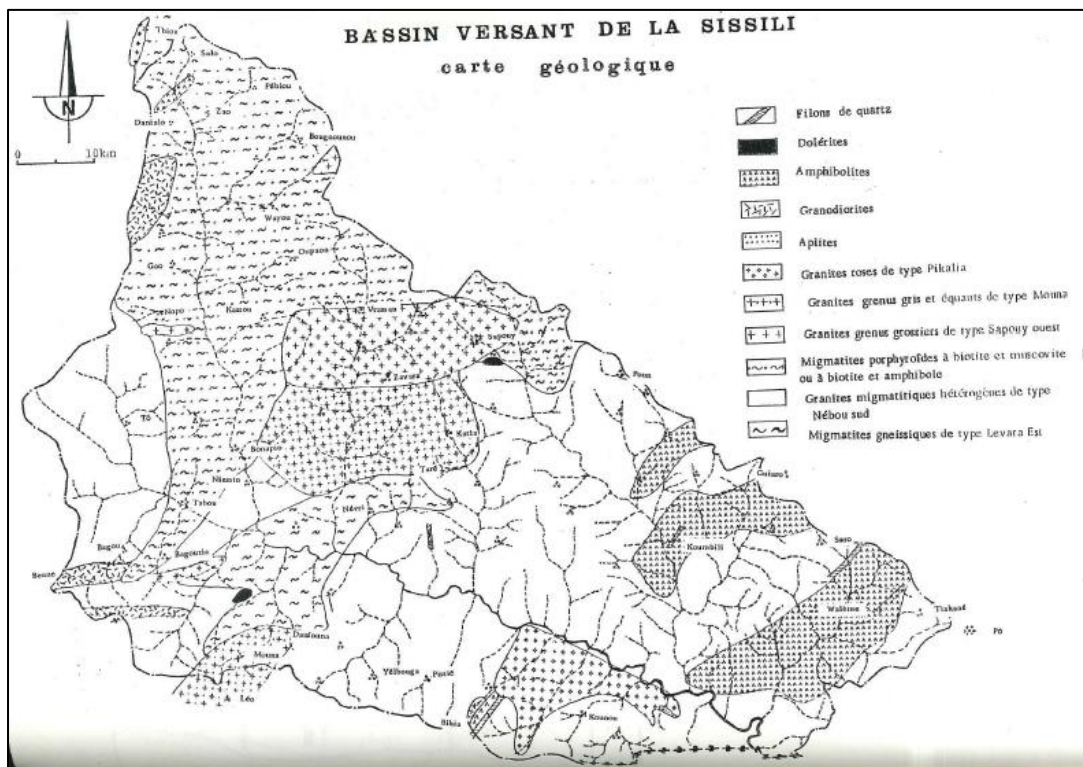


Figure 35: Carte géologique du sous-bassin de la Sissili par Savadogo 1984

II.2.2.1 Ensemble plutonique

✚ Formations de granite, granodiorite, tonalite, diorite quartzifère peu orientée

Ces roches constituent un ensemble lithologique dominant au sein des formations plutoniques. Elles sont mésocrates, rarement mélanocrates à grains moyens, parfois grossiers avec des amphiboles visibles à l'œil nu. Elles se rencontrent dans la partie nord, au centre sud vers. Les principaux minéraux sont des plagioclases, l'amphibole verte, la biotite peu chlorotisée. Le quartz peut occuper 20% de la roche (Savado, 1975).

✚ Formations de granite à biotite

Les granites à biotite couvrent une surface importante du bassin du Nord au Sud, à l'est de Ouagadougou, dans les zones de Tenkodogo et Pô, etc. Ils présentent un faciès homogène avec ou sans tablettes de feldspath potassique rose. Ils sont traversés par l'intrusion de dykes doloritiques (Bessoles, 1977).

✚ Formations de micaschiste à grenat, de sillimanite et staurotide

Ce sont des formations métamorphiques micacées de haut degré qui affleurent dans la région de Gourcy.

II.2.2.2 Ensemble volcan sédimentaire

✚ Basalte à affinité tholéïitique et amphibolite

Ils sont associés principalement aux schistes sédimentaires et tufacés. Les basaltes amphibolisés affleurent fréquemment au niveau des collines basses, ces basaltes amphibolisés se rencontrent surtout dans la partie septentrionale du bassin (Ducellier, 1963).

✚ Schiste volcan sédimentaire

Les schistes volcan sédimentaires se rapportent à un contexte régional volcan sédimentaire. Ils regroupent des faciès assez variés depuis les métasédiments vrais jusqu'à des volcanites franches. Ces formations longent de part et d'autre les basaltes amphibolisés et prennent une forte extension dans le sous-bassin (Savado, 1984).

✚ Complexe rhyolite, rhyodacite, tuf acide

Ces roches sont massives, leucocrates à mésocrates. On distingue des faciès de tuf ou de lave plus ou moins porphyriques à petits phénocristaux de feldspath et quartz essentiellement, passant parfois par des faciès filoniens hypovolcaniques proches des micro-granitoïdes. On les rencontre sur des surfaces relativement peu étendues au nord de Bourzanga, dans la zone de Léo (Savado, 1984).

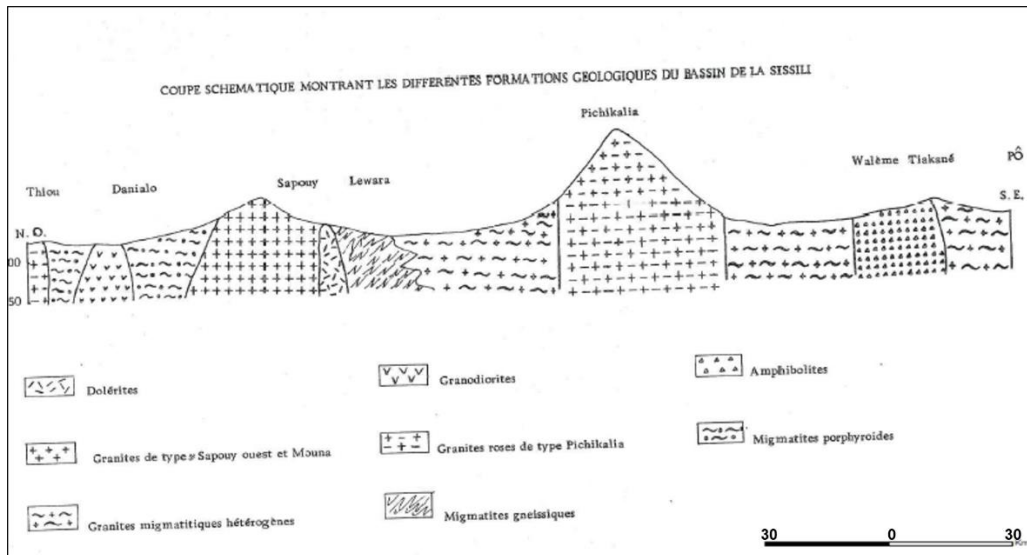


Figure 36: Coupe des différentes formations géologiques du sous-bassin de la Sissili par Sawadogo 1984

II.2.2.3 Formations rocheuses à forte teneur d'arsenic

Les rapports relatifs au problème de l'arsenic n'identifient pas de manière précise, la nature des formations rocheuses bien qu'il soit établi que les sillons birimiens sont à l'origine des fortes teneurs en arsenic de l'eau souterraine constatée dans de nombreux forages dans le sous-bassin (Savadogo, 1975). Cependant, les zones sont bien circonscrites au niveau du sous-bassin. Les buttes birimiennes marquent le paysage dont la topographie est monotone. Ces témoins de cuirasse latérite sont particulièrement impressionnantes dans les régions où affleurent les formations birimiennes. C'est à travers ce recouvrement de cuirasse latéritique, d'argiles latéritiques et d'alluvions fluviales ou paléo fluviales que s'ordonnent les mécanismes de transport de flux verticaux vers les formations. Il y a en effet, différents aquifères superposés que l'on peut examiner dans la partie hydrogéologie.

II.2.2.4 Tectonique

II.2.2.4.1 Etude de la fracturation dans le cadre général

Certains auteurs Engalenc, (1975); Guiraud et al., (1987); Koussoubé, (1996); Savadogo, (1984) se sont déjà intéressés au socle cristallin en étudiant essentiellement les linéaments. L'ensemble de la région à laquelle appartient le grand bassin du Nakambé (auquel appartient la Sissili) a été affecté par la tectonique éburnéenne (Hottin et Ouedraogo, 1975). Celle-ci débute par une fracturation importante suivant deux directions prédominantes :

- Une direction variant de NNE (prédominante sur la bordure ouest du noyau mossi) à franchement NE (bordure Est et Nord du noyau mossi) ;
- Une direction N°80 W à N°60 W surtout remarquable dans les secteurs de Ouahigouya-Séguénéga-Kaya-Boulsa, mais aussi dans la partie centrale et sud.

Les phénomènes responsables des failles tectoniques majeures peuvent s'étaler sur des dizaines, véritablement des centaines de kilomètres. Il en est ainsi de ce couloir nord-sud qui quitte Sollé dans le Loroum, passe à l'est de Ouahigouya, traverse l'espace pour se poursuivre au sud du pays jusqu'à la frontière avec la Côte d'Ivoire (Hottin et Ouedraogo, 1975). À partir de Ouagadougou situé au centre de l'espace, les couloirs de cisaillement deviennent plus nombreux et empruntent une direction Nord Est. Et ils parviennent à coïncider entiers les bras du Nakambé. Cependant, le revêtement des altérites peut facilement perturber la cartographie géologique des fissures émergeant au regard du terrain ; la carte géologique ne peut désigner qu'une petite portion du réseau de failles qui affiche le socle. Il est à souligner que les phases tectoniques ayant affecté la zone étant nombreuses (au moins trois), les failles ont pu rejouer à plusieurs reprises provoquant un fort broyage des roches. C'est ce phénomène qui explique que les filons, notamment ceux de quartz et de pegmatite, constituent les meilleurs drains sur le plan des ressources en eau souterraine (Engalenc, 1975; Savadogo, 1984).

II.2.2.4.2 Etude de la fracturation du sous-bassin de la Sissili

Les roches qui occupent tout le sous-bassin de la Sissili sont des roches à porosité faible ou nulle. Elles sont dites aquifères dans le cas d'une fissuration ou d'une fracturation. Les études antérieures se sont basées sur les images de photographie aérienne pour tracer le réseau de linéaments. Déjà l'importance de l'étude magnétique avait permis de mettre en évidence d'importante fracture liée à la tectonique qui affecte le socle. Cependant, il faut attendre les années 1950 pour voir la carte d'un réseau dense de fracture réalisé par Engalenc, (1975) à travers l'étude du ranch de Leo. Savadogo, (1984) réalise parallèlement la carte de la tectonique du sous-bassin versant de la Sissili. Cette carte s'est essentiellement basée sur les extraits de carte du ranch de Leo, de la photographie aérienne, et des mesures directes sur affleurement ont chaque fois que cela l'a permis.

II.3 HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

Le sous-bassin de la Sissili est essentiellement couvert par des formations géologiques peu productives. En effet, la productivité hydraulique des ouvrages de captage de l'eau souterraine

dépend de l'importance des failles qui affecte le socle rocheux et des faciès pétrographiques des différentes formations lithologiques traversées. En termes de productivité hydraulique, les différentes formations géologiques peuvent être qualifiées de la manière suivante :

- Une productivité hydraulique très bonne pour les formations plutoniques telles que les granodiorite, tonalite et diorite quartzifère. Elles constituent les faciès les plus productifs. Lorsqu'elles sont injectées de filons et surmontées d'un horizon capacitif puissant elles peuvent fournir des débits permanents pouvant dépasser les 20 m³/h.
- Une bonne productivité hydraulique pour les orthogneiss, les micaschistes à disthène, les leptynites à grenat, les micaschistes à grenat, les sillimanites et staurolite. L'hétérogénéité granulaire est favorable à l'obtention de bons débits dans les zones faillées.
- Une productivité hydraulique faible pour les formations volcan sédimentaires, qu'il s'agisse des schistes (phyllades et schistes sédimentaires surtout), et diorites. Lorsque les injections de filons de quartz ou de pegmatites permettent de dépasser les débits de 5 m³/h, la productivité des ouvrages peut chuter en cours d'exploitation suite au colmatage des fissures par les argiles d'altération.
- Une productivité hydraulique très faible pour les plutons intrusifs post tectoniques (granite à biotite, granite à biotite et souvent à amphibole). Il y est difficile d'atteindre les 5 m³/h et lorsqu'ils sont fins et à grains homogènes, atteindre même 2 m³/h n'est pas chose aisée.

On retiendra cependant que, quel que soit le faciès, l'anisotropie hydraulique est de règle : la productivité des ouvrages de captage varie beaucoup à l'intérieur d'un espace occupé par le même faciès. Il en est également ainsi le long d'une faille affectant le même faciès. La description des systèmes aquifères du socle cristallin de la zone d'étude d'après les forages (figure 37), confirme les observations géologiques. Les coupes de forages mettent en relief la superposition des aquifères. Le profil a une structure verticale composée du sommet à la base :

- La cuirasse latéritique est riche en croûte ferrugineuse (2 à 3m). Elle est répandue au nord et au centre, butte de cuirasse de petite dimension qui peut être absente en raison de l'érosion.
- La saprolite (Allotérite et Isaltérite) : un matériau riche en argile, dérivé de décomposition in situ prolongée du substrat rocheux, avec une porosité effective comprise entre 3% et 10% et une conductivité hydraulique assez faible (Dewandel et al., 2006).

- La couche allotérite, riche en argile appelée l'argile latéritique (17 à 20 m). Elle est riche en kaolin et provient de l'altération très poussée de la roche mère, la carapace résulte du cuirassement des argiles.
- La couche isaltérite appelée arènes grenues (19 à 22 m), la couche de granite altéré contenant des débris grossiers, la couche fissurée qui affecte le granite légèrement altéré et le granite sain fracturé. Cette couche est riche en argile et sable, on n'y reconnaît la structure de la roche mère, les minéraux sont partiellement dégradés.
 - Roche mère fissurée (18 à 20 m) ou granite fissuré où commence l'altération en boucle. La couche fissurée est caractérisée par fissuration horizontale dense et des fissures subverticales, attribuer à l'altération (Maréchal et al., 2004), c'est à ce niveau que les arrivées d'eau sont observées au cours de la foration
 - Roche mère saine (6 à 10m) se trouve à la base du profil d'altération. Elle est composée de granite sauf entre Guénien et Bazilakoa où on n'a les granodiorites. On peut y observe quelques arrivées d'eau isolées.

D'après Savadogo, (1984) les grandes profondeurs ne garantissent pas toujours une grande productivité des ouvrages ce qui concorde parfaitement avec l'observation faite par des études plus récentes en Ouganda sur la perméabilité de fractures des aquifères du socle Taylor et Howard, (2000) qui ont montré qu'aucune zone fracturée présentant une perméabilité meilleure que 10^{-5} m/s n'a été trouvée au-dessous de 57 m. Ceci permet de supposer que la base réelle de l'aquifère est à environ 60 m sous la surface du sol.

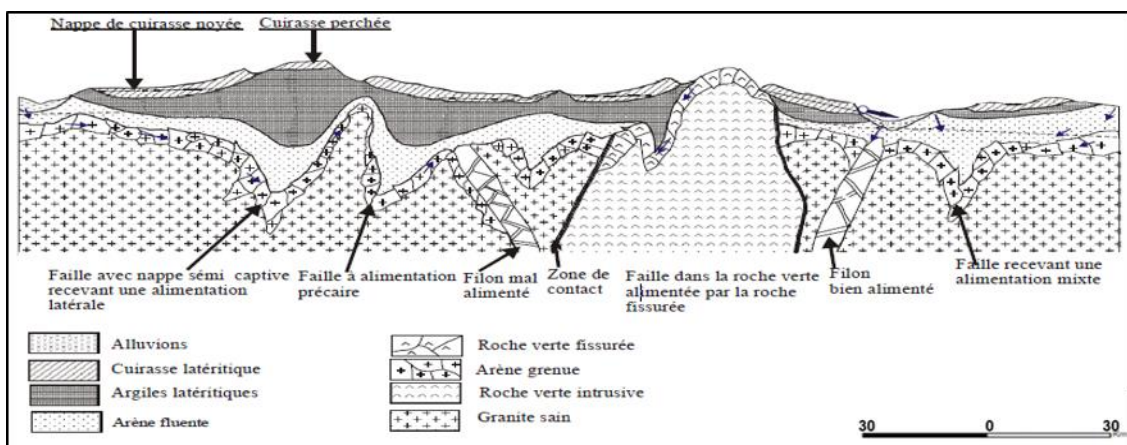


Figure 37: Mode de gisement des ressources en eau souterraine (Savadogo, 1984)

II.4 CONCLUSION PARTIELLE

La caractérisation du sous-bassin de la Sissili d'une superficie de 7559 km² est occupée par une population de 1 695 863 hbts avec une densité de 79 hbt/km². On observe trois types d'occupations des terres : les zones agricoles, les zones pastorales, les zones humides. Son sol est peu évolué et hydromorphe. Son climat est de type Soudanien (sud soudanien), situé au sud du parallèle 11°30'N, couvre la totalité du sous-bassin de la Sissili., il est traversé par une rivière qui donne son nom à la commune. Les formations géologiques rencontrées sont variées et peuvent être regroupées en deux grands ensembles géologiques d'âges protérozoïques : l'ensemble plutonique et l'ensemble volcan sédimentaire. L'exploitation de l'image Landsat montre les directions N10°-20°, N60°-70° et N100°-110°, N°120-130° sont prédominantes et aussi des directions préférentielles de fractures d'orientation N10°-20° (N-S) sont plus représentés, N60°-70°, N100°-115° et N120°-130° (NE-SO), qui suivent et sont prédominantes et plus captées par les forages.

**CHAPITRE III : ETAT DES LIEUX ET COMPREHENSION DE LA POLLUTION DES EAUX
SOUTERRAINES DU SOUS-BASSIN VERSANT DE LA SISSILI AU BURKINA-FASO**

CHAPITRE III : ETAT DES LIEUX ET COMPREHENSION DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU SOUS-BASSIN VERSANT DE LA SISSILI AU BURKINA-FASO

Plusieurs géologues se sont intéressés à la chimie des eaux du sous-bassin de la Sissili avant l'essor des études hydrogéologiques. Le sous-bassin de la Sissili fait partie de ces zones où les eaux souterraines se localisent le plus souvent dans les altérites et empruntent les couloirs privilégiés que sont les fractures (Savadogo, 1984). Les couches altérées et les roches fracturées sont des produits de l'effet de l'intempérie chimique in situ prolongée de la roche mère et des mouvements tectoniques, respectivement (Dewandel et al., 2006). Par conséquent, la chimie des eaux souterraines des sous-sols est directement liée à la composition minéralogique de la roche-mère et des divers processus d'altération (Bamba et al., 2013; Kouanda et al., 2018; Sako et al., 2016). Ce sous-bassin est, depuis quelques années, soumis à une forte activité anthropique, notamment les activités minières, et agricoles, mais aussi en association avec la minéralisation (Faye et al., 2020). Les anciennes analyses d'eau souterraine sont incomplètes du fait qu'elles ont été faites à travers des kits de terrain. En effet, on peut noter à titre d'exemple que le sodium et le potassium ne sont pas dosés et ne permettant donc pas d'apprécier la balance ionique des sources d'eaux étudiées (Savadogo, 1975). L'Etat Burkinabé dans le souci d'améliorer l'accès à l'eau de la population rurale initie régulièrement des campagnes de suivi qualitatif et de suivi des risques de pollution liés aux ressources en eau. La campagne d'analyse de 2012 a montré un degré élevé de certains paramètres chimiques au niveau du sous-bassin qui peut affecter la qualité des eaux. Afin de mieux cerner la qualité de l'eaux, 67 analyses réalisées dans les ouvrages de captages des eaux souterraines ont été retenues. Ces ouvrages ont été coptés car ils disposent des informations sur la géologie et sur les paramètres physico-chimiques. Ce chapitre expose les différentes méthodes et outils utilisés pour une meilleure appréciation de l'hydrochimie des eaux de forages captées. Cette approche vise à atteindre l'objectif spécifique pour comprendre l'origine et les mécanismes des différents types de pollution identifiés pour en évaluer l'évolution dans cet environnement fortement anthropisé. Cela permettra de vérifier l'hypothèse selon laquelle si l'évolution et l'origine des eaux de forages polluées sont en relation directes avec les faciès. Des résultats issus de ce chapitre ont fait l'objet de valorisation, à travers la publication d'un article scientifique portant sur : « Understanding groundwater pollution of sissili catchment area in BURKINA-FASO » dans LARHYSS Journal No 42 (2020): Issue 42.

III.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1.1 ACQUISITION DES DONNEES ET ETAT DES LIEUX DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Au Burkina Faso, l'augmentation de la demande en eau, et la rareté de la ressource en eau restent un aspect préoccupant. Dans la zone d'étude, l'agriculture, l'élevage, l'exploitation minière, et l'industrie constituent les principales activités. La dégradation de la qualité des eaux souterraines y est provoquée par des facteurs anthropiques et naturels. L'espacement d'un point d'eau par rapport à la source de contamination et la profondeur de la nappe constituent deux critères prépondérants dans la détermination de la qualité de l'eau souterraine (Hassane, 2010). Un diagnostic organoleptique de la qualité des eaux souterraines en 2008 a abouti à une étude physico-chimique préliminaire et a montré la possibilité d'une contamination d'origine anthropique de la nappe. En effet, une campagne de collecte a été initiée par la direction en charge de ce volet en 2012 pour la mise en évidence d'éléments chimiques nocifs en fortes teneurs dans les eaux de certaines localités. Il en est de même pour les eaux fortement minéralisées pouvant entraîner des problèmes rénaux pour les populations. Au total 67 analyses de la qualité de l'eau des forages se trouvant dans notre zone d'étude ont été recensées selon les bases de données du Burkina (BEWACO 1996, INOH 2010). Dans ce chapitre, tous les échantillons sont traités par la statistique descriptive et la représentation sur le diagramme de Piper. Les diagrammes de corrélation et d'équilibre seront utilisés pour interpréter les résultats des analyses sans distinction de localisation ou de profondeur.

III.1.1.1 Méthode d'échantillonnage

I.1.1.1.1 Choix des sites de prélèvement d'eau souterraine

Dans cette étude, les analyses d'eau ont été faites par la DIEE et les analyses ont été réalisées par le laboratoire de la DGRE. La méthodologie utilisée pour la collection des eaux souterraines est appliquée sur les ouvrages de captage qui sont principalement les forages équipés de pompes manuelles fonctionnels de manière à couvrir toute la zone urbaine afin d'avoir une bonne idée sur la qualité physico-chimique des eaux (figure 38). Tenant compte de la très grande variabilité, les zones cibles pour la qualité des eaux souterraines ont été choisies de manière à couvrir la totalité du bassin. Ce choix s'est fait en fonction de la lithologie de l'aquifère, et des activités qui s'y exercent afin d'obtenir des renseignements sur les paramètres étudiés et les facteurs de contrôle du chimisme des eaux des roches cristallines sous climat tropical sec. La procédure de sélection des ouvrages à échantillonner s'est basée sur un maillage

carré de 10 km de côté dit stratégique ou régional qui couvre tout le sous-bassin selon la méthode normative utilisée par les géologues (Antoni et al., 2017). Dans chaque maille, huit (8) points sont sélectionnés et repartis en fonction de la géologie. Le nombre de points d'échantillonnage peut dépasser huit selon l'occupation du sol et plus particulièrement selon la densité de la population au km².

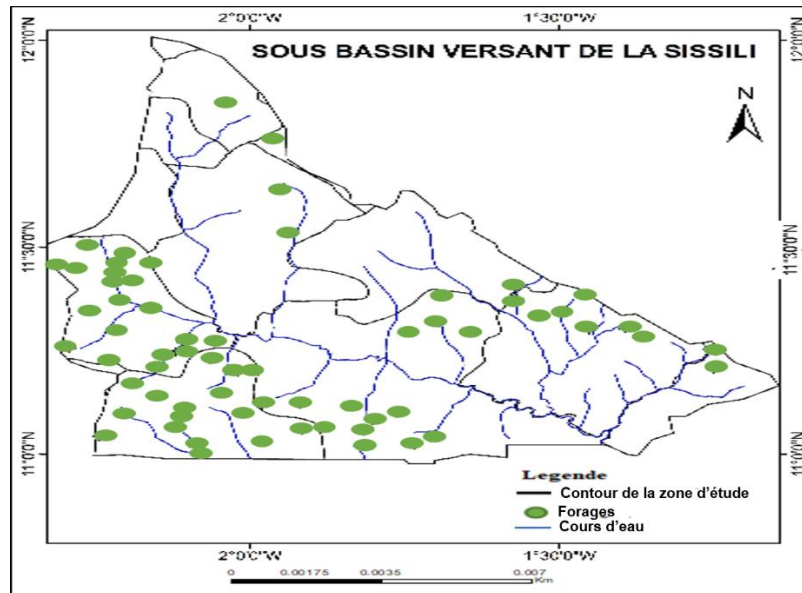


Figure 38: Localisation des sites d'échantillonnages du sous-bassin de la Sissili

III.1.1.1.2 Mode de dosage des échantillons d'eau utilisés

Dans le cadre de cette étude, un certain nombre de paramètres de qualité ont été analysés afin de caractériser la qualité globale de l'eau et d'identifier les pollutions éventuelles. Les ions majeurs Calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), chlorures (Cl^-) ont été dosés par la méthode de Titration complexométrique. Les teneurs en nitrate (NO_3^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrites (NO_2^-), ammonium (NH_4^+), orthophosphate (PO_4^{3+}), fer (Fe^{2+}), et fluorures (F) ont été obtenues par spectrophotométrie avec spectrophotomètre d'absorption moléculaire DR3900. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) ont été dosés par la photométrie à l'aide d'un photomètre à flamme Jenway PFP7. Le cyanure libre a été analysé par la méthode de spectrophotométrie. L'arsenic (As), le plomb (Pb), le chrome (Cr), l'aluminium (Al), le zinc (Zn), le nickel (Ni) ont été caractérisés par la méthode spectrométrie d'absorption atomique. Les bicarbonates (HCO_3^-) ont été dosés par titrimétrie, et la silice par la méthode d'un spectrocolorimètre.

L'objectif de l'analyse des paramètres physico-chimiques est double. Dans un premier temps, elle permettra d'apprécier, sur la base des indicateurs du Burkina, la qualité des eaux des PMH utilisés pour l'AEP. Dans un second temps les résultats obtenus seront utilisés pour apprécier

le contraste entre aquifères et surtout pour l'analyse des sources de pollution à travers la cartographie.

III.1.1.2 Démarche méthodologique de traitement et d'analyse des données sur la qualité des eaux

Plusieurs études à travers le monde ont étudié l'impact de la qualité des eaux superficielles et souterraines. De nombreux pays ont développé leurs propres méthodes, adaptées aux conditions locales et en s'inspirant éventuellement de l'une ou l'autre des méthodes existantes. Dans le cadre de cette étude, le traitement des données collectées sur les eaux souterraines du sous-bassin a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées.

III.1.1.2.1 Correction et critique des données

Ainsi, la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude est, dans un premier temps, la méthode de correction et critique sur la qualité des données. La première étape consiste à vérifier les divisions administratives des sites de prélèvement du sous-bassin. Les coordonnées géographiques des forages ont été attribués aux coordonnées du village. Pour la préparation des données, une campagne de reconnaissance a été lancée pour corriger et harmoniser les coordonnées tout en vérifiant leur état de fonctionnement. De plus, certains paramètres manquaient ou avaient des valeurs négatives. Le principe est de sélectionner les données qui sont similaires et qui sont les plus proches. Certaines variables physico-chimiques sont manquantes ou comportent des erreurs de saisie (utilisation du point et de la virgule comme séparateur décimal, valeur négative). D'après la littérature plusieurs méthodes de correction et critique existent selon le type de variable.

La deuxième étape consiste en une analyse statistique (corrélation, moyenne) pour compléter les données préparées. Cette analyse consiste à faire une corrélation, de calculer la moyenne et le mode des données ayant déjà été corrigées. Pour notre part, c'est la méthode de régression linéaire qui est plus adaptée. Dans un premier temps les données ont été classées par provinces. À travers la matrice de corrélation, on peut voir les données qui se corréleront le mieux. Cette méthode de comblement des lacunes est établie sur le principe selon lequel les données les plus proches les unes des autres se ressemblent plus par rapport aux données situées à une grande distance où la géologie y est différente par exemple (Koussoube et al., 2000). Ce qui n'est pas évident en milieu discontinu. La géologie pourrait être le critère idéal, mais, cette information étant mal connue pour les ouvrages échantillonnés, la subdivision par province a été retenue. Deux niveaux de régression linéaire existent : la régionalisation des données et ensuite la

régression sur l'ensemble des données. Il a été considéré comme ajustement linéaire toute corrélation entre deux variables satisfaisant à la condition $|R| \geq 0.7$, où R est le coefficient de corrélation entre deux variables (Kumar et Muttan, 2006; Pagès, 2004). Si toutefois cette condition est satisfaisante, on détermine l'équation de la droite de régression linéaire liant les deux variables, ce qui permettra de compléter les données manquantes d'une variable par rapport aux données de l'autre variable. Dans un second temps, on a procédé à la détermination des corrélations. En effet, il existe des ouvrages dont certains paramètres n'ont pas été mesurés. Alors la méthode de régression linéaire ne permet pas de combler ces données, car la donnée manquante est générée par une autre valeur qui est elle-même manquante.

Afin de combler les lacunes de ce genre, la démarche suivante a été retenue :

- Déterminer sur l'ensemble des données les paramètres statistiques suivants : Minimum, Maximum, Moyenne, Mode, Médiane, Quartile 25% (1er quartile), Quartile 75% (3ème quartile), écart type.
- Juger la dispersion des données de chaque variable et attribuer une valeur à chaque donnée manquante de la variable.

Et troisièmement, la correction consiste en l'équilibre ionique. Cela se justifie ici, car dans les études précédentes le sodium et le potassium n'ont pas été pris en compte. La balance ionique traduit l'état d'équilibre entre les cations et les anions des éléments majeurs. La comparaison des deux sommes globales anions (A-) et cations (C +) permet d'identifier les échantillons qui s'écartent trop de la bissectrice. Il permet de déceler là où il y a une équivalence entre les anions et les cations et de les éliminer, ce qui est traduit par l'équation (4) et la balance ionique par l'équation (5) :

$$[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] \quad (4)$$

$$\text{L'erreur en \% est donnée par : } BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} * 100 \quad (5)$$

Certains auteurs définissent cette erreur acceptable lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10% (Mahamane et Guel, 2015 ; Yameogo, 2008), d'autre par contre la fixe à +/-5 % par d'autres auteurs (Kouanda et al., 2018 ; Malik et Shimi, 2019). Dans un premier temps, après avoir éliminé toutes les analyses qui ont une balance supérieure à 10% les données de tous les échantillons ont été traitées sans considérer leur origine. Dans un deuxième temps, le

traitement a été réalisé après séparation de différents groupes en fonction de l'origine de l'eau et de la profondeur sur chacune des familles d'eau.

III.1.1.2.2 Analyse multivariée

L'approche des méthodes d'analyse statistique multivariée est établie pour étudier les phénomènes qui sont à l'origine de la minéralisation de l'eau et reposent sur l'analyse des composants principaux. Le choix d'une technique d'analyse de données multivariées permet d'extraire facilement les informations importantes à l'état brut. La littérature a aidé à choisir une méthode de data mining appropriée en fonction du type de problématique :

- Les problématiques exploratoires permettent d'aborder des jeux de données multivariées sans considérer d'hypothèse particulière à valider. Les techniques exploratoires d'analyse impliquent souvent une réduction de données volumineux rendant leur exploration plus facile.
- Les problématiques décisionnelles qui impliquent de tester le lien entre deux groupes de variables (corrélation) ou d'expliquer une variable ou un groupe de variables par un autre groupe (causalité).

Dans notre contexte et parmi toutes les méthodes existantes, celle de la description des données et des variables quantitatives sera utilisée. L'outil le plus approprié dans ce cas de figure est l'analyse factorielle ou l'analyse des composantes principales (Gournay, 2012). Elle sera couplée à la résolution statistique telles que le mode R appliqué à l'analyse des composantes factorielles (ACP) pour décrypter les variables. Dans cette étude il sera retenu pour l'analyse de corrélation proche de +1 ou -1 signifie une bonne relation entre deux variables, soit corrélées positivement ou négativement. Une corrélation supérieure à 0,7 correspond à des données fortement corrélées tandis qu'une corrélation entre 0,5 et 0,7 correspond à des données modérément corrélées. Cela permettra de synthétiser et de classer un grand nombre de données afin d'en extraire les principaux facteurs de leurs relations réciproques. De plus, cette étude déterminera les différents faciès hydrogéochimiques, l'origine de la minéralisation et les Faciès chimiques des eaux. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du code R.

III.1.1.2.3 Détermination des faciès à l'aide du diagramme de Piper

Pour la détermination des faciès hydrochimiques des eaux souterraines du sous-bassin de la Sissili, une approche très classique a été utilisée. Il s'agit de la représentation des échantillons prélevés dans le diagramme de Piper (Piper, 1944). Il a trois parties : le triangle des cations, le

triangle des anions et un losange utilisé pour déterminer les hydro faciès. L'étude du faciès de l'eau sera considérée dans chaque partie du diagramme qui permettra de distinguer les différents types d'eau (Lghoul et al., 2014). Les résultats obtenus seront comparés à ceux de Savadogo, (1984) dans le but d'apprécier l'évolution dans le temps des faciès chimiques. La position relative des résultats permet de définir les dominances anioniques et cationiques ainsi que des regroupements par famille qui présentent des faciès similaires. Ces faciès sont définis à partir de l'anion dominant et du cation dominant. L'analyse globale de l'échantillon est représentée dans un losange permettant de définir le faciès de l'eau étudiée.

III.1.1.2.4 Acquisition et processus de minéralisation des eaux souterraines

L'approche thermodynamique et les diagrammes d'équilibre construits à partir des teneurs en éléments chimiques majeurs permettent de mieux définir le potentiel minéral qu'on peut trouver dans le contexte géologique de la zone. À partir du contenu des principaux éléments chimiques, on peut connaître l'état d'équilibre des eaux par rapport aux minéraux primaires ou nouvellement formés (Yameogo, 2008). Cela permet de connaître certaines propriétés et comportements des eaux, en particulier, le caractère corrosif ou détartrant. Cette approche a consisté dans le cas de notre étude à déterminer les indices de saturation (IS) et les indices de Ryznard (RSI) de certains minéraux présents dans la zone de socle à l'aide du module PHREEQC du logiciel Diagrammes.

- Indice de saturation

Si on considère une réaction chimique entre l'eau et un minéral, la constante d'équilibre thermodynamique de cette réaction, $K(T)$ s'écrit suivant l'équation (6) :

$$K(T) = PAI \quad (6)$$

PAI est appelé produit d'activité ionique. L'écart à l'équilibre est défini par l'indice de saturation IS qui s'écrit suivant l'équation (7) :

$$IS = \log (PAI) - \log(T) \quad (7)$$

Quand $IS = 0$ l'eau est à l'équilibre avec le minéral

$IS < 0$ l'eau est sous saturée, et capable de dissoudre le minéral

$IS > 0$ l'eau est sursaturée, et capable de précipiter le minéral

L'absence de fiches techniques de forages a limité dans la distinction entre les eaux de la nappe des altérites et de la frange fissurée ou des arènes grenues.

Pour la saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés, l'IS dépend de la validité des mesures des concentrations ioniques et du pH dans certains cas de mesures. Mais aussi suivant l'imprécision dans les calculs Kouanda et al., (2018); Moussa et al., (2011) proposent de considérer que la saturation est obtenue dans un domaine un peu plus large tel que $-1 < IS < 1$. Aussi, est-il recommandé d'utiliser différents diagrammes bivariés pour plus d'investigations sur les sources de déminéralisation des eaux.

- **Indices de Ryznard**

L'indice de Ryznard ou indice de stabilité de Ryznard (RSI) est un indice qui permet de définir la tendance agressive (corrosion) ou entartrante de l'eau qui s'écrit suivant l'équation (8) :

$$RSI = 2pH_s - pH. \quad (8)$$

Dans cette formule, pH_s ou pH à saturation, ou pH d'équilibre est calculé selon la formule empirique qui s'écrit suivant l'équation (9) :

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (9)$$

$$A = \text{Log}_{10}(\text{salinité en mg/l}) - 1/10$$

$$B = -13.12 \times \text{Log}_{10}(\text{température en } ^\circ\text{C} + 273) + 34.55$$

$$C = \text{Log}_{10}(\text{dureté calcique en mg/l}) - 0.4$$

$$D = \text{Log}_{10}(\text{TAC en mg/l})$$

Plusieurs ordres de grandeur de RSI sont définis par rapport au pouvoir agressif ou entartrant de l'eau.

Si $RSI > 7$, l'eau est agressive et corrosive ;

Si $RSI < 7$ l'eau est incrustante et va entraîner un dépôt de carbonate de calcium ;

Si $RSI \leq 6.5$: pas de tendance corrosive ;

Si $RSI > 6.5$ et ≤ 7.2 : corrosion légère ;

Si $RSI > 7.2$ et ≤ 8.5 : corrosion sévère ;

Si $RSI > 8.5$: corrosion importante.

En général, il est démontré par de nombreux travaux que lorsque la formation géologique est acide, l'eau est agressive (granites, migmatite, quartzite, grès, gneiss et schiste) et peut libérer les métaux à savoir le fer, le cuivre, le plomb, le nickel, le chrome et le zinc. Mais lorsque la

roche est de nature basique (basalte, dolérite, gabbro, calcaire.), l'eau est non agressive avec un pH >7 (Ghazali et Zaid, 2013; Hanon et Rouelle, 2011; Kahoul et Touhami, 2014). L'action corrosive dépend de son contenu en ions de ce métal, mais également de sa teneur en d'autres ions capables de rentrer dans les réactions d'oxydoréduction. Par contre, certaines eaux sont non corrosives.

III.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.2.1 CORRECTION ET CRITIQUE

La phase de correction et de critique consiste à trouver les forages dans les communes. En effet, le sous-bassin de la Sissili est partagé par 13 communes, qui n'ont pas les mêmes contextes géologiques. La matrice de corrélation (tableau 3) donne une idée de la relation qui puisse exister entre deux variables.

Des courbes de régression linéaire ont été utilisées pour apprécier la qualité des corrélations (figure 39). Elles ont permis de compléter les données manquantes d'une variable par rapport aux données de l'autre variable. L'équation de la CE en fonction du TDS a déterminé la droite $y = 0,8428x + 12,215$. Les TDS comme la CE décrivent les sels inorganiques présents en solution dans l'eau avec une corrélation ($R^2=0,74$). Le TAC est essentiellement dû aux HCO_3 , il se situe dans l'intervalle 5 mg/l et traduit les faibles valeurs des ions bicarbonates par rapport aux TDS (figure 39) avec une corrélation de ($R^2=0,56$) et une droite $y = 0,4367x + 46,311$. Ce qui peut s'expliquer par le fait qu'un nombre élevé de variables rend difficile la corrélation d'un nombre de variables explicatives. Ces variables génèrent des erreurs types plus faibles que celles de la constante. Cependant, il faut réduire le nombre pour plus de clarté. De ce fait, la méthode d'analyse statistique de paramètres physico-chimiques serait la mieux adaptée, cela prend en compte un nombre plus importants de variables (tableau 2). Ce tableau sera utilisé pour la suite de l'analyse des caractéristiques physicochimiques.

La balance ionique sur les échantillons varie de 0 % Kayabo à 31 % à Boala. Enfin, selon les résultats des analyses effectuées, l'équilibre ionique est vérifié à partir des teneurs en ions dosés (< 10%) en tenant compte de certaines charges ioniques élevées. Ce qui donne une fiabilité suffisante aux données d'analyses de laboratoire et par conséquent aux interprétations qui en découle. Cependant, tous les échantillons n'ont pas une balance ionique équilibrée. Les échantillons de Boala, Métió, Kayero-bo ne sont pas fiables (> 10%), mais s'avèrent faible au regard des résultats. Les eaux de ses trois villages pourraient être dominées par des éléments de traces métalliques. Ces traces ne sont pas prises en compte lors du calcul de la balance. Par

exemple, on constate que le fer est en excès dans la plupart des forages. Cet écart peut aussi provenir des résultats des analyses non valides ou des ions présents dans l'eau qui n'ont pas été analysés. Il est aussi noté la présence de tous les éléments majeurs au niveau des différents échantillons. Donc cela peut découler du manque de précision dans les méthodes d'analyse utilisées. Les résultats nous montrent que les échantillons à balance équilibrée présentent de meilleures valeurs des critères de comparaison (Kouassi, 2013 ; Mahamane, 2013). Ainsi, aux vues de ses résultats, la balance ionique est donc la fiabilité pour le traitement des données physico-chimiques des eaux souterraines. Cela a été appuyé à partir de la régression linéaire.

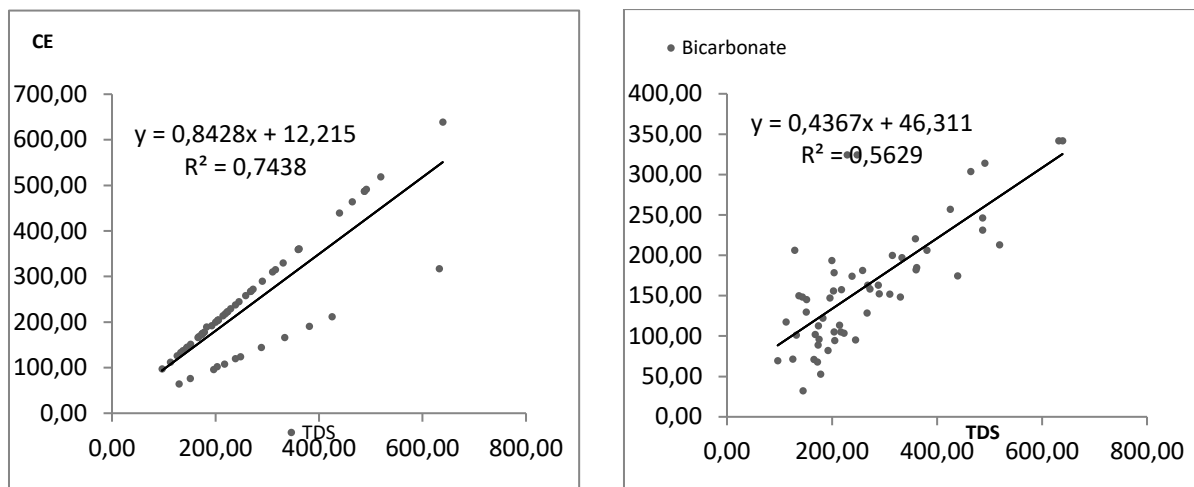


Figure 39: Régression linéaire entre les paramètres, HCO₃ et TDS ; TDS et CE dans les eaux souterraines de la province de la SISSILI

III.2.2 RESULTATS DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET ORIGINE DES EAUX

Le traitement statistique de 67 analyses présente la moyenne des valeurs et les écarts types des concentrations (tableau 2). Pour certaines valeurs, on constate que l'écart type est supérieur à la moyenne. Cela peut supposer que les valeurs de ces variables sont dispersées et met ainsi en exergue une vraie dissemblance des eaux échantillonnées dans la nappe de la zone d'étude. Et pour les variables qui sont inférieures aux valeurs moyennes, cela indique une certaine homogénéité dans le type d'eau.

Tableau 2: Statistiques moyennes de paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines

	T°	PH	Ce	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺
Moyenne	30,31	6,47	274,77	28,43	13,39	6,82	2,28	0,19
Écart-type	0,93	0,64	131,65	31,71	21,11	4,95	1,85	0,48
Minimum	28,30	5,69	96,60	7,80	1,19	1,90	0,80	0,001
Maximum	32,00	10,93	639,00	265,44	47,87	29,20	14,10	2,90

	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Po ₄ ⁻	P	F
Moyenne	0,05	1,46	4,43	0,02	6,51	0,88	0,29	0,49
Écart-type	0,13	1,56	6,06	0,03	10,60	0,70	0,23	0,40
Minimum	0,01	0,30	0,001	0,00	0,44	0,18	0,06	0,01
Maximum	1,02	9,90	31,00	0,22	52,80	4,63	1,51	1,95

	CN ⁻	Al	As	Cr	Pb	Zn	HCO ₃ ⁻
Moyenne	0,07	1,67	15,69	0,01	0,02	0,12	139,55
Écart-type	0,10	1,29	15,21	0,03	0,02	0,22	88,86
Minimum	0,00	0,00	2,76	0,00	0,001	0,001	0,001
Maximum	0,41	5,37	76,42	0,22	0,07	1,44	341,97

III.2.2.1 Les paramètres physiques

Le tableau 2 montre les valeurs de la température qui varie de 28,3°C (Kilounguin) à 32°C (darsalam), avec une moyenne de 30,31°C. Les températures moyennes de l'eau exposent peu de modifications entre les formations géologiques et se mettent dans la fourchette de la valeur annuelle de la température atmosphérique dans la zone d'étude. Yameogo (2008) justifie que cet intervalle de valeur est presque semblable dans un même environnement de socle du fait que la pression de l'insolation est intense et cela s'accumule durant l'année d'où une chaleur considérable. Ces températures sont dans l'ensemble bien supérieures à la température de l'air qui est de 25°C. Cependant, leur suivi quotidien serait très important pour une étude de la vulnérabilité des eaux à la pollution. En effet, les études menées par Ahoussi et al., (2012); Eblin, (2014); Yameogo, (2008) ont montré que les eaux souterraines, selon les variations quotidiennes de l'atmosphère, sont vulnérables à la pollution.

Le potentiel hydrogène (pH) des eaux souterraines varie de 5,69 (Darsalam) à 10,93 (Pore), avec une moyenne de 6,47 qui est acide. La valeur de pH plus élevée indique un aquifère basique. Le pH plus bas est lié aux processus de drainage acide lié à l'orpaillage répandu dans la localité. Les faibles valeurs de pH peuvent être également liées aux minéraux à faible teneur en carbonate contenus dans la couche altérée (Sako et al., 2018). Ce phénomène est bien perçu dans la localité de Tabou où l'eau souterraine a un goût de calcaire ce qui pousse la population à abandonner certains puits d'eau.

La conductivité électrique varie entre 96,6 µS/cm (Yelbouga) et atteint un maximum de 639 µS/cm (Karaya). Aucune valeur élevée ne dépasse la norme en vigueur au Burkina Faso de 1000 µS/cm. Cependant, les conductivités de l'eau obtenues sur les points de mesures sont faibles. Ce qui reflète une faible minéralisation de ces points, d'où l'indépendance des poches d'eau les unes des autres. Concernant les forages où on note les plus grandes valeurs de

la CE, leurs pH sont généralement faibles pour ces eaux des forages et la profondeur est de l'ordre de 45 m à 60 m. La minéralisation correspond à tous les sels dissous contenus dans l'eau selon (Faye et al., 2022; D. Kuitcha et al., 2013) on y reviendra aussi plus tard dans l'étude des processus qui gouvernent la minéralisation. Ce résultat est différent aussi de celui trouver par (Savado, 1975) ; ou les valeurs de la CE s'étalent entre 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 12500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ce qui donne une minéralisation moyenne ou forte.

III.2.2.2 Les cations

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent que dans les eaux souterraines les cations sont dans l'ordre d'importance suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$.

Le calcium est le cation le plus abondant dans les eaux souterraines du sous-bassin. La concentration moyenne est de 28,43 mg/l. La concentration varie entre 7,8 mg/l et 265,44 mg/l, avec un regroupement autour de 20 à 30 mg/l et aucune valeur ne dépasse la norme en vigueur au Burkina Faso fixée à 100 mg/l. Les valeurs élevées de concentration proviennent de forages dont les eaux ont une forte teneur en minéraux par rapport à l'ensemble des forages. Selon Faye et al., (2022) et Vicat et al., (2002), cela pourrait être expliqué par le lessivage du profil des sols riches en minéraux calciques. La faible concentration ou la diminution de calcium dans les eaux souterraines peut être expliquée par la présence de plagioclases présents sur les schistes et granito-gneiss du sous-bassin, ou par la précipitation des minéraux carbonatés.

Les valeurs de concentration en magnésium sont comprises entre 0,29 mg/l et 47,5 mg/l. Les valeurs maximales sont beaucoup plus observées au niveau de la province de la Sissili. On peut supposer que leur composition est probablement influencée directement ou indirectement par des phénomènes de pollution naturelle. Le rapport Ca/Mg inférieur à 1 le confirme pour les ouvrages de Koumbogoro et Tuai. Cependant, il peut aussi provenir de l'altération de minéraux ferromagnésiens issus de biotites ou d'amphiboles.

Les valeurs de la concentration du sodium sont comprises entre 1,9 mg/l et 29,2 mg/l, indiquant ainsi qu'aucune valeur ne dépasse la recommandation de 200 mg/l. Sa présence dans les eaux souterraines montre qu'elle provient de la décomposition de feldspathique, mais aussi de l'altération des micas. Cela peut s'expliquer par le fait que la concentration de sodium (Na^+) est supérieure à celle de potassium (K^+), qui se traduit selon Kuitcha et al., (2013), d'une part, par la plus grande stabilité des micas feldspathiques et potassiques et d'autre part par l'absorption et la mobilisation des ions potassium positifs (K^+) dans les minéraux nouvellement formés lors de l'altération. Les concentrations de ces deux ions sont également modérément corrélées ($R^2 = 0,64$). La dominance des ions sodium (Na^+) sur les ions potassium (K^+) est

également due à l'absorption sélective des argiles; le potassium (K^+) ayant une masse atomique plus élevée que le sodium (Na^+), il s'ensuit que les eaux contiennent plus de sodium que de potassium (Ahouidi et al., 2015).

Le potassium montre une grande variabilité avec les valeurs de concentration d'un minimum de 0,80 mg/l et maximum de 14,1 mg/l. Selon une recommandation de 10 mg/l, seuls trois forages situés dans le village de Tabou dépassent cette limite. Ces concentrations élevées et ponctuelles montrent que les eaux sont soumises à des pressions anthropiques. Les faibles valeurs peuvent être expliquées, selon certains auteurs, par le fait que le potassium est 10 fois plus abondant que son absorption par les plantes. Les ions sodium et potassium pourraient provenir de la décomposition de minéraux tels que les feldspaths, les pyroxènes, les micas et amphiboles, et échanges ioniques avec les minéraux argileux et ainsi que la pollution des activités humaines. Cela est bien confirmé par le rapport Na/K qui est inférieur à 1, correspondant à des eaux qui ont rapidement rejoint la nappe sans un prélèvement important de potassium par la plante ou autorisé un enrichissement de l'eau en sodium par lessivage des minéraux altérés de substratum.

III.2.2.3 Les anions

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude montrent que les anions sont dans l'ordre d'importance dans les eaux souterraines suivant : $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$.

Les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux et dominent les anions, ils peuvent donc influencer la CE ($R^2 = 0,55$). Les valeurs de concentration sont comprises entre 32,22 mg/l et 341,97 mg/l, avec une moyenne de 139,55 mg/l. Au-dessus de 200 mg/l, cela suppose que le CO_2 est produit dans l'aquifère à partir de la minéralisation de la matière organique. Néanmoins, on peut dire que sa concentration élevée dans les eaux souterraines peut traduire le lessivage des roches par infiltration d'eau de puits (la dissolution du CO_2 provenant de l'atmosphère et du sol en petite quantité). De plus, l'altération des feldspaths libère des ions qui, combinés, donnent du HCO_3^- lorsqu'il contient des minéraux carbonatés. Sa faible teneur peut également s'expliquer par les valeurs de pH des eaux souterraines puisque la libération des bicarbonates est favorisée lorsque le pH du milieu augmente (Kuitcha et al., 2013). Donc on peut en conclure que le bicarbonate est d'origine atmosphérique.

Les concentrations de nitrate sont comprises entre 0,44 mg/l et 52 mg/l. Seulement trois des échantillons ne respectent pas la norme autorisée au Burkina Faso de 50 mg/l dans la commune de Bieha. Plusieurs sources sont possibles dans ce cas précis en plus du cycle normal

de l'azote dans l'eau (engrais, d'oxydation, élevage, industrie). Les eaux souterraines sont donc vulnérables aux sources ponctuelles de pollution. Ce phénomène s'explique par la contribution des polluants provenant de la surface immédiate de chaque forage, car il n'y a pas de corrélation entre les nitrates (NO_3^-) et chlore (Cl^-) et entre nitrate (NO_3^-) et sulfate (SO_4^{2-}).

Les chlorures et sulfates ont des valeurs faibles par rapport à la norme acceptée au Burkina, soit de 250 mg/l chacun. Selon Ahoussi et al., (2012); Travi et Dia, (1986), leurs faibles valeurs montrent qu'ils proviennent de granites et que sa présence est caractéristique des pays de socle. Cependant, l'étude de (Savadogo, 1984) dans la même zone d'étude montre des concentrations élevées en chlore qui s'accompagne de concentrations élevées en magnésium avec une bonne corrélation. Les études de (Bamba et al., 2013; Sako et al., 2018), réalisée au Burkina, ont montré une corrélation entre chlore et magnésium à fortes concentrations. L'étude de Kuitcha et al., (2013) dans la Yaoundé montre également une corrélation entre le chlore, le sodium et le potassium. Cependant, ce n'est pas le cas dans les résultats des analyses. Ces paramètres sont non corrélés dans cette étude, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'eau des forages est reçue par infiltration directe de la roche non obstruée donc sa présence n'est pas de nature géologique. L'infiltration de ces eaux à travers les altérites subit un lessivage qui conduit à une faible concentration de chlore. De plus, la couverture d'argile ne rend pas la circulation de l'eau difficile, si ce n'était pas le cas il y aurait une accumulation impliquant des concentrations importantes. Dans les régions non habitées aussi le chlore retrouvé dans les analyses peut se justifier par un apport des eaux de pluie sous la forme de chlorure de sodium dissous dans les eaux de pluie. Donc il est normal que les fortes valeurs de chlores soient accompagnées de fortes valeurs de sodium. Les faibles valeurs de sulfate montrent que les formations géologiques sont pauvres en minéraux sulfureux comme les pyrites, et sa présence serait liée à l'oxydation de celui, et de la dissolution des minéraux secondaires sulfatés.

III.2.2.4 Les concentrations des ions mineurs

Le fluor a des concentrations variants entre 0,01 mg/l et 1,95 mg/l, tandis que le taux à ne pas dépasser est de 1,5 mg/l. Il y a deux échantillons qui dépassent cette norme. Cela s'explique par l'intrusion granitique dans la lithologie locale (BGS, 2002). Ils sont éparpillés sur l'ensemble des trois provinces et se situent dans des champs agricoles. Le fluor dans l'eau provient principalement de la dissolution des minéraux naturels trouvés dans les roches et dans les sols avec lesquels l'eau réagit. La fluorite (CaF_2), la cryolite (Na_3AlF_6), le fluorapatite ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$) et les micas sont les principaux minéraux qui le contiennent (Matini et al., 2009).

Les eaux sont riches en fer avec des teneurs variables entre 0,001 mg/l et 2,95 mg/l, pour une recommandation en vigueur au Burkina Faso de 0,3 mg/l au Burkina Faso. Néanmoins, douze échantillons dépassent cette norme. Des études sur le chimisme des cuirasses montrent qu'il peut avoir une accumulation au niveau de la cuirasse cinq fois plus de Fe que les roches n'en contiennent. Mais les valeurs faibles indiquent que bien que le fer soit présent dans les horizons latéritiques, celui-ci n'est pas mobilisé par les eaux infiltrées dans les conditions climatiques ou par sa continuité qui ne lui permet pas de venir enrichir au niveau des horizons superficiels des altérites. L'étude réalisée par Sako et al., (2016) dans la zone de la région du centre au Burkina, montre que la forte concentration de Fe^{2+} présent dans les eaux souterraines est due à la présence de fer au niveau de la couche altérée qui est généralement latéritique.

III.2.2.5 Métaux lourds et métalloïdes

Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. Les métaux lourds à certaines concentrations peuvent caractériser des types de contamination naturelle ou anthropique, par exemple le chrome révèle la présence d'une tannerie ; le plomb est lié à une pollution diffuse ; le zinc est évacué par les industries qui pratiquent la galvanisation.

Concernant le cyanure, dix-neuf échantillons ont des paramètres supérieurs à la recommandation au Burkina de 0,07 mg/l. Ces échantillons sont prélevés dans les zones d'orpaillage ou exploitation minière traditionnelle, dans des forages entourés d'arbres, dans des décharges, et au niveau des fermes. Les valeurs de concentration de cyanure sont comprises entre 0,001 mg/l et 0,4 mg/l. De plus, des morts massives de bétail ont déjà été enregistrées dans la région et attribuées aux effluents de cyanure (Bamba et al., 2013). La contamination des eaux souterraines à proximité de ces sites de traitement du minerai ne peut donc être exclue sans étude à une échelle appropriée.

L'arsenic est naturellement présent dans le sous-sol du Burkina Faso selon l'étude de Bretzler et al., (2017) à diverses concentrations et en différents éléments tels que pyrite, arsénopyrite, etc. L'analyse statistique montre que trente et une analyse sur les soixante-sept ont des valeurs élevées dépassant la norme autorisée de 0,01 mg/l et sont une fois de plus en lien avec les sites d'orpaillages ou leurs entourages, ou par le biais de fissures. Cependant, si les parois de sulfures sont atteintes, ces risques seront élevés avec une possible excitation de substances de marques éventuellement dangereux dans les systèmes d'eau souterraine (Sako et al., 2018). Il convient donc de souligner que du point de vue de l'usage domestique, les eaux de la nappe sont potables mis à part les forages à fort taux d'arsenic corrélable à la nature même

du minerai qui contient de l'arsénopyrite (Lalanne, 2012). Selon Guissou et al., (2009), les compositions d'arsenic dominantes des eaux des forages exposent les populations consommatrices à un danger d'empoisonnement (lésions cutanées à type d'hyperpigmentation, de verrues). Ces changements paraissent habituellement après une durée d'exposition allant de 5 à 15 ans. Selon de nombreux auteurs (Lindberg et al., 2007; Smedley et al., 2007) le pH alcalin favorise la présence d'une forte concentration d'arsenic et ils croient que la concentration d'arsenic serait plus élevée dans les aquifères pour lesquels les concentrations d'oxygène seraient inférieures à 2 mg/l.

Pour l'aluminium, trente-cinq forages ont des concentrations allant de 0,5 mg/l à 5 mg/l qui dépassent la norme de 0,02 mg/l. Cela pourrait s'expliquer par sa mobilité qui semble être supérieure à celle des autres métaux. Fekhaoui et Pattee, (1993) l'explique par une fixation préférentielle sur les particules fines. Dans son état naturel, il est très finement dispersé sous forme de microcristaux de divers aluminosilicates, constituants essentiels des argiles. Ses concentrations peuvent être considérées comme représentatives des concentrations naturelles dans les eaux souterraines.

La norme du chrome de 0,05 mg/l dans notre sous-bassin est respectée. Cependant, ce n'est pas le cas des forages autour de notre zone d'étude. C'est le cas de Kakadouna près de To à Sissili, Kongoussi à Bam sur une base de socle cristalline. Cette présence est associée aux activités industrielles et aux tanneries (Al Khawaja et Stoof, 2001). Les eaux de puits témoins montrent des teneurs faibles en chrome ce qui laisse penser que les teneurs élevées ne peuvent être que de source industrielle.

La figure 40 résume la dominance des paramètres traités.

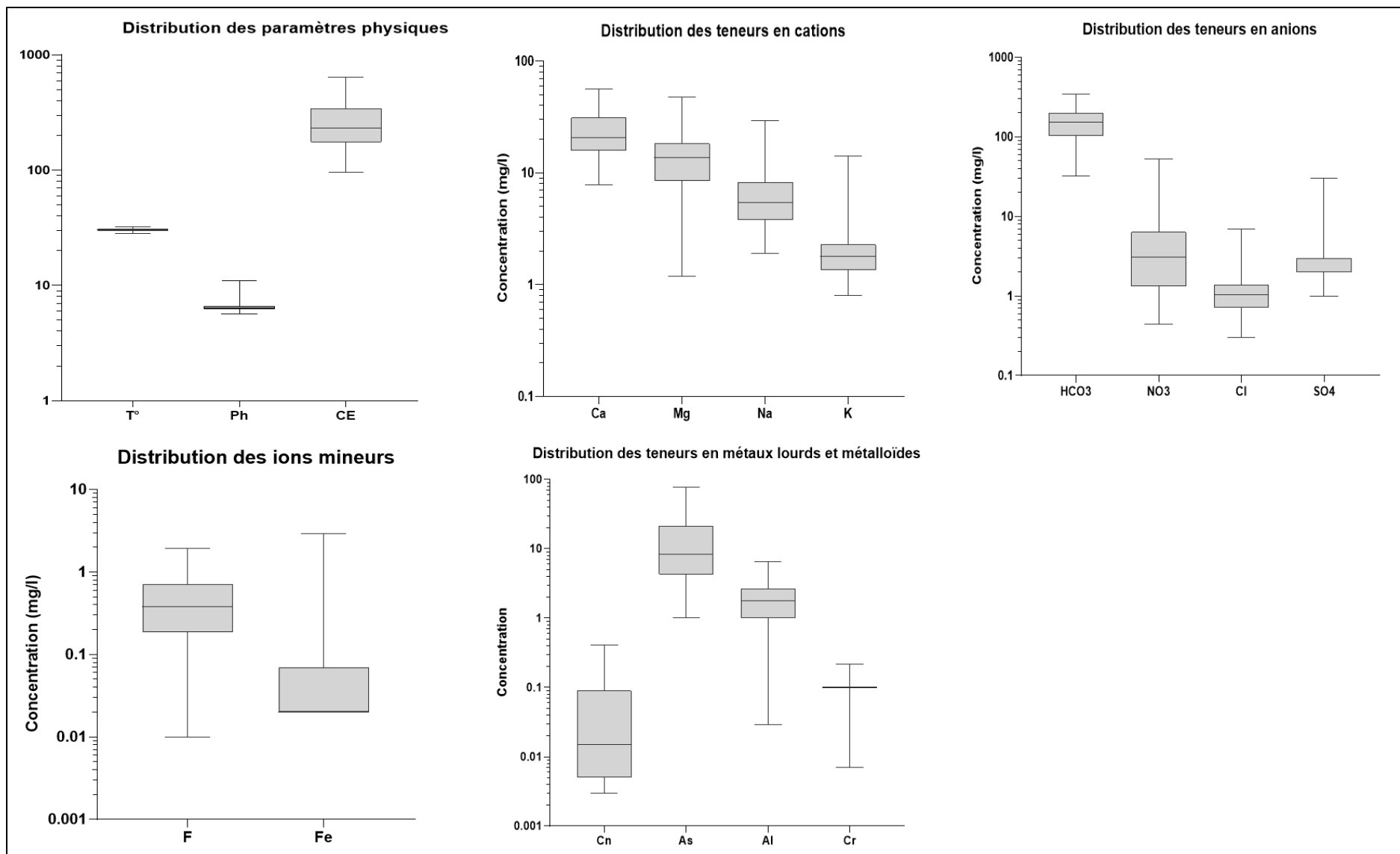


Figure 40 : Box plot de la distribution des paramètres physicochimiques

III.2.2.6 Corrélation entre les différentes variables physico-chimiques et chimiques

Le tableau 3 montre la matrice de corrélation entre les différents ions et paramètres physico-chimiques. Pour ce faire, 67 échantillons sont concernés par cet exercice. L'avantage de cette méthode est qu'elle diminue les informations en un nombre de éléments plus limité que le nombre initial de variables. Il s'agit donc d'une méthode à la fois énumération et véridique (représentation des variables dans un espace selon des directions d'inertie maximale).

Les liens significatifs qui existent entre les différents paramètres pris deux par deux sont donnés par la matrice de corrélation. Ces liens sont traduits par les différentes corrélations qui existent entre les variables étudiées. Il y a une corrélation modérée à forte entre HCO_3^- et Ca^{2+} ($R^2=0,61$), Mg^{2+} ($R^2=0,79$), Na^+ ($R^2=0,60$), K ($R^2=0,51$) et entre l'ammonium et le fer ($R^2=0,87$). C'est l'altération du silicate qui conduit à une augmentation des concentrations de cations et les bicarbonates. Lorsque les éléments solubles sont lavés, les parties insolubles restent sur place telle quelle ou se recombinaient avec les ions disponibles. L'eau d'infiltration est chargée de CO_2^- et cette eau riche en CO_2^- attaquera les minéraux aluminosilicates (plagioclase, biotite) des roches (Yameogo, 2008). Des composés intermédiaires mal cristallisés, des chaînes de silicate et les ions en solution se reclassent en minéraux de néoformation, particulièrement des argiles et peuvent intervenir à toutes les étapes de ce processus. Ils fournissent en particulier des minéraux ou organiques.

Les relations entre les teneurs en cations et HCO_3^- sont similaires à celles mises en évidence avec un même environnement de socle. On peut également noter une corrélation entre les cations et HCO_3^- en déduisant que l'altération des silicates n'est pas seulement influencée par ces ions. Cette observation confirme celle de l'ACP qui indique que le potassium et le sodium pourraient avoir une origine externe au système eau-roche, ce qui est la conséquence d'une forte pression anthropique. On peut noter que le processus dominant est la mise en solution se faisant à partir des minéraux calciques sous l'action du dioxyde de carbone dissous dans l'eau. La faille étant ouverte, le dioxyde de carbone biogénique se répand très facilement au niveau des piézomètres peu profonds au moment de la recharge. La relation est peu bonne pour le sodium et le potassium, mais meilleure pour le magnésium en raison d'un probable apport extérieur au système aquifère.

Les relations entre les concentrations en cations et de Cl^- montrent qu'il n'existe aucune corrélation entre ces paramètres (Ca^+) ($R^2 = 0,27$), (Na^+) ($R^2 = 0,29$), (Mg^{2+}) ($R^2 = 0,36$), (K^+) ($R^2 = 0,47$) ; hormis quelques échantillons isolés pour les concentrations de sodium et de

potassium. Il est à noter que les concentrations de sodium (Na^+) et de potassium (K^+) augmentent autant que celle du chlore (Cl^-) diminue, on peut penser que les teneurs en concentrations semblent indépendantes ou n'ont pas la même provenance dans le sous-bassin. Ce qui est normal, car il n'existe pas de minéraux riches en chlorure dans les roches de la zone d'étude. On ne rencontre des chlorures que dans l'apatite qui est en inclusion dans la biotite (Savadogo, 1984, 1975; Travi et Dia, 1986). Pour le magnésium on observe les eaux les moins minéralisées, ceci laisse penser qu'il existe des sources de pollution spécifiques dans l'environnement.

Pour les relations entre les teneurs en anions et Cl^- sont quasi inexistantes HCO_3^- ($R^2 = 0,40$), NO_3^- ($R^2 = 0,34$), SO_4^{2-} ($R^2 = 0,33$). Pour les ions bicarbonatés, la corrélation n'est pas bien marquée avec les chlorures ce qui semble confirmer que l'origine des chlorures dans l'eau n'est pas directement en relation avec l'altération des silicates. On remarque un regroupement dans la relation entre les nitrates et le chlorure. On constate que trois ouvrages où la concentration en nitrate est élevée se distinguent dans le village de Koumbogoro qui se situe dans la commune de Bieha et le village de Don dans la commune de Leo, pour lequel une origine commune anthropique (agriculture) est probable du fait que ces ouvrages se trouvent dans un champ agricole selon l'occupation des terres. Les valeurs du chlorure ne s'accompagnent pas de valeurs élevées en nitrates. Ces dernières disparités peuvent être par dénitrification, ou son absence dans la source de pollution. Pour la relation entre les ortho phosphates et les chlorures, deux tendances s'observent comme dans le cas de la relation sulfate et du chlorure. Les points extrêmes correspondraient à des sources polluantes domestiques par les nitrates ou par les engrais chimiques utilisés dans les champs.

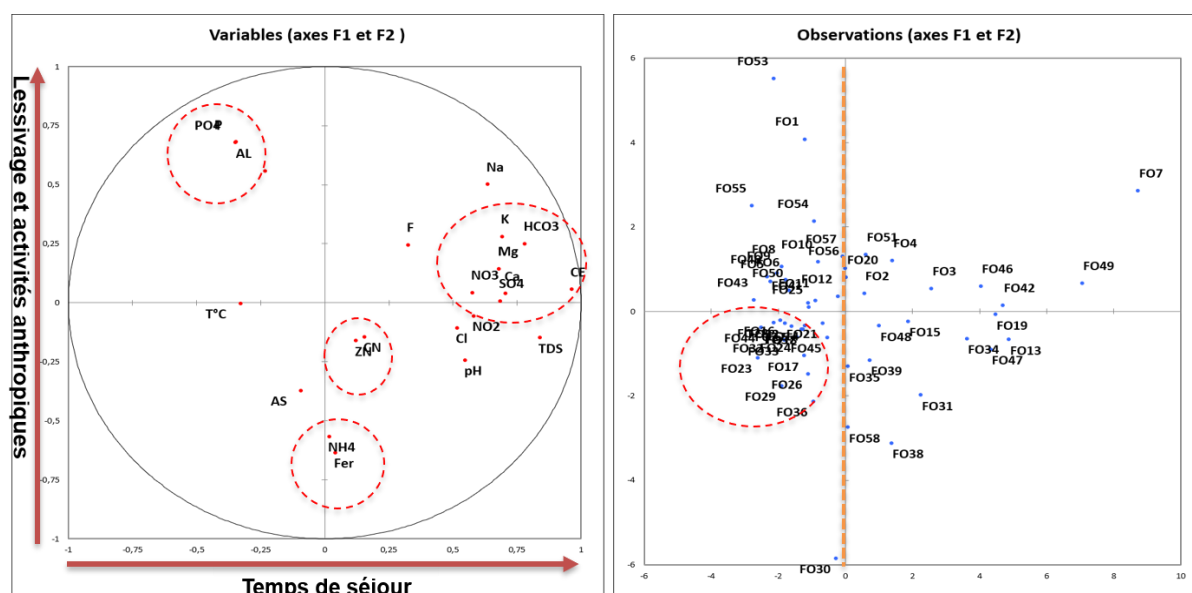
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	Am	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	P	F	Cn ⁻	Al	As	Cr	Pb	Zn	HCO ₃ ⁻	
Ca ²⁺	1,00																				
Mg ²⁺	0,26	1,00																			
Na ⁺	0,43	0,37	1,00																		
K ⁺	0,30	0,46	0,64	1,00																	
Fe ²⁺	0,02	-0,04	-0,19	-0,03	1,00																
Am	-0,01	-0,02	-0,14	0,00	0,87	1,00															
Cl ⁻	0,27	0,36	0,29	0,47	0,13	0,19	1,00														
SO ₄ ²⁻	0,59	0,26	0,40	0,41	-0,04	-0,04	0,33	1,00													
NO ₃ ⁻	0,08	0,47	0,35	0,62	0,16	0,07	0,34	0,26	1,00												
NO ₂ ⁻	0,17	0,42	0,39	0,50	0,03	-0,03	0,24	0,20	0,63	1,00											
PO ₄ ³⁻	-0,10	-0,14	0,02	-0,11	-0,14	-0,15	-0,28	-0,23	-0,25	-0,17	1,00										
P	-0,10	-0,14	0,02	-0,11	-0,14	-0,15	-0,28	-0,23	-0,25	-0,17	1,00	1,00									
F	0,28	0,13	0,43	0,13	-0,16	-0,19	-0,04	0,29	0,06	-0,05	0,02	0,02	1,00								
Cn ⁻	0,03	0,29	-0,25	-0,07	-0,05	-0,02	-0,12	0,09	0,13	0,33	-0,06	-0,06	-0,15	1,00							
Al	-0,15	-0,10	0,13	0,06	-0,18	-0,19	-0,16	-0,13	0,01	-0,02	0,37	0,37	0,04	-0,03	1,00						
As	-0,05	-0,28	-0,30	-0,21	0,04	-0,08	-0,12	0,10	-0,12	-0,05	-0,18	-0,18	0,15	0,02	-0,26	1,00					
Cr	0,01	-0,04	-0,13	0,10	0,51	0,25	-0,02	0,00	0,26	0,16	-0,09	-0,09	-0,03	-0,07	0,08	0,16	1,00				
Pb	0,10	0,17	0,22	-0,03	0,02	-0,07	0,00	-0,17	0,18	0,01	0,16	0,16	0,07	-0,10	0,41	-0,41	0,01	1,00			
Zn	0,15	0,15	-0,13	0,01	0,07	0,04	0,01	-0,07	0,33	0,07	-0,11	-0,11	-0,05	0,16	0,06	-0,13	-0,08	0,53	1,00		
HCO ₃ ⁻	0,61	0,79	0,60	0,52	-0,05	-0,01	0,40	0,44	0,33	0,31	-0,11	-0,11	0,25	0,08	-0,10	-0,32	-0,06	0,15	0,02	1,00	

Tableau 3: Matrice de corrélation des eaux souterraines

III.2.2.7 Caractérisation des eaux souterraines à partir de l'analyse en composantes principales

Afin d'établir les relations entre les différentes variables physico-chimiques et variables chimiques, une analyse multivariée est nécessaire. Le but recherché est de déterminer les relations entre les différentes variables et éventuellement de regrouper les échantillons qui montrent un type de variation similaire. Cette analyse fait suite à la matrice de corrélation entre les différentes variables. Pour la suite de l'étude statistique, l'analyse des composantes principales (ACP) sera réalisée avec le logiciel R. Pour pouvoir caractériser les prélèvements en vue de les comparés deux à deux, l'ensemble des variables n'ont pas été prise en compte. Les résultats de l'ACP du fait du nombre d'échantillons réduits (axe 1 : 28,88% et axe 2 : 12,35%) comme le montre la figure 41, qui donne une idée indicatrice d'une dispersion des sources de variabilité de la composition chimique des eaux. Elle montre que la qualité chimique des eaux provient de plusieurs processus ce qui entraîne une situation très complexe. Il semble que la minéralisation des eaux est influencée par rapport au temps de séjour avec le lessivage des roches et les réactions chimiques qui pourraient avoir lieu dans l'aquifère. Le tableau 4 donne les valeurs propres cumulées selon les dimensions et la contribution des différentes variables dans la définition des principaux facteurs. Chaque facteur est défini par un certain nombre de variables essentielles pour mettre en évidence le mécanisme de minéralisation et pollution de l'eau. Cependant, la matrice de corrélation vient en appui pour corroborer ces affirmations. L'abondance de bicarbonate dans les eaux de cet aquifère montre qu'il provient principalement de la dissolution des roches silicatées et ils fournissent des informations sur le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère (Lasm et al., 2011). Quatre groupes ont été distingués. L'axe 1 montre une corrélation positive de la conductivité avec les concentrations des ions HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , qui sont des indicateurs du milieu influencé par les eaux avec un long temps de dissolution après contact eau-roche. L'hydrolyse étant un processus lent, l'axe 1 rend compte des conditions d'acquisition dans lesquelles la chimie de l'eau est acquise (Ahoussi et al., 2012; Amadou et al., 2014; Eblin, 2014). L'ACP certifie l'activité d'une relation négative entre les compositions en contaminants (ions majeurs dans ce cas) et le pH, une très bonne corrélation entre les Ca^{2+} et le HCO_3^- . L'axe 2 montre une corrélation entre NH_4^+ , Fe^{2+} , Al , PO_4^{3-} , P , et traduit un échange venant du sol qui indiquerait une forte contribution des activités anthropiques. Une corrélation est moins positive entre ce groupe d'éléments chimiques du groupe Zn , As , NO_3^- , T . En effet, dans ce groupement, l'association de ces ions correspond

au pôle anthropique de la minéralisation de l'eau. L'ACP a montré que deux autres phénomènes participent à la minéralisation des eaux de la zone d'étude (Gnamba et al., 2019). Ceux-ci sont le lessivage des sols et l'intervention des activités anthropiques. L'ACP appliquée aux échantillons de forages montre que deux axes factoriels se dégagent. D'une part, on a des corrélations positives qui traduit l'origine naturelle liée à la pétrographie de la formation géologique (les silicates et leurs produits d'altérations). Et d'autre part des corrélations négatives, qui définit que l'origine anthropique de la minéralisation est liée à la pollution diffuse agricole. En projetant les points dans l'espace des variables, on peut dire que les forages qui s'écartent du nuage influencé par les apports externes suivant les valeurs négatives de la F2 sont pollués. La limite qui sépare les eaux polluées de celles non polluées est représentée par la verticale en tireté. Ce qui montre que les sources minérales sont les mêmes et les sources de pollutions qui affectent les forages commencent à affecter d'abord les eaux de la nappe superficielle captée par les puits. L'analyse en composante principale est donc une méthode pertinente.



**Figure 41 : Analyse en composantes principales des données physico-chimiques
Projection du nuage de points dans l'espace**

Tableau 4: Contributions des variables basées sur les corrélations

	T°	PH	Ce	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Axe1	0.280	0.486	0.944	0.652	0.702	0.677	0.754	0.024	0.017	0.542	0.666
Axe2	0.131	0.118	0.041	0.104	0.077	0.428	0.145	0.654	0.633	0.222	0.026

	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Po ₄ ⁻	P	F	Al	As	Zn	HCO ₃ ⁻
Axe1	0.629	0.579	0.338	0.338	0.310	0.186	0.161	0.130	0.798
Axe2	0.152	0.024	0.719	0.719	0.340	0.543	0.228	0.182	0.197

	Eigen value	Proportion	Cumulative
Axe 1	6.58296	9.68082	9.68082
Axe 2	3.71340	5.46088	15.14169
Axe 3	3.07695	4.52492	19.66662

III.2.2.8 Faciès chimiques des eaux souterraines

Afin de caractériser les hydrofaciès des eaux souterraines, une approche sera utilisée via le logiciel DIAGRAMME. Le diagramme de Piper présenté par la figure 42, concerne tous les 67 échantillons d'eau de forage et leur prédominance. Mais l'approche permet de distinguer d'autres hydrofaciès. Les hydrofaciès en grande majorité sont de types bicarbonatés calciques (que l'on retrouve dans les alluvions, la base des cuirasses, granodiorites) et magnésiens (formation basique, amphibole). Les eaux bicarbonatées calciques se retrouvent dans les forages se situant dans la Sissili (Kada, Guiaro, Danfouna, Nebou) au niveau des alluvions, cuirasses et surtout les altérites de migmatites gneissiques ou gneiss, roche verte et granodiorites. Les eaux bicarbonatées magnésiennes appartiennent aux forages se situant à Dialo, Saro qui sont des eaux issues des formations basiques (amphiboles, dolérites et gneiss). On remarque que la majorité des échantillons sont situés dans le triangle des cations où l'on peut noter que des forages éparpillés traduisent une dominance du pôle calcique. On peut remarquer aussi dans le triangle des anions qu'il n'y a pas dominance ; il se présente un début d'évolution depuis le pôle bicarbonaté vers le pôle chlorures nitrates traduisant une certaine atteinte anthropique. C'est particulièrement le cas pour certains forages avec des normes supérieures à la recommandation au Burkina dans la commune de Sissili, au niveau des forages de Koumbogoro et Bon. La majorité des eaux bicarbonatées appartiennent à la couche de fissures. L'étude menée dans un même contexte de socle rapporte des concentrations de nitrates dans les puisards et les puits dans la zone de Ouagadougou. Cette concentration pourrait découler de l'insuffisance de l'assainissement, mais dans notre cas, il pourrait être lié à l'agriculture. Dans le triangle de cations, on remarque que certaines eaux sont proches du pôle calcique tandis que certaines se démarquent clairement vers le pôle sodique. Les forages de faible profondeur se remarquent par leur faible concentration en Na⁺ et K (présents dans les

altérites argileuses). Dans cette étude, il était intéressant de voir l'évolution temporelle des ions, mais hélas ce n'était pas possible, car il n'y avait pas de suivi mensuel au niveau des échantillons. De nombreux auteurs qui ont étudié l'hydrochimie en Afrique de l'Ouest en zone de socle ont conclu que le faciès bicarbonaté calcique est le plus abondant dans les eaux souterraines. Cette prédominance du bicarbonate peut être justifiée par la teneur en bicarbonate enregistrée dans les eaux de cet aquifère.

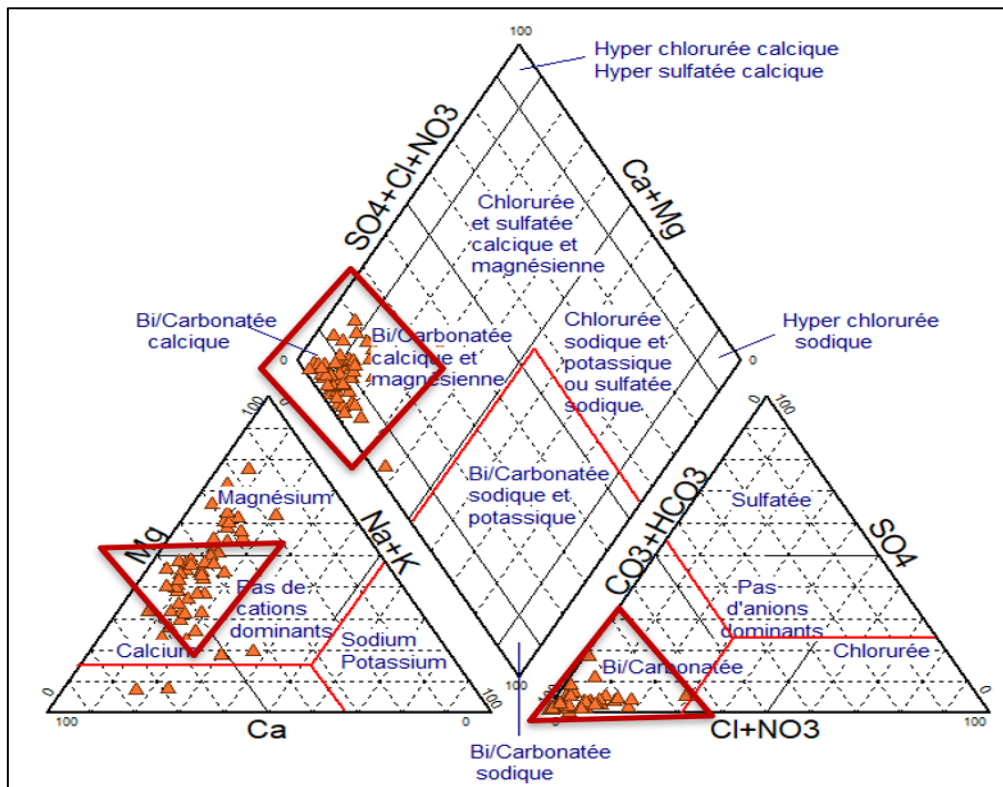


Figure 42 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du sous bassin de la Sissili

III.2.2.9 Agressivité des eaux souterraines

On observe qu'à partir du contenu des principaux éléments chimiques, il est possible de savoir l'état d'équilibre des eaux vis-à-vis des minéraux. Cela rend possible la connaissance de certaines propriétés et comportements des eaux, en particulier, le caractère corrosif ou détartrant.

III.2.2.9.1 Indice Ryznard

Il permet de définir une tendance agressive (corrosive) de l'eau comme le montre le tableau 5. La tendance donne des eaux agressives et hautement corrosives pour l'ensemble du bassin sauf dans le cas du forage Yaké dans la commune de To qui a une eau incrustante et va entraîner un dépôt de carbonate de calcium. Dans d'autres travaux, les auteurs ont montré que l'eau est

agressive dans une roche acide (granites, migmatite, quartzite, grès, gneiss et schiste), mais lorsque la roche est basique avec un pH supérieur à 7 l'eau n'est pas agressive (basalte, dolérite). Par conséquent, cela dépendra de la teneur en acide carbonique, du pH et l'indice Ryznard qui peuvent jouer un rôle décisif dans l'équilibre ionique. Cela reflète dans ce sous-bassin que l'agressivité est liée au faciès géologique. La corrosion de l'eau dépend de sa concentration en ions. Cela est clairement visible dans la zone de Koudougou où on note une couleur rougeâtre des eaux, ce qui a conduit les populations à abandonner les forages. Les études menées par Kouanda et al., (2018); Sauret, (2005) dans le bassin du Mouhoun dans un cadre sédimentaire ont également montré ce fait. Les relations de ses ordres de grandeurs vont dépendre des relations obtenues.

Tableau 5: Indices des paramètres statistiques de Ryznard (RSI)

	<i>Ryznard</i>	<i>pH</i>
Moyenne	9,28	6,351
Médiane	9,285	6,355
Écart-type	0,867	0,295
Minimum	7,09	5,69
Maximum	11,87	7,09

III.2.2.9.2 Indices de saturation des eaux souterraines (IS)

L'analyse du tableau 6 montre une sous saturation des eaux souterraines par rapport aux calcites, aragonites, gypses, et anhydrites. Des concentrations relativement élevées de la calcite et l'interaction étendue eau-roche dans les forages ont tendance à augmenter les valeurs du pH, avec des indices de saturation de la calcite approchant l'équilibre. Cette association accrue entre le pH et la saturation en calcite peut conduire à une déprotonation des surfaces minérales de l'aquifère (Sako et al., 2016). En revanche, le gypse et l'anhydrite présentent un état d'équilibre favorable à la dissolution dans l'eau. On note une dominance du Ca^{2+} par rapport au SO_4^- , sur tous les échantillons, ce qui peut indiquer que la dissolution des gypses et anhydrite est un processus évidemment secondaire et que d'autres réactions ont eu lieu et ont contribué à la production significative d'ions Ca^{2+} par rapport au SO_4^- dans les différents aquifères. Ce fait est monté par la prédominance du faciès bicarbonaté calcique et magnésienne. Pour la dolomite, calcites on note une domination d'échantillons à l'état de sursaturation, état d'équilibre vis-à-vis des minéraux carbonatés ($-1 < \text{IS} < 1$) est aussi observé pour certains échantillons. Ces résultats sont similaires à ceux de beaucoup d'auteurs dans un environnement de socle, qui ont

conclu que l'IS ne permet pas de comprendre le mécanisme géochimique de la déminéralisation. Car généralement, on n'observe aucunes précipitations de minéraux carbonatés (calcite) dans les roches du socle granitique. Il est clair que la mise en solution des minéraux d'aluminosilicates de calcique sous l'action de dioxyde de carbone dissous dans l'eau est le processus dominant dans l'acquisition et l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines.

Tableau 6: Paramètres statistiques des indices de saturation (IS)

	Is Calcite	pHs calcite	Is Aragonite	pHs aragonite	Is Dolomite	pHs dolomite	Is Gypse	Is Anhydrite
Moyenne	-1,46	7,81	-1,60	7,95	-2,77	7,74	-3,41	-3,61
Médiane	-1,46	7,78	-1,60	7,92	-2,74	7,69	-3,57	-3,76
Écart-type	0,54	0,35	0,54	0,35	1,14	0,39	0,43	0,43
Minimum	-3	7,09	-3,14	7,23	-6,28	7	-3,97	-4,16
Maximum	0	8,87	-0,14	9,01	0,09	9,01	-2,11	-2,31

III.3 CONCLUSION PARTIELLE

Les différentes études antérieures avaient mis en évidence la pollution au niveau du sous-bassin de la Sissili. Mais de nos jours, cette pollution des eaux souterraines a augmenté et les risques sanitaires sont alors prévisibles et aussi l'abandon de certains points d'eau par la population. L'indice de saturation et l'analyse factorielle ont permis de mieux comprendre la qualité de l'eau dans cette région du Burkina Faso. La moyenne des valeurs des eaux souterraines indique un pH généralement acide. Les valeurs de la conductivité électrique suggèrent une forte minéralisation et se traduisent par une indépendance des poches d'eau. Cette minéralisation et cette conductivité sont en parfait accord avec le mode de gisement. Ce gisement définit comme la présentation et l'organisation générale des roches du sous bassin. En effet, dans les régions couvertes de cuirasse latéritique la nappe de la cuirasse est séparée de la nappe de la roche fissurée. On note également que les éléments de cations et anions augmentent en fonction de la profondeur des ouvrages. De plus, le calcium et le magnésium varient d'un forage à l'autre, ce qui est l'inverse pour le chlore et le sodium. Les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux et dominant les autres anions. La grande majorité des eaux souterraines est de faciès bicarbonaté de calcique et magnésique. Ses eaux sont également agressives, très corrosives pour l'ensemble du bassin à l'exception du forage de Yaké situé dans la commune de To. Elles sont également saturées en calcites. Les méthodes d'analyse multivariée ont montré que la minéralisation est régie par le lessivage des sols, les activités anthropiques.

**CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ET DE LA GEOMETRIE DU SYSTÈME
AQUIFERE - INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES**

CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ET DE LA GEOMETRIE DU SYSTEME AQUIFERE - INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES

Si l'importance de la fracturation n'est plus à démontrer, le problème de localisation des failles n'est point résolu. Au début des années 1970, de nombreux travaux avaient pour but l'étude de la tectonique afin de cartographier le réseau de fractures pour une meilleure connaissance de la géométrie aquifère de socle (Savadogo, 1975). Ainsi, la structure géométrique définit l'aquifère comme un espace fini indispensable pour une compréhension hydrogéologique en vue d'une modélisation du système (Koïta et al., 2010). Mais la complexité relève de sa structure géométrique qui est mal connue jusqu'à ce jour. Le sous-bassin de la Sissili fait partie de ces zones où les eaux souterraines se localisent le plus souvent dans les altérites et empruntent les couloirs privilégiés qui sont les fractures (Savadogo, 1975; Courtois et al., 2010; Lachassagne et al., 2011; Sako et al., 2016). Le chapitre précédent décrit un degré de pollution et de contamination des eaux souterraines. Cependant, pour remédier à ce problème et atteindre l'objectif de la thèse à travers une modélisation du transfert de polluant, des campagnes géophysiques ont été réalisées dans le sous-bassin de la Sissili pour voir quelle est la meilleure approche pour déterminer la géométrie de l'aquifère tout en regardant son action sur les propriétés hydrodynamiques pour les intégrer ou pas dans un modèle d'écoulement. Pour ce faire on adopte la télédétection par les images satellitaires que beaucoup d'auteurs préconisent Youan Ta et al., (2014); Yalo et al., (2019) et la géophysique 1D et 2D (qui permet d'observer les variations verticales et latérales) (Soro, 2017; Akokponhoué et al., 2017; Alle, 2019). Ce chapitre vise donc à améliorer la connaissance des aquifères de socle à travers une cartographie structurale et cela permettra de repérer les fractures auxquelles sont liées les poches d'eau souterraine pour une simulation de la contamination.

IV.1 MATERIELS ET METHODES

IV.1.1 DONNEES ET MATERIELS

Les prises de vues du sol par les satellites permettent une analyse ponctuelle et évolutive de l'environnement (climat, sol, végétation...). Du fait de l'échelle d'analyse très petite et de la résolution spatiale et spectrale assez bonne, les données satellitaires sont un outil de choix qu'on utilise pour la cartographie linéamentaire. Dans la suite de ces travaux, ses résultats seront couplés aux données hydrodynamiques en vue de donner des explications sur le taux d'échec, et pour finir sans suivra une modélisation numérique et de transfert à travers ces couloirs

préférentiels. Les auteurs comme Yalo et al. (2019) ; Youan Ta et al. (2011) ; Li et al. (2013) ; Adiri et al. (2017) ; Sombo et al. (2019) préconisent l'utilisation de l'imagerie satellitaire particulièrement celle des images Landsat, les fonds de cartes (topographiques et géologiques) et les données de terrain (géophysique, mesures structurales) pour une bonne étude des ressources en eaux en zone de socle. Les images satellitaires ont des coordonnées des scènes 195-052 et 195-053 et sont acquises en février 2014 et apparaissent en général claires, du fait que cette période de l'année correspond à la saison sèche. Les scènes des images satellitaires Landsat 8 sont composées de 11 bandes (1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; 9 ; 10 et 11). Les bandes 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 7 ; 9 ont des pixels carrés de 30 m de côté. Les bandes thermiques 10 ; 11 sont constituées de pixels carrés de 60 m de côté. Et enfin, la bande panchromatique 8 qui possède des pixels carrés de 15 m de côté. Les caractéristiques de ses bandes sont mentionnées dans le tableau 7. En effet, ces bandes sont utilisées en raison de leurs caractéristiques spatiales et spectrales très riche qui conviennent parfaitement à la cartographie litho structurale (Youan Ta, 2008). Divers outils ont été utilisés pour les missions de terrain, il s'agit d'un GPS, d'un décimètre, d'une boussole, d'un appareil de photo, et un Pick up. Cela a permis d'assembler des indications sur les affleurements notamment les mesures structurales : longueurs, ouvertures, espacements et directions des fractures. Les données de forages prises dans cette étude sont issues de la base de données nationale du Burkina Faso INOH et BEWACO. Ces forages ont été réalisés entre 1957 à 2011 par des programmes d'hydraulique villageoise. Dans le sous-bassin de la Sissili, 146 forages dont les informations (l'épaisseur d'altération, nature de la formation, la profondeur de foration des forages, etc.) ont été utilisés. Dans beaucoup de cas, ses informations sont souvent manquantes. Afin d'approfondir les données, on délimitera aux forages où l'on a les données complètes. Divers logiciels ont été utilisés pour le traitement des données. Il s'agit : d'ArcGis pour la compilation des données, d'Envi5.0 pour le prétraitement et le traitement des images satellitaires, Arcmap 10.3, Arcview 3.2 et Géomatica pour l'extraction des linéaments issus du traitement des images et enfin Rockwork pour la détermination des directions.

Tableau 7: Description des bandes Landsat 8

Bande	Description
2	Cartographie bathymétrique, distinguant les sols de la végétation et des feuilles de la végétation résineuse
3	Souligne la végétation de pointe, ce qui est utile pour évaluer la vigueur de la plante
4	Différencie la teneur en humidité du sol et de la végétation, la pénétration
5	Infrarouge- met l'accent sur le contenu de la biomasse et les rives Stress de la végétation induits par les phénomènes géologiques, détection d'oxyde de fer
6	Infrarouge moyen- distinguer la teneur en humidité du sol et de la végétation- Indicateur sur la teneur cartographie en eau des sols et de la végétation des argiles, indicateur secondaire des altérations hydrothermales
7	Infrarouge lointain- teneur en eau impropre du sol et de la végétation et pénétration des nuages minces- Discrimination de certaines roches, telles que l'argile et les micas dans les niveaux silicatés, la kaolinite et la montmorillonite dans les sols
8	(Panchromatique- définition d'image nette)
10-11	Infrarouge thermique- cartographie thermique et humidité estimée du sol cartographie thermique améliorée et estimation de l'humidité du sol- Discrimination des roches silicatées et non silicatées, contenu en eau des sols, analyse des stress de la végétation

IV.1.2 METHODOLOGIE

IV.1.2.1 Méthodologie pour le traitement des données de la télédétection

Les travaux antérieurs dans le sous-bassin versant de la Sissili situé en milieu de socle ont montré l'existence de fracture d'origine tectonique. Mais hélas, on constate un taux élevé de forage négatifs et non productifs. Dans cette étude, on se propose d'identifier les couloirs préférentiels de circulation des eaux souterraines. Cela permettra de caractériser l'aquifère en vue d'une modélisation de transport de contaminant. Notre zone d'étude est à cheval sur 13 différentes communes réparties dans 3 provinces. Dans un premier temps, nous regrouperons les quadrants des différentes scènes pour les lier en une seule image. Par la suite, des points de calage ont été définis pour juxtaposer ces derniers en une seule base de données regroupent les huit bandes. La bande panchromatique qui possède des pixels carrés de 15 m de côté ont été rééchantillonnés à 30 m. La discrimination des linéaments a été possible grâce à différentes opérations de traitement numérique. Delay et al., (1992) indique que cette approche est difficile à mettre en œuvre dans les zones de socle granitique s'il s'agit de validation des linéaments par observation de terrain comme l'a fait Chandra et al. (2006) en Inde. C'est pourquoi il est adapté le choix de levé visuel et manuel plutôt que de recourir à une procédure automatique. Sans

oublier que la cartographie des fractures par traitement d'images satellitaires est source d'erreurs Yang, (2007).

IV.1.2.1.1 Technique de l'analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une technique de rehaussement qui consiste à développer le signal-image sur la base de fonctions orthogonales entre elles. Cela tend à la recherche de la plus grande variance des bands Landsat suivant les trois axes (Youan Ta, 2008). La première composante est calculée dans la direction de l'espace suivant laquelle la variance est maximale. La seconde obéit à la même règle dans l'espace restant et ainsi de suite. Cette transformation génère des nouvelles images, composantes ou axes, qui sont en combinaison linéaire avec les images originales. Dans le cadre de cette étude, vue aucune règle de décision n'est définit, on se propose de garder les composantes souhaitées en fonction de critères propres à cette étude. Cependant, suivant les limites de l'ACPS, plusieurs auteurs préconisent deux méthodologies.

La première méthode consiste à réaliser une première ACP, il est retenu les 3 premières composantes avec les bands OLI 2,3,4 pour réaliser l'ACP1. Les 3 composantes obtenus sont $ACP_{1,2,3,4}$, $ACP_{2,2,3,4}$, $ACP_{3,2,3,4}$ (Jourda, 2005). Une deuxième ACP (ACP2) sera réalisée avec les bands infrarouges. On obtiendra également 3 composantes $ACP_{1,6,10,7}$, $ACP_{2,6,10,7}$, $ACP_{3,6,10,7}$. Une série de composition sera réalisée en utilisant les différentes composantes des deux ACP accompagnées parfois des rapports de bandes.

La deuxième méthode consiste à réaliser des composantes principales avec deux bandes. Il s'agira de mettre en évidence le contraste entre les différentes parties du spectre électromagnétique de sorte à avoir les informations différentes plutôt que celles qui sont communes à chaque bande. L'utilisation de deux bandes renvoie à la cartographie des informations dans la première composante. Dans ce cas les informations spécifiques dans chaque bande seront regroupées dans la deuxième composante. Les compositions suivantes ont été réalisées : OLI 2 et OLI 3 ; OLI 3 et OLI 7 ; OLI 5 et OLI 7 ; OLI 6 et OLI 7 ; OLI 6 et OLI 8 et OLI 8 et OLI 7.

IV.1.2.1.2 Rapport des bandes

La méthode des rapports de bandes est fondée sur la notion de réflectance, qui est le rapport, mesuré par un radiomètre, entre la quantité de radiations réfléchies par un matériau et la quantité d'énergie qu'il reçoit pour une longueur d'onde donnée (Yao, 2009). C'est une technique d'amélioration des images reposantes sur des éléments de calculs appliquées aux différentes

bandes de l'image satellitaire. Dans notre cas, pour obtenir un meilleur contraste, trois liaisons de bandes sont utilisées pour obtenir une image. Pour ce faire, les rapports (OLI 5/ OLI 6 ; OLI 5/ OLI 4 ; OLI 7/ OLI 4; OLI 6/ OLI 5) ont été utilisés. L'indice de la végétation normalisé est mise en évidence par la méthode ARSIS décrite par Vicinanza et al., (2014) qui a été calculé dans sa forme la plus utilisée (équation (10)) :

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (10)$$

Cet indice, d'après Savadogo (1984), est très efficace. L'identification d'une importante biomasse végétale, allongée suivant une direction donnée en saison sèche pourrait indiquer la présence de fractures souterraines ouvertes et humides. Par ailleurs, des études ont montré que la végétation est souvent influencée par la minéralisation, la lithologie et la fracturation de la masse rocheuse.

IV.1.2.1.3 Composition colorée

La technique des compositions colorées augmente le contraste dans l'image en produisant de nouvelles images multichromes à partir de trois images monochromes. La technique rouge, vert et bleu (RVB) ou la transformation RVB a été utilisée. Tous les contrastes sont donc une combinaison singulière des trois couleurs primaires, le contraste blanc étant l'augmentation des trois couleurs originelles à accentuation optimale. Ce procédé est appelé synthèse trichromique additive. Dans le cadre de cette étude, les compositions colorées sont réalisées à partir des bandes OLI 5-6-7, et des ACPS de l'image Landsat. Soit respectivement les bandes du proche infrarouge (PIR), du moyen infrarouge (MIR) et infrarouge lointain (LIR). Elles ont permis d'optimiser l'analyse visuelle et d'adapter les variations de tonalités au système visuel humain.

IV.1.2.1.3 Application des filtres Sobel

Les filtres spatiaux évoquent un autre procédé de traitement numérique utilisée pour le rehaussement d'une image. Plusieurs types de filtres existent et la méthode de filtrage consiste à déplacer une matrice d'une dimension de quelques pixels au-dessus de chaque pixel de l'image. On emploie les valeurs des pixels sous la fenêtre et on échange la valeur du pixel central par le résultat obtenu. La fenêtre est déplacée le long des lignes de l'image en répétant le calcul, pour chaque pixel devenu le pixel central, jusqu'à ce que l'image entière soit filtrée. Ce procédé est alors appelé " filtrage par fenêtre mobile". L'application sur ACP des filtres Sobel suivant les quatre directions a permis un rehaussement des linéaments associés aux mégastructures et aux grands couloirs de cisaillements tout en faisant une analyse visuelle afin d'éliminer toute

sorte de fausses présentations qui coïncident avec les pistes, les routes, le réseau hydrographiques etc... (Kouakou et al., 2014; Lghoul et al., 2012; Youan Ta et al., 2008). Les filtres Sobel ont permis d'identifier quelques linéaments. En effet, ils mettent en évidence les caractéristiques des images qui résultent de la texture. Dans la pratique, les filtres de Sobel 7×7 (affectés du poids 6) dans les directions N-S ; E-O, NE-SO et NO-SE ont été utilisés dans le cadre de cette étude comme le montre la figure 43. Ces filtres ont été appliqués sur les images OLI 6, OLI 7, OLI 3, OLI 4/OLI 5, OLI 6 / OLI 5 et sur les ACPS. Le choix de ses directions se justifie par exemple la direction E-O permet de ressortir les linéaments N-S et l'image filtrée présente un effet d'ombrage avec la partie Est éclairée, indiquant la provenance de la source de rayonnement.

1	2	3	4	3	2	1	1	2	3	0	-3	-2	-1
2	3	4	5	4	3	2	2	3	4	0	-4	-3	-2
3	4	5	6	5	4	3	3	4	5	0	-5	-4	-3
0	0	0	0	0	0	0	4	5	6	0	-6	-5	-4
-6	-4	-5	-6	-5	-4	-3	3	4	5	0	-5	-4	-3
-2	-3	-4	-5	-4	-3	-2	2	3	4	0	-4	-3	-2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	1	2	3	0	-3	-2	-1
a) Filtre Sobel de direction N-S							b) Filtre Sobel de direction E-O						
0	1	2	2	3	3	4	4	3	3	2	2	1	0
-1	0	3	4	4	5	3	3	5	4	4	3	0	-1
-2	-3	0	5	6	4	3	3	4	6	5	0	-3	-2
-2	-4	-5	0	5	4	2	2	4	5	0	-5	-4	-2
-3	-4	-6	-5	0	3	2	2	3	0	-5	-6	-4	-3
-3	-5	-4	-4	-3	0	1	1	0	-3	-4	-4	-5	-3
-4	-3	-3	-2	-2	-1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4
c) Filtre Sobel de direction NE-SO							d) Filtre Sobel de direction NO-SE						

Figure 43: Filtres directionnels de SOBEL 7x7 a) N-S ; b) E-0 ; c) NE-SO et d) : NO-SE

IV.1.2.1.4 Extraction manuelle des linéaments par examen visible et leurs validations

Un linéament est une discontinuité imagée. Il peut se confondre à une structure linéaire artificielle. Avant l'extraction, le réseau routier et hydrographique sont vectorisés à partir de plusieurs cartes administratives. Ensuite, ces différents éléments linéaires d'origine anthropique sont superposés aux différentes images traitées de manière à éviter de les prendre en compte lors de l'extraction des linéaments. Il est conseillé de l'appliquer sur la composition colorée pour voir la variation du ton gris. Par la suite on procède aux levés manuels. Cela consiste à symboliser par une section de droite les discontinuités images et les changements brusques de tonalité observés sur les images traitées. Youan Ta et al., (2008) préconise une longueur de 240

m pour les levés. D'après l'auteur, une structure linéaire n'est cartographiée comme étant un linéament que si elle s'étend sur au moins 8 pixels connectés. Alors que Yao, (2009) recommande une longueur supérieure ou égale 9 km comme linéaments majeurs soit 300 pixels et une longueur supérieur à 480 m pour les linéaments de petite taille. Cette distance a été jugée suffisamment longue pour désigner la plus petite fracture susceptible d'être cartographier sur l'image satellitaire. Les linéaments ainsi observés peuvent être des fractures fermées ou ouvertes ; des failles subverticales ou inverses ; des filons généralement associés à des fractures ; des contacts géologiques ; la foliation des roches métamorphiques d'autant plus que les fractures empruntent les plans de foliation. La carte linéamentaire obtenue constituera un support numérique très important en hydrogéologie des milieux fissurés. Donc sa validation doit être établie avec la plus grande rigueur possible. Les linéaments identifiés à partir des images de Landsat ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle permettant de faire ressortir les directions principales par la rosace directionnelle. Pour la validation, la littérature a montré plusieurs types de validation.

Dans le cadre de cette étude, différentes méthodes de validation ont été utilisées. Il s'agit dans un premier temps de superposer la carte des images satellitaires qui a fait l'objet d'une analyse fréquentielle à celles des travaux antérieurs réalisés dans le sous-bassin de la Sissili (Savadogo, 1984). Cette validation consiste à attribuer par une superposition l'ensemble des linéaments des images satellitaires Landsat aux valeurs de la fracturation déjà validées par les études antérieures par la photographie aérienne par les travaux de (Savadogo 1975, 1984). Mais aussi elle peut être basée sur la comparaison des directions des grandes familles de linéaments avec les directions de fracturation relevées sur carte géologique. Selon Nakolendousse et al., (2009) l'observation sur différents supports, à différentes échelles et par différents photo-interprètes, des linéaments peut être considérée comme des fractures effectives sur le terrain. Adiaffi, (2008) a utilisé cette technique dans sa zone d'étude et a ainsi eu une corrélation par comparaison. Cet exercice a permis de valider certains des linéaments issus de la photo aérienne, et heureusement la plupart des linéaments.

Par la suite, en second lieu de la validation, la méthodologie renvoie à la géophysique par la méthode électrique : traîné électrique et sondage électrique, méthode 1D (Soro, 2017) et/ou la tomographie de résistivité électrique méthode 2D (Akokponhoué et al. 2017).

Et enfin, la troisième méthode de validation renvoie à la superposition des forages positifs déjà réalisés dans la zone d'étude sur la carte de linéaments (Akokponhoué et al. 2019). Ici, il s'agit de faire une analyse comparative des résultats de prospection électrique aux logs de forage. Cette analyse s'est faite en regroupant les mesures de prospections en familles de formations

géologiques rencontrées dans la zone d'étude. Cela a permis de voir les différentes observations en hydrogéologie : le type et la forme des anomalies, les types de sondage électrique, l'épaisseur d'altération. La densité de fracturation exprimée en nombre par mailles a été étudiée et sa distribution spatiale analysée à travers les différentes formations lithologiques.

IV.1.2.2 Méthodes géophysique utilisée pour la caractérisation des aquifères de socle

Les méthodes géophysiques permettront de déterminer et définir la structure et la géométrie de l'aquifère. Elles identifient aussi les éventuelles failles et les zones d'interconnexions qui constituent les couloirs privilégiés de circulation des eaux souterraines. Enfin, elles définissent les caractéristiques hydrodynamiques. Les méthodes de sismiques réfractions ont longtemps été appliquées (Koussoube et al., 2000). Mais cette méthode s'est avérée inopérante dans la zone du fait que la vitesse de propagation dans la cuirasse est supérieure à celle des altérites. Cela explique le choix de la méthode électrique dans le cadre de la présente étude. Les méthodes électriques se reposent sur la mesure de la résistivité électrique du sous-sol (inverse de la conductivité électrique). Elles consistent à injecter un courant électrique dans le sous-sol moyennant des électrodes de courant et à mesurer la différence du potentiel électrique entre d'autres électrodes dites de potentiel. La prospection électrique implique donc la détection des effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Le succès des méthodes électriques, en matière d'étude des sites où l'on observe une contamination des eaux souterraines, est dû au fait que la conductivité électrique des roches ou des formations géologiques est principalement liée à leur teneur en eau et à la minéralisation de cette dernière. Ainsi la valeur de la résistivité électrique permettra de comparer deux ou plusieurs formations et de les localiser les unes par rapport aux autres, et par étalonnage avec la connaissance géologique, on peut souvent définir lithologiquement ou stratigraphiquement les formations mises en évidence. En pratique, la résistivité du sol ne peut être mesurée immédiatement. Elle découle de la mesure de la différence de potentiel entre deux électrodes. Dans la littérature, les électrodes d'injection de courant sont couramment nommées par les couples de lettres. Ainsi, les couples (A, B) sont utilisés pour désigner les électrodes d'injection de courant et les couples (M, N) pour désigner les électrodes de mesure du potentiel. Les mesures sont généralement faites en courant continu, éventuellement à basse fréquence. Les différentes méthodes électriques appliquées dans cette étude sont : le traîné électrique, le sondage électrique, et la tomographie de résistivité électrique.

De nos jours, bien que le sous-bassin apparaisse très fracturé d'après les études antérieures, il est constaté un taux de forages négatifs de 30 %, avec 40,77 % forages où on note un débit inférieur

à 2,5 m³/h. Vu ce constat on se propose de voir dans un premier temps si la méthodologie utilisée dans les études antérieures, présentait-elle certaines limites à la corrélation des linéaments au couloir de circulation préférentiel des eaux dans le contexte géologique. Et ainsi mettent-elles en relation l'épaisseur et la nature de l'altération dans le but de déterminer la géométrie. Et dans un second temps voir quelle est la meilleure approche pour déterminer la géométrie de l'aquifère tout en regardant son action sur les propriétés hydrodynamiques pour les intégrer ou pas dans un modèle d'écoulement. Pour ce faire il sera réalisé des traînés dont l'objectif indique une variation de résistivité apparente pour une profondeur d'investigation donnée pour appréhender la variation de la profondeur. Il est démontré qu'il n'établit pas efficacement l'épaisseur de l'aquifère d'altération. Par la suite en complément, il sera établi des sondages dont le but est de définir la classification verticale des résistivités apparentes. De ce fait, par une recherche en profondeur, le courant parcourt les différentes formations pour en déterminer les épaisseurs du terrain. Il montre une distribution qui vient amender l'interprétation des traînés et TRE en montrant un modèle géoélectrique vérifié sur la base de la composition des différentes couches. Et en fin la tomographie de résistivité électrique qui permet d'observer les variations verticales et latérales, et émet les variations spatiales de la lithologie.

Ainsi, la recherche géophysique exposera distinctement la géométrie de l'aquifère en zone profonde et avec une validation de la carte des linéaments.

IV.1.2.2.1 Traîné électrique

Principe, dispositif de mesure et mise en œuvre des traînés électriques

C'est une méthode de mesures pour déterminer les variations latérales des résistivités apparentes avec un dispositif tel que les électrodes ont des intervalles constants sur des positions variables en vue de déterminer les discontinuités dans le socle. Dans la littérature, les auteurs confirment que c'est une investigation pour détecter des discontinuités suivant une épaisseur constante pour une variation latérale (Marescot et al. 2008 ; Sombo et al. 2019; Koussoube et Savadogo 2006; Kouakou et al. 2015). En outre, ils repèrent des anomalies qui correspondent à des baisses de résistivités apparentes mesurées. Certains auteurs aussi, définissent la largeur de l'anomalie comme critère de choix, mais (Alle, 2019) dans ses travaux au Bénin affirme que des anomalies ayant un même contraste, mais des largeurs complètement différentes peuvent être sélectionnées. Pour le meilleur choix du dispositif de traîné, il faut prendre des dispositions lors de l'implantation à savoir être en des points topographiquement bas ; être en aval d'un bassin versant le plus large possible ; être à proximité d'un marigot permanent ; être dans le

croisement de fractures les plus longues, les plus nettes et si possible les plus nombreuses. Pour voir l'orientation des discontinuités, il faut des profils parallèles. Ces profils parallèles représentés sur le même graphique, permettent de mettre en évidence l'extension et l'orientation de ces discontinuités matérialisées par des alignements d'anomalies conductrices. Dans cette étude, les traînés électriques ont été effectués par le Syscal R1 plus 72 switches, selon le dispositif Schlumberger qui est représenté par la figure 44. Au total 12 traînés (3 profils par sites) dans la zone d'étude avec les caractéristiques renseignées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Caractéristiques des profils de traînés

Sites	Koukin	Kada	Sissili Mossi	Tiakané
Distance (m)	860	400	400	400
AB (m)	200	200	200	200
MN (m)	10	10	10	10

Il est opté pour les profils de traînés une direction nord sud et Est Ouest ; ajusté au besoin pour recouper les linéaments à valider. Cette configuration a été utilisée dans d'autres zones de socle cristallin au Burkina Faso. Les dispositifs des traînés électriques sont positionnés de telle sorte qu'ils recoupent les linéaments. En effet, on cherche à recouper l'anomalie par une perpendiculaire pour en mesurer sa résistivité. Le traitement des valeurs des résistivités apparentes mesurées en vue de tracer l'allure des profils s'est fait à l'aide de Microsoft Excel.

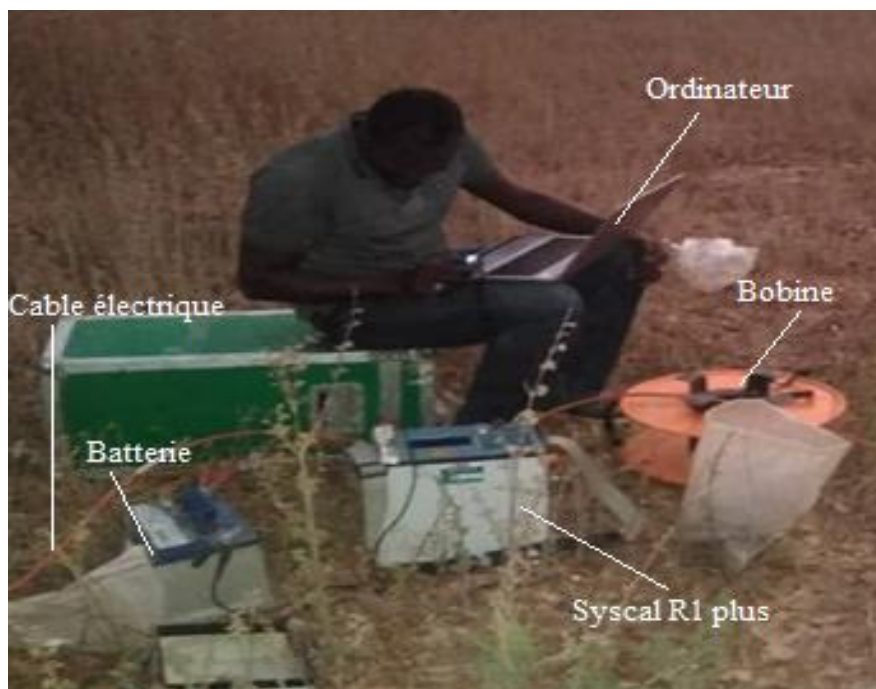


Figure 44: Séance d'acquisition mesure avec un résistivimètre Syscal R1 plus 72 switches

IV.1.2.2.2 Sondage électrique

Principe, dispositif de mesure et mise en œuvre sondages électriques

C'est une méthode de mesure des résistivités apparentes (variations verticales (1D) de résistivité) avec un dispositif en variant l'espacement des électrodes de courant en relation à un point central en gardant fixe l'intervalle entre les électrodes de potentiel. On cherche la variation quantitative de la résistivité avec la profondeur au lieu du sondage. Ainsi, à travers une recherche en profondeur, le sondage électrique permet d'explorer les différentes couches de terrain afin d'avoir une idée des épaisseurs de ces dernières. Ces épaisseurs sont traduites sous forme de courbes correspondants à des familles déjà établies par (Dieng et al., 2004). La valeur de la résistivité caractérise une formation sans pour autant donner des renseignements quant à la teneur en eau ou à la minéralisation de l'eau de la formation. Lors des mesures, le potentiel peut être faible lorsque la distance AB est assez grande par rapport à la distance MN, dans ce cas on procède à un embrayage en augmentant cette distance. Les résultats des mesures fournissent une courbe qui est basée sur le calcul d'un modèle de terrain dont la courbe théorique doit se superposer avec celle expérimentale acquise in situ par une inversion. La construction des courbes de résistivité apparente s'est faite sur une échelle bi logarithmique. Notons qu'en abscisse on porte les longueurs $AB/2$ et en ordonnée les valeurs de résistivités apparentes. La technique des sondages électriques est donc très adaptée au domaine horizontalement illimité. (Fargier, 2011 ; Berné et al., 2002). Le dispositif Schlumberger a également été utilisé avec un espacement entre sondages et en profondeur $AB/2$ varie de 1,5 à 500 m, $MN/2$ de 0,75 à 50 m. Au total 5 sondages ont été mis au point dans deux sites du fait des contraintes sur le terrain, et sur les profils il est impossible de savoir à quelle profondeur se trouve le toit de la nappe. Cela est dû à l'inexistence d'un contraste de résistivité marqué entre les altérites noyées, les altérites sèches, et aussi par une variation de faciès. Dans la localité de Koukin sur granite, trois sondages électriques ont été exécutés, en vue de retenir des zones favorables pour la réalisation de forage et aussi sur les fractures identifiées par les traînés. Sur le site Kada, bâti sur une formation migmatique deux sondages électriques ont été réalisés. Ce choix est conditionné du fait que l'on se trouve dans un environnement de socle où les résistivités étaient très fortes ainsi que les résistances de prise de terre. Ensuite à l'aide du logiciel IP2WIN, on a interprété les données en termes de résistivité et d'épaisseur afin de caractériser et de quantifier les épaisseurs des terrains sous-jacents.

IV.1.2.2.3 Tomographie de résistivité électrique

Principe, dispositif de mesure et mise en œuvre de la Tomographie de Résistivité Electrique TRE

C'est une méthode 2D qui évalue la classification de la résistivité du sol suivant un plan vertical ou 3D dans un volume de sol (Dahlin, 2004; Soro, 2017). En premier il s'agit d'effectuer une suite de mesures individuelles grâce à des électrodes métalliques enfoncées dans le sol, habituellement sur la longueur du profil (2D). Les mesures électriques sont exécutées selon une séquence géométrique prédéfinie programmée et introduite dans le logiciel d'acquisition du récepteur. Les valeurs des résistivités apparentes obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées à sur le dispositif à une profondeur relative à la valeur. La profondeur d'investigation augmente avec l'espacement entre électrodes. On peut alors représenter les résistivités apparentes mesurées sous la forme d'une pseudo-section qui reflète qualitativement la variation spatiale et verticale de la résistivité apparente (Kouakou et al., 2015; Lghoul et al., 2012).

Le dispositif retenu sera Wenner-alpha et Wenner-beta. Le choix du dispositif est très important pour une meilleure résolution des discontinuités. Alle (2019); Roques (2013) proposent la configuration dipôle-dipôle pour les zones de socle. Mais dans cette étude, on a opté pour la modélisation synthétique. C'est un test numérique qui renseigne sur le choix du dispositif à mettre en œuvre et les bons paramètres d'inversion. Le choix du meilleur dispositif dépend de la structure à imager, du bruit de fond et de la sensibilité de l'appareil de mesure défini par Soro, (2017) ce qui a permis de retenir ce dispositif. Une gamme de résistivité a été choisie pour les codes couleur pour différencier la résistivité et faciliter l'interprétation de l'inversion. Cela a été possible par l'analyse des diagraphies de résistivités électriques proposée par (Soro, 2017). En effet, cela a permis d'attribuer des gammes de résistivités électriques à chaque couche du profil d'altération. Ces diagraphies démontrent que pour une allure d'altération donnée, les valeurs de résistivités électriques changent avec la profondeur au sein d'une même couche, témoignant ainsi de l'hétérogénéité de celle-ci. Ces travaux ont attribué des valeurs de résistivités pour chaque couche, et cela permettra de mieux appréhender les résultats de la tomographie que l'on a après l'inversion. Ainsi, les valeurs obtenues par Soro au niveau de la saprolite sont comprises entre 56 $\Omega.m$ et 228 $\Omega.m$, pour la couche fissurée les résistivités sont comprises entre 228 et 871 $\Omega.m$, et pour le socle sain les résistivités obtenues sont comprises entre 871 et 3727 $\Omega.m$. Cette classification sera utilisée dans cette étude. Sur le terrain, les mesures de résistivités ont été réalisées avec une résistivimètre de type R1 Syscal 72 électrodes

avec 5m d'espacement entre les électrodes. En fonction de la séquence assignée, il injecte le courant et mesure la différence de potentiel engendrée à travers des câbles qui sont en contact avec le sol par le biais des piquets en acier inox. Le déplacement d'une tomographie à une autre a été fait suivant le mode Roll Along, illustré par la figure 45 avec un déplacement de la moitié du dispositif après la 72^{ème} électrode. Cette approche de mesure de Roll Allong permet d'avoir un bon compromis entre la profondeur d'investigation au niveau du recouvrement et la mise en œuvre sur le terrain. Le but de cette détermination est d'estimer l'aptitude de détection des compositions géologiques avec les agencements employés sur le terrain.

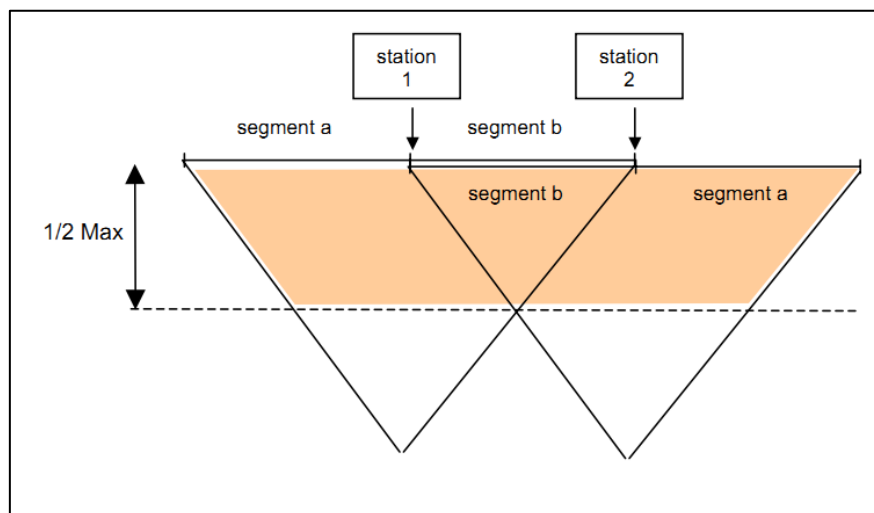


Figure 45: Roll Allong $\frac{1}{2}$ (Bernard, 2003)

Les séquences d'acquisitions des données nécessitent une inversion et une interprétation, cela a été possible par le logiciel Resd2Inv. Cela consiste à travers les valeurs de résistivités apparentes mesurées à déterminer des modèles de sol dont l'objectif est de minimiser l'écart entre la pseudo-section calculée pour un modèle de sol et la pseudo-section mesurée sur le terrain. La qualité de l'inversion qui engendre cet écart est contrôlée par le χ^2 et le RMS (Root Mean Squared) qui est un estimateur d'incertitude. Le RMS mesure la différence entre les résistivités électriques apparentes calculées et les résistivités électriques mesurées par le critère des moindres carrés. Pour avoir un prototype qui imite rationnellement les résistivités apparentes mesurées, il faut que le RMS soit le plus faible possible.

L'inversion commence par le prétraitement des données qui consiste à l'acquisition des données de l'appareil programmées sous le logiciel Prosys II et sortie dans un format *.dat. Cela montre que le nombre de lignes est directement lié au nombre de valeurs éliminées, donc on peut avoir deux fichiers avec le nombre de lignes différentes. Par la suite suivront l'élimination des valeurs aberrantes, la suppression d'une électrode qui était défectueuse et la

concaténation des TRE dans la mesure où le ROLL Allong a été fait. Pour cela, il faut tenir compte des coordonnées de la première électrode, le logiciel X2IPI a permis de faire le traitement.

Au total 4 panneaux électriques issus des Roll Along (soit 10 panneaux) ont été réalisés. Et les investigations se sont faites sur une distance de 720 m à Kada, Thyou et Sissili Mossi ; et sur 360 m à Tiakané, toujours au droit d'un forage existant et en restant perpendiculaire aux linéaments des images satellitaires. L'intérêt de faire passer la section de mesure à proximité de ces forages réside dans le fait que les logs issus de ces forages serviront de référence pour apprécier la réalité géologique des modèles de profil d'altération issus de l'inversion des résistivités apparentes et ainsi d'aider à la validation des modèles géologiques obtenues. Il est aussi déterminé la direction et l'extension des zones de discontinuités et de recouper toutes les fractures secondaires quel que soit leur direction.

À la suite de cette approche, il est défini les épaisseurs d'altérations et la comparaître aux logs des forages acquis. Pour ensuite attribuer à ces épaisseurs des valeurs de résistivités issues de l'inversion des données de la tomographie. Ce qui permettra de les classées géologiquement sur la base de la correspondance des gammes de résistivité en fonction des couches du profil d'altération établie par les résultats des investigations de diagraphies électriques. La figure 46 montre la présentation des zones de TRE et de traîné électrique.

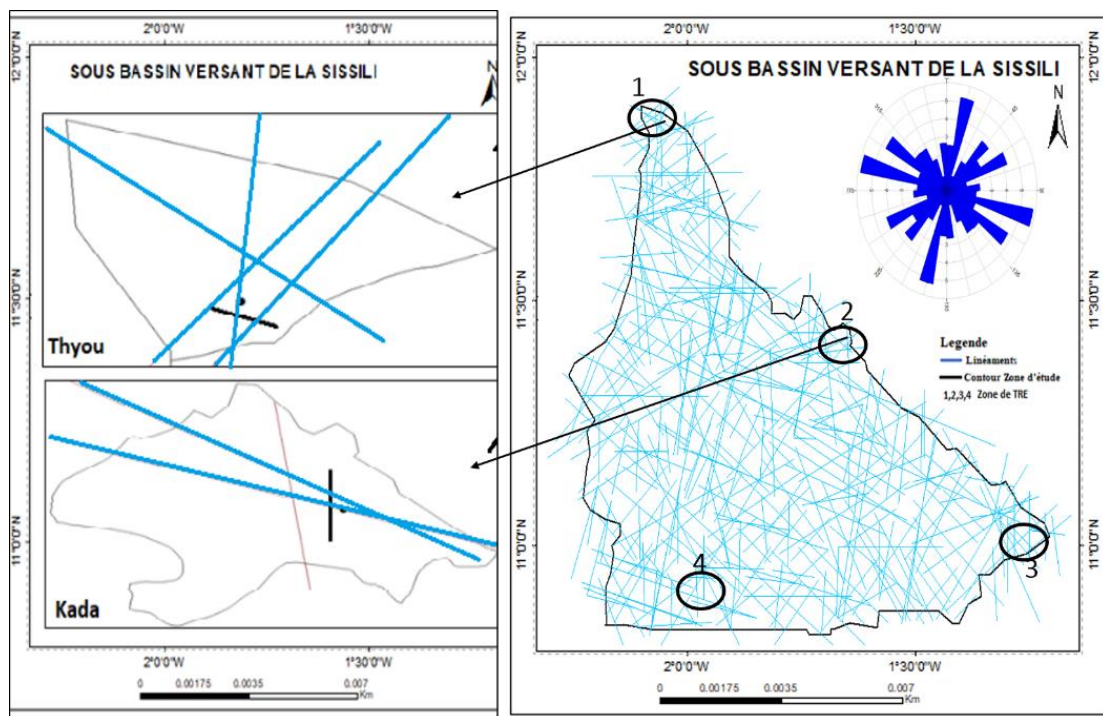


Figure 46 : Présentation des zones de TRE dans la commune de Kada et Sapouy

IV.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.2.1 TRAITEMENT DES DONNEES A PARTIR DE LA TELEDETECTION

L'identification des éventuels couloirs d'eaux souterraines a été possible grâce à l'analyse de certaines images traitées suivant la méthodologie annoncée plus haut. Cette image permet, en outre, la vectorisation des accidents géologiques qui y sont rattachés et qui peut être interprétée comme des axes d'écoulement d'eau. L'étude de la productivité n'est pas abordée dans cette thèse du fait que les données de forages dont on dispose ne sont pas complètes (manque de données sur les débits).

IV.2.1.1 Technique de l'analyse en composantes principale (ACP)

Le traitement des images satellitaires a commencé par l'ACP, il s'agit de choisir le nombre de composantes à retenir pour rendre les images plus expressives et plus nettes. La figure 47 a et b montre les résultats de la mise en évidence de la première composante principale (PC1). En effet, l'ACP sur les bandes OLI révèle que les trois premières composantes contiennent la quasi-totalité de la variance totale. En effet, elle est présente dans les sept bandes originales. La première composante principale (PC1) concentre la grande majorité des informations contenues dans les bandes sur le plan structural. Elle permet de distinguer les linéaments régionaux et les linéaments associés au réseau hydrographique (Yao, 2009). Dans cette partie présentée, elle se dessine très clairement un domaine dans un ton gris fin dans la partie sud-ouest et les linéaments de direction NE-SO et N-S définie par l'accident régional y sont bien visibles.

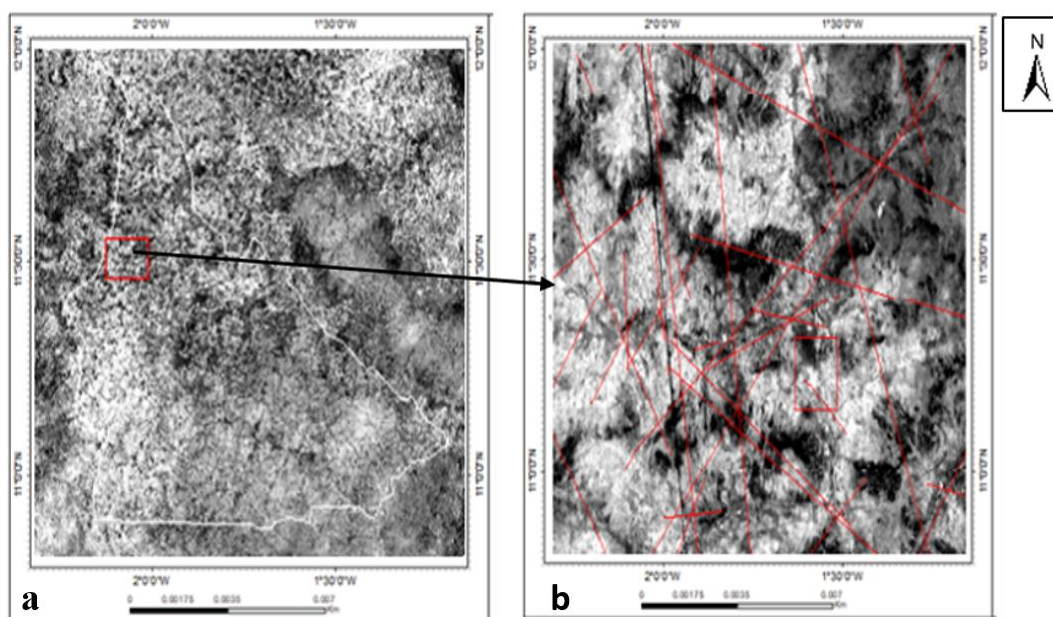


Figure 47 : Mise en évidence des linéaments sur la première composante principale

IV.2.1.2 Rapport des bandes

La combinaison des bandes est généralement utilisée pour obtenir une image en RVB. Les différentes combinaisons possibles qui donnent de bons résultats sont (OLI 5/ OLI 6 ; OLI 5/ OLI 10 ; OLI 7/ OLI 10 ; OLI 6/ OLI 5 ; OLI 4/ OLI 3). La figure 48 a et b représente un exemple de rapports de bande. L'analyse des images montre un ton noir à texture rugueuse et grossière, caractérisé par un réseau de type dendritique de type treillis. Il laisse entrevoir le réseau hydrographique et la mise en évidence des fractures gouvernant certains bras de cours d'eau qui y sont rattachés. Ce domaine s'identifie à un vaste ensemble granitique. Les anomalies détectées au niveau du réseau hydrographique permettent de renforcer la fiabilité et la validité des données linéaire en tant que marqueurs tectoniques parfois masqués par le couvert végétal et les altérites.

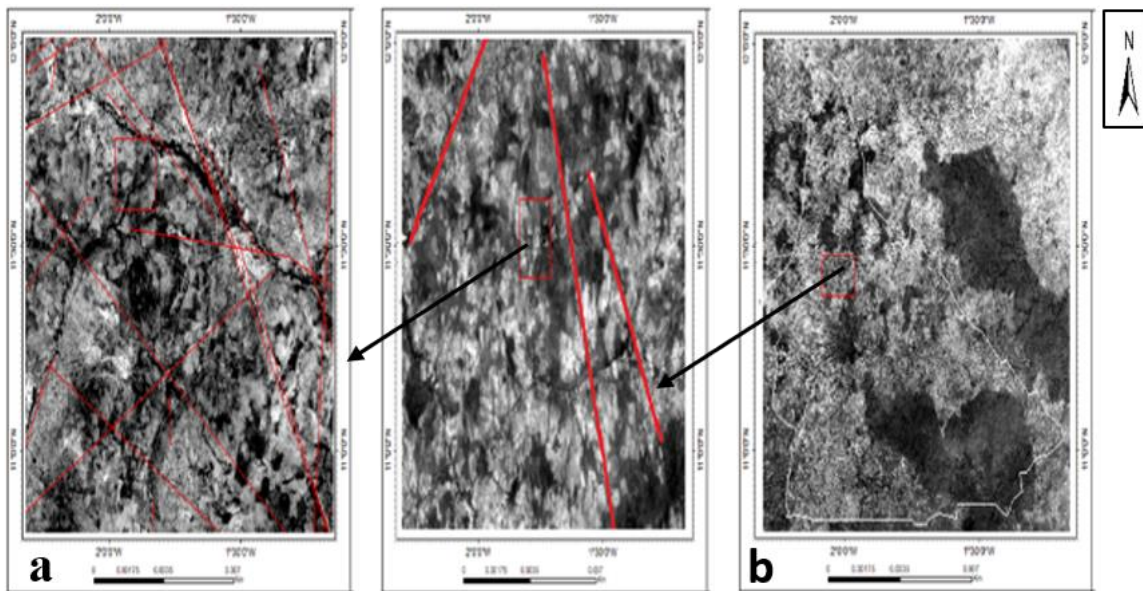


Figure 48 : Linéament identifié sur la combinaison (OLI 4/ OLI 3)

IV.2.1.3 Composition colorée

Dans le souci d'optimiser l'analyse visuelle et d'adapter les variations de tonalités au système visuel humain, des compositions colorées sont réalisées à partir des bandes de l'image Landsat. En effet, chacune de ces bandes intègre des informations complémentaires (sensibilité à la vigueur du couvert végétal, sensibilité à la teneur en eau du sol) qui font apparaître plus nettement les discontinuités structurales et texturales entre la végétation et les accidents géologiques, facilitant ainsi la discrimination visuelle des linéaments. On peut ajouter aussi qu'elle participe à la reconnaissance des milieux rocheux, notamment carbonatés ; en déterminant pour repérer les zones d'altération ferrugineuse ; une bonne indication sur la

réponse dans le domaine visible, notamment lorsque l'on a affaire à des roches très claires sur le terrain. Ainsi on voit au nord et à l'est de notre sous-bassin une couleur turquoise caractérisée par un réseau de type radial. Ce sous domaine correspond au vaste ensemble granitique. Elle a aussi permis de rehausser les différents types de réseaux hydrographiques de direction Nord - Est et par conséquent les différentes formations géologiques et les linéaments rattachés à chaque type de réseau. Ces résultats sont similaires à ceux de Jourda (2005); Youan Ta (2008) en Côte d'Ivoire et Edet et al., (1998) au Nigeria dans un même environnement de socle. Ces fractures sont très recherchées lors des prospections hydrogéologiques pour la recherche d'eau souterraine, car leur grande taille favorise leur interconnexion avec d'autres fractures facilitant ainsi la formation d'un bon aquifère. La relation linéament, eau, végétation montre des fractures ouvertes ou le stock permet la connaissance d'une bonne croissance des végétaux, et donne une bonne idée sur la recherche d'eau souterraine. Le développement de la couverture végétale en zone sahélienne est dû à l'altération qui se développe sur les zones les plus fracturées. La figure 49 a et b montre la composition colorée en couleur naturelle de la commune de Thyou au nord de notre bassin.

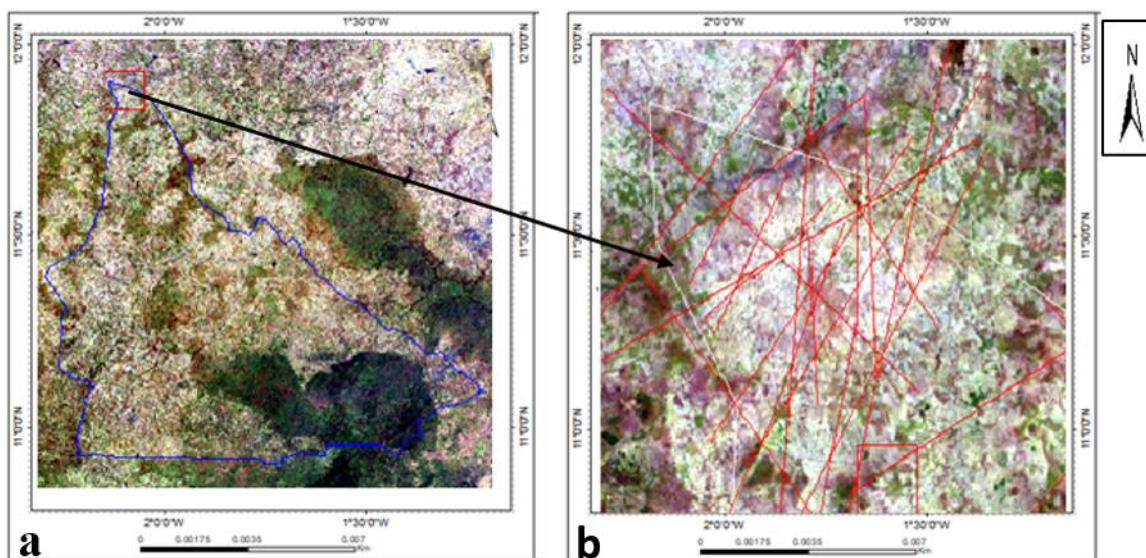


Figure 49 : Composition colorée (OLI5-6-7) faisant ressortir des linéaments.

IV.2.1.3 Application des filtres Sobel

L'objectif de l'application des filtres est de repérer le moyen pour reconnaître les linéaments jusque-là mal connus correspondant à des discontinuités lithologiques ou structurales dans les images. Les filtres directionnels rendent plus simple la visibilité des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image (Laghoug, 2011). La figure 50 a et b illustre

l'application de filtre N-S sur le rapport d'images OLI 3/ OLI 4 du sous-bassin dans la zone de Po. Le filtre Sobel de direction N-S maintient les fissures structurales et met en exactitude les linéaments de direction E-O, NO-SE (libérienne) et NE-SO (éburnéenne) (Youan Ta et al., 2011). Les filtres utilisés dans le cadre de ce travail ont été d'un apport considérable dans la vectorisation. Cette approche a permis de déceler des discontinuités images mêmes les plus subtiles. On note aussi que certains linéaments gouvernant la direction de différents bras d'eau de la région correspondent à des failles parallèles ayant probablement la même histoire géologique.

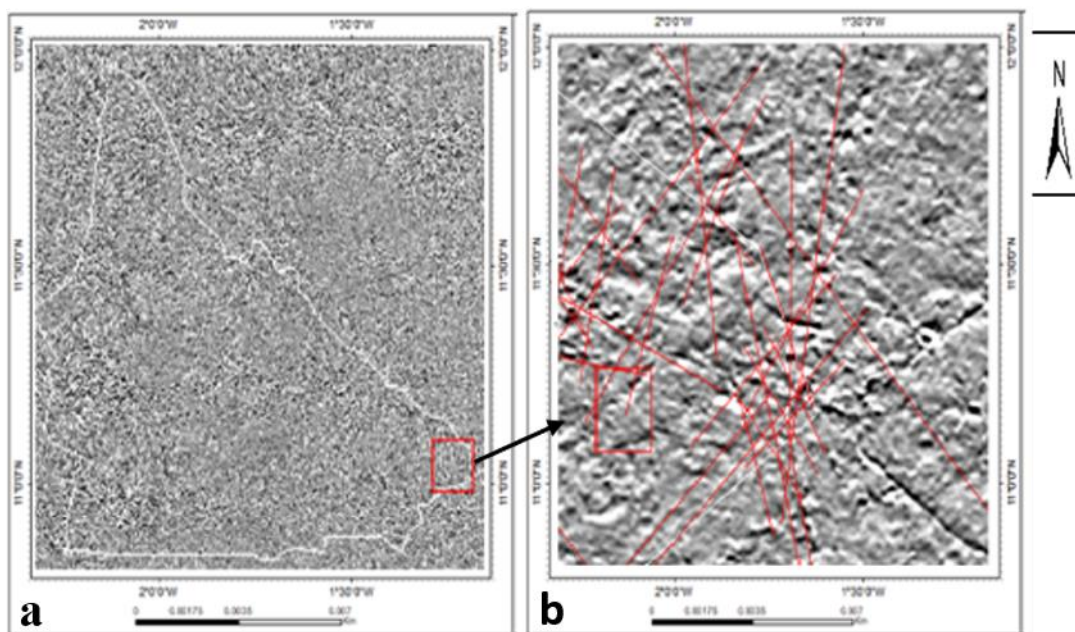
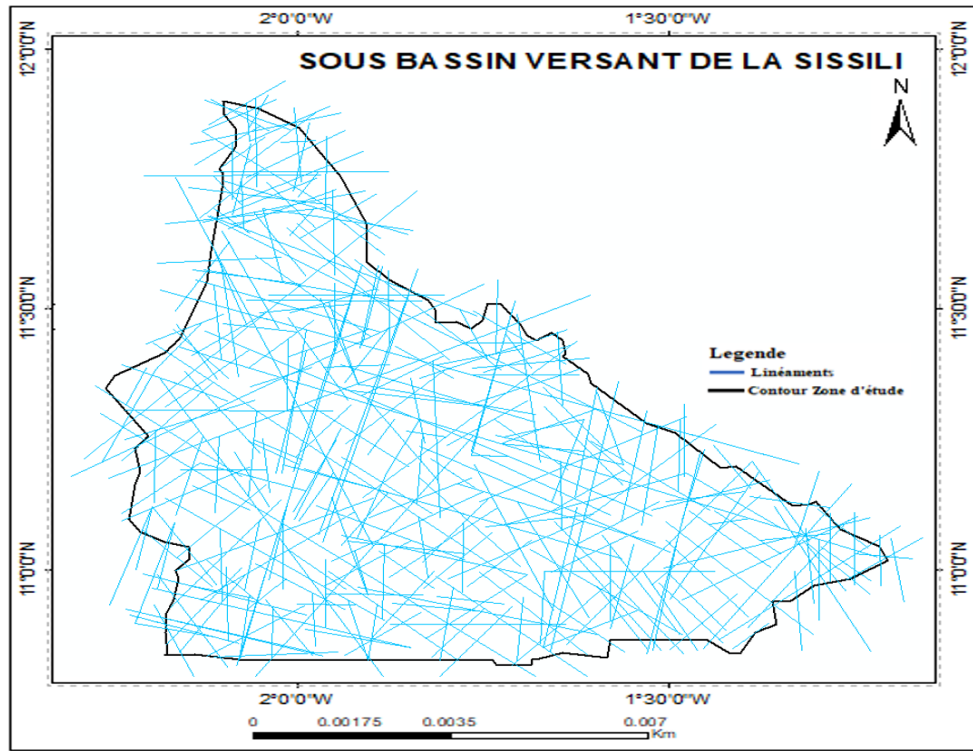


Figure 50 : Application de filtre Sobel Nord Sud

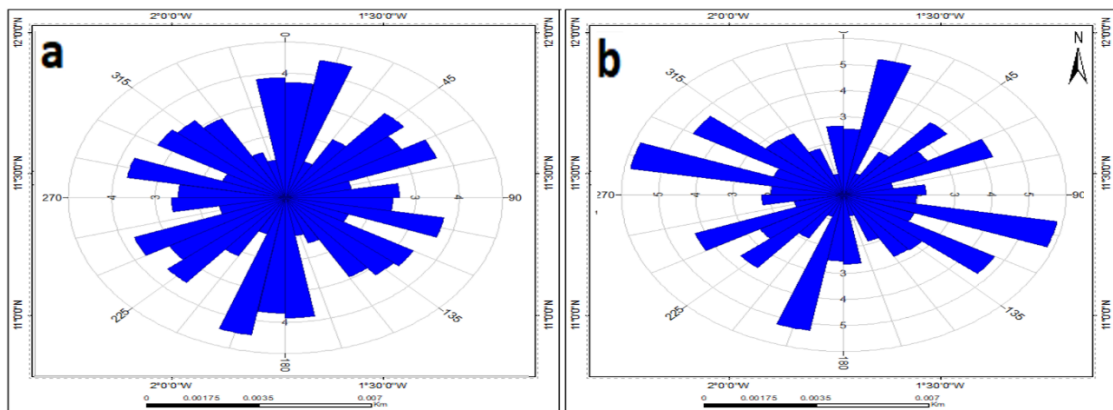
IV.2.1.4 Extraction manuelle des linéaments par analyse visuelle

Après la phase de prétraitement et de traitement, les linéaments ont été tracés à la main. La figure 51a représente les résultats obtenus après extraction des linéaments effectués sur les images Landsat et la figure 51b renseigne sur la rosace pour indiquer la distribution des orientations. L'extraction des linéaments des images satellitaires révèle des tailles, des directions différentes, et comporte plusieurs linéaments. Cela confirme les études de la tectonique menée par Savadogo (1984) au Burkina qui affirme que le sous-bassin de la Sissili aurait subi l'influence de plusieurs phénomènes tectoniques qui ont conduit à la fragmentation prononcée des formations géologiques. On remarque une grande représentation des directions majeures de la famille NO-SE et NE-SO et une classe minoritaire de la famille NS et E-O. Les directions données par les filtres sont superposées sur la carte géologique et montre les

formations libériennes et éburnéennes du carton Ouest Africain. Ce qui rend cette carte non complète, mais très représentative.



a) Extraction des linéaments issus des images satellitaires Landsat



b) Distribution des orientations, a. fréquence en nombre b. en longueur cumulée

Figure 51: Carte des linéaments issus des images satellitaires Landsat

IV.2.1.5 Validation des linéaments

IV.2.1.5.1 Validation de la carte de linéaments en imagerie

Après l'extraction se pose le problème de leurs validations du fait que les imageries restent peu crédibles. La validation est très importante pour une interprétation structurale et

hydrogéologique. Les rosaces directionnelles issues des images Landsat de cette étude et ceux de la photographie aérienne de Sawadogo (1975) ont été analysés (figure 52). Il en ressort que les deux rosaces ont une assez bonne corrélation avec des directions N60°-70°, N140°-150° avec des pics fréquentiels. On rencontre sur la photographie aérienne des pics aux voisinages de N10°, N20°, N40° alors qu'au niveau de notre rosace directionnelle des images Landsat il est montré des directions préférentielles N10°-15°, N30°-35°, N85°-90°. Les directions peuvent s'associer par couples de directions N°10-20°, N°60-70°, N100°-110°. Il convient de noter que l'allure de la distribution des linéaments dans la zone de Léo se regroupe entre N40° et N50°. On constate aussi des directions inexistantes sur les images N30°-N35°, N165°-N175°, et au niveau de la photographie aérienne ceux sont les directions N80° et N110°. Cette absence de direction peut être expliquée par le fait que le satellite balaye la direction Est-Ouest, cela est visible sur la photographie aérienne aussi. Les deux cartes présentent des pics fréquentiels N40°-50°, N60°-70°, des directions qui forment d'angle droit ou perpendiculaire sont visible N15°-105°, N45°-135°, N60°-150. On peut ajouter à cela que le rôle hydraulique des différentes fractures permet de distinguer des joints ouverts et fermés. En effet, le constat sur le terrain et les données recueillis sur les forages positifs ou négatives confirme que la direction peut jouer sur la nature du joint. En superposant les forages sur les linéaments, on remarque plusieurs directions N0°-N20°, N60°-N70° qui représentent les forages négatifs donc des joints fermés. En effet, les joints ouverts à la surface peuvent se retrouver fermés en profondeur provoquant une réduction de la perméabilité occasionnant la disparition des linéaments satellitaires en même temps que la diminution des vides. D'autres, par contre de direction N90°-N100°, N120°-N130° et N160° qui représentent les forages positifs donc des joints ouverts. Il a été retenu que les directions ouvertes sont les plus capables de jouer un rôle de drainage par rapport aux altérites environnantes. C'est dire donc à grande échelle apparaissent des directions à forte densité locale alors que sur le plan régional elles sont à faible taux de fréquence. Donc les directions des plus grandes fractures ne sont pas nécessairement les plus fréquentes. On retient que la plupart des fractures se retrouvant sur la photo aérienne ont l'avantage de permettre le repérage de nombres plus importants de linéaments. L'observation des deux rosaces confirme donc la validation par imagerie de la carte détaillée des linéaments du sous-bassin de la Sissili. La différence de densité de fracturation enregistrée au niveau des deux rosaces peut être liée d'une part à la qualité et à la résolution des photographies qui n'ont pas permis de cartographier convenablement les fractures et d'autre part à l'absence de techniques d'amélioration d'images au niveau de la photographie acquise uniquement dans le visible. Toutefois, dans une démarche de modélisation, l'ajustement d'une loi normale par famille serait acceptable. En somme, on

retiendra ici que les linéaments majeurs présentent une grande hétérogénéité dans leur orientation, avec une prépondérance (Adiaffi, 2008).

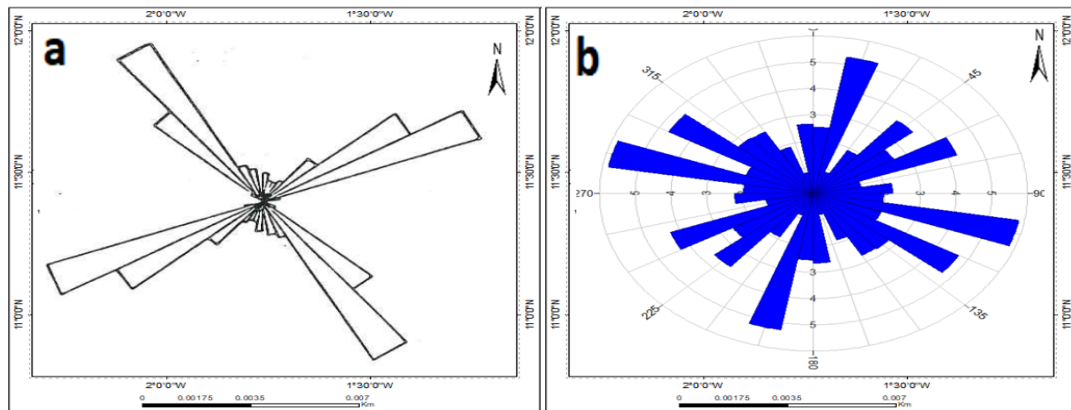


Figure 52: a) Rosace photographie aérienne b) Rosace Landsat

IV.2.1.5.2 Validation de la carte de linéaments par superposition des forages positifs

Selon leurs orientations par croissant angulaire de 10 degrés, les linéaments sont regroupés par classe directionnelles. Cette validation consiste à attribuer par une superposition à l'ensemble des linéaments des images satellitaires, les 146 forages positifs et 60 forages négatifs recensés dans le sous-bassin de la Sissili.

- **Positionnement forages positifs et linéaments**

Dans cette étude il est appliqué à l'ensemble des directions des linéaments comme le montre la figure 53. En ce sens pour valider les linéaments en fractures, on se propose d'étudier les relations entre sens d'orientation et distance. On note que 60 forages soit 41,10 % des forages correspondant aux différentes intersections des linéaments, ce qui laisse penser que cela concorde aux fractures dans le sous-sol. Par la suite, on constate dans les 82 forages restants soit 58,9 %, ne se superposent pas sur les images. Dans la mesure où un forage peut capter plusieurs directions, le pourcentage de forages impactés suivant les orientations sont les suivants :

- la direction NO-SE est exploitée par 15 forages soit 10 %,
- la direction NE-SO est exploitée par 45 forages soit 30 %,
- la direction N-S est exploitée par 10 forages soit 6,8 %,
- la direction E-O est exploitée par 13 forages soit 8,9 %.

Suivant cette exploitation, on remarque que 83 forages sur les 146 forages sont au droit d'un linéament. Ce qui peut être expliqué par le fait que certains forages captent les linéaments secondaires qui sont mal connus. L'analyse des différents pourcentages permettent de classer les linéaments en fonction de leur influence dans le positionnement des forages : NE-SO > NO-

SE > EO > NS. Les directions prédominantes et des directions préférentielles des linéaments d'orientation N60°-70°, N100°-115° et N120°-130° (NE-SO) et (NO-SE) qui sont les plus représentés, ensuite les directions N10°-20° (N-S) suivent. Des résultats similaires par une dominance des directions NO-SE ont été obtenus par différents auteurs Biémi (1992); Jourda, (2005); Youan Ta et al., (2011); Abdou Babaye et al., (2017); Sombo et al. (2019) dans un même environnement de socle qui décrivent qu'il y'a un faible pourcentage de corrélation sur les directions. Les intensités de linéament dominante correspondent majoritairement aux domaines des schistes, granite et des granites migmatiques ce qui résulte d'une activité tectonique qui donne naissance à un réseau hydrographique. A grande échelle apparaissent des directions à forte densité locale alors que sur le plan régional elles sont à faible taux de fréquence. La superposition renseigne aussi sur des joints ouverts, de direction N90°-N100°, N120°-N130° et N160°. Il a été retenu que les directions ouvertes sont les plus capables de jouer un rôle de drainage par rapport aux altérites environnantes (Savadogo, 1984).

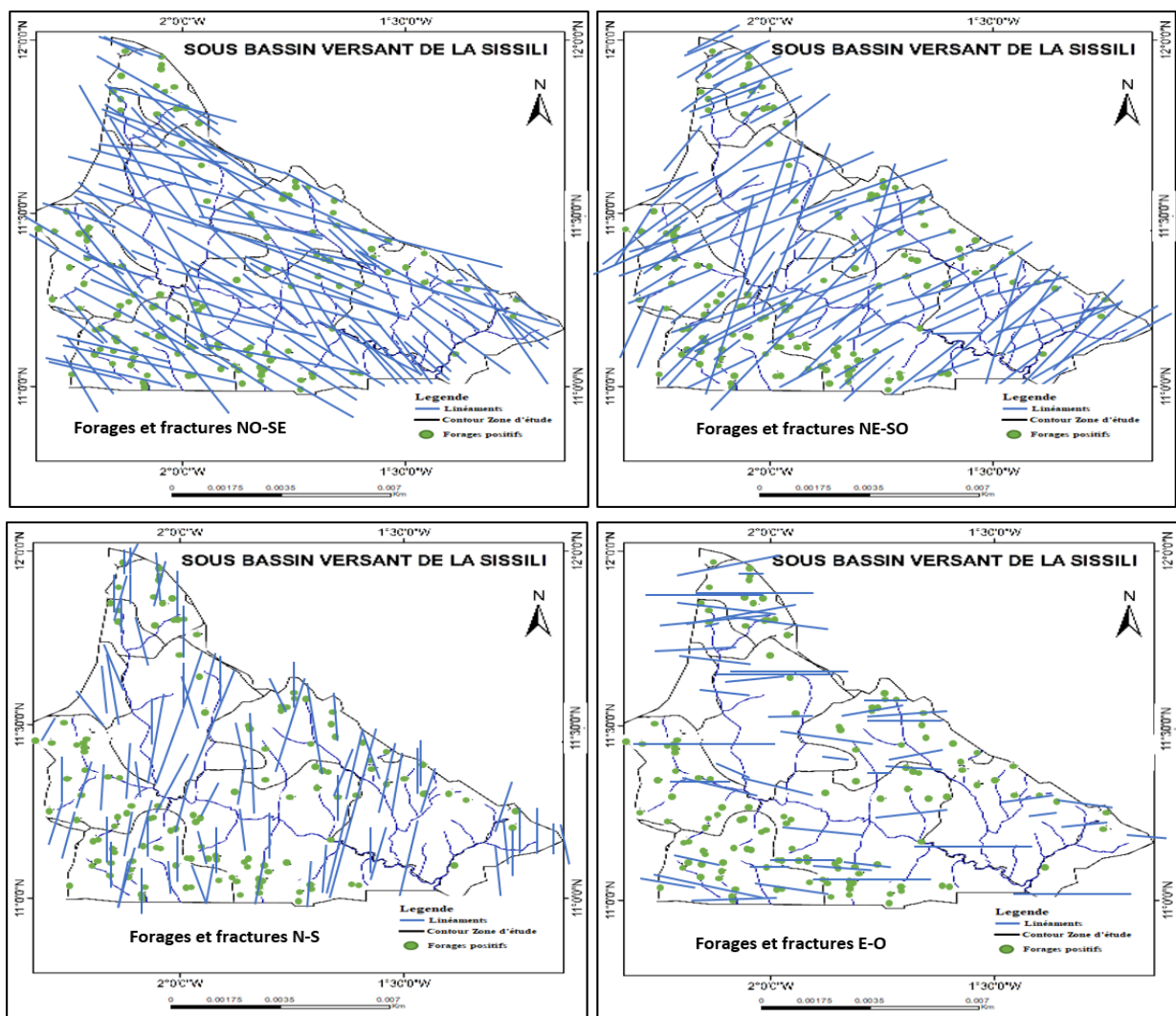


Figure 53: Superposition des forages positifs par rapport aux orientations des linéaments du sous-bassin de la Sissili

- **Positionnement forages négatifs et linéaments**

Pour les 60 forages négatifs comme illustré par la figure 54, on note que la direction majoritairement coïncider avec la direction des forages est la direction N-S. En effet, sur 30 forages concernés, 27 forages sont de directions N-S soit presque 50 % des forages négatifs :

- la direction NO-SE est exploitée par 16 forages soit 26,66 %,
- la direction NE-SO est exploitée par 17 forages soit 28,33 %,
- la direction N-S est exploitée par 28 forages soit 46,66 %,
- la direction E-O est exploitée par 5 forages soit 8,33 %.

Cela confirme suite à la superposition de plusieurs directions, que certaines directions peuvent avoir des joints fermés (N-S) $N0^{\circ}$ - $N10^{\circ}$, mais aussi de direction (E-O) $N60^{\circ}$ - $N80^{\circ}$. En effet, le constat sur le terrain et les données recueillies sur les forages négatifs confirme que la direction peut jouer sur la nature du joint.

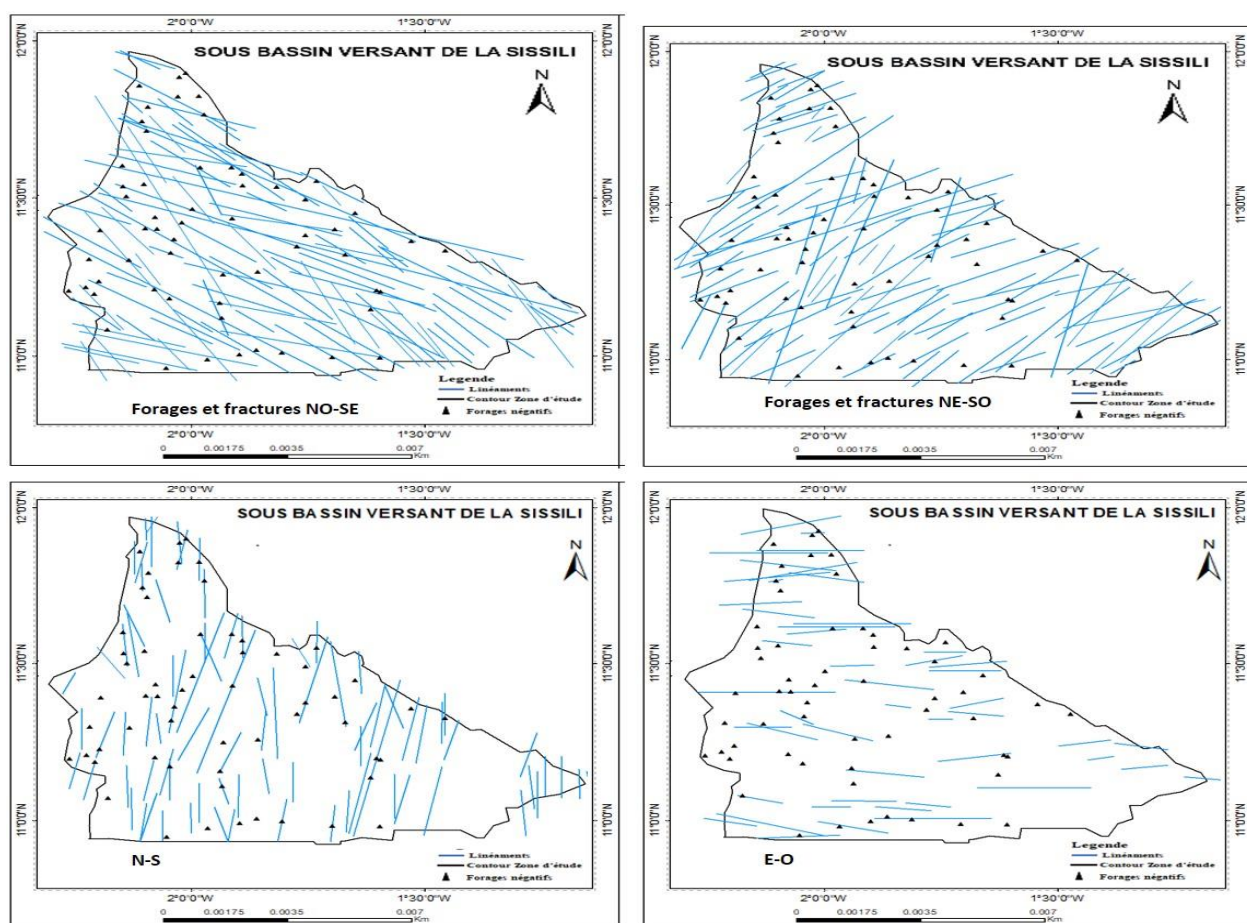


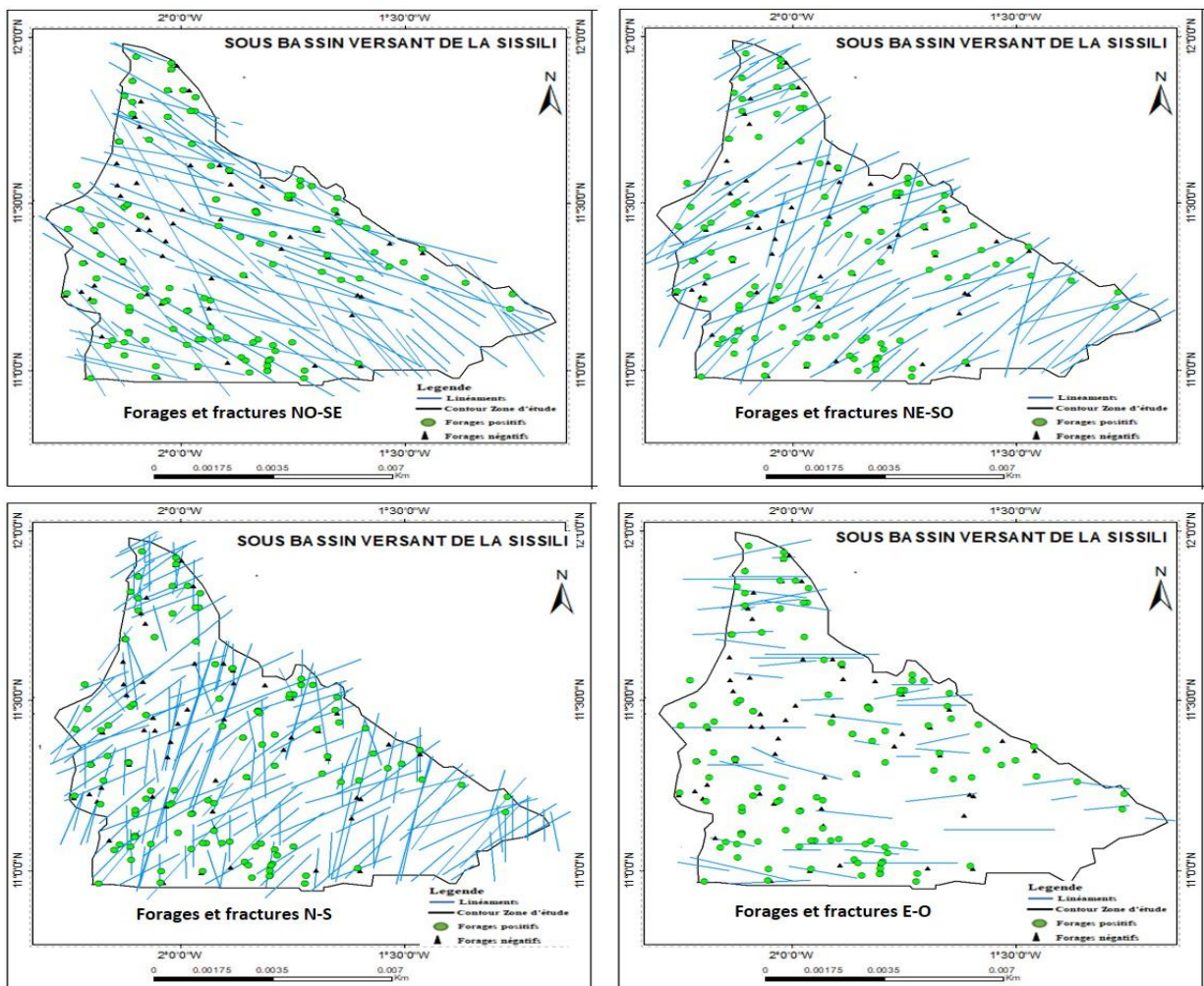
Figure 54: Superposition des forages négatifs par rapport aux orientations des linéaments du sous-bassin de la Sissili

- **Distances d'éloignement et forages**

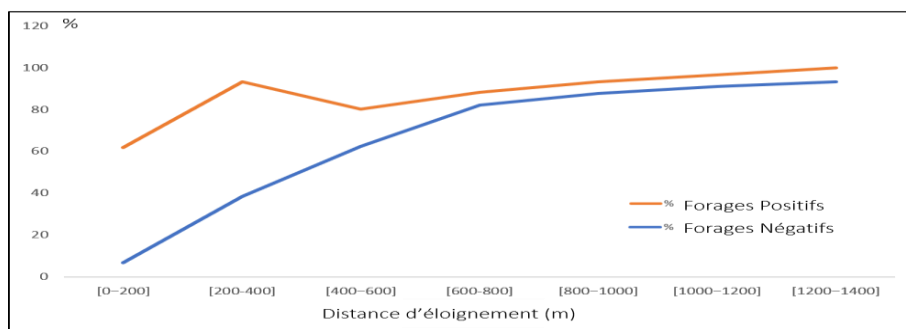
Par la suite la distance d'éloignement de chaque forage par rapport aux linéaments a été mesurée, le pourcentage de forages positifs et négatifs impactés suivant les orientations sont représenté par la figure 55a et répertorié dans le tableau 9. Les implantations de forages s'étaient faites dans le sous-bassin le plus souvent par tâtonnement d'après les résultats. La figure 55b nous montre un pic de 93,33 % au niveau des forages négatifs et 38,36 % pour les forages positifs à 200 mètres de distances.

Tableau 9: Pourcentage cumulé de forages suivant les toutes orientations

	Distance	[0-200]	[200-400]	[400-600]	[600-800]	[800-1000]	[1000-1200]	[1200-1400]
F. Positif	Nombre	10	56	91	120	128	133	136
F. Positif	%	6,85	38,36	62,33	82,19	87,67	91,1	93,15
F. Négatif	%	61,67	93,33	80	88,33	93,33	96,67	100



a) Distance d'éloignement de chaque forage par rapport aux linéaments



b) Distance d'éloignement (m)

Figure 55 : Distance d'éloignement de chaque forage par rapport aux linéaments

- **Classe de débits et orientations de fractures**

L'étude des classes de débits par rapport aux linéaments en fonction des directions des fractures N-S, E-O, NE-SO et NO-SE ; est effectuée et représenté par la figure 56. Dans les 146 forages, 127 forages ont des débits variants de 0,04 m³/h à Taré et 18 m³/h à Boala, sont concernés par cette étude (figure 56a). Les classes de débits supérieurs à 5 m³/h sont observés en zone granitique avec des formes d'anomalie en "V" et "U" ; mais la forme "W" présente le taux de réussite le plus élevé. D'après la courbe de sondage, les plus forts débits correspondent aux courbes de type "H" %, suivie du type "A". En termes de productivité, les formations granitiques sont les plus productives. Mais cependant, toutes les orientations sont susceptibles de fournir un débit faible. Le tableau 10 représente la classification des débits selon le CIEH, (1978). L'analyse montre que 65,35 % des débits faibles sont inférieurs à 2,5 m³/h, ce taux est certainement dû au fait que ces forages captent ou sont positionnés sur les linéaments secondaires. Ou aussi leurs implantations n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie, et se veut d'être à côté des habitations. Les plus faibles débits dans la zone sont observés dans les directions abritant la direction NO-SE. La zone à forte tendance structurale identifiée par la télédétection correspond certainement à un couloir souterrain qui s'exprime par des petites fractures, mais en nombre important comme le cas de Koukin et Thiakané. Les 34,65 % sont des débits supérieurs à 2,5 m³/h, cela laisse penser que ces forages ont fait l'objet d'étude de cartographie linéamentaire suivie d'une validation par la géophysique. Les meilleurs débits dans la zone sont observés dans les directions abritant la direction NE-SO.

Tableau 10: classification des débits

Classe débits CIEH	Nombre	%	
[0-1] Très faibles	49	38,58	NO-SE
[1-2,5] Faibles	34	26,77	
[2,5-5] Moyens	21	16,54	NE-SO
[>5] Forts	23	18,11	

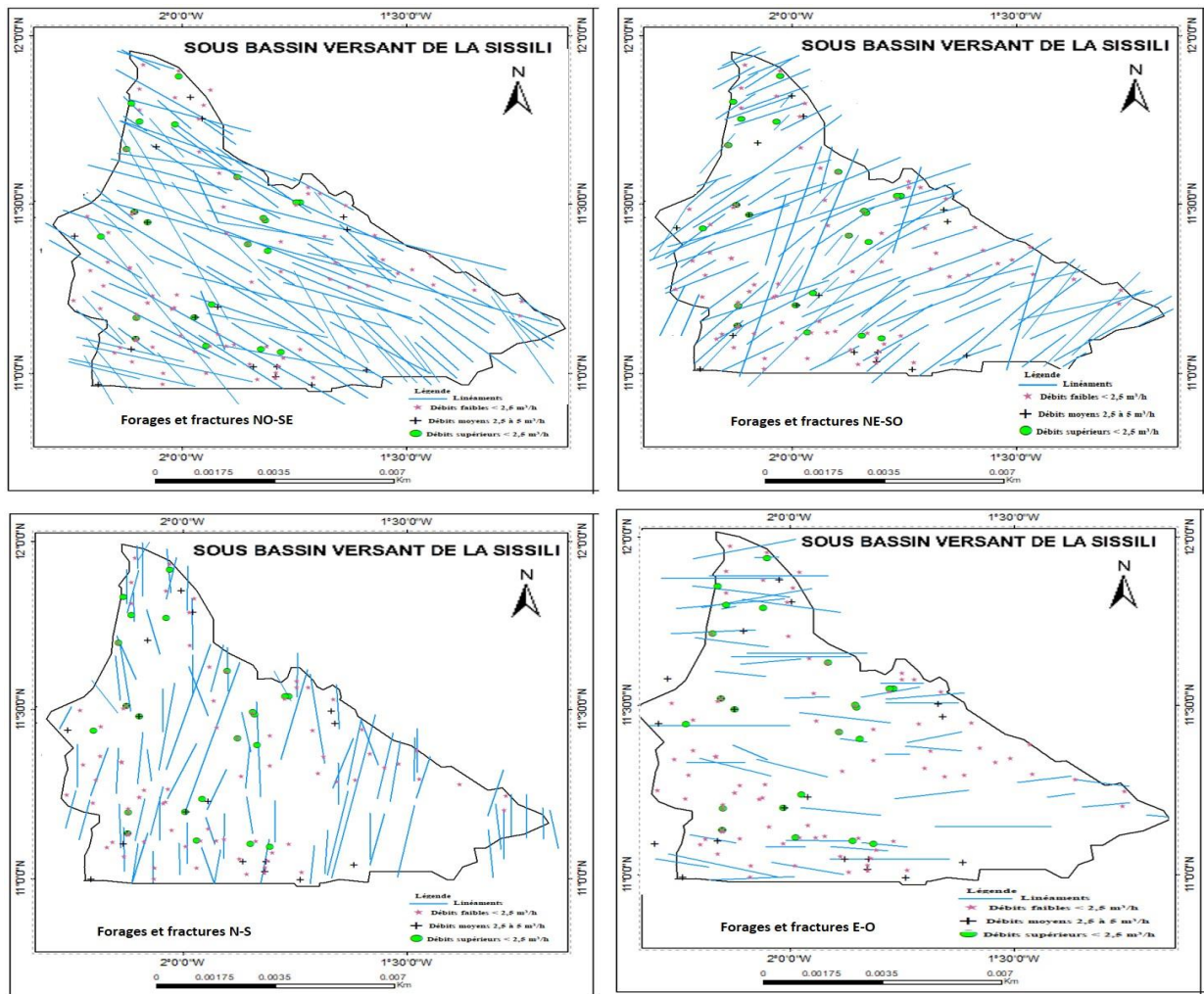


Figure 56 a) Relation entre classe de débits et orientations de fractures

- **Classes de débits et la profondeur**

La relation entre les classes de débits et la profondeur des ouvrages donne une moyenne de 58,3 mètres. Selon la profondeur, on observe la plus grande à 86 mètres à Nation et la plus petite 37 mètres à Kombila. La figure 56 b illustre que l'on rencontre les faibles débits à toutes les profondeurs, alors que les faibles débits sont compris entre 43 mètres à 84,75 mètres réparti dans les 3 provinces et les débits moyens à forts sont comprises entre les profondeurs 45 mètres à 80 mètres.

Cette productivité à fort débit confirme l'étude de Youan Ta et al., (2008) qui décrit que la limite d'apparition de fractures à joint ouvert se trouve entre 30 et 60 mètres, alors que Jourda, (2005) fixe cette limite entre 50 à 70 mètres.

Cette analyse confirme que la profondeur des forages ne garantit pas forcément de forts débits, par exemple dans la localité de Sapouy pour 3 forages de profondeurs respectives 74 m, on a des débits de 10 m³/h, 6,14 m³/h et 0,60 m³/h. Cela suppose qu'à de grandes profondeurs il peut y avoir la présence de fracture productive.

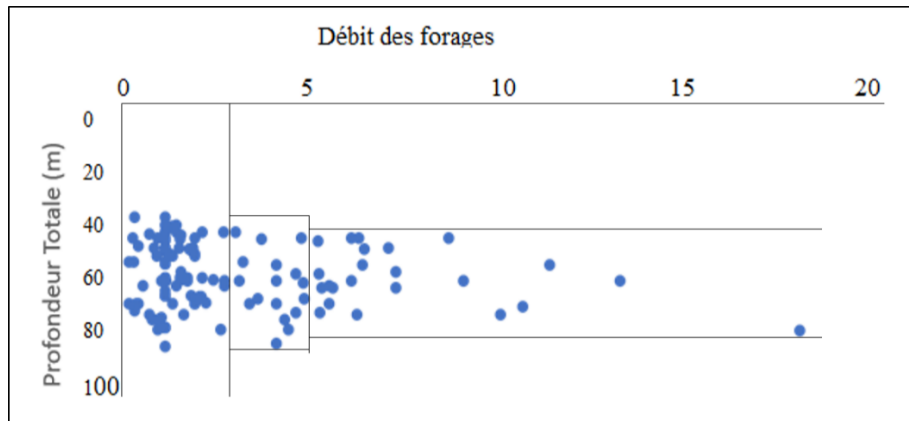


Figure 56 b) Relation entre débits et profondeur totale des forages

- **Classes de débits et les épaisseurs d'altérations**

La relation entre les classes de débits et les épaisseurs d'altérations (figures 56 c) montre qu'entre les profondeurs de 12,94 à 40,31 mètres enregistrent les plus forts débits avec une influence sur les épaisseurs. Les faibles débits se remarquent en dessous de 12,94 mètres et au-dessus de 40,31 mètres. Ses résultats sont semblables à ce de Kouamé, (1999) qui décrit une accumulation des eaux en provenance des altérites par les phénomènes de drainage peut expliquer ce fait. Par la suite, les plus fortes épaisseurs à faible débit montrent que le drainage est obstrué et les plus faibles épaisseurs décrites que capacité de retenue est biaisée et que l'aquifère est soumis à une fluctuation saisonnière. Mais aussi la charge a tendance à comprimer les fissures lorsque la profondeur augmente. Le lessivage des matériaux altéré par l'infiltration peuvent aussi colmater partiellement les fissures, dans ce cas on s'entend que le sommet de la zone fracturée présente des paramètres hydraulique voisin de celle des arènes qui la surmonte.

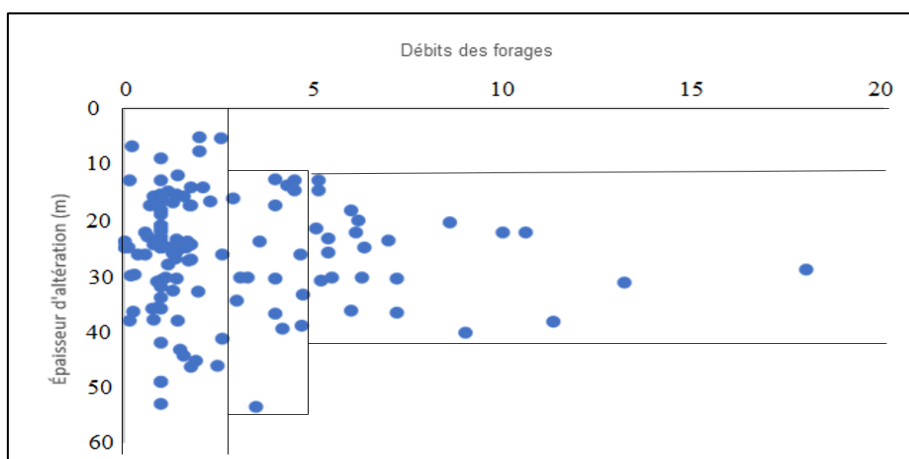


Figure 56 c) Relation débits et épaisseurs d'altération

Figure 56 : Relation entre classe de débits et orientations, épaisseurs, altérations

La partie IV.2.2 traitera la caractérisation de l'aquifère et la validation des linéaments par la géophysique.

IV.2.2 CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE

IV.2.2.1 Traîné électrique

Nous traiterons ici les principes et l'interprétation des données que nous avons mis en œuvre. Le profil de trainé réalisé dans les zones de prospections pour la validation des linéaments confirme la direction des linéaments observés par l'allure des courbes (figure 57), pour apprécier la direction préférentielle (figure 58).

La reconnaissance des 12 trainés réalisés donne des zones de discontinuité dont les caractéristiques sont représentées dans le tableau 11 et leurs orientations directionnelles par les profils parallèles obtenues par la géophysique a permis de valider les linéaments en fractures qui altèrent la roche saine et sont représentées par les zones de faible résistivité. Par ailleurs, du fait que la cuirasse latéritique couvre totalement le sous-bassin, des coupes lithologiques ont été établies à travers les logs de forages pour une comparaison plus fiable avec les mesures de terrains pour l'atteinte des objectifs de la thèse.

La validation des linéaments dans les villages de Kada et Sissili Mossi a montré d'autres linéaments qui n'avaient pas pu être perçus au niveau des images satellitaires. Les profils de trainé implantés nous renseignent sur de résistivité forte (roche dure) à faibles (associé à des fractures de forte perméabilité) et de forme d'anomalie. Le profil principal rencontre un pic à l'endroit du forage existant. Le profil de trainé réalisé dans les villages de Koukin et Tiakané, montre que les anomalies reconcentrées donnent les meilleurs résultats, quel que soit le contexte géologique.

L'identification des zones de discontinuités et leurs orientations obtenues par la géophysique ont permis de cartographier les fractures qui altèrent la roche saine et sont représentées par des profils de résistivités caractérisés par des anomalies conductrices (zones de faible résistivité). En principe en partant d'une courbe, on voit que le fait de reporter les mesures du sondage électrique sur un repère entraîne une augmentation de la résistivité du premier terrain ou de celle du second conduit à une translation verticale de la courbe. Un accroissement de l'épaisseur totale des altérites surmontant la roche dure provoquera une translation horizontale vers la droite de la courbe. Ce trainé permet de voir les zones broyées qui accompagnent les fractures sur lesquelles l'épaisseur des altérites croît brutalement et permet de mettre en évidence les variations d'épaisseurs. Même si les valeurs de résistivités apparentes représentent un point

d'une courbe de sondage qu'on aurait réalisé en un point de mesure, la résistivité mesurée ne donne pas une idée de la forme qui précède. C'est la variation de la résistivité apparente du traîné des altérites, qui introduit une difficulté dans l'interprétation des données du traîné. C'est le cas de la variation ou le substratum est recouvert de placage argileux très conducteur. Les profils présentent des valeurs moins contrastées sur les migmatites que sur les granites ou migmatites. Les fissures localisées par les images satellitaires favorisent une plus grande extension de la zone d'influence, et souvent un seul profil de traîné suffit pour l'implantation des forages. Mais si les débits demandés sont importants, on se propose de nombreux profils. Les profils parallèles sur le même graphique permettent de mettre en évidence l'extension et l'orientation de ces discontinuités matérialisées par des alignements d'anomalies conductrices. On note une vaste zone de résistivité variant de 200 à 400 Ω .m et de direction N° 156 N°180 à Kada, N°146 N°190 N°142 à Sissili Mossi, N°212 N°174 à Koukin, et N°145 N°149 N°202 à Tiakané. Les épaisseurs de la zone varient de 20 à 50 m et sont un indice probable de l'intense fracturation survenue dans le sous-bassin versant. L'impact du changement de profondeur d'investigation sur leur allure a mis en évidence plusieurs discontinuités ou fractures favorables à l'implantation de forages. Cependant, il faut préciser que les zones de discontinuités ne correspondent pas toujours à des zones accidentées saturées d'eau. En effet, Sombo et al., (2019) précise que d'autres paramètres peuvent intervenir. Les profils de traîné lors de notre prospection ont montré différents paliers suivant la valeur de la résistivité et de la forme de l'anomalie. En effet, selon Dieng et al., (2004), la forme de l'anomalie détermine le taux de réussite. Donc le choix du meilleur site provisoire sur une ligne de prospection tient compte de la forme de l'anomalie mise en évidence sur le profil de résistivités (Kouakou et al., 2015). Dans le cadre cette étude les profils de résistivité présentent des paliers de moyenne valeur de résistivité par rapport à la moyenne. Ces niveaux correspondant à des zones d'anomalies conductrices présentent 6 formes d'anomalie variées ("V" à 30 %,"U" à 10 %,"W" à 8.9 %,"H" à 6.8 %, les formes "M", et "K" ne sont pas pris en compte, car insignifiantes) et sont associées le plus souvent à des zones de discontinuités (zone de contacts, failles, fractures, etc.). Il est examiné un rapport plus dominant dans les configurations en "W et V" associé aux directions NE-SO sur les granites, supposant qu'elles sont liées à des fractures mineures s'installant de part et d'autre d'un accident majeur pour la forme « V » et à des fractures parallèles pour la forme « W ». Mais par contre 19 % des forages échoués sont de formes "U". Les résultats de notre étude confirment ceux des travaux de Koussoube et Savadogo, (2006) dans un environnement de socle au Burkina à l'utilisation de la méthode de prospection. La méthode est la plus recommandée avec le dispositif de profil de traîné Schlumberger. Il est

observé sur les différents profils de traînés que dans certaines zones les fractures sont de faible extension ou il peut s'agir de poches d'eau discontinues séparés par des seuils. Les études de Kouassi et al., (2012) sur l'analyse de la productivité et ceux de (Engalenc, 1975) sur les méthodes de recherche d'eau montre qu'une fracture est parallèle à la tectonique est ouverte alors que ce qui sont orthogonales sont fermées. L'étude de Sombo et al., (2019) dans un même environnement de socle confirme ces mêmes résultats. Dans le sous-bassin de la Sissili, la direction des failles joue un rôle sur la productivité, car certaines sont ouvertes et d'autres fermées. Dans le village de Sissili mossi il est constaté des forages négatifs sur le même profil de traîné alors que deux autres sont positifs, car la plupart se trouvent dans la direction NO-SE qui d'après Kouassi et al., (2012), est étanche. Ce qui suppose que les directions NE-SO et les directions NS et EO sont étanches ce sous-bassin.

Mais la question à vouloir continuer cette méthode demeure. La technique de traîné (1D) a été longtemps utilisé dans le sous-bassin et dans le pays, pour l'implantation des forages. Néanmoins, cette méthode a ses limites, car les traîné sont interprétés sur la base des résistivités apparentes (Alle, 2019), où soit sur la base de la largeur et de la forme de la discontinuité (Dieng, 2004). Mais l'analyse de profils montre que la zone présentant de l'argile latéritique montre des structures très surprenantes entre termes de diversité parfois supérieures à ceux des structures de discontinuité de la zone fissurée. A cela on peut ajouter que la méthode utilisée comme le Schlumberger peut conduire à des écarts, en effet, cela est confirmé par les résultats de la modélisation synthétique et conclue que le dispositif Wenner plus adapté et produit moins d'écart (Soro, 2017), mais démontre des limites qu'en a la profondeur des zones fissurées et sa mise en œuvre. Alle, (2019) montre que quel que soit la méthode de traîné mis en place, cela ne pourrait pas déterminer les discontinuités subverticales dans la zone non altérée.

Tableau 11: Représentation des caractéristiques des profils électriques

Sites	Koukin	Kada	Sissili Mossi	Tiakané
Distance (m)	860	400	400	400
AB (m)	200	200	200	200
MN (m)	10	10	10	10
Direction	N°90	N°70	N°70	N°90
Résistivité observée ($\Omega.m$)	261	280	340	203
Epaisseur (m)	18	20		
Type d'anomalie	U & H&K	V	V	W
Direction des fractures identifiées	N°212 & 174	N° 156 & 180	N°146 & 190 & 142	N°145 & 149 & 202

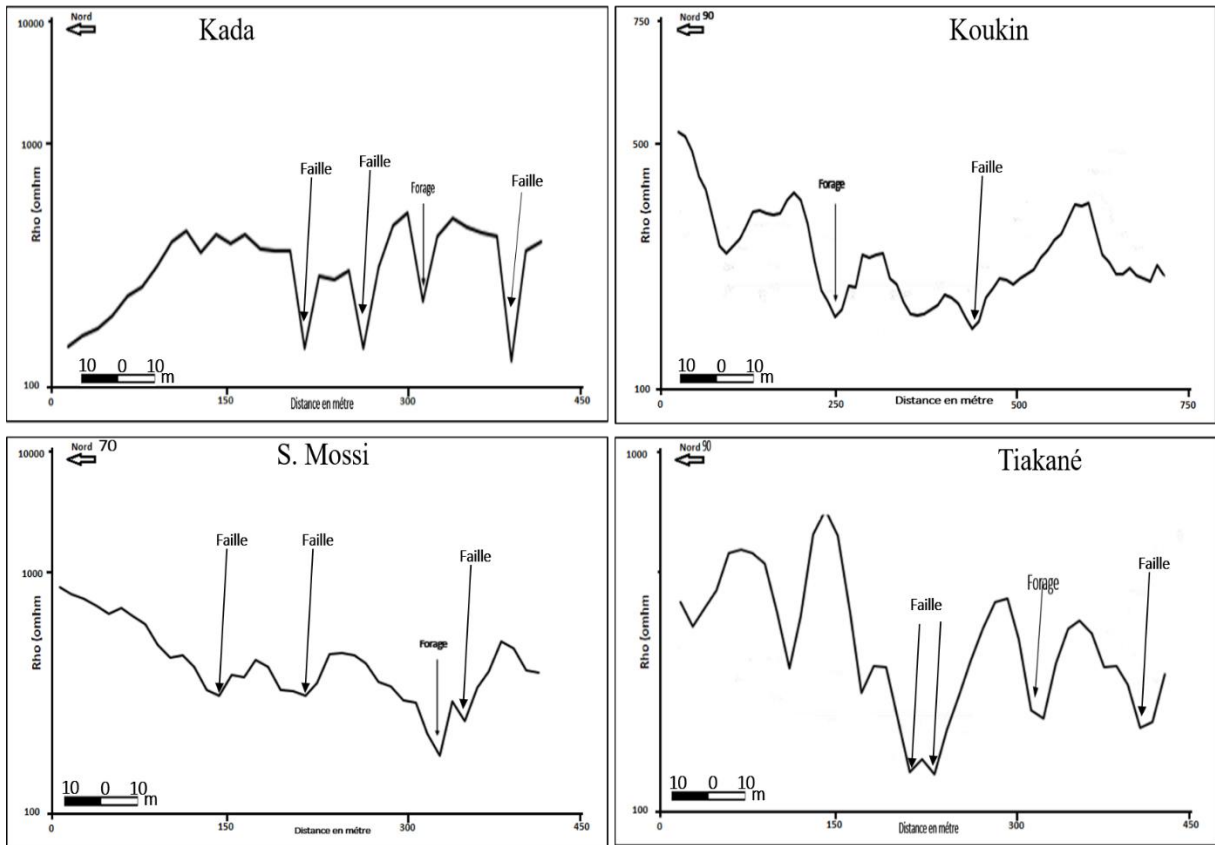


Figure 57: Profils de traîné L1+00

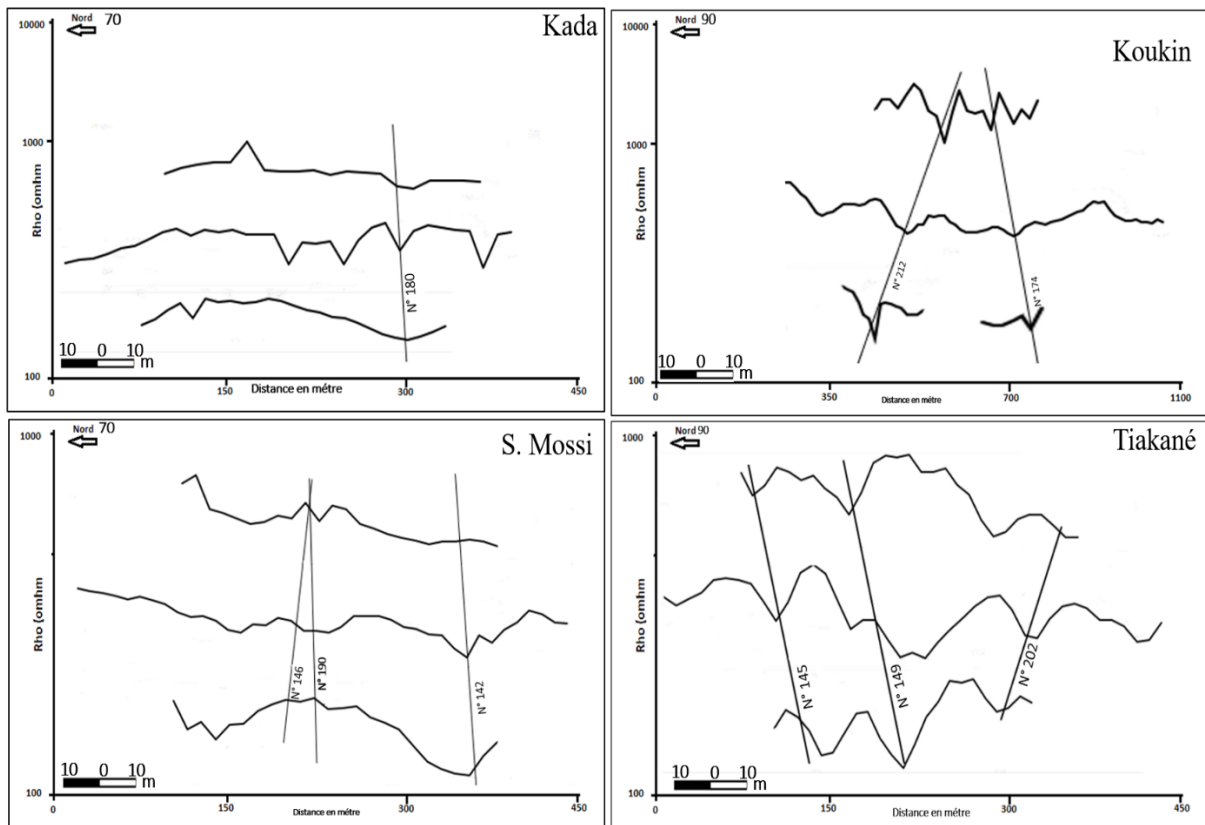


Figure 58: Profils parallèles de traîné

IV.2.2.2 Sondage électrique

Le sondage doit compléter et expliquer les données de traîné. L'objectif est de voir comment varie verticalement la résistivité apparente, en un point donné à la surface. Ce qui permet de voir que l'allure des courbes de traîné concorde bien avec la fracture et les épaisseurs. Par contre, le nombre de couches ne concordent pour les deux méthodes comme la montre la figure 59 et la figure 60. Les profils aussi sont superposés aux logs de forage pour une meilleure appréciation.

- **Allure en fond de bateau de type H**

Les sondages effectués dans le cadre de cette étude donnent des courbes à deux et trois terrains (le plus observé) avec différentes allures. Une allure en fond de bateau de type H, ce type de courbe ne donne aucun indicateur permettant de dégager la présence de fracture. C'est le cas de SE3 Koukin de la figure 59 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) qui caractérise les régions à cuirasse latéritique superficielle et se traduit par une remontée à 45° au niveau de substratum sain. Elle correspond à la superposition de trois couches. La première couche correspond au recouvrement superficiel d'épaisseur ou le niveau sec de surface variant de 0 m à 6.7 m et de résistivité comprise entre 90 $\Omega.m$ et 1000 $\Omega.m$; elle est constituée des carapaces latéritiques. La seconde couche correspond à l'altération argileuse d'épaisseur 37.6 m de résistivité 67.4 $\Omega.m$, elle constitue la formation conductrice. La dernière couche correspond au socle résistant de profondeur 50 m à 70 m et de résistivité supérieure à 3000 $\Omega.m$, la roche peu fissurée caractérise les régions à cuirasses latéritiques et ne donne aucun indicateur permettant de dégager la présence de fracture, cette portion est montante au niveau de la courbe. Dans bien des cas, les résistivités de la cuirasse baissent par rapport aux arènes par argiles bariolées. Mais si on a affaire à deux nappes étagées formées au niveau de la cuirasse noyée et des arènes, la courbe devient une courbe à cinq couches. Les enceintes conductrices pointent le fond de bateau de la courbe. Elles sont composées de carrières argileuses fluentes et de roche fissurée qui lorsqu'elle est peu épaisse passe inaperçue sur la courbe de sondage. C'est pourquoi les vraies résistivités sont difficiles à calculer surtout quand elles sont peu puissantes. Sur les roches granites, une forte humidité permanente des altérites argileuses les rend très conductrices quand bien même elles ne contiennent pas d'eau exploitable. Alors on obtient des résistivités très basent qui malgré les résistivités élevées de la cuirasse donne un fond de bateau. On a une bonne corrélation entre la courbe et les données de terrain sur des schistes que sur les granites ou les résistivités sont généralement élevées. Cela permet de dire qu'en zone de schiste quel que soit

le type de sondage, le taux de succès est relativement élevé par rapport à celui en zone de granite. Les épaisseurs d'altérations de l'ordre de 20 m à 30 m paraissent les plus favorables, quelle que soit la nature de la formation géologique (Bordes, 1987; Dieng et al., 2004; Savadogo, 1984).

- **Allure à une seule branche montante de type A**

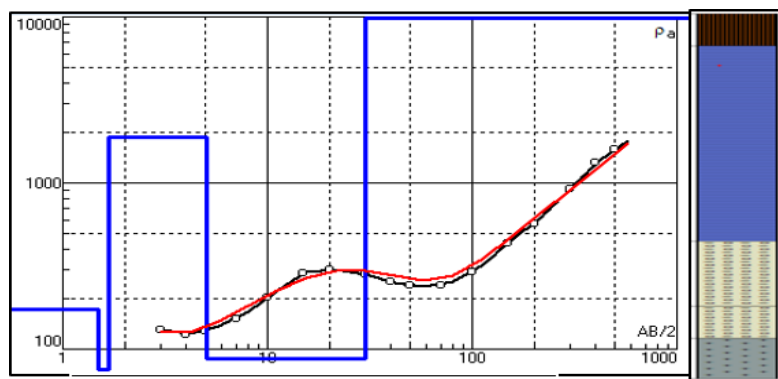
Une allure à une seule branche montante de type A (SE1 et SE2 à Koukin figure 59 et SE2 Kada figure 60) correspondant à deux couches à une petite pente. La première couche correspond à un horizon d'arènes conductrices avec des variations de la teneur en argile, latéritique ou en teneur en eau. La deuxième couche correspond un substratum résistant correspondant à l'horizon altéré ou fissuré, et fait ressortir une forte altération surtout dans le domaine schisteux qui est plus conductrice. Ce type de sondage est lié à l'influence d'une mégafracture. Il faut rappeler aussi qu'une anomalie conductrice peut produire des forages négatifs. L'étude des couches de terrains montre une incohérence surtout au niveau du forage SE1 de Koukin figure 59. La coupe de forage donne 5 couches de terrains alors que le profil de sondage donne 3 couches de terrains sachant que l'allure des courbes de sondages est à l'origine de la différence observée au niveau du nombre de couches. Cela peut s'expliquer du fait qu'au niveau du sondage le changement de pente ne correspond pas à des changements de terrains. Ils correspondent plutôt à des variations de la teneur en eau dans la même couche. Par ailleurs deux couches sur le log de forage sont identifiées comme étant une seule couche au niveau du sondage. Mais en faisant la somme des épaisseurs des terrains en question sur le log, on obtient l'épaisseur de celui identifié avec le sondage. Ces résultats sont semblables à ceux de Kouakou et al., (2016) et Njueya et al., (2016) qui l'explique par le fait qu'il possède des résistivités presque identiques ; ce qui ne facilite pas l'observation sur la courbe de sondage d'un changement de pente qui marquerait un changement de terrain. En effet, la seule branche montante peut être productive si l'alimentation est bonne comme dans le cas de granites grossiers tectonisés ou de zones de bas-fonds.

- **Allure en cloche puis en fond de bateau de type KH**

Une allure en cloche puis en fond de bateau de type KH (SE1 Kada figure 60) correspondant à quatre couches. La première couche correspond au terrain superficiel avec des résistivités de 172 Ω .m et d'épaisseur faible de 1,5 m. La deuxième couche correspond aux arènes conductrices qui sont scindées en 2 couches, et enfin, la roche saine (Savadogo, 1984). Un autre cas de figure présentant une allure similaire est celui où la cuirasse ferrugineuse épaisse est

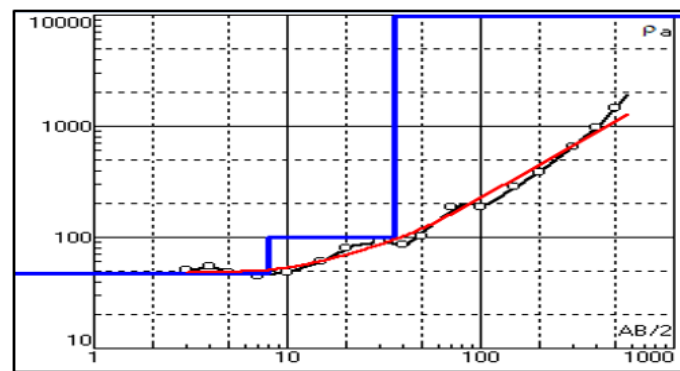
démantelée (remaniement par une termitière, exploitation en carrière). Il faut noter aussi que sur le SE2 à Kada figure 60, la cuirasse latéritique est compacte et influence la courbe du fait que par une translation verticale sur toute la courbe. En effet, l'augmentation de l'épaisseur des altérites entraîne une baisse de la résistivité cela s'observe lorsque le substratum est recouvert par de l'argile très conductrice. Dans ce cas, la courbe de sondage se présente en courbes de 3 terrains ceux qui donnent de faibles valeurs aux traînés alors que l'épaisseur de recouvrement est faible. Les valeurs de résistivités sont plus basses sur les schistes, et les roches volcano-sédimentaire que sur les granites et les migmatites ce qui est dû à la teneur en argile. Au niveau des granites migmatites, on observe des micros fractures, qui favorisent une plus grande extension de la zone d'influence. En effet, lorsque le profil recoupe la fracture à valider c'est l'intersection qui est le plus souvent connue avec précision, la direction de l'axe ne l'est que rarement, car elle est déterminée de façon interprétative. De manière générale le taux d'échec des forages dans le sous-bassin de la Sissili peut être attribué aux méthodes de prospections géophysiques ou à plusieurs phénomènes liés au sous-sol pendant l'implantation. Ces échecs sont liés à une anomalie conductrice due à un phénomène superficiel. En effet, certaines anomalies peuvent être dues aux variations de résistivités du recouvrement superficiel sans lien avec la fracturation. C'est le cas de la présence d'épaisse couche d'argile gorgée d'eau dans les altérites de faible résistivité qui conclut à une roche fissurée. Pour pallier à cela Kouakou et al., (2016) propose des profils de résistivités avec un dispositif carré surtout en milieu cristallin. D'autres auteurs définissent ces échecs du fait que la fracture peut être inclinée suivant le sens de l'écoulement d'où l'eau s'accumule en profondeur. La fracture définie par le sondage électrique peut être aussi stérile ou minéralisée à très faible teneur en eau. Ces auteurs accordent une priorité en prospection hydrogéologie de socle cristallin et cristallophyllien, aux courbes de sondages en fond de bateau. Cette différence s'explique par le fait que, le choix des sites ne tient pas compte de la combinaison des indicateurs de types de formes d'anomalies et des types de sondages.

Mais la question à vouloir continuer cette méthode demeure. La technique de sondage (1D) présente aussi des intérêts et limites bien connues. Sa mise en œuvre suit celui du profil de traîné selon la discontinuité à recouper sur la perpendiculaire. Mais la difficulté majeure résiste dans la présence de verdure et de zone cultivable, qui exprime mal la géométrie de l'aquifère (1D) qui a tendance à regrouper les couches du log en une couche unique qui sous-estime l'épaisseur comme le cas du sondage de Koukin.



en cloche puis en fond de bateau

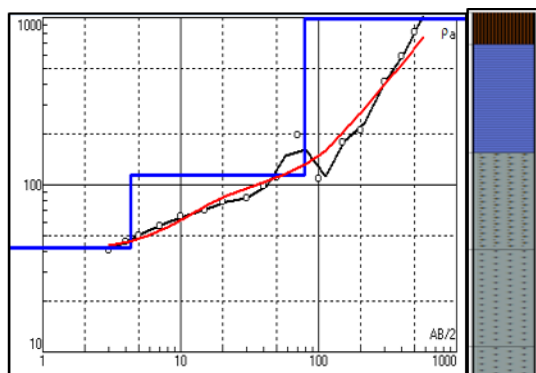
Ro 172 6.63 1897 29.4 94031
 Ep 1.5 0.183 3.33 25.3
 Prof0 1.5 1.68 5.01 30.31



branche montante

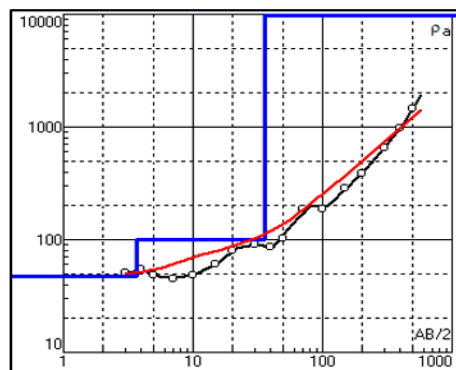
Ro 47.7 101 56485
 Ep 8.03 27.8
 Prof0 8.03 35.83

Figure 59: Profils de sondage électrique de la Commune de Thyou: village de Koukin



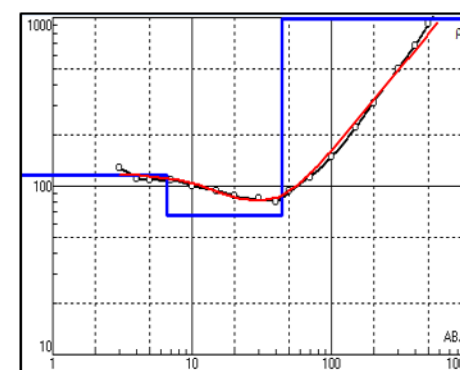
branche montante

Ro 42.1 115 54304
 Ep 4 74.4
 Prof0 4.34 78.74



branche montante

Ro 47.7 101 56485
 Ep 3.67 32.2
 Prof0 3.67 35.87



fond de bateau

Ro 117 67.4 82632
 Ep 6.57 37.6
 Prof0 6.57 44.17

Figure 60: Profils de sondage électrique de la Commune de Sapouy : village de Kada

IV.2.2.3 Tomographie de résistivité électrique

Les résultats de l'inversion de la TRE appliquée dans les 4 sites sont globalement effectués tout en passant par des forages existants. Les résultats de l'inversion sont représentés par la figure 61. Il se présente une partie blanche comme sur le profil de Kada. Ces différentes parties correspondent en réalité aux valeurs aberrantes ou aux électrodes qui ont été supprimées. Les sections traduisent les résistivités en couleur, ici on a de faibles résistivités au centre des sections de couleur bleue (9,21 Ω .m à 228 Ω .m) ; des résistivités de couleur verte (228 Ω .m à 871 Ω .m) qui servent de frontière entre les trois couches, et des résistivités très élevées de couleur rouge - orange (871 Ω .m à 1000 Ω .m) qui caractérisent le socle sain. La limite de résistivité choisie par le modèle est de 228 Ω .m pour la zone altérée et la zone fissurée ; et 871 Ω .m comme limite zone fissurée et la roche saine. Par ailleurs dans le but de matérialiser les fractures répertoriées au niveau des profils électriques, on a superposé les profils aux résultats d'inversion issus de la tomographie de résistivité électrique (Annexe 4, figure 6).

La section de Kada a permis d'obtenir après la reclassification des résistivités un profil qui présente trois couches continues correspondant à différentes couches géologiques du sous-sol (la saprolite, la zone fissurée et la roche saine) avec des gammes de résistivité préalable qui varient de 16.2 Ω .m à 36 258 Ω .m. Dans la suite, la coupe lithologique a été superposée à la section. Il est constaté que la limite géophysique est environ 15 m en dessous de celle indiquée par lithologs de forage. Par ailleurs, la section de résistivité montre trois corps résistants dans la saprolite. Deux de ces trois corps affleurent tandis que le 3^{ème} est situé dans l'axe central à environ 12 m de profondeur. Les deux corps résistants en surface sont de la cuirasse latéritique. Elle est suivie par le compartiment conducteur caractérisé la couche des altérites. Elle est caractérisée par une tendance argileuse. Au centre de la section, on peut noter la présence d'une couche entre la profondeur 10 et 18 sur le lithologs de forage correspondant à la profondeur de 320 m à 312 m sur une longueur de 80 m.

La section de Koukin représente des couches continues correspondantes à différentes couches géologiques du sous-sol avec des gammes de résistivité qui varient de 7,42 Ω .m à 72 000 Ω .m. Au niveau des couches identifiées par l'imagerie, on a la couche superficielle à un seul endroit avec des résistivités allant de 301 Ω .m à 400 Ω .m. L'épaisseur de cette couche est de 9 m correspondant à la profondeur 345 m. Elle est caractérisée par une résistivité allant de 7,42 Ω .m à 228 Ω .m qui s'étend jusqu'à une profondeur 27 m correspondant à la profondeur 333 m sur la section. La couche est caractérisée par un horizon d'arènes conductrices avec des variations

de la couche d'argile avoisinante une moyenne de 100 Ω .m. L'épaisseur des altérites observée est globalement supérieure à 40 m sur l'ensemble de la section.

La section de Tiakané représente des gammes de résistivité qui varient de 9,60 Ω .m à 93 000 Ω .m. Par ailleurs, la section de résistivités montre un corps résistant (résistivité supérieure à 871 Ω .m) dans la saprolite. Ce corps résistant qui affleure en surface est à la cuirasse latéritique à environ 25 m de profondeur sur une distance de 20 m, cela a été constaté sur le terrain. Les trois formations décrites par le modèle conceptuel classique en zone de socle sont présentes.

La section de Sissili Mossi illustre des gammes de résistivité qui varient de 11,68 Ω .m à 72 000 Ω .m. L'analyse de la section montre un corps résistant (résistivités supérieures à 871 Ω .m par endroit) qui s'étend sur quasiment toute la surface. Ce corps résistant à une épaisseur qui varie entre 4 et 10 m. En dessous de celui-ci on observe un compartiment conducteur dont la résistivité oscille de 21,2 à 228 Ω .m avec une épaisseur d'environ 20 m. On voit aussi sur l'imagerie de la section que la roche saine est traversée par un couloir conducteur (épais d'une largeur d'environ 20 m).

Les résultats de l'inversion des données de la tomographie de Kada, Koukin, Tiakané, et Sissili Mossi donnent des valeurs des écarts d'erreurs RMS correspondants de 2,7% ; 9,3% ; 7,9% ; 4,2%. Ces faibles valeurs de RMS s'expliquent par le fait que les données aberrantes sont éliminées au niveau du prétraitement donc le filtrage aboutit à une section de données lissées. Selon Lghoul et al., (2012) la valeur de tolérances de RMS doit être inférieure à 20% et tient compte des connaissances a priori pour choisir parmi le modèle le plus réaliste à retenir. A cela il soutient que les valeurs de RMS supérieur à 20 % peut expliquer la présence de soufre or tel n'est pas le cas dans ma zone d'étude. On observe un décalage entre quant à la profondeur réelle de la base ; soit par la difficulté de choisir un seuil de résistivité électrique pour délimiter la base de la couche fissurée. Cela peut s'expliquer par la théorie de la percolation. En effet, la réduction de la densité des fissures au bas emmène l'arrêt de la percolation. Il devient alors difficile de distinguer les résistivités électriques de la base de la couche fissurée et celles de la roche saine (Soro, 2017). La présence de roche au centre du dispositif toujours dans la section de Kada se caractérise par une résistivité comprise entre 228 Ω .m et 400 Ω .m, peut représenter la présence de roche volcano sédimentaire. Celui de la couche superficielle à un seul endroit avec des résistivités allant de 301 Ω .m à 400 Ω .m de Koukin. Ces résistivités dans ces zones sont décrites comme étant une zone probable d'apport de contamination anthropique issu de la surface. En effet l'observation sur le terrain à ses endroits montre des zones de cultures autour du forage. On peut soupçonner que le mouvement dans ces formations s'accroît avec la profondeur et s'agrandit, raison pour laquelle elles ne s'aperçoivent pas en surface. Lghoul et

al., (2012) explique cette forte résistivité qui sépare la couche conductrice par une profondeur donnée comme étant un indicateur de pollution de par sa position au centre du modèle qui représente un polluant anthropique. Faillat et Drogue, (1993) le décrit à leurs tours comme étant la présence de granites altérés. En effet, comme le montre la carte des linéaments, il existe beaucoup de zones d'intersection ou de croisement de ces linéaments. La présence de la cuirasse latéritique dans ces zones favorise le ruissellement vers les zones de recirculation des eaux qui devient une zone préférentielle de recharge. Les eaux ruisselées s'y infiltrent d'où une recharge localisée de la nappe. L'incohérence observée sur la différence des nombres de couches à Koukin d'après le log de forage et du sondage, peut s'expliquer du fait qu'au niveau des résultats d'inversion, le changement de résistivité d'une couche à l'autre ne correspond pas forcément au changement de terrains, mais plutôt à des variations de la teneur en eau dans la même couche. Mais en faisant la somme des épaisseurs des couches de terrains sur le log en question, on obtient l'épaisseur de celui identifié la section. Au niveau de la section de Sissili, l'anomalie qui traverse la roche saine peut signifier la présence d'une faille tectonique. La profondeur d'investigation ne permet pas avec certitude de connaître l'épaisseur ni la profondeur de cette couche. On peut en conclure que mis à part à la position du forage, au niveau des images satellitaires, il est remarqué que cela correspond à l'approfondissement de la couche fissurée en cet endroit. Ce résultat obtenu à l'issue de ce travail peut offrir un bon compromis entre la télédétection et la TRE. Ce résultat peut être comparé à ce de Soro, 2017 à Sanon. Sur ces résultats, il en ressort qu'aucune trace de fractures tectoniques n'est visible au niveau de la section. La présente démarche si elle est avérée, serait plus fiable pour augmenter la probabilité de succès lors des travaux d'implantation des forages en zone de socle cristallin en (2D). Connaissant les caractéristiques et la géométrie, le forage sera idéalement implanté dans le lit de la fracture. Pour ce profil on ne peut pas affirmer que la méthode (2D) appliquée à Sissili est un moyen de validation des linéaments tectoniques comme l'affirme Akokponhoué et al., (2019) au Bénin dans un même environnement de socle qui a des résultats similaires à cette section. De façon générale l'observation des résultats des inversions indique trois couches facilement identifiables en zone de socle : la saprolite qui peut être scindée en deux sous-couches qui sont la sous-couche allotérite et la sous-couche isaltérite, la couche fissurée et le socle sain. La résistivité varie suivant ces différentes couches et les plus fortes résistivités renvoient à la roche saine ouverte dans un endroit dans la section de Sissili Mossi. La tomographie montre que les altérites, les épaisseurs de recouvrement, etc. ne sont pas les mêmes suivant les zones. Les épaisseurs d'altérations au niveau des lithologs montrent une épaisseur allant de 17 à 20 m et ; le modèle géophysique donne des épaisseurs de variant de 17 à 40 m.,

alors que Courtois et al., (2010) l'estime entre 20 m et 31m au Burkina Soro, (2017) l'estime entre 13 m à 21 m à Sanon. Cette différence certains auteurs l'expliquent par le fait que lors de la foration les lithologs ne sont pas bien représentés d'où une incertitude, ou alors les valeurs affectées aux différentes résistivités au niveau de la zone fissurée ne sont pas représentatives. En d'autres termes, les buttes cuirassées ne coïncident pas avec les lignes de partage des eaux souterraines. Ces résultats sont semblables aux profils Courtois et al., (2010); Dewandel, (2019); Koïta et al., (2010); Savadogo, (1984); Soro, (2017) décrivent ces dernières années qui soutient que les paramètres hydrauliques sont en relation avec le processus d'altération. Cela se justifie par le fait que la plupart des forages sont implantés à une centaine de mètres donc peuvent capter des fractures secondaires alors que le modèle conception décrite par Lachassagne et Wyns, (2005) affirme que les linéaments sont représentés par les fractures tectoniques. Soro, (2017) déclare que la fracturation tectonique ne peut pas être évoquée en tant que concept génétique pour expliquer l'origine des fissures secondaires dans les roches de socle. Ces profils de tomographies peuvent aussi révéler de présence de polluant avec des gammes de résistivités variante entre 1 Ω .m à 5 Ω .m dans la zone superficielle, entre 20 Ω .m à 90 Ω .m dans la zone altérée, et supérieure à 90 Ω .m dans la roche saine selon Lghoul et al., (2012). Pour les sections de Kada, Koukin et Tiakané, on ne peut pas affirmer que la méthode (2D) est un moyen de validation des linéaments tectoniques comme l'affirme Akokponhoué et al., (2019) au Bénin dans un même environnement de socle, mais ces résultats sont semblable à ce de Soro, (2017) dans le site de Sanon au Burkina. On peut en conclure que mis à part la fracture où se trouve le forage, il est identifié un couloir où se caractérise une couche plus résistante que cette des altérites de résistivité comprise entre 228 Ω .m à 871 Ω .m ou d'autres fractures peuvent être visible par un profil de traîné et peut être plus productive et visible sur les images satellitaires. En ce sens, il est procédé la superposition des profils de trainé et ceux de la tomographie. Il en ressort que les sections de Kada et Sissili Mossi ont 3 fractures, la section de Koukin présente 1 fracture, et pour Tiakané on a 2 fractures. Ces fractures dans la zone altérée peuvent être expliquées par l'existence de fractures anciennes, ou par le fait que la variation de logs occasionne une altération préférentielle mais on peut les considérer comme visibles que de par leurs résistivités. On constate une réduction ou chute de la résistive à l'emplacement des fractures entre deux couches correspondant le plus souvent à des zones dominées par de l'argile engendre très souvent de fortes anomalies Alle, (2019). Cela réfute l'idée à savoir pour les implantations de forages les fractures du profil de traîné doivent être profondes. Mais la production de ces fractures dépend de l'épaisseur de la zone altérée peu argileuse et de la résistivité supérieure à la moyenne des valeurs rencontrées dans le sous-bassin. Cependant, il

serait intéressant de réaliser des forages dans ces différentes zones pour reconnaître cette affirmation, cela confirmera les cibles montrées par la TRE. Au niveau de l'emplacement du forage existant sur les sections, on remarque une concordance entre la limite de la zone altérée et a zone fissurée les logs de forages.

Mais la question à vouloir continuer cette méthode demeure. Le profil de tomographie (2D) confirme ceux des profils (1D) et va au-delà de leurs limites, il caractérise parfaitement les structures géologiques en vue de caractériser la géométrie. Mais cependant, les TRE présentent des limites par exemple la difficulté d'identifier les fractures en zone altérée ; selon le dispositif Wenner, la limite de la profondeur de la roche saine de peut pas être identifier avec exactitude comme le montre le profil de Sissili Mossi, Koukin et Kada. Certains auteurs comme Alle, (2019) affirment qu'à plus de 50 mètres avec le Wenner, la base de la roche saine n'est pas bien identifiée dès que la zone altérée est argileuse, alors que le dipole-dipole est plus approprié pour les structures profondes.

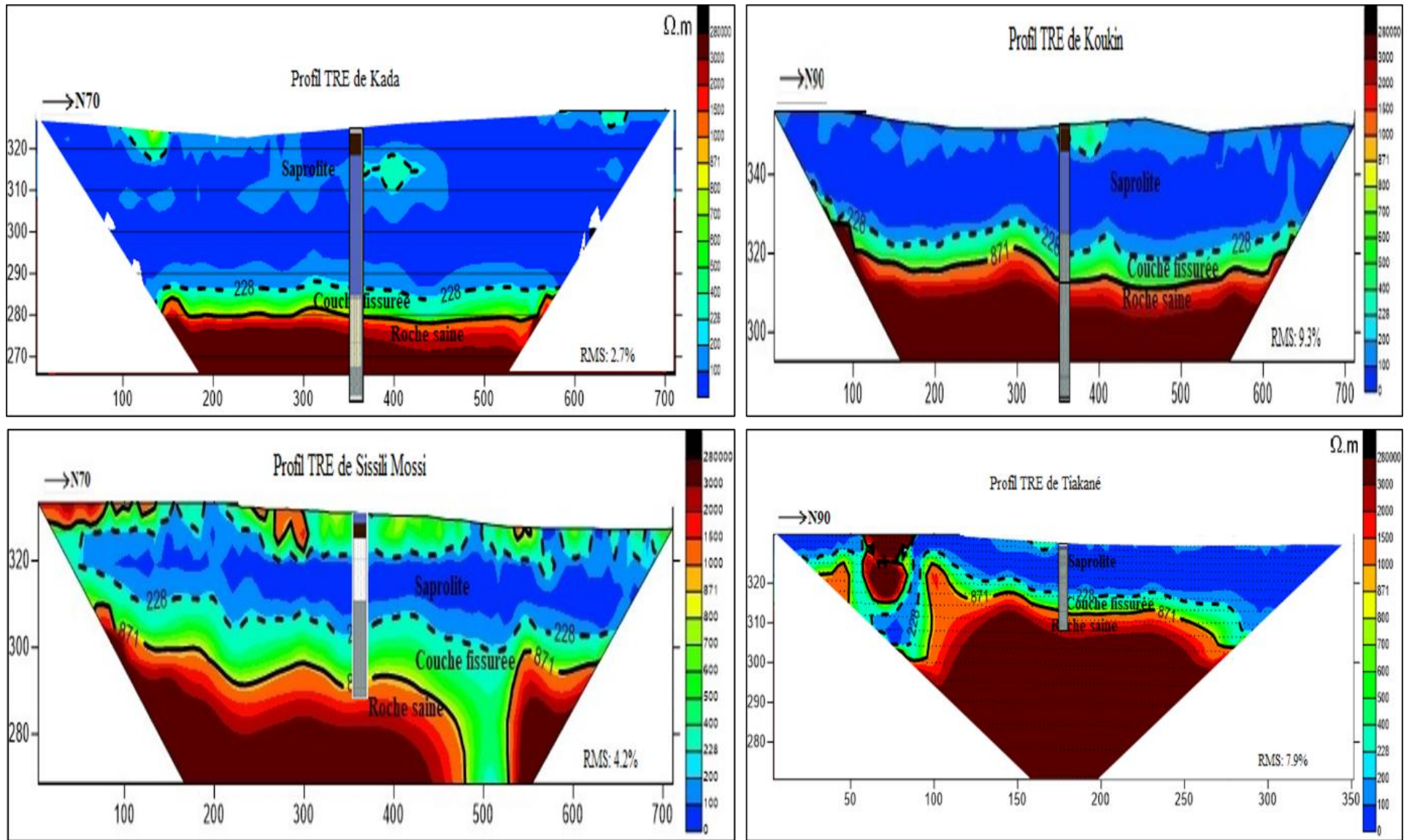


Figure 61: Panneau des profils de Trainé de Résistivité Electrique (TRE)

IV.3 CONCLUSION PARTIELLE

L'avènement des images satellitaires de nos jours constitue un puissant outil pour la prospection des eaux souterraines. Le traitement et l'analyse d'images satellitaires de Landsat a permis de contribuer à cartographier les linéaments dans notre sous-bassin. Le sous-bassin de la Sissili apparaît comme étant une zone très favorable pour l'implantation des forages. Selon la méthode utilisée, les résultats montrent des directions préférentielles de fracture N15°, N60° et N120°. Les conclusions de la prospection géophysique par le traîné montre des anomalies de forme U, V, et K. les profils parallèles donnent des directions direction N° 156 N°180 à Kada, N°146 N°190 N°142 à Sissili Mossi, N°212 N°174 à Koukin, N°145 N°149 N°202 à Tiakané. Les sondages donnent trois formes A, H et KH avec de différentes productivités. Les dissemblances au niveau des couches et épaisseurs sont les causes probables de nombreux échecs pendant l'implantation des forages. Les conclusions des logs de forage viennent confirmer celles données par les sondages géophysiques. Cela a permis à travers le traîné de comprendre et justifier les échecs des forages à travers l'altération et de la direction de la fracture. Cela a permis aussi à travers la TRE d'avoir 4 panneaux électriques. On observe aussi un approfondissement de la zone fracturée sur un profondeurs de 60m et une moyenne de largeur de 40m à Sissili Mossi. Cette prospection a permis également de mettre en évidence l'existence de failles et de couloirs fracturés qui constitueraient des drains privilégiés vers la nappe d'eau souterraine. On a aussi un profil de 3 couches sur les migmatites et les granites : la saprolite, la couche fissurée et la roche saine. Ce profil d'altération s'allie aux modèles présentés ces dernières années qui maintiennent que la conductivité hydraulique des milieux de socle est due à l'altération et non aux fractures tectoniques. Dans la suite de ses travaux, ces résultats seront couplés aux données hydrodynamiques, pour une modélisation numérique qui sera abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V : MODELISATION NUMERIQUE HYDROGEOLOGIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT DANS LES EAUX SOUTERRAINES

CHAPITRE V : MODELISATION NUMERIQUE HYDROGEOLOGIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT DANS LES EAUX SOUTERRAINES

V.1 DEMARCHE, INTERET ET OBJECTIF DE CETTE MODELISATION NUMERIQUE

Dans un milieu de socle, l'approche retenue pour la modélisation des écoulements est souvent contrainte par la géométrie et les propriétés hydrauliques des milieux fracturés qui sont difficiles à estimer à l'échelle d'étude du milieu fracturé. Ainsi beaucoup de chercheurs et scientifiques se sont intéressés à la caractérisation de l'aquifère, à la modélisation et à la prédiction de l'évolution spatiotemporelle de la contamination des eaux souterraines (Boutera et al., 2018; Carrière, 2013; Cesar, 2012; Fleurant, 2016; Ghoraba et al., 2013; Goderniaux et al., 2011; Hill et al., 2000; Jin, 2015; Koïta et al., 2010; Lghoul et al., 2014; Orban et al., 2011; Philippe, 2011; Soro, 2017). Dans le chapitre précédent, on a suggéré que la géophysique reste un atout majeur pour une étude de prédiction de polluant.

L'importance de l'eau souterraine au niveau du sous-bassin de la Sissili représente un atout majeur en termes d'eau de boisson pour les populations rurales, étant donné que les eaux de surface ne sont pas pérennes en plus de leur qualité impure. Ce qui pousse les populations à s'approvisionner à travers les eaux souterraines pour des besoins domestiques, pour l'irrigation et les besoins industriels. Le constat fait est que 33,5% des forages sont soumis à une pollution ponctuelle, dont certains abandonnés par la population. Ce constat impacte le taux d'accès fixé à 80% en 2015 qui est à la baisse dans la région. De nombreux problèmes sont à la base de la non-maîtrise des ressources en eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Il s'agit de la maîtrise des capacités de stockage, la maîtrise des potentialités et des systèmes des aquifères, et la maîtrise de la qualité de l'eau à l'échelle des sous-bassins. Il se pose alors la question de comment d'appréhender le devenir des polluants dans ce type de milieu ? Comment définir des périmètres de protection de la ressource en eau souterraine dans ce type de milieu ?

Pour répondre à ces préoccupations, il sera proposé une simulation du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère. Cela permettra de voir le processus hydrique du transport du polluant, de l'évolution temporelle du contaminant et son devenir dans le sous-bassin de la Sissili. Les modèles de transfert en milieu de socle sont mis en place essentiellement à travers la prospection hydrogéophysique. Ainsi cette combinaison de la géophysique et de la modélisation a été mise en œuvre par beaucoup d'auteurs pour les études de contamination ou transfert de polluants d'écrit à la section **I.1.3.2.**

L'objectif de la modélisation dans un premier temps vise à amender les hypothèses issues des travaux de terrain pour proposer un modèle conceptuel hydrogéologique qui représentera le comportement de l'aquifère en reproduisant l'écoulement souterrain observé dans la zone d'étude. Ensuite dans un second temps à partir de ce modèle conceptuel, une reproduction de la pollution sera synthétisée pour voir le devenir de ce polluant à partir des données expérimentées. Il n'est pas défini que le calibrage sera fait avec exactitude vu les données, mais il saura reproduire les grandes tendances. La fiabilité du modèle numérique dépend de son aptitude à reproduire avec certitude les conditions exactes.

Spécifiquement l'objectif visé est de simuler si les modèles proposés dans les chapitres antérieurs acceptent d'appréhender la géométrie en s'appuyant sur les résultats de la géophysique pour la mise en œuvre d'un modèle d'écoulement et de transfert de polluant en régime permanent. Cependant, vu l'accroissement de la population, les conditions de changement climatique, l'occupation des terres qui réduit les zones d'infiltration, etc. il serait convenable de reproduire la simulation en régime transitoire.

Cette synthèse de l'écoulement contribue à la compréhension du système des écoulements souterrains. Elle permettra d'apprécier l'impact ou de définir les mesures de sauvegarde ou de protection les plus pertinentes en cas de pollution. Ce modèle constituera un outil de gestion et de planification de la ressource en eau dans le sous-bassin de la Sissili.

Le présent chapitre porte sur la mise en œuvre d'un modèle d'écoulement et de transport de polluant. Les résultats issus de cette simulation, permettra d'apporter des éléments de réponse relatifs au choix de future implantation. Dans le chapitre **I.1.3** du document, il est présenté et détailler la démarche : les différentes approches existantes, le choix du modèle numérique d'écoulement et de transfert, les difficultés ou contraintes rencontrées en modélisation, les types de données et étapes de la modélisation, le transfert de fluide en milieu fracturé, et l'apport de la modélisation numérique hydrodynamique et de transport de polluant. Pour la suite, il est démonté ici l'intérêt de la présente modélisation, les données qui serviront de contraintes ou de paramètres de calage du modèle conceptuel, et enfin on passera à la validation des résultats obtenus par le modèle.

V.2 CONSTRUCTION DE MODELE HYDRODYNAMIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT

V.2.1 MATERIELS ET METHODES

V.2.1.1 Elaboration du modèle conceptuel hydrogéologique

Dans cette étude, la conceptualisation du modèle monocouche du point de vue hydrogéologique est choisie suivant la disponibilité des données. En ce sens l'aquifère des altérites est défini comme hétérogène, car étant une structure complexe du fait de la présence des discontinuités éventuellement. Donc il faut simplifier le système à spécifier sur la base des hypothèses complètes établies par un processus itératif selon la compréhension des caractéristiques à savoir le degré de fracturation, l'interconnectivité des discontinuités, l'attribution de la porosité et de la perméabilité. En effet, l'écoulement existe sur la base de la présence de fractures dans ces milieux scindant l'espace en une série de masses perméables, nommées matrices poreuses. Dans le souci de conceptualiser un modèle d'écoulement, la géométrie du domaine à modéliser est indispensable. L'objectif est de reproduire la piézométrie observée, mais cela passe par la connaissance des paramètres hydrodynamiques des formations du site, de la recharge, des prélèvements, et des valeurs de charges hydrauliques en certains endroits. Ce processus est guidé par le fait que les ouvrages de captage dans la zone d'étude canalisent les altérites et les zones fissurées. Elles enregistrent les mêmes périodes au niveau des piézomètres ce qui définit un état d'équilibre hydrostatique d'où l'approche du milieu continu équivalent. Cependant, ce type d'approche présente des limites du fait qu'il est parfois difficile d'apprécier l'évolution du transfert de pollution dans la matrice et la discontinuité, à cela s'ajoute l'évaluation fiable des paramètres hydrauliques dans certaines parties du domaine. Cela semble être le plus adapté pour la dissimulation numérique des écoulements. Cette démarche a longtemps été adoptée par divers auteurs Billaux et Dedecker, (2018) ; Cañamon Valera, (2006) ; Cheikh, (2016) ; Darcel, (2002) ; De Dreuzy, (2000) ; Delorme, (2015) ; Rafini, (2008) donne de meilleurs résultats.

V.2.1.2 les conditions aux limites

Les conditions frontières permettent de définir les interactions d'eau ou de soluté, entre la zone modélisée et les zones voisines ainsi qu'avec d'autres composantes du cycle de l'eau. Les écoulements d'eau dans les aquifères sont basés sur l'intégration numérique de l'équation de diffusivité qui régit les écoulements. Le fonctionnement d'un modèle numérique dépend de la définition des conditions aux limites. En effet, le modèle est conditionné par le fait que l'eau

rentre ou sort à ces limites. Les conditions aux limites pour le transfert d'eau peuvent être de deux types. En premier on a le potentiel imposé ou la condition de Dirichlet interne qui permet d'imposer que la charge soit équivalente de part et d'autre d'un nœud dédoublé dans deux sous-domaines. La charge au niveau du nœud sur lequel est imposée cette condition reste ainsi une variable du modèle. Et en dernier il y'a le type de flux imposé, cette condition est appliquée automatiquement à une valeur nulle sur la périphérie du modèle. Il est cependant possible d'imposer une valeur non nulle où cela est nécessaire.

Dans notre cas, le potentiel imposé est utilisé et les conditions de Dirichlet ont été résolues en supposant la carte piézométrie du sous-bassin à la limite de la zone à modéliser. Les croisements de point d'égal potentiel appelé isopièzes avec l'extrémité de la zone à modéliser, créent des nœuds qui est affectée à la charge de l'isopièze correspondant. Cette approche est établie sur la base d'information hydrogéologique peu disponible. Cependant, il faut rappeler que le sous-bassin est traversé par la rivière de la Sissili qui coule abondamment du fait de son relief et de la pluviométrie dans la zone. Cette rivière est symbolisée par une condition de type drain qui est tirée des MNT.

V.2.1.3 Paramètres hydrodynamiques

Sa détermination est très importante, car elle définit le comportement d'un milieu conducteur d'un fluide pour déterminer sa disposition à le renfermer, afin d'accepter son écoulement. La détermination de ses paramètres est multiple, soit au laboratoire, soit sur le terrain, ou au moment des essais de pompages. Dans notre cas d'étude, on cherche à déterminer la fonction de l'aquifère à retenir l'eau dans ce cas de figure c'est la conductivité hydraulique et le coefficient d'emménagement. Comme la simulation se fera en régime permanent, la conductivité hydraulique est le seul paramètre à une influence sur le champ de potentiel hydraulique et les écoulements du modèle, le coefficient d'emménagement n'est pas pertinent. Sa détermination est essentiellement faite à partir des essais de pompages et des études antérieures dans la zone d'étude. La difficulté ici est qu'on peut être en présence de forages qui captent à la fois les altérites et la couche fissurée, donc ces ouvrages ne sont pas pris en compte. En plus de cela, certains des ouvrages ont des essais de pompages de courtes durées, dans ce cas la conductivité hydraulique est supposée identique dans les différentes couches de l'aquifère. Une évaluation de la conductivité hydraulique de chaque couche est faite sur base de la formule $T = K * b$ avec T la transmissivité ; K la conductivité hydraulique et b l'épaisseur de l'aquifère considéré. Dans un premier temps, on aura à déterminer les valeurs de la conductivité en fonction des formations géologiques du sous-bassin selon les piézomètres et

forages existants en déterminant les transmissivités qui varient de $1,7.10^{-4}$ m²/s à $4,2.10^{-6}$ m²/s. Sachant que l'on a choisi un système monocouche, on s'intéressera plus aux valeurs équivalentes. En d'autres termes, pour une localité donnée où des valeurs de K existent pour chacun des compartiments altérés et fissurés, une valeur unique appelée conductivité hydraulique équivalente (K_{eq}) est affectée à l'aquifère monocouche de la localité suivant le principe de l'équation (11) :

$$K_{eq} = \frac{\sum_{i=0}^n K_i \cdot b_i}{b} \quad (11)$$

Avec K_i : conductivité hydraulique pour chaque couche aquifère (m/s), b_i : épaisseur réelle pour chaque couche aquifère (m), b : épaisseur totale de l'aquifère (m).

Ces résultats donnent des conductivités hydrauliques variant de $3,10^{-6}$ m/s à $1,10^{-7}$ m/s. Dans un second temps il s'agit d'affecter la valeur de conductivité et de la comparer avec ceux calculés, et à ceux définis par Dewandel, et al. (2006). Dans la zone à modéliser, nous avons identifié plusieurs zones de conductivité sur la base des ordres de grandeur.

V.2.1.4 Paramètres de l'écoulement : Recharge, prélèvements et apports de la rivière

Les flux d'entrées (recharge) et de sorties (prélèvement tout en supposant qu'il n'y a pas de perte par évaporation) représentent les paramètres dynamiques de l'écoulement comme étant les échanges entre le modèle et ses limites tout en contrôlant le bilan de masse. La modélisation étant en régime permanent, les entrées et les sorties du modèle sont toujours les mêmes. Le bilan de masse est équilibré.

V.2.1.4.1 Recharge

La connaissance des mécanismes de la recharge en eau est encore réduite en zone de socle au Burkina. C'est le flux d'eau qui réapprovisionne la nappe d'eau souterraine essentiellement faite verticalement et latéralement par percolation de l'eau de pluie à travers le sol, par percolation des cours d'eau et la recharge à partir d'autres fractures. Ce mécanisme de recharge est un élément clé dans tout modèle d'écoulement des eaux souterraines ou de transfert des polluants. La variabilité spatiale de la recharge peut ne pas être prise en compte pour la modélisation, mais est déterminante quant au transfert de solution et les zones de recharge importante sont plus exposées aux contaminations (Cesar, 2012). Dans la littérature, on note plusieurs techniques de détermination de la recharge : les techniques de bilan hydrique (Bilan de THORNTHWAITE), à partir de données hydrologiques de surface, les techniques basées sur des études de la zone saturée, utilisation des traceurs environnementaux, chimiques ou

isotopiques. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux méthodes de recharge et ont fait l'objet de plusieurs parutions. Selon la synthèse de ces méthodes de détermination de la recharge, on peut en citer l'analyse de la fluctuation piézométrique, l'estimation de porosité de drainage, l'estimation de la hausse piézométrique, etc. À cela s'ajoute un autre mécanisme de recharge par infiltration directe des eaux de pluie en certains lieux de notre sous-bassin. Et enfin, le mécanisme de recharge par alimentation indirecte, ou les eaux écoulées s'accumulant aux alentours des bassins topographiques locaux. Lghoul et al., (2012) le changement dans l'espace de l'évolution de la recharge est tant expressif qu'il est nécessaire de le prendre en considération dans n'importe quel modèle hydrogéologique. La recharge constitue le principal paramètre d'entrée comme flux dans le modèle. Elle est influencée par deux facteurs : les variations pluviométriques dans le temps et le changement de l'état de l'environnement dans le temps. Selon le rapport de suivi annuel piézométrique (2017) en zone de socle, la réaction de la nappe à la pluie se fait avec un retard d'environ 2 à 4 mois et des amplitudes variables entre 0,5 m et 4 m d'après le bilan d'eau (annexe 5). Le comportement de la nappe diffère d'une formation à l'autre et même au sein d'un même type de formation ou on note des comportements différents avec une pluviométrie déficitaire. Il faut noter aussi que la détérioration de l'environnement entraînant l'augmentation du ruissellement et la diminution de la recharge a des conséquences négatives sur la disponibilité en eau. Avant, seul le programme « Bilan d'eau » avait établi à l'échelle du bassin une cartographie des recharges des nappes sur la base des données pédologiques, géotechniques et des forages. L'infiltration dans le cadre de cette étude antérieure constitue une recharge de 30 à 90 mm/an soit 3 à 11 % de la pluviométrie annuelle (800-1000 mm). L'étude menée par Diallo (2014) dans la zone définit pour une pluviométrie annuelle dans la période 1971- 2007, une fluctuation entre 350 mm et 1150 mm avec une moyenne interannuelle de 726 mm. L'étude de l'EC-AEN, (2015) ressort que la pluie annuelle oscille entre 503,3 mm et 1297,1 mm avec une moyenne interannuelle de 953,9 mm qui se trouve dans l'intervalle fixé par le bilan d'eau 1993. Mais aussi au regard de divers mécanismes supposés, le décompte de la recharge est exceptionnellement délicat, car elle varie considérablement d'un endroit à l'autre dans la partie nord du bassin. La recharge des nappes semble être beaucoup plus homogène dans la partie sud et les estimations varient entre 2 et 10% de la pluviométrie annuelle, et à partir des études de modélisation pluie-débit cette valeur est estimée à 5 % (Milville, 1991; Ministère de l'Hydraulique, 2010; AEN, 2015) . Dans le cadre de cette étude, l'apport estimé correspond à 5% de la précipitation annuelle soit 0,00054 m/j.

V.2.1.4.2 Prélèvements

Les prélèvements des nappes peuvent se faire par exploitation par l'homme ; par écoulements souterrains latéraux ; et par évapotranspiration. Elles correspondent à la quantité d'eau prélevée pour l'alimentation en eau potable des populations, l'industrie, l'irrigation des cultures et l'abreuvement du bétail. Selon l'EPA, l'irrigation constitue 85% des activités menées par la population soit 46% de la demande en eau (AEN, 2010) et consomme une grande partie des ressources en eau à l'aide de pompe immergée de débit d'exploitation allant de 200 à 300 m³/j. Concernant les prélèvements pour l'AEP, seul l'ONEA possède de renseignements structurés dans la zone. Pour ce qui concerne les prélèvements réels ou supposés par les forages d'hydraulique villageoise, aucun dispositif ne permet à l'heure actuelle de les quantifier de manière raisonnable. Ces prélèvements dans des forages issus de campagnes d'hydraulique villageoise sont réalisés, soit au moyen de pompes à motricité humaine dont le débit d'exploitation minimal est compris entre 0,7 m³/h à 1 m³/h. Selon la base de données INOH 2012 sur l'EC-AEN, on saurait présumer sur une appréciation de 10 m³ en moyenne par jour, pour 13 000 forages équipés, plus de 169 mini-adductions d'eau potable et un taux d'accès à l'eau potable de 68%. Par ailleurs, il faut signaler qu'une partie de la population se ravitaille à partir des sources coutumières qui n'interceptent que la saprolite. La quantité d'eau souterraine exploitée par l'homme ne constitue qu'un faible pourcentage de la recharge des nappes. L'écoulement latéral souterrain et l'évapotranspiration sont donc les mécanismes prédominants.

V.2.1.4.3 Apports à travers la rivière Sissili

La zone d'étude est parcourue par la rivière Sissili (affluent du Nazinon) qui donne son nom à la province. Elle prend sa source dans la province du Boulkiemdé qui (flux entrant) et coule vers le sud-est vers le Ghana (flux sortant) en prenant une oblique vers le sud. Sa vitesse d'écoulement est estimée à 2,61 m/s en 2012, avec une densité de drainage de 0,74 km⁻¹. Il est représenté par une condition de type drain. Les seuls échanges possibles se font du drain vers la nappe, la quantité de flux par unité de surface échangée est régulée par la valeur de la conductance C (m²/s) du lit du cours d'eau. La valeur de la conductance en 1D est définie suivant l'équation (12) :

$$C = \frac{K_z}{b} \quad (12)$$

Avec : K_z : conductivité verticale (m/s) ; b : épaisseur mouillée séparant le lit du cours de la nappe (m).

V.2.1.5 Simulation numérique du modèle

Cela passe avant tout par la discrétisation spatiale. La solution de l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies nécessite le maillage du domaine discrétisé. La discrétisation s'appuie sur une période pour laquelle les données disponibles sont suffisamment précises et complètes. La sélection du pas de temps constitue une étape critique puisque les valeurs d'espace et de temps de discrétisation influencent fortement les résultats numériques. Compte tenu des irrégularités des données ; une discrétisation correspondante au pas de temps des données de prélèvements a été choisie, de recharge et de variation piézométrique.

Dans la description de modèle conceptuel, la simulation numérique se décompose en deux phases :

- La première phase de simulation est basée sur l'approche milieu continu équivalent et isotrope **1.1.3.1.2**.
- La seconde phase de la simulation est caractérisée par l'attribution des valeurs de conductivité hydraulique.

V.2.1.5.1 Simulation initiale

En rappel, l'élaboration du modèle sollicite un minimum de connaissances du terrain. Par processus itératif, cela rend simple le modèle en partant des renseignements de terrain. Tout part de la conceptualisation d'un modèle géologique du système et ensuite de faire une évaluation des estimations conçues à l'intérieur du modèle géologique. Elle se fera par la résolution de l'équation aux dérivées différentielles en milieu poreux isotrope et homogène, en régime permanent ou transitoire s'écrit suivant l'équation (13) :

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (13)$$

Avec K : conductivité hydraulique (m/s), h : la hauteur piézométrique (m), S_s : le coefficient d'emménagement spécifique, q : le terme source ou perte par unité de volume l/s, t : le temps (s),

S'il n'y a pas de variation de vitesse dans les trois directions, alors il n'y a pas de variation de masse de fluide par unité de volume. Si la hauteur piézométrique h ne varie pas en fonction du temps $\left(\frac{\partial h}{\partial t} = 0 \right)$ alors l'équation en régime permanent s'écrit suivant l'équation (14) :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (14)$$

Si on considère l'hypothèse contraire, l'équation en régime transitoire s'écrit suivant l'équation (15) :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (15)$$

En considérant l'épaisseur de l'aquifère infiniment petite par rapport à ses dimensions horizontales, on se ramène à un écoulement plan. L'équation s'écrit suivant l'équation (16) :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (16)$$

L'équation de diffusivité pour un écoulement plan en régime transitoire s'exprime de la suivante l'équation (17) :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (17)$$

Dans cette approche la prescription de code du logiciel Modflow utilisé dans le cas de cette présente étude résout la relation de diffusivité en utilisant l'approximation des différences finies. La discrétisation spatiale dans un système en mailles régulières aux milieux dont l'équation de diffusivité est déterminée et les conditions aux limites connues. Cela est fait sur la base de la dérivée centrée s'exprime suivant l'équation (18) et (19).

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} \quad (18)$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (19)$$

V.2.1.5.2 Calage du modèle

Le calibrage consiste à réduire l'intervalle ou l'écart entre les valeurs observées et les valeurs simulées en ajustant la conductivité hydraulique et la recharge au niveau des piézomètres qui jouent le rôle d'observateur. Pour ce faire, on utilise une première méthode qui consiste à utiliser des algorithmes qui permettent de minimiser une fonction objective de manière automatique. Cette méthode est également appelée modélisation inverse. Et l'autre méthode manuelle est dite de « l'essai erreur », il suffit d'octroyer manuellement des valeurs aux différents paramètres pour atteindre une calibration satisfaisante. Et ainsi, on tracera la droite de corrélation R^2 pour en apprécier l'intervalle. Ce qui permet de tester les trois paramètres qui peuvent exprimer cette différence d'essai erreur :

- L'erreur moyenne qui est la différence moyenne entre les charges mesurées (h_m) et calculées (h_c) s'écrit suivant l'équation (20) :

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)_i \quad (20)$$

- L'erreur moyenne absolue qui est la différence moyenne absolue calculée entre charges mesurées et charges calculées s'écrit suivant l'équation (21) :

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_m - h_c|_i \quad (21)$$

- L'erreur quadratique moyenne qui est la moyenne des carrés des différences entre charges mesurées et calculées s'écrit suivant l'équation (22) :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_c)_i^2} \quad (22)$$

Dans GMS le module permet cette comparaison est déjà intégré. En effet, après l'insertion de ces propriétés, on a la qualité des résultats sur GMS qui engendre un écart d'erreur qui est contrôlée par des observateurs situés sur des piézomètres souvent appelés « Target » en anglais qui est un estimateur d'incertitude. Quand l'écart d'erreur est en vert comme la montre la figure 62 la simulation est exprimée comme satisfaisante à l'emplacement du piézomètre où l'erreur a été chiffrée. Néanmoins, lorsqu'elle est incertaine, l'objectif apparaît en orange (erreur comprise entre 1 et 2 m) ou en rouge (erreur supérieure à 2 m). À cela s'ajoutent d'autres estimateurs d'erreur sur GSM à savoir l'erreur moyenne, l'erreur moyenne absolue et l'erreur

quadratique moyenne (Soro, 2017). Dans le cas de cette étude, le modèle sera calibré avec une erreur de 2 m et un niveau de confiance de 96%.

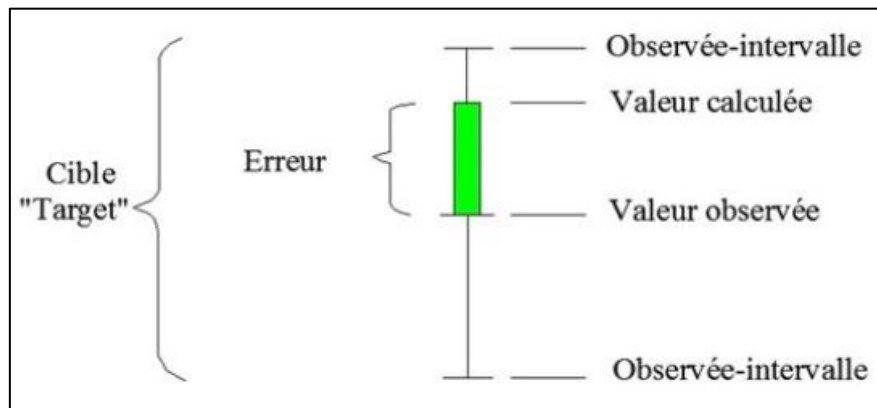


Figure 62:Schéma d'un observateur pour la détermination de l'écart d'erreur

V.2.1.5.3 Validation

Après le calage du modèle, nous procéderons à la phase de validation. Cette validation consistera avec les données de terrains de remplacer les données de calibrage par les données actuelles. Les données de validation du modèle sont les données de 2020. Les données d'entrées du modèle calibré en 2019 sont remplacées par celles de 2020 sauf les conductivités hydrauliques bien entendu, puisque ce sont-elles qui maintiennent le modèle en équilibre.

V.2.1.5.4 Tests de sensibilité

Le test de sensibilité vient identifier les variables et paramètres qui contrôlent la dynamique des écoulements souterrains sur la zone d'étude par l'effet de variation de la conductivité hydraulique et de la recharge sur les niveaux de la nappe. Les conductivités hydrauliques de toutes les parties ont été réduites à 10 % puis augmentées à 10 % de leurs valeurs calées, ce choix par ce que lors de la calibration, le moindre changement de valeur de conductivité, engendre une répercussion sur la piézométrie, contrairement à la recharge. La recharge a été réduite de 30 % puis augmentée de 30 % sur sa valeur initiale pour la zone de recharge (Tiono,2017). Le coefficient de sensibilité relative S_r est calculé pour comparer l'effet relatif des différents paramètres sur les résultats ciblés par l'analyse. Un S_r positif indique que le résultat augmente avec une augmentation du paramètre (et vice-versa) tandis qu'un S_r négatif indique que le résultat diminue lorsque la valeur du paramètre augmente. Plus le S_r augmente (en valeur absolue), plus le modèle est sensible au paramètre testé. L'équation (23) s'écrit :

$$S_r = \left[\frac{F' - F_{ref}}{F_{ref}} \right] / \left[\frac{X' - X_{ref}}{X_{ref}} \right] \quad (23)$$

Avec S_r =coefficient de sensibilité relative ; F' =résultat du modèle avec un paramètre X' ; F_{ref} =résultat de référence du modèle X ; X' =paramètre modifié ; X_{ref} =paramètre de référence.

V.2.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS DE LA SIMULATION

V.2.2.1 MODELE HYDRODYNAMIQUE

V.2.2.1.1 Géométrie et maillage

Le développement du modèle numérique commence par la discrétisation spatiale du domaine (figure 63). Dans le souci de conceptualiser un modèle d'écoulement, la géométrie est indispensable et l'objectif de reproduire la piézométrie observée. Il est écrit dans le chapitre I, les différents modèles et leurs applications. En effet, un système aquifère peut être représenté en modèle monocouche qui ne prend pas en compte la géométrie du système (Lghoul et al., 2012), ou en modèle multicouche qui est une réorientation de tous les constituants de l'écoulement au sein des couches (Soro, 2017). Pour se faire dans cette étude, une représentation monocouche sera adoptée compte tenu de la non-disponibilité de données du domaine à modéliser comme d'écrite à la section 1.1.3.1.2. Après le choix du système aquifère, on procède au maillage de celui-ci, cela consiste avant tout à choisir la zone à modéliser. Dans le cas de cette étude, elle a une superficie de 7 559 Km², mais malheureusement les limites du sous-bassin sont mal connues de plus, les données piézométriques ne sont pas suffisamment représentatives spatialement. Le choix du maillage a été guidé par l'étude conduite par Cesar, (2012). Généralement, les contours géologiques conditionnent la génération du maillage. Le temps de calcul peut être prolongé suite à la déformation des parties avec une géologie complexe. Les sources d'imprécision que l'on peut remarquer sont conditionnées par l'emplacement des observateurs ou du pompage dans la maille. Le maillage choisi sera suivi du test de sensibilité d'un modèle qui permet de tester l'influence de ces paramètres sur les résultats après simulation. Chaque grille couvrira une superficie de 150 m sur 150 m, avec un nombre de cellules de 225000 mailles de 150 m de côté. Pour chaque maille, il doit être renseigné pour les critères de géométrie l'altitude de sommet et de base des différentes couches. Ici c'est les modèles numériques de terrain (MNT) d'une résolution en X et Y de 30 m avec une résolution variable en Z qui sont utilisés et qui constituent à cet effet la surface topographique du modèle. Les écarts de certitudes de la précision de l'altimétrie entre les MNT et les levées

sont négligés dans cette étude du fait du relief topographique peu accentué et de la faible couverture ligneuse (Rusli et al., 2014). On affecte dans le modèle une nappe captive dans le but de faciliter le calage. La géométrie 3D des altérites, du toit de la couche fissurée, et du toit du socle sain est intégrée dans le modèle.

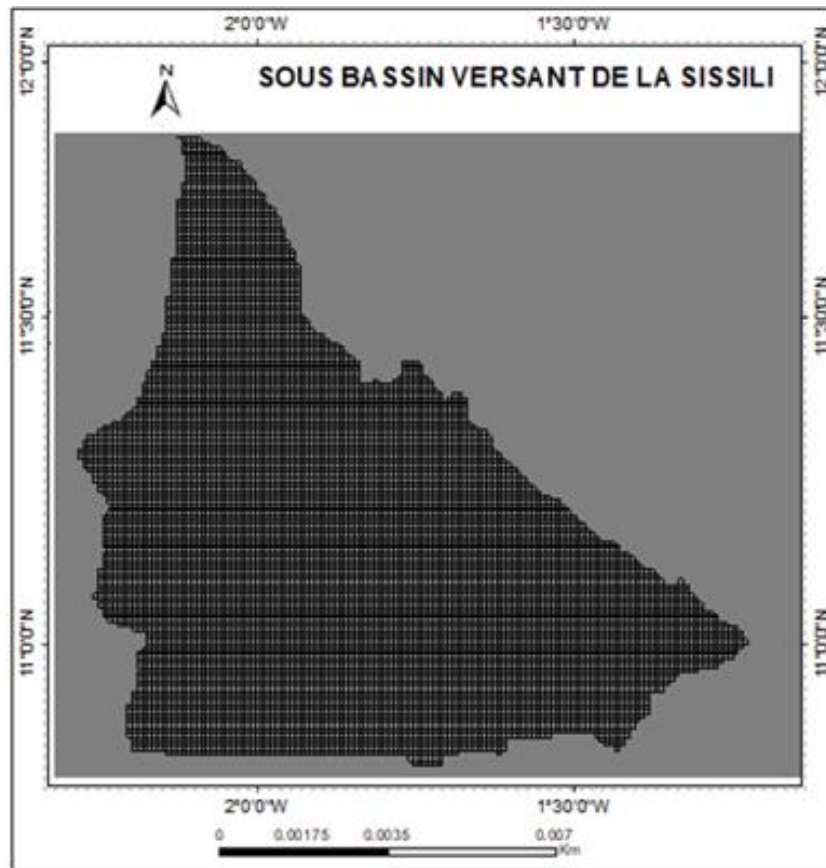


Figure 63: Modèle en 3D grille du sous bassin de la Sissili

V.2.2.1.2 Conditions aux limites

Dans la conception de Modflow, on distingue : les mailles actives, au sein desquelles la charge hydraulique (niveau piézométrique) est calculée à chaque itération de calcul à partir d'un niveau de départ fixé ; les mailles inactives où le flux est nul ; les mailles à potentiel imposé ; les mailles à charge imposée par l'utilisateur. Suivant les contraintes déjà définies, il faut savoir de bonnes conditions aux limites. Pour une disposition plus globale, et dans le but d'obtenir une description des écoulements plus concrète à partir des parties d'observations, il doit avoir une coïncidence des limites du modèle à celui de la limite physique du bassin (Koïta et al., 2010). Des flux nuls sont établis sur le contour du maillage ainsi que sur ses faces inférieures (figure 64). Les modalités de Fourier conditionnent les interférences entre la formation et la rivière, cela admet une représentation des eaux de l'aquifère écoulés vers la rivière quand la hauteur

d'eau est le plus élevée dans la nappe. Les relations verticales doivent être spécifiées aussi par des conditions de Fourier internes de façon à symboliser les argiles suivant la partie définie lors du maillage. Les mailles sont unies horizontalement par des conditions de Dirichlet internes qui garantissent le maintien de la hauteur d'eau adéquat pour un même nœud dédoublé dans deux zones. Dans le sous-bassin de la Sissili, on n'a pas de limite physique qui coïncide, de ce fait on a eu recours au potentiel imposé comme condition limite et ensuite on aura à le superposer à la carte piézométrique pour avoir les valeurs de flux aux contours des limites. Les limites à charge imposée correspondent aux affleurements granitiques. Le modèle permet de réaliser les simulations en régime permanent. Les contraintes appliquées au modèle sont la recharge calculée, et les prélèvements d'eau correspondent aux puits de pompage.

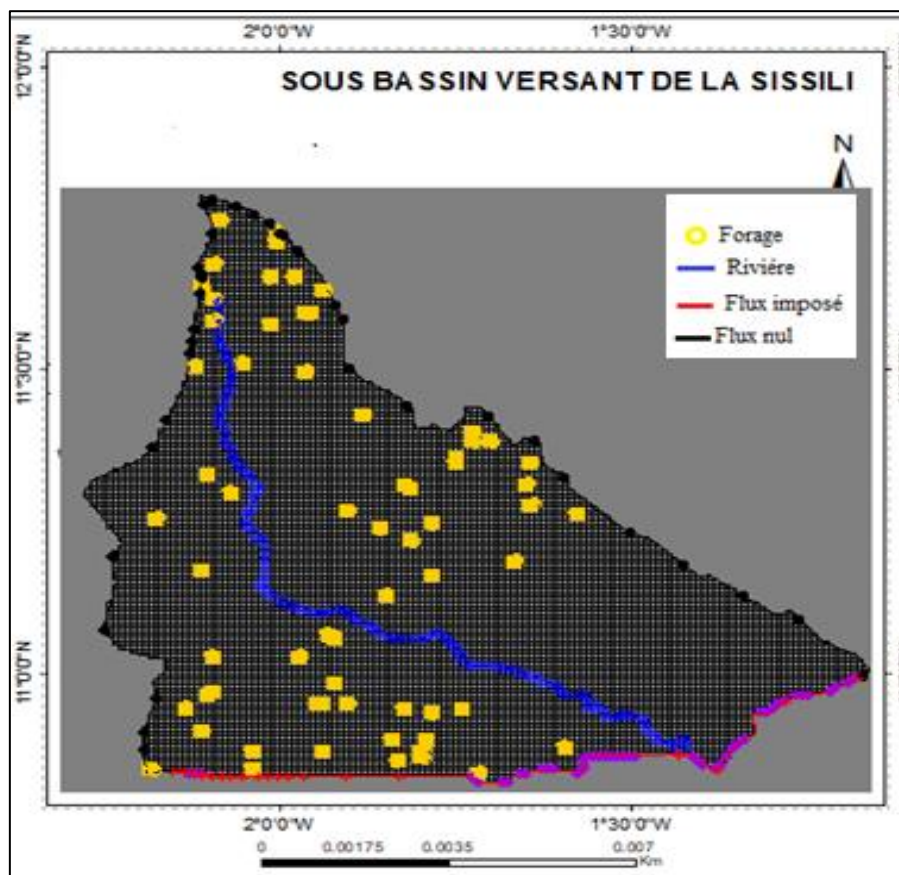


Figure 64: Conditions aux limites et de la zone à modéliser

V.2.2.1.3 Simulation numérique

La phase initiale de la simulation est basée sur l'approche continu équivalent. L'analyse de la dissimulation avec les éléments de base du modèle conceptuel obtenu n'admet pas de générer l'écoulement. La conductivité hydraulique affectée aux différentes zones n'admet pas de générer les charges observées sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 65). Les charges

simulées sont globalement inférieures aux charges observées (cibles en rouge 68a). Ces résultats exposent des intervalles importants entre les charges simulées et les charges observées. Dans la mesure où les observateurs présentent que cette simulation n'est pas acceptable, il faut donc apporter des modifications au modèle conceptuel pour que les charges simulées et les charges observées s'ajustent. Pour ce faire, il a été fait des modifications sur les valeurs de conductivités hydrauliques aux différentes zones du sous bassin. La seconde phase de la simulation est caractérisée par l'attribution des valeurs de conductivité hydraulique.

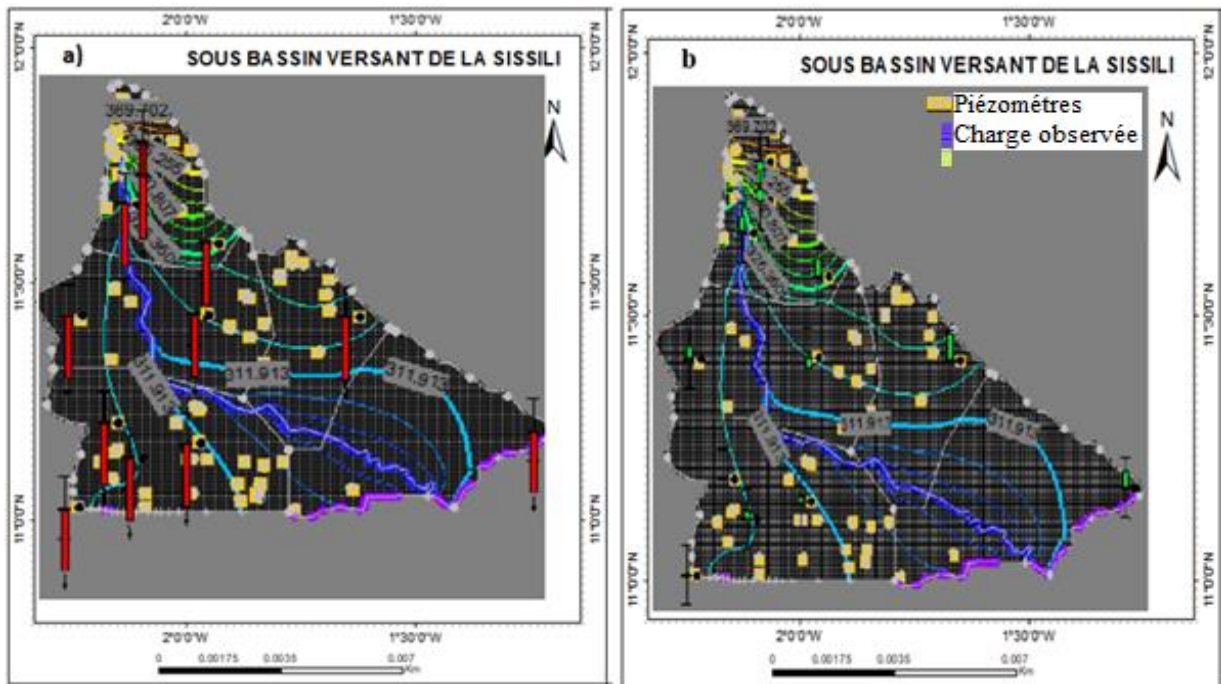


Figure 65: Résultats de la première phase de la simulation a) présentation des cibles b) Comparaison des isopièzes obtenues à partir des charges observées aux isopièzes obtenues à partir des charges simulées

V.2.2.1.4 Calage du modèle

La Simulation en régime permanent renvoi au comportement ou à l'existence d'un état connu du système dans lequel il y aurait à la fois stabilité des débits entrant et sortant et stabilité des hauteurs piézométriques. La carte piézométrique de 2019 est utilisée pour le calage du modèle comme état devant servir de référence au calage en régime permanent. Mais cela n'a pas permis de reproduire l'écoulement. En effet, par l'attribution des valeurs de conductivité hydraulique et de la recharge ont permis d'avoir un ajustement entre les charges simulées et les charges observées. Cela a permis par conséquent d'avoir quatre zones de conductivité hydraulique sont définies (figure 66). La valeur de recharge qui a permis de réaliser ce bon ajustement est de 0,54 mm/j.

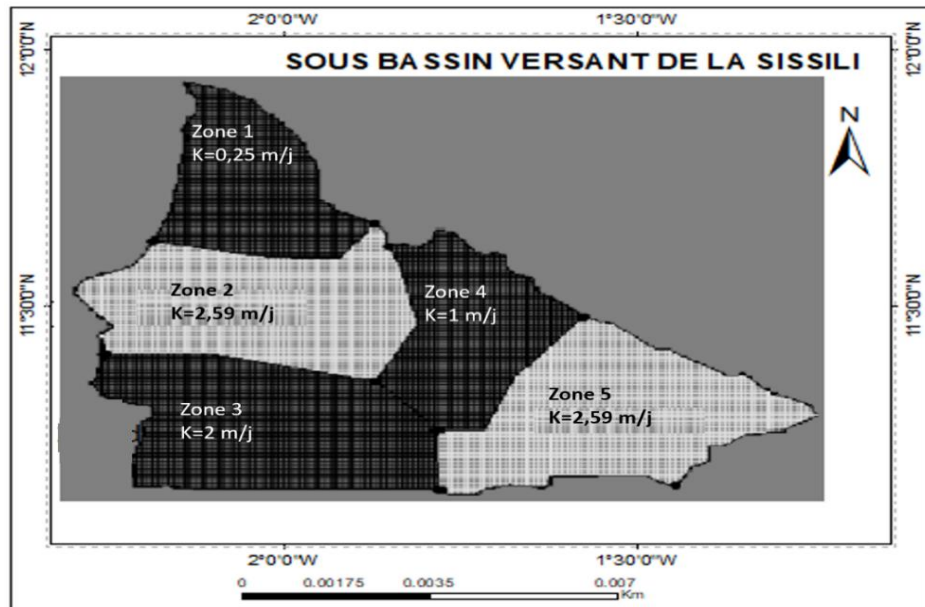


Figure 66: Zones de conductivité hydraulique fixées après calage

Les résultats statistiques de valeurs cohérentes du calage de la méthode manuelle est dite de « l'essai erreur » (tableau 12) indiquent que la RMS qui est de 22,9 est inférieure à l'incertitude sur les données topographiques en fonction des endroits. Lorsque la RMS est recalculée, elle baisse à 0,983. Les résidus varient de -1,524 à 1,139 avec une moyenne en valeur absolue de 0,836. À la vue de ces rapports d'erreur partiellement faibles, le calage est examiné ainsi acceptable.

Tableau 12: Indications statistiques des résultats du calage du modèle

Désignations	Erreur
Résidu min (m)	-1,524
Résidu max (m)	1,136
Erreur moyenne (m)	-0,469
Erreur absolue moyenne (m)	0,836
R ²	0,99
RMS	0,983

Par la suite dans le but de test les trois paramètres d'erreur, ainsi on tracera la droite de corrélation R² pour en apprécier l'intervalle. Par la suite dans le but de test les trois paramètres d'erreur, ainsi on tracera la droite de corrélation R² pour en apprécier l'intervalle. La figure 67 illustrée représente une bonne corrélation des charges observées et simulées. Cependant, les charges sont toutes voisines de la ligne de la bissectrice initiale. Le calcul de la droite de corrélation donne R²=0,99 (très proche de 1). Cette valeur montre que la charge observée et celle simulée par le modèle

sont parfaitement reliées. Le modèle établi accepte donc de compter des charges proches de celles observées en certitude.

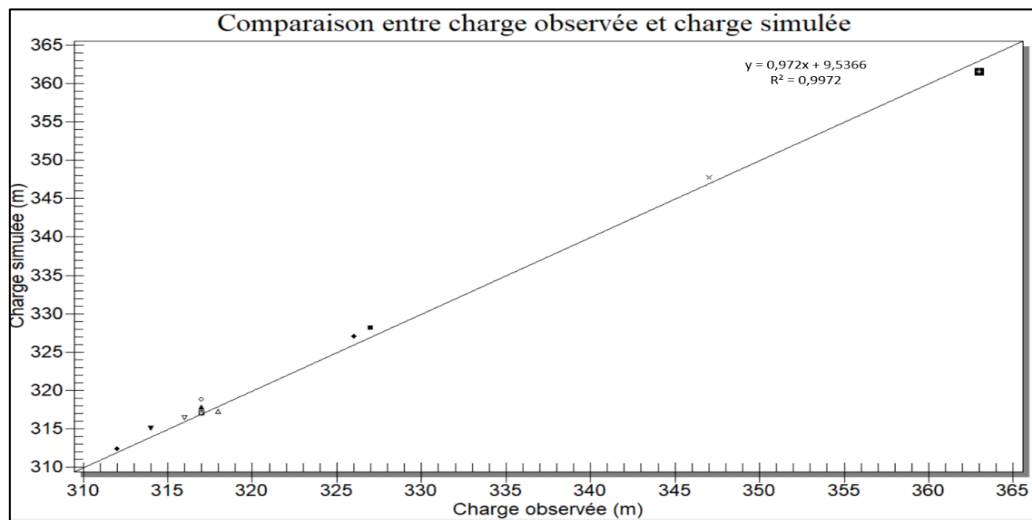


Figure 67: Graphique de comparaison entre charge observée et charge simulée

V.2.2.1.5 Bilan hydrique

Par la suite, le bilan hydrique de la nappe par évaluation de ses différentes composantes sera reconstitué (calcul du flux entrant et sortant du système étudié). Il a permis de quantifier les flux transitant dans la nappe (tableau 13) qui présente le bilan global de la nappe et présente un équilibre des flux qui cohérents avec la théorie de la modélisation en régime permanent. Aussi le pourcentage de disparité entre les apports en eau et les pertes est 0,000035%, ce qui est inférieur aux 0,1% préconisés par Anderson et Woessner, (1992). Ce bilan de masse est très important dans tous les modèles d'eau souterraine, car il définit les potentialités libres (Brassington et Younger, 2010). En somme, la calibration en régime permanent et le bilan en eau du système en équilibre montrent que la principale entrée du système est l'infiltration, on affirme que la recharge est l'unique contribution en flux du domaine modélisé. La décharge au niveau de ses eaux souterraines est le pompage au niveau des forages, et les écoulements latéraux.

Tableau 13: Bilan de masse du modèle calé

Désignation	Flux entrant (m ³ /j)	Flux sortant (m ³ /j)
Charges constantes	1129501,7712402	140152,9122314
River	0	4988139,102444
Puits de pompage	0	1056
Recharge	3999848,0391235	0
Total	5129349,8103638	5129348,014675
Total entrées – total sorties = 1,7956886291504		
Pourcentage d'anomalie=0,000035008114		

V.2.2.1.6 Validation

Après un calage acceptable du modèle, il suivra la phase de validation par une simulation des valeurs de 2020 en comparant les valeurs de charges observées et simulées aux valeurs de la conductivité hydraulique retenue lors du calibrage. Cela permettra de voir le comportement de la piézométrie du modèle calibré et du modèle validé pour confirmer les valeurs du calage (tableau 14) (figure 68). L'analyse montre que les valeurs sont sensiblement égales, cette étape de la modélisation en régime permanent est très importante, car cela nous ouvre le chemin pour passer à la simulation du transfert de polluant.

Tableau 14: Statistiques des tests de validation

Désignations	Modèle calibré	Modèle validé
Résidu min (m)	-1,524	-1,998
Résidu max (m)	1,136	1,660
Erreur moyenne (m)	-0,469	-0,202
Erreur absolue moyenne (m)	0,836	0,920
R ²	0,99	0,973
RMS	0,983	1,190

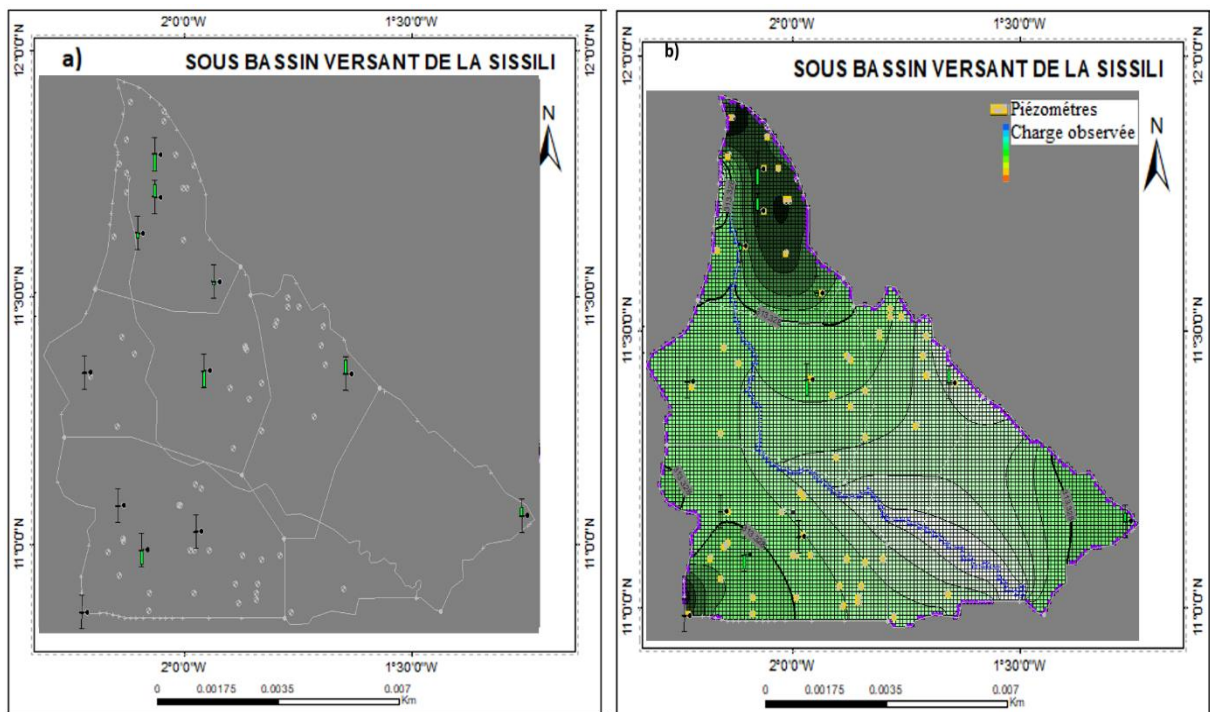


Figure 68: Résultat de la validation du modèle a) présentation des cibles b) Comparaison des isopièzes obtenues à partir des charges observées aux isopièzes obtenues à partir des charges simulées

V.2.2.1.7 Tests de sensibilité

Le test de sensibilité est effectué après le calage et la validation du modèle. Cela dans le but d'apprécier les paramètres qui contrôlent la dynamique des écoulements souterrains par l'effet de la modification de la conductivité hydraulique et de la recharge sur le modèle. Pour ce faire le coefficient de sensibilité (S_r) a été calculé pour comparer l'effet relatif des différents paramètres sur les résultats ciblés par l'analyse.

Concernant la recharge, une diminution de 30 % entraîne une diminution de la charge simulée et idem pour l'augmentation de 30 %. En somme, cela a peu d'impact sur la charge, les bilans de masse sont équilibrés. En effet, le rendu de ces essais montre que le modèle est à peine sensible aux modifications de la recharge. On note aussi que la baisse de la recharge augmente de peu les écarts pour certains piézomètres.

Pour la conductivité, il est observé dans ce cas qu'une augmentation de 10 % de la conductivité hydraulique entraîne une légère diminution de la charge simulée et observée. Cela s'explique par le fait qu'une augmentation de la conductivité favorise l'écoulement. Par ailleurs pour les zones 2 et 5, une augmentation de la valeur de conductivité montre une très légère augmentation du bilan hydrique. Tandis que les zones 1, 3 et 4 une augmentation de la conductivité entraîne une faible réduction d'où un faible potentiel. On observe aussi une légère diminution d'écart de S20, S3 et S10. On constate dans la zone 1 par exemple, la variation des valeurs affecte peu la charge moyenne des 4 autres zones, elle a un effet peu limité (Laroque et al., 2013). Cependant, pour l'EM, l'EMA et la RMS il n'y pas de grand changement suite à l'augmentation de la conductivité.

Une diminution de 10 % de la conductivité hydraulique entraîne une augmentation de 16,37 m de la charge calculée. En effet, cette diminution entraîne une limitation de l'écoulement tout en maintenant des charges plus élevées. Cependant, la RMS de 1,056 est supérieure suivant les charges observées. La conductivité des zones 2 et 5 présente un impact sur la charge, on peut supposer que ces zones contrôlent l'écoulement provenant de l'amont du fait de leurs proximités avec la rivière de la Sissili ou par des points favorables de réalimentation. On peut l'expliquer par le fait que l'écoulement souterrain (qui dépendent du volume dans les failles) en termes de potentialité est plus représenté dans les zones 2 et 5.

Au regard de ces résultats, on peut en déduire que le modèle est plus sensible à la baisse de la conductivité hydraulique. Le modèle est donc fiable pour ces variables en régime permanent.

En termes de conclusion nous pouvons dire que la modélisation de l'écoulement du sous-bassin de la Sissili est une première initiative pour la gestion quantitative de la région. Son élaboration

est faite sur la base des données issues des études antérieures sur la tectonique et sur les travaux de terrains. Suivant le choix du milieu continu équivalent, les conductivités hydrauliques issues des essais de pompage ont pu reproduire la piézométrie, car les observateurs d'erreurs sont dans la marge des erreurs sur la cartographie. Mais cette approche doit être améliorée, car le choix des ajustements de la conductivité hydraulique ne s'applique pas forcément sur l'ensemble géologique à l'échelle élargie de la région comme le cas de l'étude de Koïta et al., (2010). Car ici nous avons défini 5 zones de conductivité alors que tel peut ne pas être le cas à l'échelle régionale. La recharge est prise comme uniforme dans le sous-bassin. Ces résultats sont très satisfaisants, car le bilan hydrique entre flux entrant et flux sortant est parfaitement équilibré. En régime permanent, le calage et la validation renseignent que l'infiltration issue de la pluviométrie est la seule source de recharge. Cependant, le modèle conçu a dévoilé une souplesse lors de la validation. Mais le test de validation peut être amélioré en faisant des levés topographiques pour améliorer le nivellement de la surface de site contrairement au MNT utilisé dans cette étude.

Il serait convenable de reproduire la simulation en régime transitoire. En effet, cela sera accès sur la fluctuation des niveaux piézométriques et principalement sur l'étude détaillée de la recharge. Cet état de fait est une conséquence de la croissance démographique, des pratiques culturelles anarchiques et des progrès réalisés. Cette conséquence exerce une pression sur la ressource tout en se combinant pour engendrer une sollicitation en eau constamment plus importante d'une part et diminuer les zones de recharge d'autre part. Il faut, cependant, se pencher sur une mesure pour pallier à la baisse de la recharge. En ce sens la régularisation des pratiques anarchiques serait un atout. En effet, pour une bonne gestion de la ressource, les activités agricoles sur les zones préférentielles de recharge doivent être réglementées. Ces pratiques ne doivent pas impacter négativement sur la capacité d'infiltration dans ces zones. Aussi, il faut penser à la restitution du couvert végétal, en particulier au niveau des zones préférentielles de recharge. Ce qui contribuera à une gestion durable de la ressource en eau souterraine qui joue un rôle important dans le ruissellement et l'infiltration des quantités d'eau prélevées.

V.3 MODELE DU TRANSPORT DE POLLUANT

V.3.1 OBJECTIF

La conceptualisation du modèle de transport renvoie à la reproduction quantitative du système de transport lequel résume ce qui est collectif relatif à la source de contaminant, et à l'évolution de celui-ci. L'objectif d'une étude de transport de polluant est de pouvoir prendre en compte l'évolution temporelle et spatiale entre le polluant. Il s'agit d'appréhender la géométrie en s'appuyant sur les résultats de la géophysique pour l'incorporer dans un modèle numérique d'écoulement et de transfert. Cela renvoie d'abord à la quantification du polluant et à sa progression depuis la surface vers une percolation souterraine illustré par la figure 69. Plusieurs auteurs se sont intéressés au devenir d'un polluant dans le milieu de socle et diverses études ont traité ce sujet comme indiqué dans la partie I.1.3.2. Il est question de vérifier l'hypothèse à savoir si le modèle numérique d'écoulement hydrogéologique permet-il de simuler le transfert de polluants. La simulation du transfert du contaminant admet de ce fait de déterminer les changements temporels et accroissements du polluant. Dans ce travail le modèle hydrodynamique en régime permanent défini ci haut sera couplé au modèle de transport dans la période où les paramètres hydrodynamiques sont réalisés. En effet, ce choix a été basé sur le fait que durant cette période les conditions prédéfinies auparavant sont réalisées.

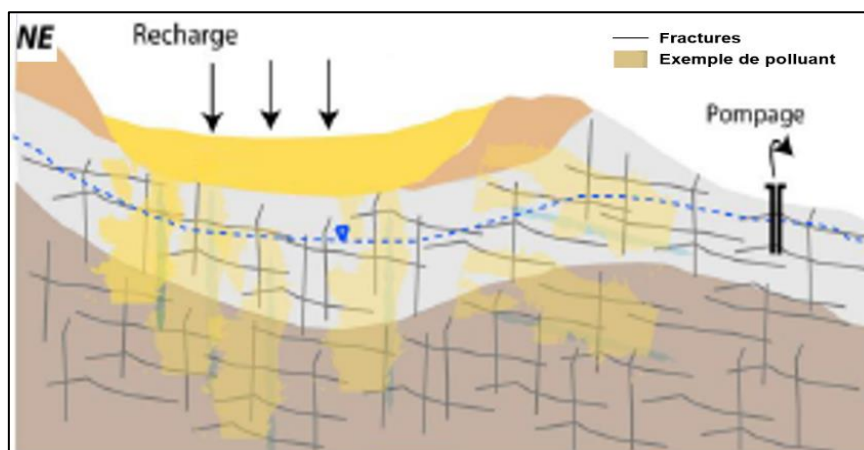


Figure 69: Illustration de la migration du polluant dans un milieu fracturé

V.3.2 EVOLUTION DE LA POLLUTION AU SEIN DE LA NAPPE

Les aquifères sont souvent sujets à des problématiques de pollutions (domestiques, industrielles ou agricoles). La préservation de la ressource nécessite de bien comprendre les processus de transfert ou transport de polluants. Le modèle simule le transfert de polluant pour différentes propriétés préalablement données et indique l'évolution de sa concentration en fonction du

temps au sein de l'aquifère. Les paramètres qui interviennent dans la modélisation et qui sont régis par la loi du transport en solution des éléments conservatifs de polluant sont :

- L'advection est définie comme étant le transport des particules en solution dissoute dans le fluide qui se déplace suivant le sens de l'écoulement. Il est nécessaire de définir avec précision la partie qui est effectivement mobile du fluide présent ainsi que la vitesse réelle de mouvement de ce fluide. Elle est associée aux paramètres de coefficient de perméabilité K , de la porosité efficace ou cinématique. Lors de ce transport, le flux unidirectionnel est le produit de la quantité d'eau qui circule par la concentration du soluté dissous ;

$$JC = \theta_e \cdot v \cdot C \quad (24)$$

Où θ_e représente la porosité efficace ou encore la porosité effective, C la concentration en composé dissous et v la vitesse d'écoulement

- La dispersion est à l'origine de l'étalement de la pollution et contribue à diluer les concentrations. Elle est associée aux paramètres de coefficient de dispersion longitudinal D_L qui est l'étalement des solutés dans la direction du flux principal décrit par l'équation (25) (dont la valeur est le 1/10ème de la longueur du panache de polluant ou de l'observation) et un coefficient de dispersion transversal D_T dans les directions perpendiculaires décrites par l'équation (26) (dont la valeur est le 1/100ème de la longueur du panache de polluant ou de l'observation), qui sont généralement proportionnels à la vitesse de Darcy, et un coefficient de dispersion vertical dirigé vers le haut : très faible. C'est la suite de la différence des régimes et des vitesses voisines d'écoulement au sein d'un espace perméable. Ces vitesses apparentes de l'eau acceptent la fusion en solution. Cette fusion est appelée dispersion mécanique. La dislocation qui se fait suivant l'écoulement est nommée dispersion longitudinale. Celle qui est régulière à l'écoulement est désignée dispersion transversale. La dispersion mécanique ne peut être opposée de la diffusion moléculaire, ce qui détermine un autre fait appelé dispersion hydrodynamique dont le coefficient est la somme du coefficient de dispersion mécanique et celui de la diffusion moléculaire.

$$D_L = \alpha L U \quad (25)$$

$$D_T = \alpha T U \quad (26)$$

Dans cette étude aucun essai n'a été exécuté dans la zone. Les valeurs préposées de dispersion ont été évaluées suivant un procédé habituellement utilisé basée sur la dimension. Ce procédé conçoit, initialement une approche, un coefficient de dispersion longitudinal de l'ordre de 0.1 fois la longueur de la distance par le polluant. Ce n'est qu'une évaluation qui évoque un bon pas de départ pour une action de modélisation. Il subsiste d'abondants rapports expérimentaux

parmi les coefficients de dispersion longitudinale, transversale et verticale qui ont été décrits. Habituellement, α_T est évalué à $0,1\alpha_L$ et α_V est estimé à $0,05\alpha_L$ (ASTM,1995).

La diffusion moléculaire est un fait relié à l'agitation moléculaire qui est l'enlèvement de particules des bandes à concentration dominante vers les zones à concentration petite. Elle est associée aux paramètres de coefficient de diffusivité moléculaire. Ainsi la mise en certitude cette contamination par la définition d'évolution qui dirige l'attitude et le déplacement des contaminants dans les sols et les eaux souterraines ainsi qu'à leur modélisation mathématique et à la prédiction de la modification spatio-temporelle de cette pollution est abordée dans les sections **I.1.3.2.1 et I.1.4.**

V.3.3 SIMULATION DE TRANSPORT DU POLLUANT

L'état de la pollution est représenté par le chapitre III, montre que le degré de contamination des eaux souterraines dépend des interactions avec le sol et les roches qui constituent les couloirs préférentiels de drain du contaminant. Pour simuler la réalité, on adopte la modélisation du transport de polluant. Pour ce faire nous allons affecter des degrés de concentration au différent polluant déterminer dans la zone d'étude et correspondant aux concentrations obtenues par la campagne de 2012. Les différents polluants sont pris pour la simulation dans cette étude. Ce qui constitue l'élément ayant les plus fortes concentrations dans l'eau et donc l'une des principales sources de pollution de ces eaux souterraines. En premiers lieux, l'état actuel de la pollution sera présenté pour le cyanure, le plomb, le fluor et l'arsenic comme la montre la figure 70. A travers cette modélisation, il sera fait un outil d'aide à la prédiction de risque pour une gestion optimale de la ressource en eau de notre zone d'étude. Pour ce faire, les conditions correspondantes aux concentrations constantes ont été imposées au niveau de chaque forage. Cette valeur correspond à la concentration standard dans les eaux souterraines selon les recommandations du Burkina. Cela permettra de reproduire les conditions réelles en 2012 pour en déterminer le devenir actuel du polluant en 50 ans comme la montre la figure 71, pour les autres cellules la concentration est nulle.

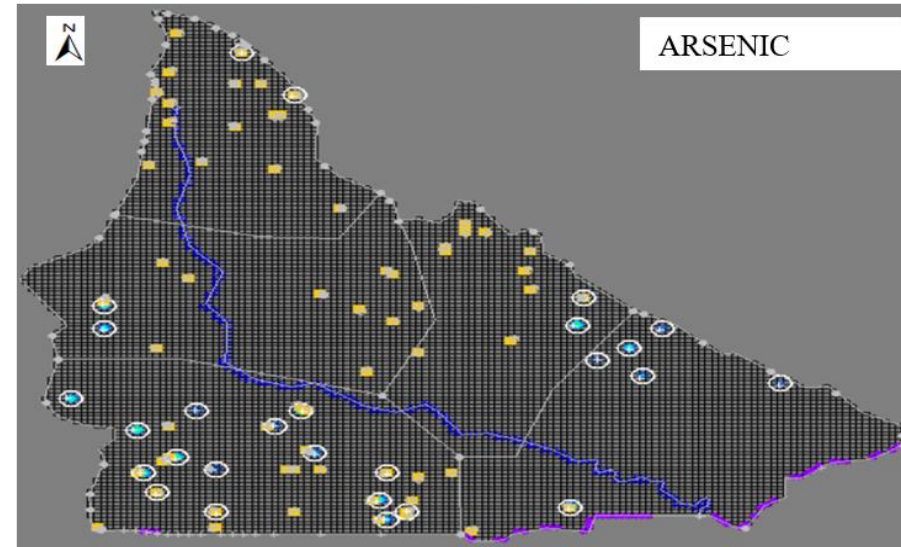
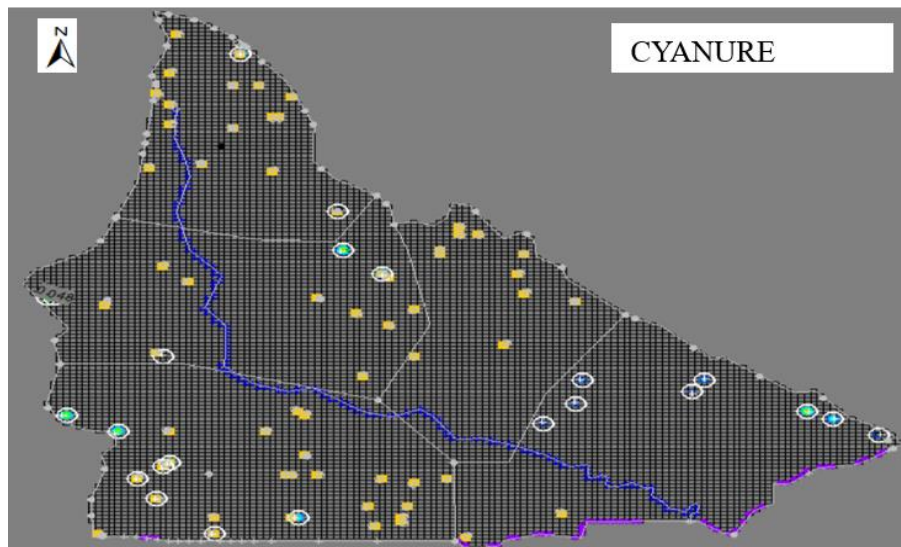
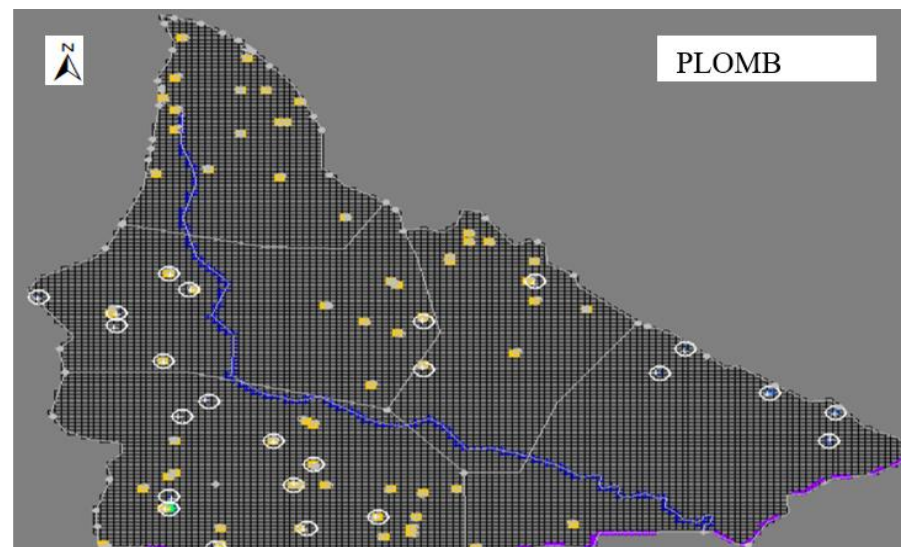
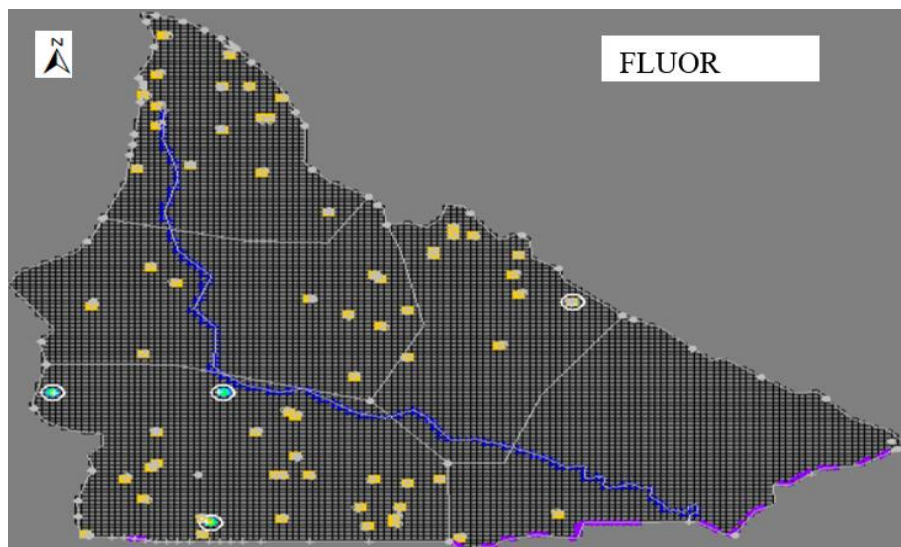


Figure 70: Concentration à l'état initial observée en 2012 par GMS

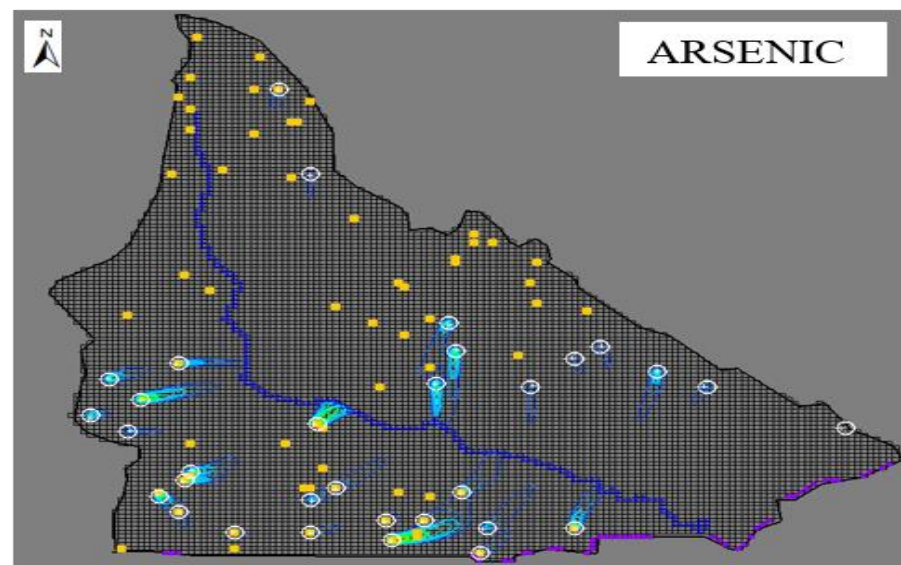
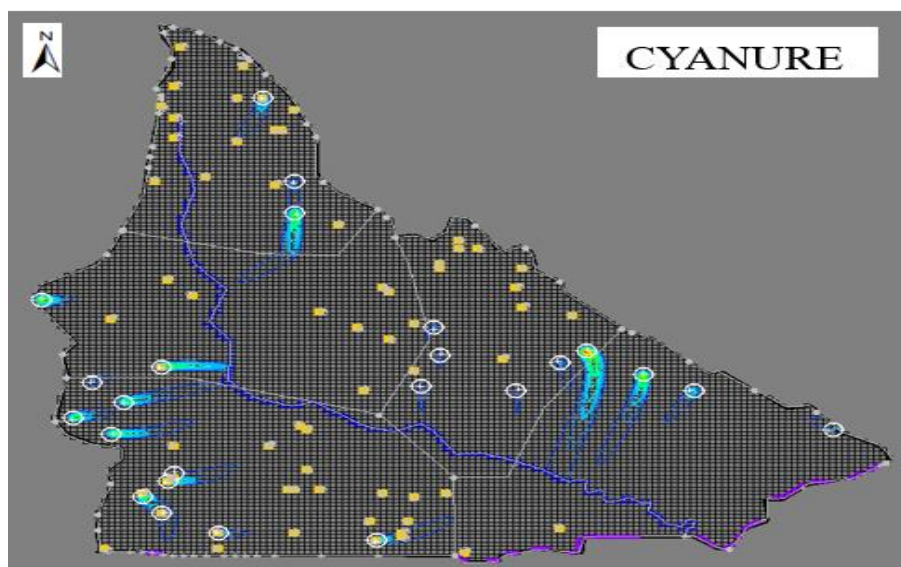
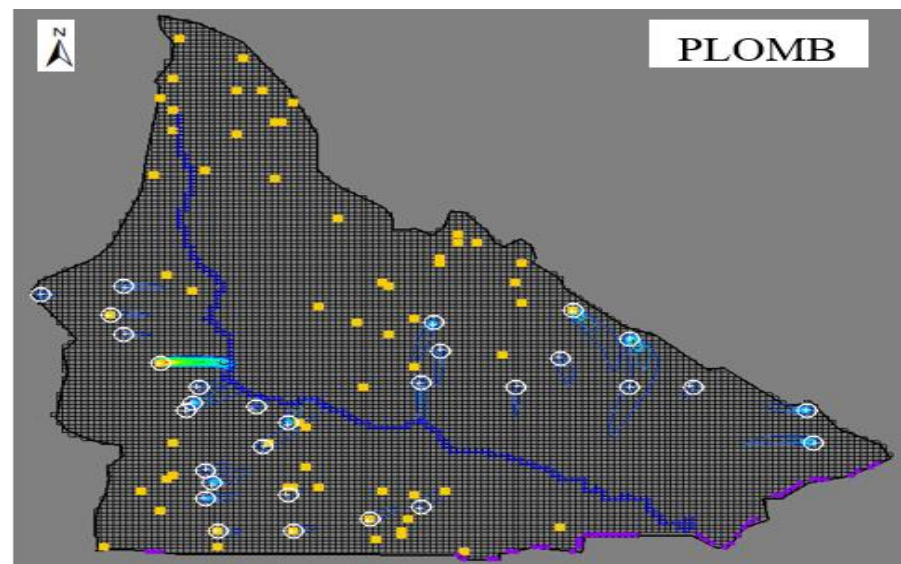
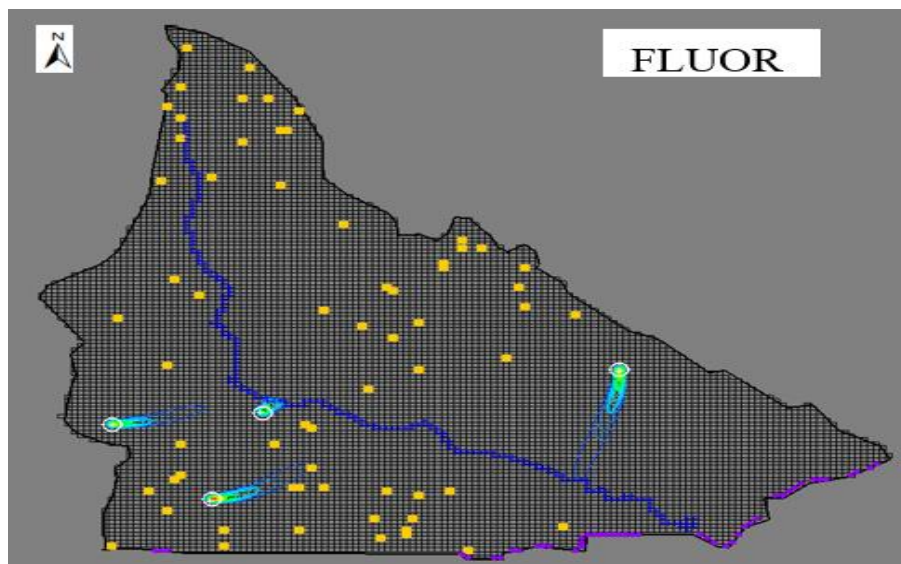


Figure 71: Concentration observée en 50 ans

Les résultats sont obtenus en ne faisant pas la variation des paramètres de dispersivité sur une période de simulation de 50 ans soit en 2062. Les concentrations introduites dans le modèle sont les mêmes que celles obtenues suite aux analyses des eaux souterraines échantillonnées. En ce sens la concentration prédite augmente par rapport à la concentration introduite pour la majorité des forages. On remarque sur la figure 71 que l'ensemble des polluants présentent une différence en termes de concentration, de forme et d'extension. Et aussi que la pollution converge dans le sens de l'écoulement en aval du forage toute en abondance dans le temps. Cette convergence est due au coefficient de dispersion. Les éléments de dispersion procèdent ainsi un rôle dominant dans la modification du contaminant. Il serait ainsi beaucoup plus pertinent d'effectuer des mesures sur le terrain, du type essai de traçage, pour davantage obliger le modèle, et d'en réformer ainsi les propriétés prédictives. Cette figure montre aussi que, la distribution de la recharge résulte en une concentration plus faible sur une zone au centre du bassin pour le plomb et le cyanure. L'influence des flux en provenance du bassin est perceptible, avec une diminution des concentrations à certains endroits, puisque le flux massique imposé sur les frontières externes est nul. Toujours pour le cyanure et le plomb, on observe un phénomène de dilution pour certains forages. Cela laisserait penser que dans ces zones, la nappe est réalimentée par la rivière. Cette déduction est vérifiée sur la simulation, par exemple pour le plomb on constate que seul un forage converge. Alors que la concentration de ce forage est inférieure aux autres valeurs de concentrations. Cependant, il y a des zones qui sont rapidement plus touchées que d'autres, pouvant être la différence entre les tendances des concentrations simulées aux différents forages. C'est dû à la zone non saturée qui est l'élément clé pour le transfert, surtout pour le retard ou l'accélération de la dispersion du polluant. Elle multiplie la pollution plus que dans l'aquifère superficiel, ainsi que la position considérée sur le sous-bassin. Si la zone non saturée est importante, le flux est lent, d'où le système réagit au changement de flux. Aussi au les données utilisées ont une influence sur les résultats surtout au niveau de la répartition spéciale des forages et leurs positions géologiques, ainsi que sur les informations de la zone saturée. Ainsi il faut une nouvelle campagne pour revoir la précision du modèle et le calage, car le terrain contient certainement une quantité de polluant non négligeable. Cette simulation donne une idée sur les lieux précis où les implantations peuvent être faites dans le sous-bassin de la Sissili. Cela améliorera la démarche de suivi de la qualité de l'eau par la SNIE et de localisation des zones polluées. Pour ce faire la cartographie des activités autour des points d'eau sera indispensable pour l'étude des éventuelles sources de pollutions. La présente étude est un outil de prédiction de la propagation du polluant et de lutte contre la contamination des eaux souterraines.

V.4 CONCLUSION PARTIELLE

La conception du modèle hydrogéologique monocouche et du transfert de polluants a été possible grâce à l'investigation de terrain, et a permis de simuler l'évolution et le devenir de la pollution dans le sous-bassin de la Sissili. La limite majeure dans cette étude est le manque de données, pour y remédier il est utilisé une approche basée sur la littérature pour l'estimation des paramètres hydrodynamique nécessaire pour la réalisation de la modélisation, ainsi que pour l'estimation de la piézométrie. Le modèle construit est monocouche avec différentes zones de conductivités acceptables selon les observateurs cibles. Après l'élaboration du modèle, le calage montre par le bilan de flux très satisfaisant.

La conception du modèle de transport a été réalisée selon les conditions de la campagne d'échantillonnage de 2012 pour une simulation de 50 ans. Cela montre que la contamination est étendue avec abondance et converge selon le sens de l'écoulement. Comme attendu, le modèle a été confronté à de nouveaux problèmes liés à la réalité de terrain.

En outre cette simulation était en grande partie fonction des données disponibles et de leur fiabilité. Par conséquent pour mieux appréhender ce modèle, une campagne doit voir le jour pour comparaître l'évolution des contaminants.

Cependant, un modèle n'étant pas fixe est appelé à évoluer dans le temps, il serait donc très judicieux de reprendre la détermination des paramètres hydrodynamiques et le suivi de la piézométrie.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les études de modélisation hydrogéologique et de transfert de polluants des formations cristallines ne couvrent pas tout le Burkina. L'étude conduite dans le cadre de cette recherche participe à une meilleure connaissance du sous-bassin de la Sissili. Ce travail a été mis en œuvre pour valoriser les outils de recherche appliquée qui sera certainement étendue à l'échelle des bassins versants dans les années à venir afin de répondre aux exigences d'aide à la prise de décisions pour la gestion quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine.

Les travaux réalisés au niveau de cette thèse sont la combinaison de nombreuses approches (chimique, microbiologique, géologique...). L'ensemble des résultats obtenus dans ce cadre consentira de comprendre l'éventuel danger et de faire des propositions concernant le futur du sous-bassin. Ils permettront aussi d'orienter la gestion de l'aquifère de socle dans la zone.

La méthodologie d'approche, l'interprétation et le traitement des données acquises durant ces travaux ont permis d'avoir des résultats importants qui sont synthétisés comme suit :

- **Etat des lieux et compréhension de la pollution des eaux souterraines**

Les différentes études antérieures avaient défini avec exactitude la pollution au niveau du sous-bassin de la Sissili. Mais de nos jours, il a augmenté et les risques sanitaires sont alors prévisibles. Les investigations hydrochimiques ont permis de distinguer dans la zone d'étude des eaux bicarbonatés calciques et magnésiques. Le traitement statistique de 67 analyses présente les valeurs des concentrations moyennes et caractéristiques avec des écarts types parfois supérieurs aux valeurs moyennes ce qui indique que les valeurs de ces variables sont éparpillées et met ainsi en exergue une exacte différence des eaux échantillonnées dans le sous-bassin.

Les températures moyennes de l'eau présentent peu de variations entre les formations géologiques et se situent dans la fourchette de la valeur annuelle de la température atmosphérique dans la zone d'étude. Le potentiel hydrogène des eaux souterraines est généralement acide montrant des eaux agressives. La conductivité électrique des eaux de forage reflète la faible minéralisation d'où l'indépendance des poches d'eau les unes des autres. En plus, pour les forages où on note les plus grandes valeurs de la CE, leurs pH sont généralement faibles. La conductivité augmente avec la recharge en certains points d'eau en mis août témoignant d'un apport d'ions par les eaux d'infiltration.

Les résultats des cations sont dans l'ordre d'importance dans les eaux souterraines $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Le rapport Ca/Mg inférieur à 1 pour certains ouvrages confirme que leur

composition est probablement influencée directement ou indirectement par des phénomènes de pollution naturelle.

Les résultats des anions sont dans l'ordre d'importance dans les eaux souterraines $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation des eaux et dominent les anions, ils peuvent donc influencer la CE. La non corrélation entre le chlore, le sodium et le potassium s'explique par le fait que l'eau des forages est reçue par infiltration directe de la roche non obstruée donc sa présence n'est pas de nature géologique.

Les concentrations des ions mineurs montrent une intrusion granitique dans la lithologie locale, avec un apport anthropique. La forte concentration de Fe^{2+} présent dans les eaux souterraines est due à l'existence de fer au niveau de la couche altérée qui est généralement latéritique. Le fluor dans l'eau découle particulièrement de la dissolution des minéraux naturels trouvés dans les roches et dans les sols avec lesquels l'eau réagit. La fluorite (CaF_2), la cryolite (Na_3AlF_6), le fluorapatite ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$) et les micas sont les principaux minéraux qui le contiennent.

Les métaux lourds et métalloïdes ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. Cependant, si les parois de sulfures sont atteintes, ces risques seront élevés avec une possible mobilisation d'éléments traces potentiellement toxiques dans les systèmes d'eau souterraine.

L'analyse statistique multi variable a admis en premier la mise en évidence de deux axes importants du fait du nombre d'échantillons réduits (axe 1 marqueur de l'augmentation de la pollution et axe 2 marqueurs du temps de séjour). Ces deux axes donnent une idée indicatrice d'une dispersion des sources de variabilité de la composition chimique des eaux. Dans un second temps, cette analyse a permis de montrer que l'axe 1 met en évidence l'évolution de la minéralisation en fonction de l'hydrolyse des silicates, phénomène prédominant dans le processus de minéralisation des eaux de notre zone d'étude ; et l'axe 2 montre la pollution anthropique. Il semble que la minéralisation des eaux est influencée par rapport au temps de séjour avec le lessivage des roches et les réactions chimiques qui pourraient avoir lieu dans l'aquifère.

Les faciès géochimiques des eaux sont dominés par les bicarbonatés calciques (que l'on retrouve dans les alluvions, la base des cuirasses, granodiorites) et magnésiens (formation basique, amphibole) en grande majorité. La majorité des eaux bicarbonatées appartient à la couche de fissures. Les bicarbonates dont l'origine est essentiellement contrôlée par la diffusion du CO_2 atmosphérique et organique.

Ces eaux sont également agressives, très corrosives, pour l'ensemble du bassin et sont également saturées de calcites.

Les analyses hydrochimiques mettent en exergue la pollution élevée de l'aquifère provenant des infiltrations de surface et la vulnérabilité de la nappe des fissures/fractures à une pollution éventuelle. Ce qui rend urgent la définition des règles de gestion de l'aquifère et devront délimiter les zones favorables ou non à l'installation de ces ouvrages.

- **Caractérisation de la structure et de la géométrie du système aquifère - investigations géophysiques**

Selon les techniques de traitement d'image et d'analyse utilisées, les résultats montrent des directions préférentielles de fracture N15°, N60° et N120°, aussi il a été déterminé les directions NE et NS productive et les directions NO et EO étanches.

L'APC permet de distinguer les linéaments régionaux et les linéaments associés au réseau hydrographique. Elle se dessine très clairement un domaine dans un ton gris fin dans la partie sud-ouest et les linéaments de direction NE-SO et N-S définie par l'accident régional y sont bien visibles.

Le rapport des bandes montre un ton noir à texture rugueuse et grossière, caractérisé par un réseau de type dendritique de type treillis. Il laisse entrevoir la mise en évidence des fractures gouvernant certains bras de cours d'eau qui y sont rattachés.

La composition colorée montre au nord et à l'est une couleur turquoise caractérisée par un réseau de type radial. Elle a aussi permis de rehausser les différentes formations géologiques et les linéaments rattachés à chaque type de réseau.

L'application de filtre sur les bandes OLI 3/ OLI 4 accentue les discontinuités structurales et met en évidence les linéaments libérienne et éburnéenne.

L'analyse des différents pourcentages permettent de classer les linéaments en fonction de leur influence dans le positionnement des forages.

Les conclusions de la prospection géophysique par le traîné montre des directions N° 156 N°180 à Kada, N°146 N°190 N°142 à Sissili Mossi, N°212 N°174 à Koukin, N°145 N°149 N°202 à Tiakané.

Les sondages donnent trois formes. Les dissemblances au niveau des couches et épaisseurs sont les causes probables de nombreux échecs pendant l'implantation des forages.

Les sections de TRE ont permis la validation de 1 linéament en fracture tectonique avec des profondeurs de 60m et une largeur de 40m. Cette prospection a permis également de mettre en évidence des drains privilégiés vers la nappe d'eau souterraine. Le profil d'altération s'allie aux modèles présentés ces dernières années qui maintiennent que la conductivité hydraulique des milieux de socle est due à l'altération et non aux fractures tectoniques.

- **Modélisation numérique hydrogéologique et de transfert de polluant**

Modèle hydrodynamique

Les résultats issus des investigations géologiques et hydrogéologiques ont permis de réaliser un modèle numérique monocouche et du transfert de polluants. Ce modèle a permis de simuler l'évolution et le devenir de la pollution dans le sous-bassin de la Sissili. Notre modèle conceptuel a été considéré comme homogène équivalent et continu.

Le maillage choisi a été suivi du test de sensibilité d'un modèle qui permet de tester l'influence de ces paramètres sur les résultats après simulation. Chaque grille couvre une superficie de 150 m sur 150 m, avec un nombre de cellules de 225000 mailles. On n'a pas de limite physique qui coïncide, de ce fait on a eu recours au potentiel imposé comme condition limite et ensuite il est superposé à la carte piézométrique pour avoir les valeurs de flux aux contours des limites. Les limites à charge imposée correspondent aux affleurements granitiques.

Face au manque des données, il est estimé les paramètres hydrodynamiques, dont la transmissivité et la conductivité hydraulique nécessaire pour la réalisation de la modélisation. Les transmissivités varient de $1,7 \cdot 10^{-4}$ m²/s au niveau des altérites à $4,2 \cdot 10^{-6}$ m²/s au niveau des altérites plus roche fissurée, avec des conductivités hydrauliques variant de $3,10^{-6}$ m/s à $1,10^{-7}$ m/s.

La recharge des nappes semble être beaucoup plus homogène et les estimations varient entre 2 et 10% de la pluviométrie annuelle. Dans le cadre de cette étude, il est estimé à 5% de la précipitation annuelle 0.00054 m/j.

Les simulations ont abouti à une entière adhérence entre les données issues de mesures sur le terrain et les valeurs simulées par le logiciel. Le calage est bon au niveau dans les piézomètres (cibles en vert) où les écarts sont inférieurs à 2 m. De cela, est issu des cartes avec les charges simulées et les charges observées. Cette carte montre la grande proximité existante entre piézométrie simulée et observée.

L'analyse statistique des résultats du calage indique que la RMS qui est de 22,9 est inférieure à l'incertitude sur les données topographiques en fonction des endroits. Lorsque la RMS est recalculée, elle baisse à 0,983. Le calcul de la droite de corrélation donne $R^2=0,99$ (très proche de 1). Cette valeur montre que la charge observée et celle simulée par le modèle sont parfaitement reliées. Le modèle établi accepte donc de compter des charges proches de celles observées en certitude.

Le bilan de masse est très déterminant dans tous les modèles d'eau souterraine, car il détermine les ressources libres et fournit les facteurs de dilution dans les études de contamination aussi le

pourcentage de différence entre les apports en eau et les pertes est 0,000035%, ce qui est inférieur aux 0,1% préconisés.

Modèle du transport de polluant

La simulation de la contamination et son évolution dans les eaux souterraines a mené à davantage interpréter le fonctionnement hydrodynamique de la nappe. Les résultats obtenus ont montré une évolution de la contamination pour certains forages. Mais on constate aussi une absence de l'évolution de contaminant pour d'autres forages. La pollution baisse ou reste constante d'une façon significative sur 50 ans. On remarque aussi que la pollution converge dans le sens de l'écoulement en aval du forage tout en abondance dans le temps. Cette simulation donne une idée sur les lieux précis où les implantations futures peuvent être faites dans le sous-bassin de la Sissili. Cela améliora la démarche de suivi de la qualité de l'eau par la SNIE et de localisation des zones polluées. Pour ce faire la cartographie des activités autour des points d'eau sera indispensable pour l'étude des éventuelles sources de pollutions.

PERSPECTIVES

L'ensemble des résultats obtenus constitue des éléments d'aide à la décision pour l'élaboration de la Gestion de l'Eau et elle vient renforcer les études précédentes dans la zone d'étude en apportant des éléments nouveaux tels que la discussion des méthodes d'évaluation des écoulements souterrains, la modélisation hydrogéologique et de transport de polluant qui prend en compte. Mais ces travaux n'étant qu'une contribution et non figés il serait important d'améliorer la robustesse du modèle et cela nécessite aussi un suivi rigoureux des prélèvements d'eau.

Le caractère discontinu des aquifères rend aussi irréguliers les secteurs pollués qui restent en relation directe avec l'environnement immédiat. Les études futures doivent prendre en compte la cartographie linéaire à travers les autres méthodes existantes et présentant moins de limites. Cela permettra de définir la vulnérabilité de l'aquifère où plusieurs aquifères plus ou moins confinés ou libres se superposent. La réalisation d'une carte de profondeur de la surface piézométrique de la nappe des altérites permettra de circonscrire les zones sensibles à la pollution.

Pour le volet des résultats géochimiques, une étude isotopique doit être menée en vue d'apporter des éléments nouveaux sur la recharge actuelle. En vue de prévenir les conséquences d'une dégradation de la qualité des eaux de boisson dans les années à venir. Par la suite des périmètres de protection devront être établis autour des points d'eau et surtout au niveau des zones de

recharges. La détermination de ces zones de recharges par des tests de traçage devrait être réalisée à partir d'autres méthodes de simulation mathématique simple qui vont intégrer les paramètres structuraux, hydrodynamiques, et la piézométrie. Par la suite un suivi des analyses dans la période des eaux et basses eaux serait très déterminant pour la minéralisation, surtout au niveau des eaux de puits permettrait de prévenir toute aggravation du phénomène de pollution qui reste localisée et ponctuelle.

En ce qui se concerne l'apport de la géophysique dans la modélisation, l'application de la RMP permettra de conforter les résultats des essais de pompage, et voir le rapport de transport avérer entre la transmissivité issue des essais de pompage et les résultats de la RMP. La mise en place d'un réseau de suivi de piézomètre serait un atout dans le sous-bassin. Cela contribuera au suivi continu des changements de la hauteur piézométrique et de la qualité des eaux de l'aquifère. On peut aussi penser à faire des mesures automatiques. Cette modélisation a été faite en régime permanent du fait des données dont on dispose. Cela rend difficile la correspondance de la variation dans la projection. Pour une meilleure fiabilité, il est conseillé une modélisation en régime transitoire, car cela consentira d'apprendre l'élévation de la nappe observée au niveau de l'exutoire. Par ailleurs, le modèle réalisé dominera la contribution d'informations quelconques sur la géométrie, les paramètres hydrodynamiques, les prélèvements, la recharge et les conditions aux limites.

Cet approfondissement conçoit la première prospection de l'aquifère de socle fissuré dans le sous-bassin faisant appel à la modélisation et à l'imagerie géophysique TRE dans le but de contribuer à la gestion de la ressource en eau du Burkina Faso.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES

- Abdou Babaye, M.S., Sandao, I., Saley, M.B., Wagani, I., Ousmane, B., 2017. Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 10, 2728. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.26>
- Aboyeji, O.S., Eigbokhan, S.F., 2016. Evaluations of groundwater contamination by leachates around Olusosun open dumpsite in Lagos metropolis, southwest Nigeria. *Journal of environmental management* 183, 333–341.
- Adiaffi, B. 2008. Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact " socle-bassin sédimentaire" du sud-est de la Côte d'Ivoire (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., Bachaoui, E.M., 2017. Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research* 60 (11), 2355–2367. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.006>
- Ahouidi, H., Gnandi, K., Tanouayi, G., Ouro-Sama, K., 2015. Caractérisation Physico-Chimique et Etat de pollution par les éléments traces métalliques des eaux souterraines de Lomé (Sud Togo): cas du quartier Agoe Zongo. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782* 41–56.
- Ahoussi, K., Oga, Y., Koffi, Y., Kouassi, A., Soro, N., Biemi, J., 2012. Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire: Cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v5i6.32>
- Ahoussi, K.E., Koffi, Y.B., Kouassi, A.M., Soro, G., Soro, N., Biémi, J., 2012. Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi: cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 6, 1854–1873.
- Akokponhoué, B.H., Yalo, N., Lasm, T., Youan, T.M., Alassane, A., Kouamé, J.K., Akokponhoué, N.Y., Hounton, C.C., Suanon, F., 2017. Contribution of Remote Sensing to the Structural Mapping of Aquifers with Large Water Flows in the Crystalline Hard Rock in the Department of Dongo (North-West of Benin). *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12.
- Akokponhoué, N., Yalo, N., Akokponhoué, B., Youan Ta, M., Agbahoungba, G., 2019. Apport De La Télédétection Et De La Géophysique Dans La Cartographie Des Fractures Hydrauliquement Actives En Zone De Socle Au Centre-Ouest Du Benin.
- Al Khawaja, U., Stoof, H., 2001. Skyrmions in a ferromagnetic Bose–Einstein condensate. *Nature* 411, 918–920.
- Alle, I.C., 2019. Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique (Doctoral dissertation, Université d'Abomey-Calavi (Bénin))
- Amadou, H., Laouali, M.S., Manzola, A., 2014. Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de trois aquifères de la région de Tillabéry: application des méthodes d'analyses statistiques multi variées. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources* 15, 167–173.

- Antoni, J.-P., Lerond, E., Moisy, S., Klein, O., 2017. Six nuances d'a-grey-gation L'influence du choix des unités spatiales d'agrégation sur la lecture et l'interprétation des résultats cartographiés. In Treizièmes Rencontres de Théo Quant.
- Ashraf, M.A., Maah, M., Yusoff, I., 2012. Morphology, geology and water quality assessment of former tin mining catchment. *The Scientific World Journal* 2012.
- Atteia, O., Huberson, S., Dupuy, A., 2011. A fast flux tube-based method for solute-transport simulation. *Hydrogeology journal* 19, 317–328.
- Ayouba Mahamane, A., Guel, B., 2015. Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9, 517. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i1.44>
- Bamba, O., Pelede, S., Sako, A., Kagambega, N., Miningou, M.Y., 2013. Impact de l'artisanat minier sur les sols d'un environnement agricole aménagé au Burkina Faso. *Journal des sciences*, 13(1), 1-11.
- Berné, S., Aloïsi, J.C., Baztan, J., Dennielou, B., Droz, L., Dos Reis, T., Lofi, J., Méar, Y., Rabineau, M., Satra, C., 2002. Notice de la carte morpho-bathymétrique du Golfe du Lion. IFREMER et Région Languedoc Roussillon, Brest 48.
- Bessoles, B., 1977. Géologie de l'Afrique. Le craton ouest Africain.
- Biémi, J., 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Mémoire de doctorat, Université d'Abidjan.
- Billaux, D., Dedecker, F., 2018. Modélisation numérique des roches et fracturation: du continu au discontinu. *Revue Française de Géotechnique*, (155), 2.
- Bordes, J., 1987. Protection of abstraction points for water intended for human consumption. *Bulletin de liaison du CIEH* (69) 2–6.
- Boronina, A., Renard, P., Balderer, W., Christodoulides, A., 2003. Groundwater resources in the Kouris catchment (Cyprus): data analysis and numerical modelling. *Journal of Hydrology* 271, 130–149.
- Bouteraa, O., Mebarki, A., Nouaceur, Z., Laignel, B., 2018. HYdrogeochimie, et variations spatio-temporelles de la qualite des eaux souterraines dans le bassin versant de boumerzoug-nord est ALGERIE. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre* 31–41.
- Brassington, F.C., Younger, P.L., 2010. A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water and Environment Journal* 24, 261–273.
- Bretzler, A., Lalanne, F., Nikiema, J., Podgorski, J., Pfenninger, N., Berg, M., Schirmer, M., 2017. Groundwater arsenic contamination in Burkina Faso, West Africa: Predicting and verifying regions at risk. *Science of the Total Environment* 584, 958–970.
- Cañamon Valera, I., 2006. Analyse et modélisation des phénomènes couplés thermo-hydro-mécaniques en milieux fracturés 3D. (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat (en anglais). IMFT, Institut National Polytechnique de Toulouse & Universidad Politécnica de Madrid (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas), Madrid)
- Carrière, S., 2010. Modélisation hydrogéologique à grande échelle: choix conceptuels et calibration: exemple du bassin de la Dyle (Belgique).
- Carter, R.C., Parker, A., 2009. Climate change, population trends and groundwater in Africa. *Hydrological Sciences Journal* 54, 676–689.
- Cesar, E., 2012. Modélisation régionale des écoulements souterrains et du transport de nitrates dans le bassin de la Dyle amont. Master complémentaire en ressources en eau. Université de Liège, Belgique.

- Chalikakis, K., 2006. Application de méthodes géophysiques pour la reconnaissance et la protection de ressources en eau dans les milieux karstiques. (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France, 217pp).
- Cheikh, F., 2016. Identification de fractures dans un milieu poreux. (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie)).
- Chemseddine, F., Abderrahmane, B., Abdelkader, R., Elias, S., 2010. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie* 5. <https://doi.org/10.4314/afsci.v5i2.61732>
- Chenevoy, M., & Piboule, M. (2007). Hydrothermalisme : spéciation métallique hydrique et systèmes hydrothermaux. EDP sciences.
- Chilton, P.J., Foster, S.S.D., 1995. Hydrogeological characterisation and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology journal* 3, 36–49.
- Clemenceau, B., 2018. Où en est le droit des êtres humains à l'eau et à l'assainissement depuis l'adoption de la résolution n° 64/292 de l'Assemblée générale des Nations Unies du 28 juillet 2010. *La Revue des droits de l'homme. Revue du Centre de recherches et d'études sur les droits fondamentaux*, (13).
- Comte, F., Coutin, L., Renault, E., 2012. Affine fractional stochastic volatility models. *Annals of Finance* 8, 337–378.
- Courbet, C., 2009. Etude de l'évolution d'une pollution industrielle aux solvants chlorés dans une nappe alluviale (Doctoral dissertation) Université Pierre et Marie Curie de Paris.
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougairé, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., 2010. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Ground Water* 48, 269–283. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x>
- Dahl, R., Hein K., A., Séjourné, S., Ouédraogo, C., Giovenazzo, D., 2018. Carte de synthèse géologique, structurale et des substances minérales du BURKINA FASO à l'échelle 1/1 000 000, *Effigis Géo-Solutions*. ed.
- Dahlin, T., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52 (5): 379–398.
- Dakoure, D., 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso-Mali): essai de modélisation (PhD Thesis). Paris 6.
- Darcel, C., 2002. Corrélations dans les réseaux de fractures: caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques (PhD Thesis). Université Rennes 1.
- Dassargues, A., 1990. Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 113 (2).
- De Dreuzy, J.-R., 2000. Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures. Université de Rennes, Rennes.
- Delorme, M., 2015. Ecoulements en milieux fracturés : vers une intégration des approches discrètes et continues. (Doctoral dissertation), Université de Toulouse.
- Dewandel, B., 2019. Aquifères de socle: schémas conceptuels, essais par pompage et régionalisation des propriétés hydrodynamiques (PhD Thesis). Université de Montpellier.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology* 330, 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>

- Diallo, B.M.L., 2014. Impact de la crue fluviale sur les écosystèmes et les conditions de vie des populations riveraines du NAKANBE (BURKINA FASO). (PhD Thesis). Université de Ouagadougou.
- Dieng, B., DE HEUSCH KOUASSI, A., Bakyono, B.A., 2004. Optimisation de l'implantation géophysique des forages en zone de socle au Nord du Burkina Faso. *Sud Sciences et Technologies French*. 2004 ;12:21-30
- Diersch, H.-J.G., Kolditz, O., 2002. Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Advances in Water Resources* 25, 899–944. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00063-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00063-5)
- Ducellier, G., 1953. Laboratory Cycloconcentrator. *Analytical Chemistry* 25, 1575–1575.
- Ducellier, J., 1963. Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute-Volta. Editions Technip. Mém BRGM 10, 320 pp
- Eblin, S., 2014. Dégradation des écosystèmes environnementaux dans la région d'Adiaké (Sud-est côtier de la Côte d'Ivoire) et risque de pollution des eaux: Apport d'un SiG (PhD Thesis). Thèse de Doctorat unique de l'Université FHB, Abidjan (Côte d'Ivoire) 205p.
- Edet, A., Okereke, C., Teme, S., Esu, E., 1998. Application of remotesensing data to groundwater exploration: A case study of the cross river state, southeastern Nigeria 6, pp, 394–404.
- Engalenc, M., Sawadogo, A.N. (1975).Rôle de la fracturation dans la recherche des eaux souterraines dans les granites de l'Afrique occidentale. *Bull CIEH n°20*, Ouagadougou, p.2-7.
- Ewodo Mboudou, G., Bon, A.F., Bineli, E., Ntep, F., Ombolo, A., 2018. Caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la région de l'extrême Nord, Cameroun. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences* 14, 25. <https://doi.org/10.4314/jcas.v14i1.3>
- Faillat, J.P., Drogue, C., 1993. Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological Sciences Journal* 38, 215–229. <https://doi.org/10.1080/02626669309492664>
- Fargier, Y., 2011. Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)).
- Faye, M.D., Biaou, A.C., Soro, D.D., Leye, B., Koita, M., Yacouba, H., 2020. Understanding groundwater pollution of sissili catchment area in BURKINA-FASO. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782* 0, 121–144.
- Faye, M.D., Kafando, M.B., Sawadogo, B., Panga, R., Ouédraogo, S., Yacouba, H., 2022. Groundwater Characteristics and Quality in the Cascades Region of Burkina Faso. *Resources* 11, 61.
- Fekhaoui, M., Pattee, E., 1993. Impact de la ville de Fès sur l'oued Sebou : étude physico-chimique. *Bull. Ins. Sci.(Rabat)* 17, 1–12.
- Fleurant (2016). « Transfert d'une pollution soluble dans un aquifère par une approche multi-agents ». *Cybergeo: European Journal of Geography*. En ligne : <http://cybergeo.revues.org/27475> DOI : 10.4000/cybergeo.27475
- Gadelle, F., 1995. Le monde manquera-t-il bientôt d'eau ? *Science et changements planétaires/Sécheresse* 6, 9–14.
- Gandy, C.J., Younger, P.L., 2003. Effect of a Clay Cap on oxidation of Pyrite within Mine Spoil. *Quarterly. Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 36, 207–215.
- Ghazali, D., Zaid, A., 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès-Maroc). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*.

- Ghoraba, S.M., Zyedan, B.A., Rashwan, I.M.H., 2013. Solute transport modeling of the groundwater for quaternary aquifer quality management in Middle Delta, Egypt. *Alexandria Engineering Journal* 52, 197–207.
- Giovenazzo, D., Séjourné, S., Hein K, A., Jébrak, M., Dahl, R., Ouédraogo, C., Ouédraogo, F., Wenmenga, U., 2018. Notice explicative de la carte de synthèse géologique, structurale et des substances minérales du BURKINA FASO à l'échelle 1/1 000 000., l'équipe d'Effigis Géo-Solutions. ed.
- Gnamba, F., Baka, B., Sombo, A., Kpan, O., Oga, Y., 2019. Analyse quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines de la region de katiola (CÔTE D'IVOIRE). *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 117–134.
- Goblet, P., 1981. Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère. Ecole nationale supérieure des mines de Paris. University Pierre and Marie Curie, Paris, France, 200 p., 1980).
- Goderniaux, P., Brouyere, S., Blenkinsop, S., Burton, A., Fowler, H.J., Orban, P., Dassargues, A., 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios. *Water Resources Research*, 47 (12).
- Gournay, A., 2012. Analyse statistique multivariée. Neuchâtel, Suisse: Université de Neuchâtel. Suisse.
- Guihéneuf, N., 2014. Structure des écoulements et propriétés de transport des aquifères cristallins fracturés et altérés: Application au site de Choutuppall (Inde du Sud) (PhD Thesis). Université Rennes 1.
- Guiraud, M., BURG, J.-P., Powell, R., 1987. Evidence for a Variscan suture zone in the Vendée, France: a petrological study of blueschist facies rocks from Bois de Cené. *Journal of Metamorphic Geology* 5, 225–237.
- Guyot, L., 2002. Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride: Sud Ouest de Madagascar (PhD Thesis). Université de Nantes.
- Hacini, M., 2006. Géochimie des sels et des saumures du chott Merouane et calcule des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques. thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKTAR DE ANNABA (UBMA) 190.
- Hanon, M., Rouelle, A., 2011. Le pH de l'eau de distribution. Portail environnement de Wallonie, Belgique.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. Modflow-2000, the u. s. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Open-file Report. U. S. Geological Survey 134.
- Hassane, A.B., 2010. Aquiferes superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger) Thèse de l'Univ, Abdou Moumouni de Niamey (Niger), p. 198.
- Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., Anderman, E.R., 2000. MODFLOW-2000, the US Geological Survey modular ground-water model; user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs (No. 2000-184, pp. 1-209). US Geological Survey.
- Hottin, G., OUEDRAOGO, F., 1975. Notice explicative de la carte geologique a 1/1 000 000 de la Republique de Haute-Volta, Ouagadougou, Direction de la geologie et des mines 58.
- Hounsinou, P., Mama, D., Dovonou, F., n.d. Alasane A. 2015. Seasonal evolution of the quality microbiological of the natural waters in the township of Abomey-Calavi (South Benin). *British Journal of Earth Sciences Research* 3, 30–41.

- Hunt, A.G., Gee, G.W., 2002. Application of critical path analysis to fractal porous media: Comparison with examples from the Hanford site. *Advances in Water Resources* 25, 129–146.
- Ikem, A., Osibanjo, O., Sridhar, M.K.C., Sobande, A., 2002. Evaluation of groundwater quality characteristics near two waste sites in Ibadan and Lagos, Nigeria. *Water, Air, and Soil Pollution* 140, 307–333.
- INSD, 2020. Cinquième Recensement Général de la Population et de l’Habitation du Burkina Faso : Résultats Préliminaires du 5e RGPH, 2019. Institut National des Statistiques et de la Démographie. 76 p. [WWW Document]. URL (accessed 7.18.22).
- Iskandar, I., Koike, K., 2011. Distinguishing potential sources of arsenic released to groundwater around a fault zone containing a mine site. *Environmental Earth Sciences* 63, 595–608.
- Jin, J.-M., 2015. The finite element method in electromagnetics. John Wiley & Sons. (Wiley, New York, 1993), Chap. 5.7.
- Jourda, J.P., 2005. Méthodologie d’application des techniques de télédétection et des systèmes d’information géographique à l’étude des aquifères fissurés d’Afrique de l’ouest. Concept de l’Hydrotechniquespatiale: cas des zones tests de la Côte d’Ivoire. Concept de l’hydrotechnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d’Ivoire. These de Doctorat d’État, université de Cocody (Abidjan).
- Kahoul, M., Touhami, M., 2014. Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de consommation de la ville d’Annaba (Algérie). *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*.
- Kania, L., 2006. Modelling of rollers in calculation of slewing bearing with the use of finite elements. *Mechanism and machine theory* 41, 1359–1376.
- Khemgani, M.A., HAMDI-AISSA Baelhadj, H., 2010. Caractérisation des sols alluviaux et de la nappe alluviale de l’oasis de Guerrara (PhD Thesis).
- Kohonen, T., Schroeder, M.R., Huang, T.S., Maps, S.-O., 2001. Springer-Verlag New York. Inc., Secaucus, NJ 43.
- Koita, M., Jourde, H., Ruelland, D., Koffi, K., Pistre, S., Savane, I., 2010. Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l’hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d’Ivoire. *Hydrological Sciences Journal* 55, 805–820. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.489749>
- Kouakou, E.G.K., Sombo, A.P., Bie, G.R., Ehui, A.K.A., Kouame, L.N., 2016. Comparative study of the results of electrical sounding and drilling logs in basement region. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828* 101–119.
- Kouakou, K.E.G., Dosso, L., Kouame, L.N., Sombo, A.P., 2015. Contribution des méthodes de resistivité électrique a la recherche d’eau en milieu cristallin : cas de yakassé-attobrou et d’abié, région de la mé, CÔTE D’IVOIRE 18.
- Kouakou, K.E.G., Lasm, T., Sombo, B.C., Ta, M.Y., Baka, D., Kouadio, K.E., 2014. Contribution de la géophysique à l’étude structurale et à l’identification des aquifères de fissures dans le Département de Dabakala (Centre-Nord Côte d’Ivoire) 8, 18.
- Kouamé, K. F., Akaffou, A. G., Lasm, T., De Dreuzy, J. R., Davy, P., & Bour, O. (2005, November). Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés : application au socle Archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d’Ivoire). In *Actes du Colloque Internationale SITIS* (Vol. 5, pp. 39-46).
- Kouanda, B., Coulibaly, P., Niang, D., Fowe, T., Karambiri, H., 2018. Analysis of the Performance of Base Flow Separation Methods Using Chemistry and Statistics in Sudano-Sahelian Watershed, Burkina Faso. *Hydrol. Current Res* 9, 300.

- Kouassi, A.M., Ahoussi, K.E., Yao, K.A., Ourega, W., Yao, K.S.B., Biemi, J., 2012. Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N’zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d’Ivoire). *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2602-7828.
- Koussoube, Y., Savadogo, A., 2017. Champs captants sur mégafractures du socle et généralisation des réseaux d’adduction d’eau potable en milieu rural : concept et faisabilité technique *Rév. Ivoir. Sci. Technol.*, 30 (2017) 235 - 251.
- Koussoubé, Y., 1996. Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso: Cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga).. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Univ. Cheikh Anta Diop, Sénégal, 210 p.
- Koussoube, Y., Savadogo, A.N., Nakolendousse, S., Bazie, P., 2000. Efficience de trois méthodes géophysiques d’investigation latérale dans la mise en évidence de contacts entre des formations géologiques du Protérozoïque inférieur du Burkina Faso Evaluation of the efficiency of three geophysical methods for the determination of natural contacts between Lower Proterozoic geological formations of Burkina Faso insu-00947806. Communication.
- Kuitcha, D., Takounjou, A.L.F., Ndjama, J., 2013. Contribution of hydrochemistry and environmental isotope knowledge of groundwater resources in Yaoundé, Cameroon. *Journal of Applied Biosciences* 67, 5194–5208.
- Kumar, S.S., Muttan, S., 2006. PCA-based image fusion, in: Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XII. International Society for Optics and Photonics, p. 62331T.
- Lachassagne, P., Wyns, R., 2005. Aquifères de socle: nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences* 32–37.
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., 2011. The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes: Weathering and permeability of Hard Rock Aquifers. *Terra Nova* 23, 145–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x>
- Laghouag, M.Y., 2011. Apport de la télédétection (images Landsat 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d’Aflou (Atlas saharien). Mémoire Ingénieur. Univ, Sétif 87p.
- Lalanne, F., 2012. Étude de la qualité de l’eau le long de la chaîne approvisionnement au niveau des consommateurs dans 10 villages de la Province du Ganzourgou. Région du Plateau Central, Burkina Faso 71.
- Langevin, C.D., Guo, W., 2006. MODFLOW/MT3DMS–based simulation of variable-density ground water flow and transport. *Groundwater* 44, 339–351.
- Larissa Eba, A.E., Kouame, K.J., Deh, S., Balliet, R., Touré, M., Anoh, A.K., Roger Jourda, J.P., 2016. Évaluation De La Vulnérabilité A La Pollution D’une Eau De Surface Destinée A L’adduction D’eau Potable D’une Métropole. Cas De La Lagune Agheïn A Abidjan, (Sud De La Côte D’ivoire). *European Scientific Journal*, ESJ 12, 306. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p306>
- Lasm, T., 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques; application à la région des montagnes de Côte d’Ivoire (domaine archéen) (PhD Thesis). Poitiers.
- Lasm, T., De Lasmé, O., Oga, M.-S., Youanta, M., Baka, D., Kouame, F., Yao, T.K., 2011. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d’Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 (2).
- Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Caudal, J.-P., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology* 328, 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029>

- Leray, S., de Dreuzy, J.-R., Bour, O., Bresciani, E., 2013. Numerical modeling of the productivity of vertical to shallowly dipping fractured zones in crystalline rocks. *Journal of Hydrology* 481, 64–75.
- Lghoul, M., Kchikach, A., Hakkou, R., Zouhri, L., Guerin, R., Bendjoudi, H., Teixido, T., Pena, J.A., Enrique, L., Jaffal, M., 2012. Geophysical and hydrogeological study of the abandoned mining site of Kettara (Marrakech, Morocco): contribution to the rehabilitation project. *Hydrological Sciences Journal* 57, 370–381.
- Lghoul, M., Maqsoud, A., Hakkou, R., Kchikach, A., 2014. Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco. *Journal of Geochemical Exploration* 144, 456–467. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.003>
- Li, P., Jiang, L., Feng, Z., 2013. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote Sensing* 6, 310–329. <https://doi.org/10.3390/rs6010310>
- Licteuvout, E., 2018. Accès à l'eau souterraine des populations vulnérables en zone aride: un problème de ressource, de gestion ou d'information? (PhD Thesis). Université Montpellier.
- Lindberg, R.H., Björklund, K., Rendahl, P., Johansson, M.I., Tysklind, M., Andersson, B.A., 2007. Environmental risk assessment of antibiotics in the Swedish environment with emphasis on sewage treatment plants. *Water research* 41, 613–619.
- Loukman, B., Nakolendousse, S., Nour, A.M., Nguinambaye, M.M., 2017. Caractérisation hydrochimique de la nappe de Yao et ses environs: relations entre eaux de surface (lac-Fitri) et eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 11, 1336–1349.
- Luo, R., Liu, B., Xie, Y., Li, Z., Huang, W., Yuan, J., He, G., Chen, Y., Pan, Q., Liu, Y., 2012. SOAPdenovo2: an empirically improved memory-efficient short-read de novo assembler. *Gigascience* 1, 2047–217X.
- Mahamane, A.A., Guel, B., 2015. Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9, 517–533.
- Mahamat, S.A.M., Maoudombaye, T., Abdelsalam, T., Ndoumtamia, G., Loukhman, B., 2015. Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'adduction publique de la Société Tchadienne des Eaux à N'djamena au Tchad. *Journal of Applied Biosciences* 95, 8973–8980.
- Majolagbe, A.O., Adeyi, A.A., Osibanjo, O., Adams, A.O., Ojuri, O.O., 2017. Pollution vulnerability and health risk assessment of groundwater around an engineering Landfill in Lagos, Nigeria. *Chem. Int* 3, 58–68.
- Malik, N., Shimi, N.S., 2019. Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Gafsa (Sud-Ouest de la Tunisie): Effets anthropiques et conséquences. *Algerian Journal of Environmental Science and Technology* 5 (4).
- Maréchal, J.-C., Dewandel, B., Subrahmanyam, K., 2004. Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research* 40 (11).
- Marescot, L., Monnet, R., Chapellier, D., 2008. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology* 98, 18–28.
- Matini, L., Moutou, J.M., Kongo-Mantono, M.S., 2009. Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie* 5 (1).
- Mfonka, Z., Ngoupayou, J.N., Ndjigui, P.D., Zammouri, M., Kpoumie, A., Rasolomanana, E., 2015. Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau

- Bamoun (Ouest Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9, 2200–2218.
- Milville, F., 1991. Rapport I.4 L'étude des mécanismes de la recharge naturelle des aquifères en climat semi-aride. Application au bassin versant de Barogo au Burkina Faso. *Journées de l'hydraulique* 21, 1–10.
- Ministère de l'Hydraulique, B., 2010. Etat des lieux des ressources en eau du bassin du nakanbe - rapport final.
- Moussa, A.B., Zouari, K., Marc, V., 2011. Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Hammamet–Nabeul, north-eastern Tunisia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36, 167–178.
- Nakolendousse, S., Yaméogo, S., Savadogo, A.N., Koussoube, Y., 2009. Contribution des mesures géophysiques électriques et électromagnétiques dans l'étude du site du barrage de Samendéni: mise en évidence de failles et d'intrusion de dolérites. *Sécheresse* 20, 232–236. <https://doi.org/10.1684/sec.2009.0188>
- Nicaise, Y., Bertrand, A. H., Marc, Y. T., and George, A., (2019) Apport De La Télédétection Et De La Géophysique Dans La Cartographie Des Fractures Hydrauliquement Actives En Zone De Socle Au Centre-Ouest Du Benin (Contribution of Remote Sensing and Geophysics to the Mapping of Hydraulically Active Fractures in the Central-Western Region of Benin). <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n27p426>
- Njueya, A.K., Kengni, L., Fonteh, M.F., Dongmo, A.K., Ntankouo, R.N., Nkouathio, D.G., Tazo, C., 2016. Apport des Sondages Électriques Verticaux à la Localisation et la Caractérisation des Aquifères en zone Volcanique au Cameroun : Cas d'Ebone et ses Environs. *European Journal of Scientific Research*, 131(1), 54-65.
- Nkhuwa, D.C., 2003. Karstified marble terrain-an engineering geologic challenge of urban development in Lusaka, Zambia. *Materials and Geoenvironment* 50, 273–276.
- Noronha, F., Cathelineau, M., Boiron, M.-C., Banks, D.A., Dória, A., Ribeiro, M.A., Nogueira, P., Guedes, A., 2000. A three stage fluid flow model for Variscan gold metallogenesis in northern Portugal. *Journal of Geochemical Exploration* 71, 209–224.
- Oluseyi, T., Adetunde, O., Amadi, E., 2014. Impact assessment of dumpsites on quality of near-by soil and underground water: a case study of an abandoned and a functional dumpsite in Lagos, Nigeria. *Int J Sci Environ Technol* 3, 1004–15.
- Orban, P., Jamin, P., Van Cutsem, F., Dassargues, A., 2011. Captage de Pêchet: Etude hydrogéologique en vue de préciser l'extension des zones de prévention. (CILE11/1). Rapport d'expertise (rapports)
- Osibanjo, O., Majolagbe, A.O., 2012. Physicochemical quality assessment of groundwater based on land use in Lagos city, southwest, Nigeria. *Chem J* 2, 79–86.
- Ouandaogo-Yameogo, S., Blavoux, B., Nikiema, J., Savadogo, A.N., 2013. Caractérisation du fonctionnement des aquifères de socle dans la région de Ouagadougou à partir d'une étude de la qualité chimique des eaux. *Revue des sciences de l'eau* 26, 173–191. <https://doi.org/10.7202/1018784ar>
- Pagès, J., 2004. Analyse factorielle de données mixtes : principe et exemple d'application. En: Montpellier SupAgro, <http://www.agro-montpellier.fr/sfds/CD/textes/pages1.pdf>
- Paillet, F.L., 1998. Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. *Water Resources Research* 34, 997–1010.
- Paturel, J.-E., Boubacar, I., L'Aour, A., Mahé, G., 2010. Analyses de grilles pluviométriques et principaux traits des changements survenus au 20ème siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques* 55, 1281–1288.
- Penant, P., 2016. Caractérisation des sources de nitrate dans les aquifères cristallins du Centre du Bénin. Mémoire de Master 97 p.

- Philippe, É., 2011. Contribution à la modélisation du transfert des nitrates au travers de la zone non saturée à l'échelle régionale : application au bassin de la Seine (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25, 914–928.
- Rabilou, S.M., Mousbahou, M.A.M., Laouali, M.S., Ibrahim, N., Habou, I., 2018. Caractérisation Physico-Chimique Des Eaux Souterraines Du Socle De La Région De Zinder (Niger) Pendant La Saison Des Pluies Et La Saison Sèche. *European Scientific Journal*, ESJ 14, 317. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p317>
- Rafini, S., 2012. Comportement hydraulique des milieux faillés. Université du Québec à Chicoutimi. PhD Thesis, Université du Québec à Montréal, Canada.
- Raveendran, R., Ashworth, B., Chatelier, B., 2001. Manganese removal in drinking water systems, in: 64th Annual Water Industry Engineers and Operators Conference. Citeseer, pp. 92–100.
- Renac, C., Gal, Fr., Ménot, R.-P., Squarcioni, P., Perrache, Ch., 2009. Mean recharge times and chemical modelling transfers from shallow groundwater to mineralized thermal waters at Montrond-les-Bains, Eastern Massif Central, France. *Journal of Hydrology* 376, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.011>
- Roques, C., 2013. Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin : implications en terme de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Rennes, France: Université de Rennes), 285 p.
- Rusli, N., Majid, M.R., Din, A.H.M., 2014. Google Earth's derived digital elevation model: A comparative assessment with Aster and SRTM data, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 18 (1) p. 012065.
- Sagatzky, J., 1950. Carte géologique de reconnaissance-Notice explicative sur la feuille Tenkodogo-Est 1: 500 000.-31 p., 1 fig. Dakar.
- Sako, A., Bamba, O., Gordio, A., 2016. Hydrogeochemical processes controlling groundwater quality around Bomboré gold mineralized zone, Central Burkina Faso. *Journal of Geochemical Exploration* 170, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.009>
- Sako, A., Yaro, J.M., Bamba, O., 2018. Impacts of hydrogeochemical processes and anthropogenic activities on groundwater quality in the Upper Precambrian sedimentary aquifer of northwestern Burkina Faso. *Applied Water Science* 8 (3), 1-14.
- Samardzioska, T., Popov, V., 2005. Numerical comparison of the equivalent continuum, non-homogeneous and dual porosity models for flow and transport in fractured porous media. *Advances in Water Resources* 28 (3), 235–255.
- Sauret, E., 2005. Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux souterraines du projet hydraulique villageois 310 forages dans la boucle du Mouhoun dans les provinces des Banwa des Balés, Mouhoun et de la Kossi (Burkina Faso) Mémoire de fin d'études d'ingénieur géologue. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (p. 63).
- Savadogo, N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta: étude régionale du bassin versant de la Sissili (Doctoral dissertation, Université scientifique et médicale de Grenoble).
- Savadogo, N., 1975. Hydrogéologie du bassin versant de la Haute-Sissili (Haute-Volta) (Doctoral dissertation, Université scientifique et médicale de Grenoble).
- Schwartz, M.O., Kgomanyane, J., 2008. Modelling natural attenuation of heavy-metal groundwater contamination in the Selebi-Phikwe mining area, Botswana. *Environmental geology* 54, 819–830.
- Singhal, T., Narayanan, T.K., Jain, V., Mukherjee, J., Mantil, J., 2008. 11 C-1-methionine positron emission tomography in the clinical management of cerebral gliomas. *Molecular Imaging and Biology* 10, 1–18.

- Smedley, P.L., Knudsen, J., Maiga, D., 2007. Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Applied Geochemistry* 22, 1074–1092.
- Sombo, A.P., Kouakou, K.É.-G., Eblin, S.G., Sombo, B.C., 2019. Caractérisation hydrogéologique, par télédétection et géophysique d'accidents régionaux en zone de socle: cas de Sikensi-Tiassalé, Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE* 15, 313–327.
- Soncy, K., Djeri, B., Anani, K., Eklou-Lawson, M., Adjrah, Y., Karou, D.S., Ameyapoh, Y., De Souza, C., 2015. Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits et de forage à Lomé, Togo. *Journal of Applied Biosciences* 91, 8464–8469.
- Soro, D.D., 2017. Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso) (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement).
- Soro, N., Ouattara, L., Dongo, K., Kouadio, E., Ahoussi, E., Soro, G., Oga, M., Savane, I., Biemi, J., 2011. Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire: sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 4n (6). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i6.64952>
- Souley Moussa, R., Malam Alma, M.M., Laouli, M.S., Natatou, I., Habou, I., 2019. Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire / Hamadien et du Continentalsiems Terminal de la région de Zinder (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 12, 2395. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i5.37>
- Stamm, C., Sermet, R., Leuenberger, J., Wunderli, H., Wydler, H., Flühler, H., Gehre, M., 2002. Multiple tracing of fast solute transport in a drained grassland soil. *Geoderma* 109, 245–268.
- Ta, M.Y., Lasm, T., Adja, G.M., Kouamé, K.J., Biémi, J., 2011. Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique* 21, 43–71.
- Ta, M.Y., Lasm, T., Jourda, J.P., Kouamé, K.F., Razack, M., 2008. Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 8(2), 119-135
- Tanouayi, G., Gnandi, K., Ahoudi, H., 2015. La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoe-Kpogame (Sud-Togo): cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782* 25–40.
- Taylor, R., Howard, K., 2000. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal* 8, 279–294.
- Todd, D.K., Larry, W., 2005. *Mays. Groundwater Hydrology*. 3rd ed. Np: Argosy.
- Travi, Y., Dia, O., 1986. Interprétation hydrochimique sur les nappes de formation de socle du Sénégal Oriental. Programme CEAO Rapport, Département de Géologie. Dakar.
- Tsang, Y.W., Tsang, C.F., 1987. Channel model of flow through fractured media. *Water Resources Research* 23, 467–479.
- Vadde, K.K., Wang, J., Cao, L., Yuan, T., McCarthy, A.J., Sekar, R., 2018. Assessment of water quality and identification of pollution risk locations in Tiaoxi River (Taihu Watershed), China. *Water* 10, 183.
- Valfrey-Visser, B., Rama, M., 2012. Rapport pays- Etats des lieux de l'eau et de l'assainissement au niveau national, Livre bleu. L'eau, la vie et le développement humain. Rapport Pays, s/c Eau Vive Burkina, Ouagadougou, février, 2e édition

- Vicat, J.-P., Mvondo, H., Willems, L., Pouclet, A., 2002. Phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe pan-africaine de Yaoundé (Sud-Cameroun). *Comptes Rendus Geoscience* 334, 545–550.
- Vicinanza, M.R., Restaino, R., Vivone, G., Dalla Mura, M., Chanussot, J., 2014. A pansharpening method based on the sparse representation of injected details. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 12, 180–184.
- Vouillamoz, J.M., Tossa, A.Y.A., Chatenoux, B., Kpegli, K.A.R., 2015. Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle. *Aquifères Socle: le point Sur Concepts Appl. Opérationnelles*. La Roche-sur-Yon, juin 2015.
- Wright, E. P. & Burgess, W. (1992) *The Hydrology of Crystalline Basement Aquifers in Africa*. Geol. Soc. London Spec. Publ. 66, London, UK
- Wu, M., Li, W., Dick, W.A., Ye, X., Chen, K., Kost, D., Chen, L., 2017. Bioremediation of hydrocarbon degradation in a petroleum-contaminated soil and microbial population and activity determination. *Chemosphere* 169, 124–130.
- Yameogo, A., Some, Y.S.C., Sirima, A.B., Da, D.E.C., 2020. Occupation des terres et érosion des sols dans le bassin versant supérieur de la Sissili, Burkina Faso. *Afrique Science* 17, 43–56.
- Yameogo, S., 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité. Université Avignon et pays de Vaucluse, (Doctoral dissertation, Université d'Avignon). p245.
- Yao TK. 2009. Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du Département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de Doctorat en cotutelle, Conservatoire national des Arts et Métiers, France et Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 265p.
- Yazicigil, H., Er, C., Ates, J.S., Camur, M.Z., 2009. Effects of solution mining on groundwater quality in the Kazan trona field, Ankara-Turkey: model predictions. *Environmental geology* 57, 157–172.
- Youan Ta, M., 2008. Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire, cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université de Cocody, 237 p.
- Youan Ta, M., Lasm, T., Jourda, J.P.J., Bachir Saley, M., Adja Miessan, G., Kouamé, K., Biémi, J., 2011. Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique* 21, 43–71. <https://doi.org/10.3166/riq.21.43-71>
- Zerhouni, J., FILALI, F.R., Aboukacem, A., 2015. Qualité et facteurs de risque de pollution des eaux souterraines périurbaines de la ville de SEBAA AYOUNE (MEKNES, MAROC). *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 91–107.
- Zghibi, A., Zouhri, L., Tarhouni, J., 2011. Groundwater modelling and marine intrusion in the semi-arid systems (Cap-Bon, Tunisia). *Hydrological processes* 25, 1822–1836.
- Zhang, H., Goodfellow, I., Metaxas, D., Odena, A., 2019. Self-attention generative adversarial networks, in: *International Conference on Machine Learning*. PMLR, pp. 7354–7363.
- Zheng, C., Wang, P.P., 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. Contract Report SERDP-99-1

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS	II
SOMMAIRE	IV
RESUME.....	V
ABSTRACT	VI
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE LA CARACTERISATION DES AQUIFERES DE SOCLE ET LEUR MODE DE TRANSFERT DE POLLUANTS	7
I.1 ETAT DE L'ART SUR LA CARACTERISTION DES AQUIFERES DE SOCLE.....	7
I.1.1 SOCLE ET MILIEUX FRACTURES	7
I.1.2 ALTERATION ET MODELES CONCEPTUELS DES AQUIFERES DE SOCLE.....	9
I.1.3 ETAT DE L'ART SUR LA MODELISATION NUMERIQUE	13
I.1.3.1 MODELISATION EN MILIEUX FRACTURES.....	13
I.1.3.1.1 Approches existantes	14
I.1.3.1.2 Approche de type continu équivalent	15
I.1.3.1.3 Approche discrète	16
I.1.3.1.4 Types de données et étapes de la modélisation	16
I.1.3.1.5 Difficultés rencontrées en modélisation	17
I.1.3.2 MODELE NUMERIQUE POUR LE TRANSFERT D'EAU ET DE POLLUANT	18
I.1.3.2.1 Transfert de fluide en milieu fracturé.....	18
I.1.3.2.2 Apport de la modélisation hydrodynamique et de transport de polluant.....	19
I.1.3.2.3 Modèle numérique pour le transfert de soluté.....	20
I.1.4 MODELISATION NUMERIQUE : EQUATIONS ET TECHNIQUES DE RESOLUTION RÉGISSANT LES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS	21
I.1.4.1. Equations régissant les écoulements souterrains	21
I.1.4.2. Conceptualisation de la modélisation des transports de masse :.....	23
I.1.4.2.1 CONDITIONS AUX LIMITES	24
I.1.4.2.2 CALIBRATION DES MODELES HYDROGEOLOGIQUES	24
I.2 ETAT DE CONNAISSANCE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES EN MILIEU DE SOCLE	25
I.3 GEOPHYSIQUE EN HYDROGEOLOGIE ET MODELISATION POUR LES SITES POLLUES	26
I.3.1 Méthode électromagnétique.....	27
I.3.2 Méthode électrique	27
I.3.2.3 Les différentes techniques électriques.....	28

I.3.2.3.1 Traîné ou cartographie électrique	28
I.3.2.3.2 Sondage électrique	29
I.3.2.3.3 Tomographie de résistivité électrique	29
I.3.2.3.4 Interprétation des pseudo-sections et modèles de résistivité	30
I.3.2.3.5 Inversion.....	31
I.4 CONCLUSION PARTIELLE.....	31
CHAPITRE II. PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.....	33
II.1 : LE CADRE PHYSIQUE DU BASSIN DE LA SISSILI	33
II.1.1 Situation géographique.....	33
II.1.2 Dynamique de développement et pressions sur les ressources en eau	34
II.1.2.1 Situation démographique et densité de la population.....	34
II.1.2.2 Urbanisation	36
II.1.2.3 Approvisionnement en eau potable.....	36
II.1.3 Caractéristiques du milieu biophysique.....	37
II.1.3.1 Occupation des terres	37
II.1.3.2 Caractéristiques pédologiques.....	38
II.1.3.3 Paramètres climatiques	39
II.1.4 Réseau hydrographique	42
II.1.5 Végétation	43
II.1.6 Relief	44
II.2 GEOLOGIE DU BURKINA ET DU BASSIN VERSANT	46
II.2.1 Géologie du Burkina en Afrique de l'Ouest.....	46
II.2.2 Géologie du sous-bassin de la Sissili.....	48
II.2.2.1 Ensemble plutonique.....	49
II.2.2.2 Ensemble volcan sédimentaire.....	49
II.2.2.3 Formations rocheuses à forte teneur d'arsenic.....	50
II.2.2.4 Tectonique.....	50
II.3 HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	51
II.4 CONCLUSION PARTIELLE	54
CHAPITRE III : ETAT DES LIEUX ET COMPREHENSION DE LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU SOUS-BASSIN VERSANT DE LA SISSILI AU BURKINA-FASO	56
III.1 MATÉRIELS ET MÉTHODES	57
III.1.1 ACQUISITION DES DONNEES ET ETAT DES LIEUX DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	57
III.1.1.1 Méthode d'échantillonnage	57
III.1.1.2 Démarche méthodologique de traitement et d'analyse des données sur la qualité des eaux	59

III.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS	64
III.2.1 Correction et critique	64
III.2.2 Résultats des caractéristiques physicochimiques et origine des eaux	65
III.2.2.1 Les paramètres physiques	66
III.2.2.2 Les cations	67
III.2.2.3 Les anions	68
III.2.2.4 Les concentrations des ions mineurs	69
III.2.2.5 Métaux lourds et métalloïdes	70
III.2.2.6 Corrélation entre les différentes variables physico-chimiques et chimiques	74
III.2.2.7 Caractérisation des eaux souterraines à partir de l'analyse en composantes principales	77
III.2.2.8 Faciès chimiques des eaux souterraines	79
III.2.2.9 Agressivité des eaux souterraines	80
III.3 CONCLUSION PARTIELLE	82
CHAPITRE IV : CARACTERISATION DE LA STRUCTURE ET DE LA GEOMETRIE DU SYSTÈME AQUIFERE - INVESTIGATIONS GEOPHYSIQUES	84
IV.1 MATERIELS ET METHODES	84
IV.1.1 Données et matériels	84
IV.1.2 Méthodologie	86
IV.1.2.1 Méthodologie pour le traitement des données à partir de la télédétection	86
IV.1.2.2 Méthodes géophysique utilisée pour la caractérisation des aquifères de socle	91
IV.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS	98
IV.2.1 Traitement des données à partir de la télédétection	98
IV.2.1.1 Technique de l'analyse en composantes principale (ACP)	98
IV.2.1.2 Rapport des bandes	99
IV.2.1.3 Composition colorée	99
IV.2.1.3 Application des filtres Sobel	100
IV.2.1.4 Extraction manuelle des linéaments par analyse visuelle	101
IV.2.1.5 Validation des linéaments	102
IV.2.2 Caractérisation des aquifères de socle	111
IV.2.2.1 Traîné électrique	111
IV.2.2.2 Sondage électrique	115
IV.2.2.3 Tomographie de résistivité électrique	119
IV.3 CONCLUSION PARTIELLE	125
CHAPITRE V : MODELISATION NUMERIQUE HYDROGEOLOGIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT DANS LES EAUX SOUTERRAINES	127
V.1 DEMARCHE, INTERET ET OBJECTIF DE CETTE MODELISATION NUMERIQUE	127

V.2 CONSTRUCTION DE MODELE HYDRODYNAMIQUE ET DE TRANSFERT DE POLLUANT	129
V.2.1 MATERIELS ET METHODES	129
V.2.1.1 Elaboration du modèle conceptuel hydrogéologique	129
V.2.1.2 les conditions aux limites	129
V.2.1.3 Paramètres hydrodynamiques	130
V.2.1.4 Paramètres de l'écoulement : Recharge, prélèvements et apports de la rivière	131
V.2.1.5 Simulation numérique du modèle	134
V.2.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS DE LA SIMULATION	138
V.2.2.1 MODELE HYDRODYNAMIQUE	138
V.2.2.1.1 Géométrie et maillage	138
V.2.2.1.2 Conditions aux limites	139
V.2.2.1.3 Simulation numérique	140
V.2.2.1.4 Calage du modèle	141
V.2.2.1.5 Bilan hydrique	143
V.2.2.1.6 Validation	144
V.2.2.1.7 Tests de sensibilité	145
V.3 MODELE DU TRANSPORT DE POLLUANT	147
V.3.1 Objectif	147
V.3.2 Evolution de la pollution au sein de la nappe	147
V.3.3 Simulation de transport du polluant	149
V.4 CONCLUSION PARTIELLE	153
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	155
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES GENERALES	162
TABLE DES MATIERES	174
LISTE DES FIGURES	178
LISTE DES TABLEAUX	181
ANNEXES	181

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation des milieux de socle en Afrique (Wright and Burgess, 1992).....	8
Figure 2: Histogramme du nombre de publications et du nombre de citations de 1998 à 2017 ayant pour sujet « hard rock » dans la base de données Web of Knowledge.....	9
Figure 3 : Ancien concept Ressource en eau localisée dans les fractures tectoniques ou de décompression (Lachassagne and Wyns, 2005).....	10
Figure 4:Profil d'altération typique développé sur roche dure cristalline (Acworth, 1987)...	11
Figure 5 : Nouveau concept : Ressource établi dans les profils d'altération (Wyns et al., 2004)	11
Figure 6:(a) Profil d'altération monophasée sur granite et (b) profil d'altération polyphasée sur granite (Dewandel <i>et al.</i> , 2006).....	13
Figure 7:Diagramme schématique d'écoulement en chenaux dans les fractures (Tsang and Tsang, 1987).....	14
Figure 8 : Schématisation d'un réseau de fractures par un modèle de type double porosité (Warren and Root, 1963).....	16
Figure 9: Etape de la modélisation hydrogéologique (d'après Dassargues, 2011)	17
Figure 10: Relation entre le modèle hydrodynamique et le modèle de transport du polluant (Lghoul, 2014).....	21
Figure 11: Facteurs influençant la dispersion longitudinale à l'échelle du pore (adaptée de Fetter, 2001).....	23
Figure 12: Synthèse des conditions aux limites (Hacini, 2006).....	24
Figure 13: Mesure expérimentale de la résistivité (Chouteau and Giroux, 2006)	28
Figure 14: Schéma illustrant le principe de mesure dans le cas d'un sondage électrique avec le dispositif Schlumberger.....	29
Figure 15 : Construction d'une pseudo-section électrique avec le dispositif Wenner- α (Loke, 2004).....	30
Figure 16: Schéma d'acquisition d'un panneau électrique et d'une pseudo-coupe. Cas d'un dispositif dipôle-dipôle (Boucher, 2007)	30
Figure 17: Méthodes d'inversion pour déterminer un modèle de subsurface.....	31
Figure 18: Situation administrative du bassin du Nakanbé (source DEIE 2014).....	34
Figure 19: Localisation de la zone d'étude (source DEIE 2014)	34
Figure 20: Taux d'urbanisation (%) du Burkina de 1975 à 2019.....	36
Figure 21: Taux d'accès à l'eau potable en milieu rural (Annuaire statistique MEAHA).....	37
Figure 22: Répartition spatiale de l'occupation des terres du sous-bassin.....	38

Figure 23 : Matrice de l'occupation des terres du sous-bassin de la Sissili de 2012 à 2018....	38
Figure 24: Répartition des classes de sols du sous-bassin de la Sissili	39
Figure 25: Evolution inter-annuelle de la pluviométrie-zone soudanienne	40
Figure 26: Indice de pluie annuelle standardisé-zone soudanienne.....	40
Figure 27:Variation mensuelle de la température à la station de Po de 1971 à 2010	41
Figure 28:Evolution de l'humidité relative-zone soudanienne (selon ITXPERTS, 2018)	42
Figure 29:Evolution du module hydrologique de la période de 1965 à 2012 du Sissili	43
Figure 30: Répartition de la végétation du sous-bassin de la Sissili	44
Figure 31: Courbe hypsométrique du sous-bassin Sissili.....	45
Figure 32: Profil en long du cours d'eau de la Sissili	45
Figure 33: Carte géologique simplifiée du craton ouest-africain (adapté de WAXI, 2013)	47
Figure 34 : Carte du schéma structural montrant les principaux domaines structuraux, les cisaillements et les couloirs de déformation.	47
Figure 35: Carte géologique du sous-bassin de la Sissili par Sawadogo 1984	48
Figure 36: Coupe des différentes formations géologiques du sous-bassin de la Sissili par Sawadogo 1984	50
Figure 37: Mode de gisement des ressources en eau souterraine (Savadogo, 1984)	53
Figure 38: Localisation des sites d'échantillonnages du sous-bassin de la Sissili.....	58
Figure 39: Régression linéaire entre les paramètres, HCO ₃ et TDS ; TDS et CE dans les eaux souterraines de la province de la SISSILI	65
Figure 40 : Box plot de la distribution des paramètres physicochimiques.....	73
Figure 41 : Analyse en composantes principales des données physico-chimiques Projection du nuage de points dans l'espace	78
Figure 42 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du sous bassin de la Sissili	80
Figure 43: Filtres directionnels de SOBEL 7x7 a) N-S ; b) E-O ; c) NE-SO et d) : NO-SE	89
Figure 44: Séance d'acquisition mesure avec un résistivimètre Syscal R1 plus 72 switches....	93
Figure 45: Roll Allong ½ (Bernard, 2003).....	96
Figure 46 : Présentation des zones de TRE dans la commune de Kada et Sapouy.....	97
Figure 47 : Mise en évidence des linéaments sur la première composante principale.....	98
Figure 48 : Linéament identifié sur la combinaison (OLI 4/ OLI 3).....	99
Figure 49 : Composition colorée (OLI5-6-7) faisant ressortir des linéaments.	100
Figure 50 : Application de filtre Sobel Nord Sud	101
Figure 51: Carte des linéaments issus des images satellitaires Landsat.....	102
Figure 52: a) Rosace photographie aérienne b) Rosace Landsat.....	104

Figure 53: Superposition des forages positifs par rapport aux orientations des linéaments du sous-bassin de la Sissili	105
Figure 54: Superposition des forages négatifs par rapport aux orientations des linéaments du sous-bassin de la Sissili	106
Figure 55 : Distance d'éloignement de chaque forage par rapport aux linéaments	108
Figure 56 : Relation entre classe de débits et orientations, épaisseurs, altérations	110
Figure 57: Profils de traîné L1+00	114
Figure 58: Profils parallèles de traîné	114
Figure 59: Profils de sondage électrique de la Commune de Thyou: village de Koukin.....	118
Figure 60: Profils de sondage électrique de la Commune de Sapouy : village de Kada.....	118
Figure 61: Panneau des profils de Trainé de Résistivité Electrique (TRE).....	124
Figure 62:Schéma d'un observateur pour la détermination de l'écart d'erreur	137
Figure 63: Modèle en 3D grille du sous bassin de la Sissili	139
Figure 64: Conditions aux limites et de la zone à modéliser.....	140
Figure 65: Résultats de la première phase de la simulation a) présentation des cibles b) Comparaison des isopièzes obtenues à partir des charges observées aux isopièzes obtenues à partir des charges simulées.....	141
Figure 66: Zones de conductivité hydraulique fixées après calage.....	142
Figure 67: Graphique de comparaison entre charge observée et charge simulée	143
Figure 68: Résultat de la validation du modèle a) présentation des cibles b) Comparaison des isopièzes obtenues à partir des charges observées aux isopièzes obtenues à partir des charges simulées.....	144
Figure 69: Illustration de la migration du polluant dans un milieu fracturé	147
Figure 70: Concentration à l'état initial observée en 2012 par GMS	150
Figure 71: Concentration observée en 50 ans	151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Variation de la population de 2006 à 2020	35
Tableau 2: Statistiques moyennes de paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines.....	65
Tableau 3: Matrice de corrélation des eaux souterraines	76
Tableau 4: Contributions des variables basées sur les corrélations	78
Tableau 5: Indices des paramètres statistiques de Ryznard (RSI).....	81
Tableau 6: Paramètres statistiques des indices de saturation (IS)	82
Tableau 7: Description des bandes Landsat 8	86
Tableau 8 : Caractéristiques des profils de trainés	93
Tableau 9: Pourcentage cumulé de forages suivant les toutes orientations	107
Tableau 10: classification des débits	108
Tableau 11: Représentation des caractéristiques des profils électriques.....	113
Tableau 12: Indications statistiques des résultats du calage du modèle.....	142
Tableau 13: Bilan de masse du modèle calé	143
Tableau 14: Statistiques des tests de validation	144
Tableau 15: Paramètres analysés et les méthodes d'analyse.....	184
Tableau 16: Liste des forages et paramètres en excès.....	186

ANNEXES

Annexe 1: Analyse multivariée.....	182
Annexe 2 : Les paramètres analysés, les méthodes d'analyse et la liste des forages.....	184
Annexe 3 : Lithologies et caractéristiques des forages	191
Annexe 4 : Traitement de donnée de prospection géophysique.....	192
Annexe 5 : Analyse de la pluviométrie	195
Annexe 6 : ARTICLES	198

Annexe 1: Analyse multivariée

```

> autos <- read.table(file="Barrages.txt",row.names=1,header=T,sep="\t")
> print(summary(autos))
      VILLAGE      Temp              PH              CONDOC              TURBI
Dalo  :3      Min.    :24.30      Min.    :6.820      Min.    :54.60      Min.    :12.32
sect_6:3      1st Qu.:24.90      1st Qu.:6.960      1st Qu.:56.67      1st Qu.:15.10
Sect9 :3      Median :25.35      Median :7.160      Median :57.40      Median :21.63
Tabou :3      Mean    :25.54      Mean    :7.322      Mean    :60.12      Mean    :28.05
      3rd Qu.:25.85      3rd Qu.:7.428      3rd Qu.:60.75      3rd Qu.:39.05
      Max.    :27.00      Max.    :8.280      Max.    :71.40      Max.    :55.19
      SELSDISSOU      DUR_TOT              DUR_CA              Ca
Min.    :55.00      Min.    :1.770      Min.    :1.110      Min.    :4.44
1st Qu.:55.75      1st Qu.:2.710      1st Qu.:1.855      1st Qu.:7.42
Median :56.50      Median :3.615      Median :2.540      Median :10.16
Mean    :59.75      Mean    :4.288      Mean    :2.683      Mean    :10.73
3rd Qu.:60.50      3rd Qu.:4.758      3rd Qu.:3.140      3rd Qu.:12.56
Max.    :71.00      Max.    :11.950      Max.    :5.040      Max.    :20.16
      Mg              Na              POT              Fe
Min.    :0.2904      Min.    :1.860      Min.    :1.010      Min.    :0.1700
1st Qu.:0.8833      1st Qu.:2.760      1st Qu.:1.083      1st Qu.:0.5525
Median :1.5972      Median :3.660      Median :1.230      Median :0.7350
Mean    :3.8861      Mean    :4.112      Mean    :1.353      Mean    :0.8042
3rd Qu.:3.1641      3rd Qu.:4.857      3rd Qu.:1.417      3rd Qu.:1.0450
Max.    :19.4810      Max.    :8.130      Max.    :2.060      Max.    :1.5200
      NH              Cl              No2              No3
Min.    :0.3000      Min.    :0.3500      Min.    :0.00330      Min.    :0.44
1st Qu.:0.3825      1st Qu.:0.3950      1st Qu.:0.00330      1st Qu.:0.44
Median :0.4500      Median :0.4750      Median :0.00330      Median :0.44
Mean    :0.4508      Mean    :0.5617      Mean    :0.00770      Mean    :0.88
3rd Qu.:0.5225      3rd Qu.:0.5325      3rd Qu.:0.00495      3rd Qu.:0.99
Max.    :0.6600      Max.    :1.6400      Max.    :0.02640      Max.    :3.08
      ORTHO              PHOS              F
Min.    :0.1800      Min.    :0.05863      Min.    :0.0200
1st Qu.:0.2525      1st Qu.:0.08225      1st Qu.:0.1550
Median :0.3000      Median :0.09772      Median :0.2050
Mean    :0.3775      Mean    :0.12296      Mean    :0.2333
3rd Qu.:0.4350      3rd Qu.:0.14169      3rd Qu.:0.3375
Max.    :0.8200      Max.    :0.26710      Max.    :0.4100
> |

```

Figure 1 : Donnée statistique descriptive

```

> rownames(autos.pour.acp) <- rownames(autos)
> print(round(autos.pour.acp,3))
      Temp      PH      CONDOC      TURBI      SELSDISSOU      DUR_TOT      DUR_CA      Ca      Mg
BR 1 -0.048  1.913 -0.828 -0.075      -0.727  0.023  0.587  0.587 -0.245
BR 2 -0.164  1.514 -0.859  0.585      -0.727  0.718  2.280  2.280 -0.200
BR 3 -0.280  1.574 -0.859  0.564      -0.727 -0.202  0.394  0.394 -0.424
BR 4 -0.743 -0.223  1.696 -1.069      1.722 -0.626 -0.176 -0.176 -0.666
BR 5 -0.859 -0.922  1.664 -0.910      1.722 -0.255  0.326  0.326 -0.455
BR 6 -1.438 -0.363  1.758 -0.899      1.722  0.635 -1.008 -1.008  1.225
BR 7 -0.743 -0.303 -0.439 -0.840      -0.421 -0.544 -0.099 -0.099 -0.603
BR 8 -0.164 -1.001 -0.439 -0.798      -0.421 -0.581 -0.331 -0.331 -0.540
BR 9 -0.396 -0.283 -0.423 -0.874      -0.421 -0.848 -0.844 -0.844 -0.621
BR 10 1.573 -0.662 -0.423  1.844      -0.574 -0.945 -1.521 -1.521 -0.424
BR 11 1.689 -0.343 -0.423  1.234      -0.574 -0.251 -0.786 -0.786  0.065
BR 12 1.573 -0.902 -0.423  1.237      -0.574  2.876  1.177  1.177  2.888
      Na      POT      Fe      NH      Cl      No2      No3      ORTHO      PHOS      F
BR 1 -0.146 -0.809 -0.985 -1.367 -0.544 -0.514 -0.562 -1.067 -1.067 -0.277
BR 2 -0.777  1.804 -1.218 -1.173 -0.544 -0.514 -0.562 -0.581 -0.581 -0.443
BR 3 -1.304 -0.782 -1.473 -1.464 -0.215 -0.514 -0.562 -0.797 -0.797 -0.194
BR 4 -0.800 -0.649  0.037 -0.202 -0.125 -0.514 -0.562 -0.473 -0.473  1.383
BR 5 -0.377  1.884  0.362 -0.008 -0.155 -0.514 -0.562  0.068  0.068 -0.609
BR 6  0.653 -0.329 -0.312 -0.494 -0.394 -0.514 -0.562 -0.635 -0.635  1.466
BR 7  0.358 -0.702 -0.405  1.060 -0.304 -0.514 -0.562 -0.851 -0.851  1.300
BR 8  1.290 -0.302 -0.010  0.672 -0.484 -0.514  0.000 -0.365 -0.365  0.304
BR 9 -0.725  1.351 -0.451  0.769 -0.634  0.257  1.124  0.554  0.554  0.719
BR 10 -0.800 -0.915  1.640  2.031  0.145  2.186  2.810  0.230  0.230 -1.106
BR 11  0.300 -0.329  1.152  0.186  3.228  2.186  0.562  2.390  2.390 -1.770
BR 12  2.327 -0.222  1.663 -0.008  0.025 -0.514 -0.562  1.526  1.526 -0.774
      VILLAGE.Dalo      VILLAGE.sect_6      VILLAGE.Sect9      VILLAGE.Tabou
BR 1      2      0      0      0
BR 2      2      0      0      0
BR 3      2      0      0      0
BR 4      0      2      0      0
BR 5      0      2      0      0
BR 6      0      2      0      0
BR 7      0      0      2      0
BR 8      0      0      2      0
BR 9      0      0      2      0

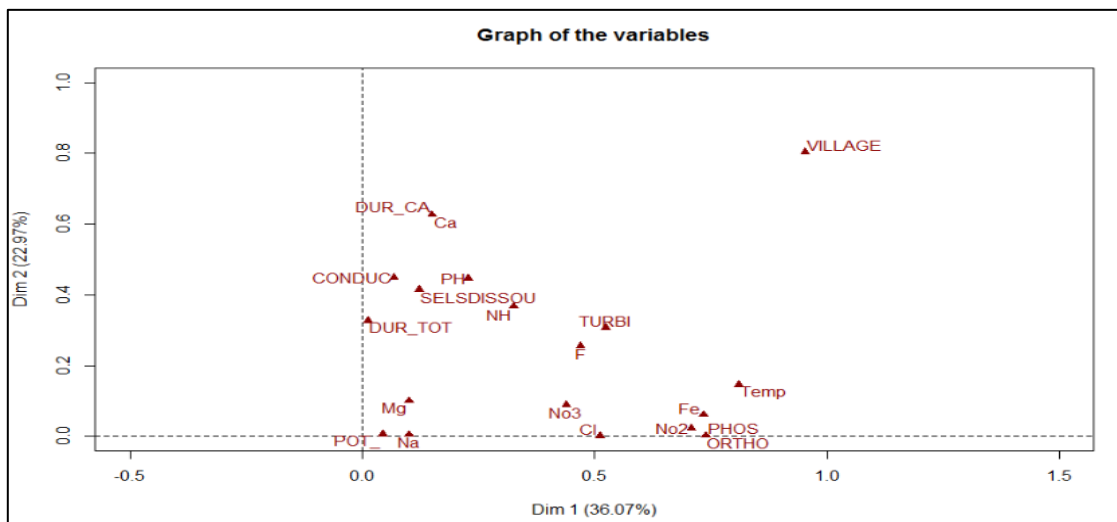
```

Figure 2 : Donnée centré réduite

```
> print(round(autos.pour.acp, 3))
```

	PH	CONDOC	TURBI	SELSDISSOU	DUR_TOT	DUR_CA	Ca	Mg	Na	
BR 1	1.913	-0.828	-0.075	-0.727	0.023	0.587	0.587	-0.245	-0.146	
BR 2	1.514	-0.859	0.585	-0.727	0.718	2.280	2.280	-0.200	-0.777	
BR 3	1.574	-0.859	0.564	-0.727	-0.202	0.394	0.394	-0.424	-1.304	
BR 4	-0.223	1.696	-1.089	1.722	-0.626	-0.176	-0.176	-0.666	-0.800	
BR 5	0.922	1.644	-0.010	1.722	-0.255	0.326	0.326	-0.455	-0.377	
BR 6	-0.363	1.758	-0.899	1.722	0.635	-1.008	-1.008	1.225	0.653	
BR 7	-0.303	-0.439	-0.840	-0.421	-0.544	-0.099	-0.099	-0.603	0.358	
BR 8	-1.001	-0.439	-0.798	-0.421	-0.581	-0.331	-0.331	-0.540	1.290	
BR 9	-0.283	-0.423	-0.874	-0.421	-0.848	-0.844	-0.844	-0.621	-0.725	
BR 10	-0.662	-0.423	1.844	-0.574	-0.945	-1.521	-1.521	-0.424	-0.800	
BR 11	-0.343	-0.423	1.234	-0.574	-0.251	-0.786	-0.786	0.065	0.300	
BR 12	-0.902	-0.423	1.237	-0.574	2.876	1.177	1.177	2.888	2.327	
	POT	Fe	NH	Cl	No2	No3	ORTHO	PHOS	F	Temp
BR 1	-0.809	-0.985	-1.367	-0.544	-0.514	-0.562	-1.067	-1.067	-0.277	0.000
BR 2	-1.804	-1.218	-1.173	-0.544	-0.514	-0.562	-0.581	-0.581	-0.443	0.000
BR 3	-0.782	-1.473	-1.464	-0.215	-0.514	-0.562	-0.797	-0.797	-0.194	0.000
BR 4	-0.649	0.037	-0.202	-0.125	-0.514	-0.562	-0.473	-0.473	1.383	0.000
BR 5	1.884	0.362	-0.008	-0.155	-0.514	-0.562	0.068	0.068	-0.609	0.000
BR 6	-0.329	-0.312	-0.494	-0.394	-0.514	-0.562	-0.635	-0.635	1.466	3.464
BR 7	-0.702	-0.405	1.060	-0.304	-0.514	-0.562	-0.851	-0.851	1.300	0.000
BR 8	-0.302	-0.010	0.672	-0.484	-0.514	0.000	-0.365	-0.365	0.304	0.000
BR 9	1.351	-0.451	0.769	-0.634	0.257	1.124	0.554	0.554	0.719	0.000
BR 10	-0.915	1.640	2.031	0.145	2.186	2.810	0.230	0.230	-1.106	0.000
BR 11	-0.329	1.152	0.186	3.228	2.186	0.562	2.390	2.390	-1.770	0.000
BR 12	-0.222	1.663	-0.008	0.025	-0.514	-0.562	1.526	1.526	-0.774	0.000
	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp	Temp
BR 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3.464	0.000	0.000
BR 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.449	0.000	0.000	0.000
BR 3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 5	3.464	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.449	0.000	0.000	0.000
BR 9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BR 10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.449

Figure 3 : Tableau disjonctif



Graphe 1 : présentation des variables

```
Eigenvalues
```

	Dim.1	Dim.2
Variance	7.936	5.052
% of var.	36.074	22.965
Cumulative % of var.	36.074	59.039

```
Individuals (the 10 first)
```

	Dist	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2
BR 1	3.921	-2.203	5.097	0.316	2.533	10.585	0.417
BR 2	5.132	-2.395	6.024	0.218	4.042	26.951	0.620
BR 3	4.029	-2.100	4.632	0.272	2.386	9.393	0.351
BR 4	3.942	-2.139	4.804	0.294	-2.492	10.240	0.399
BR 5	4.055	-1.312	4.808	0.105	-1.712	4.832	0.178
BR 6	4.535	-2.020	4.285	0.198	-2.488	10.211	0.301
BR 7	3.334	-1.460	2.239	0.192	-1.219	2.451	0.134
BR 8	2.992	-0.335	0.118	0.013	-1.212	2.421	0.164
BR 9	3.590	0.021	0.000	0.000	-1.737	4.974	0.234
BR 10	6.151	4.768	23.870	0.601	-1.470	3.563	0.057

```
Continuous variables (the 10 first)
```

	Dim.1	ctr	cos2	Dim.2	ctr	cos2
Temp	0.900	10.216	0.811	0.381	2.871	0.145
PH	-0.478	2.880	0.229	0.668	8.831	0.446
CONDOC	-0.260	0.853	0.068	-0.670	8.885	0.449
TURBI	0.724	6.605	0.524	0.554	6.069	0.307
SELSDISSOU	-0.349	1.537	0.122	-0.644	8.210	0.415
DUR_TOT	0.114	0.165	0.013	0.571	6.456	0.326
DUR_CA	-0.388	1.900	0.151	0.791	12.390	0.626
Ca	-0.388	1.900	0.151	0.791	12.390	0.626
Mg	0.317	1.262	0.100	0.315	1.966	0.099
Na	0.316	1.259	0.100	0.065	0.084	0.004

```
Categories
```

	Dim.1	ctr	cos2	v.test	Dim.2	ctr	cos2	v.test
Dalc	-2.233	1.979	0.318	-1.518	2.987	8.740	0.569	2.545
Sect_6	-1.824	1.320	0.259	-1.240	-2.230	4.872	0.387	-1.900
Sect9	-0.591	0.139	0.046	-0.402	-1.389	1.890	0.254	-1.183
Tabou	4.648	8.575	0.966	3.159	0.632	0.391	0.018	0.539

Figure 4 : Représentation des Variances

Annexe 2 : Les paramètres analysés, les méthodes d'analyse et la liste des forages

Tableau 15: Paramètres analysés et les méthodes d'analyse

Paramètres analysés	Lieu d'analyse	Unités	Méthodes	Normes	Appareils utilisés	Limites de détection
Température	In situ	°C	Electrochimique		pH mètre et conductivimètre	0.0
pH	In situ		Electrochimique	NF T 90-008	Hanna HI 98128	-2.00
Conductivité	In situ	µS/cm	Electrochimique	NF EN 27888	Hanna HI 98129	0.0
Turbidité	In situ	NTU	Nephelométrie	NF EN ISO 7027	Turbidimètre Wag-WT 3020	0.02
Orthophosphate		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8048	DR 3800	0.02
Phosphore		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8114	DR 3800	0.3
Fer total		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8008	DR 3800	0.02
Sulfate		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8051	DR 3800	2
Nitrite		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8507	DR 3800	0.002
Nitrate		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8039	DR 3800	0.3
Ammonium		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8038	DR 3800	0.02
Fluor		mg/l	Spectrophotométrie	Méthode HACH 8029	DR 3800	0.02
Sodium		mg/l	Photométrie	NF T90-019	Spectromètre de flamme AFP 100	0.5
Potassium		mg/l	Photométrie	NF T90-019	Spectromètre de flamme AFP 100	0.5
Cyanure libre		mg/l	Spectrophotométrie		DR 3800	0.005

TAC		°F	Titration complexométrique	NF T90-016	Burette digital Brand Class A precision	0.1
Calcium		mg/l	Titration complexométrique	NF T90-016	Burette digital Brand Class A precision	0.4
Magnésium		mg/l	Titration complexométrique	NF T90-003	Burette digital Brand Class A precision	0.4
Chlorure		mg/l	Titration complexométrique	NF T 90-117	Burette digital Brand Class A precision	0.4
Arsenic As		µg/l	Spectrométrie d'absorption atomique	EN ISO 11969	AAS	2
Plomb (Pb)		µg/L	Spectrométrie d'absorption atomique	FD T90-112	AAS	5
Chrome (Cr)		mg/L	Spectrométrie d'absorption atomique	NF EN 1233	AAS	0.01
Aluminium (Al)		mg/l	Spectrométrie d'absorption atomique	NF EN ISO 12020	AAS	0.1
Zinc (Zn)		mg/l	Spectrométrie d'absorption atomique	FD T90-112	AAS	0.01
Nickel (Ni)		mg/l	Spectrométrie d'absorption atomique	FD T90-112	AAS	0.01

Tableau 16:Liste des forages et paramètres en excès

FO	PROVINCE	COMMUNE	VILLAGE	LONGITUDE	LATITUDE	ANNEE	SITUATION	PARAMETRES
FO1	SISSILI	Leo	Sissili	-2.02	11.20	2009	foret	PO4,3-Al
FO2	SISSILI	Leo	wan	-2.04	11.15	1987		PO4,3-AIPb
FO3	SISSILI	Leo	kayao-bo	-2.06	11.23	1995		AIPb
FO4	SISSILI	To	mÚtio	-2.11	11.27	2006	champs agricole	PO4,3-AIPb
FO5	SISSILI	To	sagalo	-2.14	11.24	#N/A	champs agricole	PO4,3-AIPb
FO6	SISSILI	To	metio	-2.12	11.25	1995	champs agricole	PO4,3-AIPb
FO7	SISSILI	To	tabou	-2.16	11.35	1994	champs agricole	potAl
FO8	SISSILI	To	to	-2.21	11.43	2009		PO4,3-AIPb
FO9	SISSILI	To	to	-2.21	11.43	2008	champs agricole	PO4,3-AIPb
FO10	SISSILI	To	to	-2.22	11.45	#N/A		PO4,3-AIPb
FO11	SISSILI	To	to	-2.21	11.46	1989		PO4,3-AIPb
FO12	SISSILI	To	tuai	-2.32	11.46	2004		AIPb
FO13	SISSILI	Bieha	Koumbogoro	-1.70	11.38	1983	champs agricole	PO4,3-CN-AIPb
FO14	SISSILI	Bieha	Koumbo	-1.69	11.32	1995	Ordure	PO4,3-CN-AIPb
FO15	SISSILI	Bieha	Bori	-1.75	11.29	1988		PO4,3-CN-AIPb
FO16	SISSILI	Bieha	Koumbo	-1.65	11.29	1999		PO4,3-Al
FO17	SISSILI	Bieha	Ourkouna	-1.61	11.30	1987	foret	PO4,3-CN-Al
FO18	SISSILI	Leo	Fido	-2.04	11.85	2009	dans habitation	PO4,3-CN-As
FO19	SISSILI	Leo	Don	-1.94	11.54	1996	champs agricole	PO4,3-CN-
FO20	SISSILI	Bieha	Danfina	-1.96	11.76	1998	Zone inondable	PO4,3-AIAs
FO21	SISSILI	Bieha	YallÚ	-1.95	11.64	1994	bas fond	PO4,3-Al
FO22	SISSILI	Leo	Djansia	-1.98	11.12	0	champs agricole	PO4,3-AIAs
FO23	SISSILI	Bieha	Yelbouga	-1.92	11.12	1996	champs agricole	PO4,3-AIAs
FO24	SISSILI	Bieha	SabouÚ	-1.88	11.06	1998	foret	PO4,3-AIAs
FO25	SISSILI	Leo	BetiÚssan	-1.91	11.06	1985		PO4,3-AIAsPb
FO26	SISSILI	Bieha	NaborÚ	-1.84	11.11	1998	bas fond	FePO4,3-As
FO27	SISSILI	Bieha	Bieha	-1.80	11.08	1990	foret	PO4,3-AIAs
FO28	SISSILI	Bieha	Bieha	-1.82	11.06	1999		PO4,3-AIAsPb
FO29	SISSILI	Bieha	Konzio	-1.82	11.02	2000	champs agricole	PO4,3-CN-AIAs
FO30	SISSILI	Bieha	Prata	-1.73	11.02	2006	champs agricole	FePO4,3-
FO31	SISSILI	Bieha	Tacien	-1.71	11.04	2011		FeAs
FO32	SISSILI	Leo	Taga	-2.19	11.17	2005		TrPO4,3-CN-AIAs
FO33	SISSILI	Leo	LÚo- Secteur 7	-2.15	11.14	2007	dans habitation	PO4,3-AIAs

FO34	SISSILI	To	Kouri	-2.23	11.23	2009		CN-AIAs
FO35	SISSILI	To	Kanduyo	-2.29	11.26	2005	flac d'eau	PO4,3-CN-AIAs
FO36	SISSILI	To	Bougoun	-2.22	11.30	1990	dans habitation	TrCN-
FO37	SISSILI	To	Korabou	-2.25	11.35	2006		PO4,3-CN-AIAs
FO38	SISSILI	To	Kada kouna	-2.21	11.37	1984-1995	dans habitation	FeAIAsCr+3
FO39	SISSILI	To	Metio	-2.11	11.27	2006	dans habitation	PO4,3-
FO40	SISSILI	To	Metio	-2.12	11.25	1995		PO4,3-CN-AIAs
FO41	SISSILI	To	Salassa	-2.15	11.21	1999		PO4,3-CN-AIAs
FO42	SISSILI	Leo	Kayero-Bo	-2.06	11.23	1994		AIAs
FO43	SISSILI	Leo	Kayero-Bo	-2.05	11.27	2000	champs agricole	PO4,3-AIAs
FO44	SISSILI	Leo	Outoulou	-2.25	11.04	2008	claiÚre	PO4,3-
FO45	SISSILI	Leo	Nation	-2.20	11.10	1998	dans habitation	PO4,3-As
FO46	SISSILI	To	To	-2.26	11.51	1992	ruisseau	PO4,3-AI
FO47	SISSILI	To	Tuai	-2.29	11.45	1994	ruisseau	
FO48	SISSILI	To	Tuai	-2.32	11.46	2004	champs agricole	FePO4,3-CN-
FO49	SISSILI	To	Tabou	-2.16	11.35	1994	cuvette	AIPb
FO50	SISSILI	Leo	LÚo-Secteur 4	-2.11	11.11	#N/A	Zone inondable	PO4,3-AIPb
FO51	SISSILI	Leo	Secteur 5-LÚo	-2.11	11.07	2008	arbuste	PO4,3-F-AIPb
FO53	SISSILI	Leo	Lan	-2.09	11.02	2006	abrevoir	PO4,3-AIPb
FO54	SISSILI	Leo	Nabliliessan	-1.98	11.03	2007	claiÚre	PO4,3-AIAsPb
FO55	SISSILI	Leo	Sanga	-2.01	11.10	2009	champs agricole	PO4,3-AIPb
FO56	SISSILI	Leo	Wan	-2.04	11.15	2008	arbuste	PO4,3-AIPb
FO57	SISSILI	Leo	Sssily	-2.02	11.20	2009	foret	PO4,3-AIPb
FO58	NAHOURI	Guiaro	boala	-1.46	11.39	2003		FePO4,3-AIAsPb
FO59	NAHOURI	Guiaro	Nitiana	-1.50	11.35	1993	champs agricole	PO4,3-CN-AIAsPb
FO60	NAHOURI	Guiaro	Sarro	-1.36	11.28	2001	champs agricole	PO4,3-CN-AIAsPb
FO61	NAHOURI	Guiaro	Boanssan	-1.39	11.30	2004	champs agricole	PO4,3-CN-
FO62	NAHOURI	Guiaro	Koumbila	-1.45	11.30	2008	champs agricole	PO4,3-AsPb
FO63	NAHOURI	Guiaro	Koumbila	-1.53	11.33	2006	dans habitation	F-AsPb
FO64	NAHOURI	Guiaro	PorÚ	-1.57	11.40	2004	jardin	TrAsPb
FO65	NAHOURI	Guiaro	PorÚ	-1.57	11.38	2008	arbre	AIAs
FO66	NAHOURI	Po	Yaro	-1.25	11.25	2006	champs agricole	Pb
FO67	NAHOURI	Po	TiakanÚ	-1.25	11.20	1997	champs agricole	FeAIPb

Figure 1 : Carte de localisation des stations de suivi de la qualité de l'eau



Figure 2 : Carte de l'agressivité des eaux

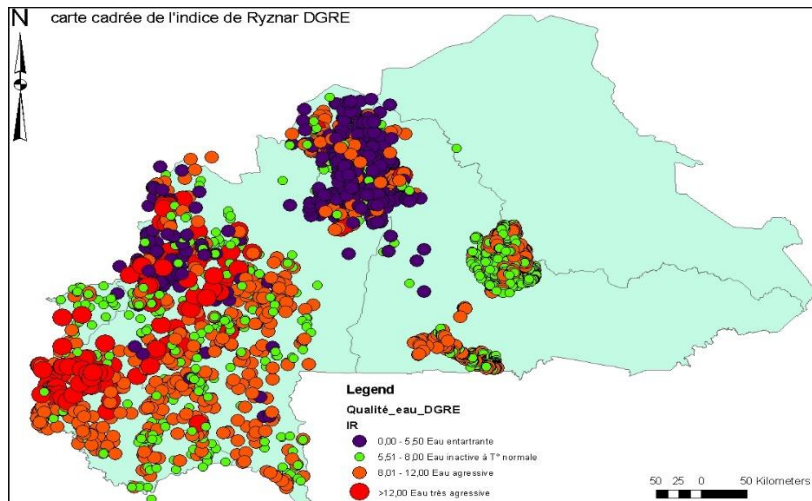


Figure 3 : Carte des teneurs en fluorures

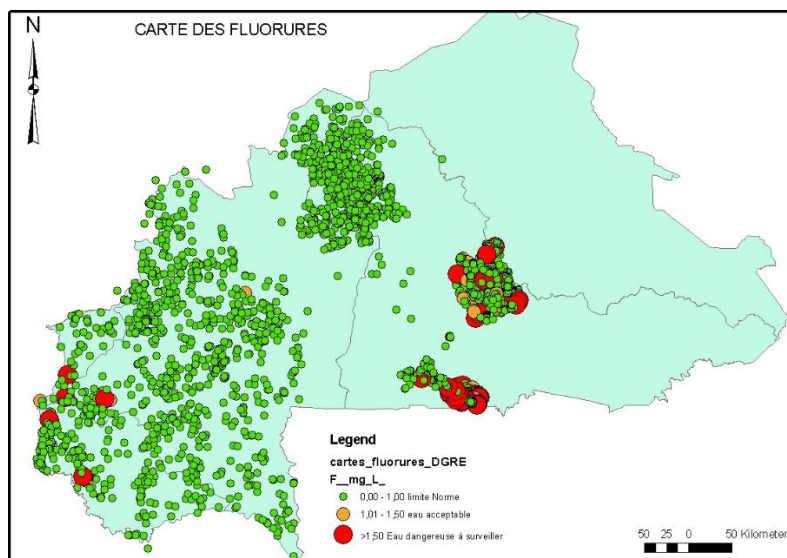


Figure 4 : Carte des teneurs en arsenic

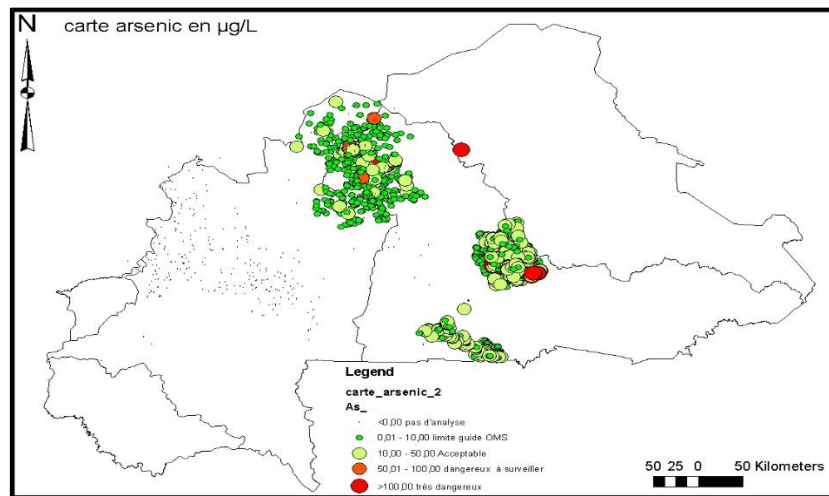


Figure 5 : Carte des teneurs en fer total

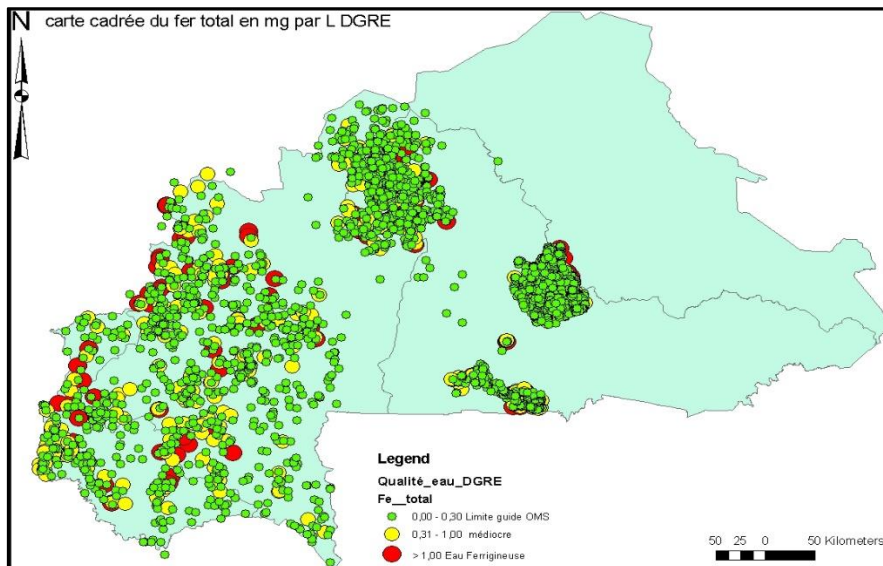
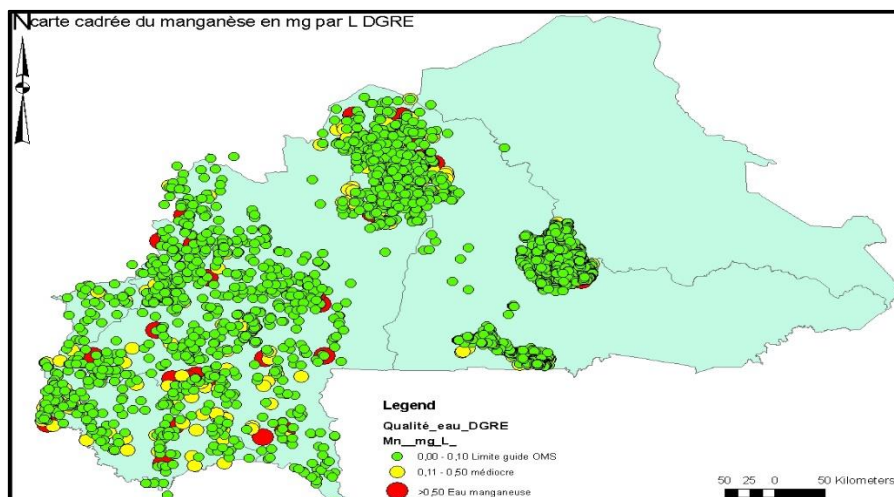


Figure 6 : Carte des teneurs en manganèse



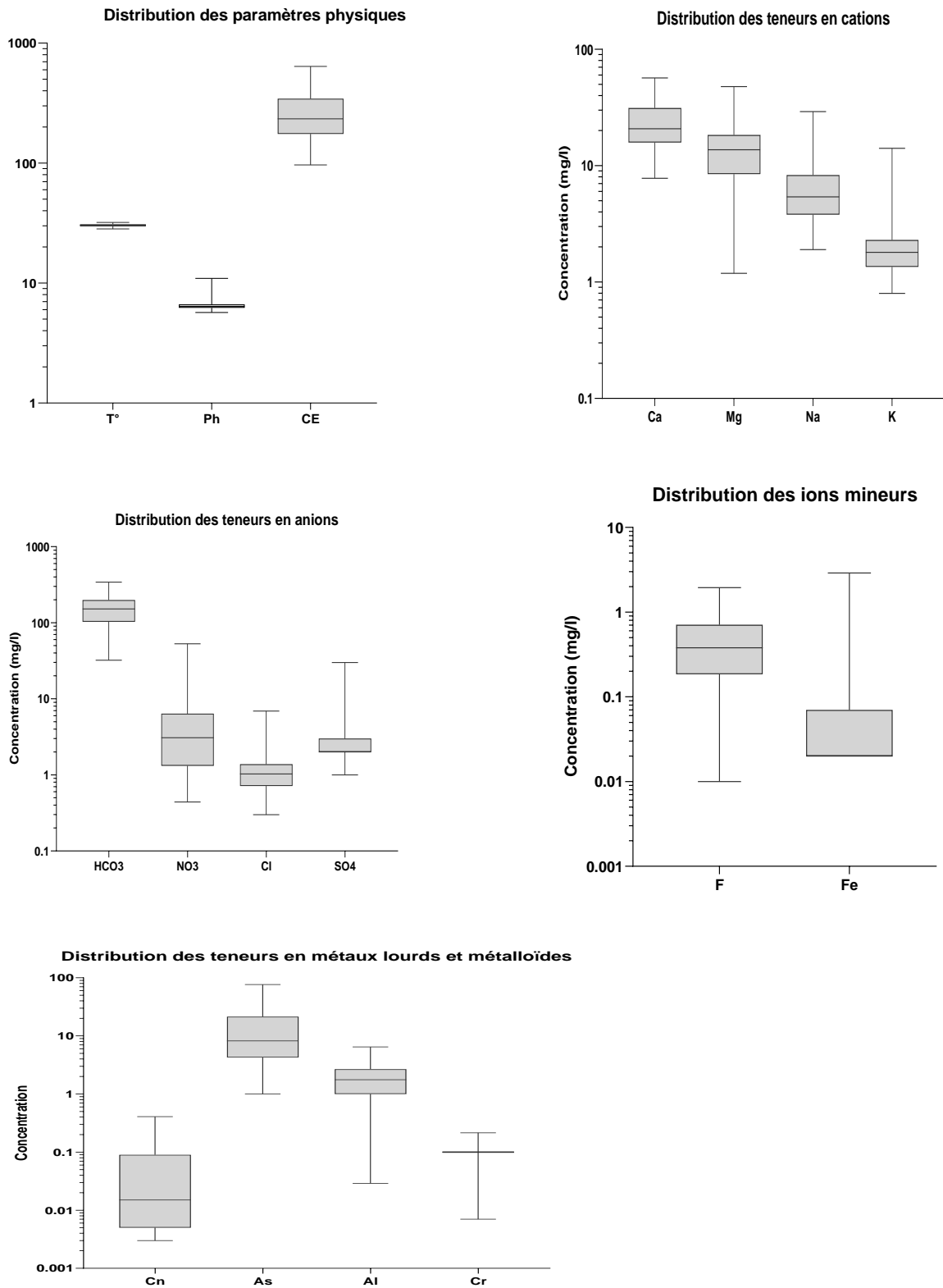
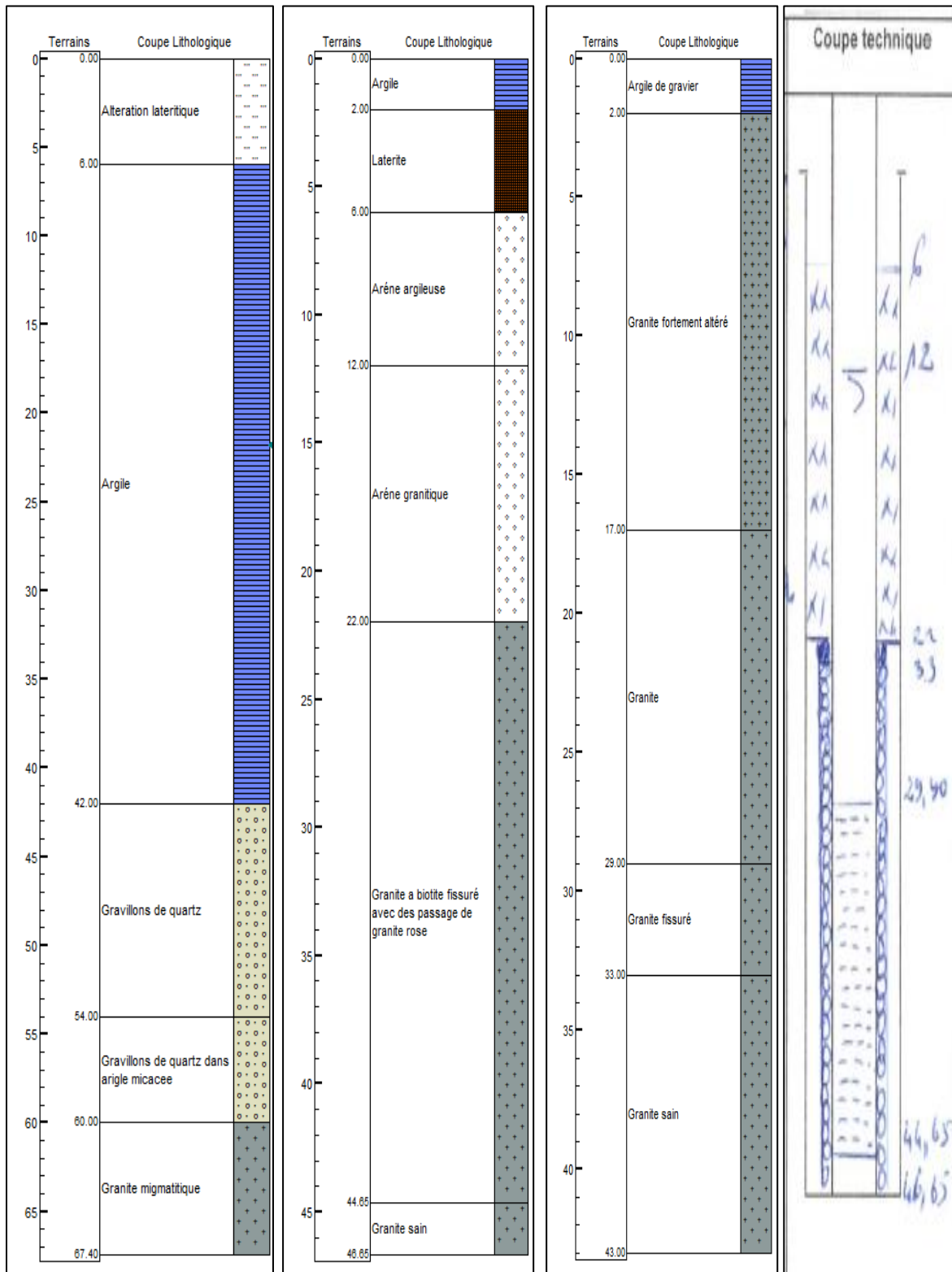


Figure 7 : Box plot de la distribution des paramètres physicochimiques

Annexe 3 : Lithologies et caractéristiques des forages



Annexe 4 : Traitement de donnée de prospection géophysique

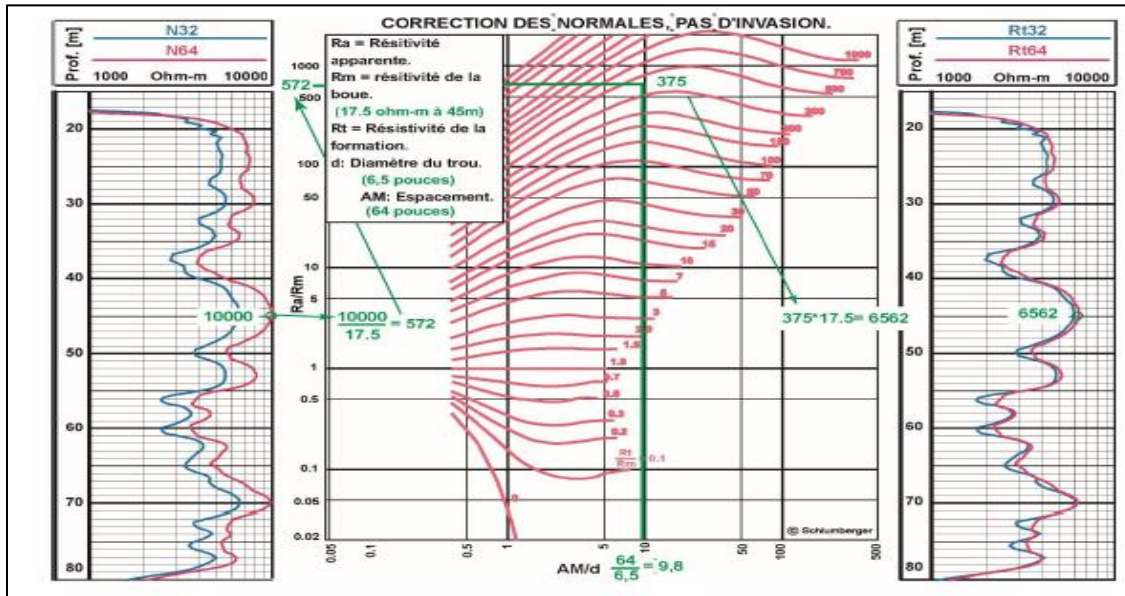


Figure 1 : Abaque de correction des mesures de diagraphe du dispositif pôle pôle (Beck and Girardet, 2002)

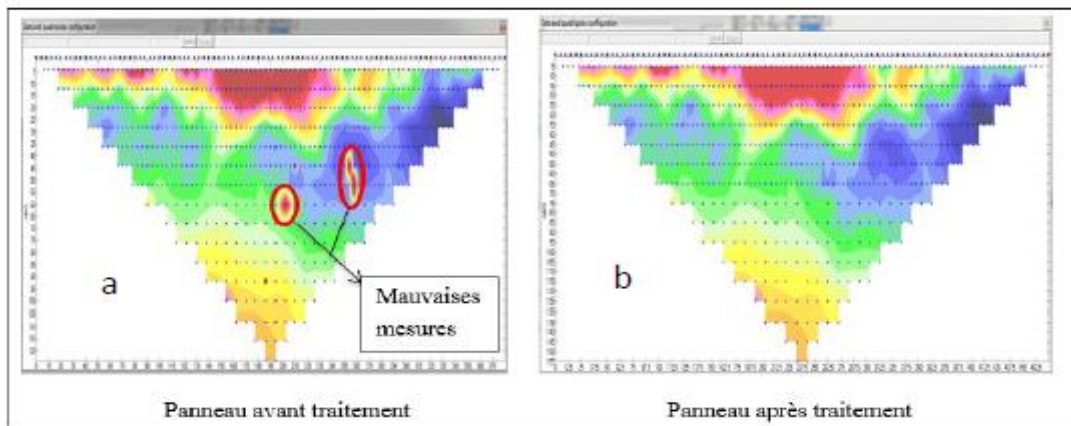


Figure 2 : Exemple d'élimination de valeurs aberrantes dans une image de TRE. a) Image brute et b) image traitée

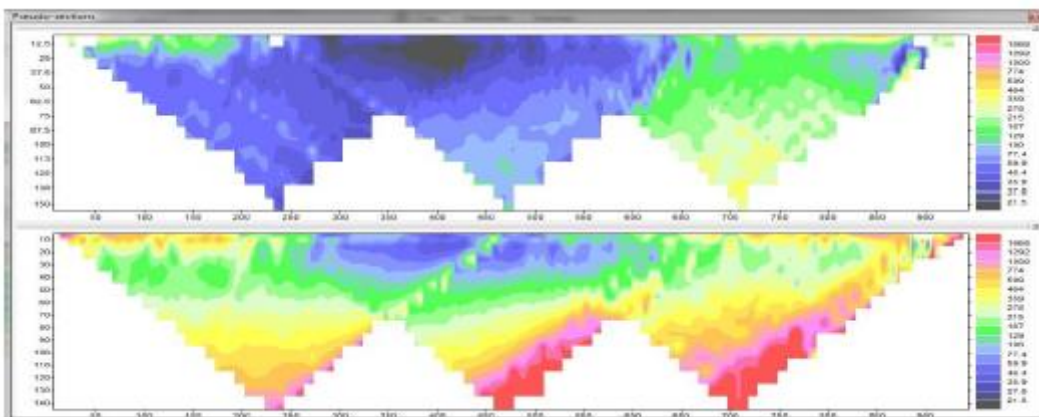


Figure 3 : Exemple de concaténation de trois panneaux électriques à l'aide du logiciel X2IPI

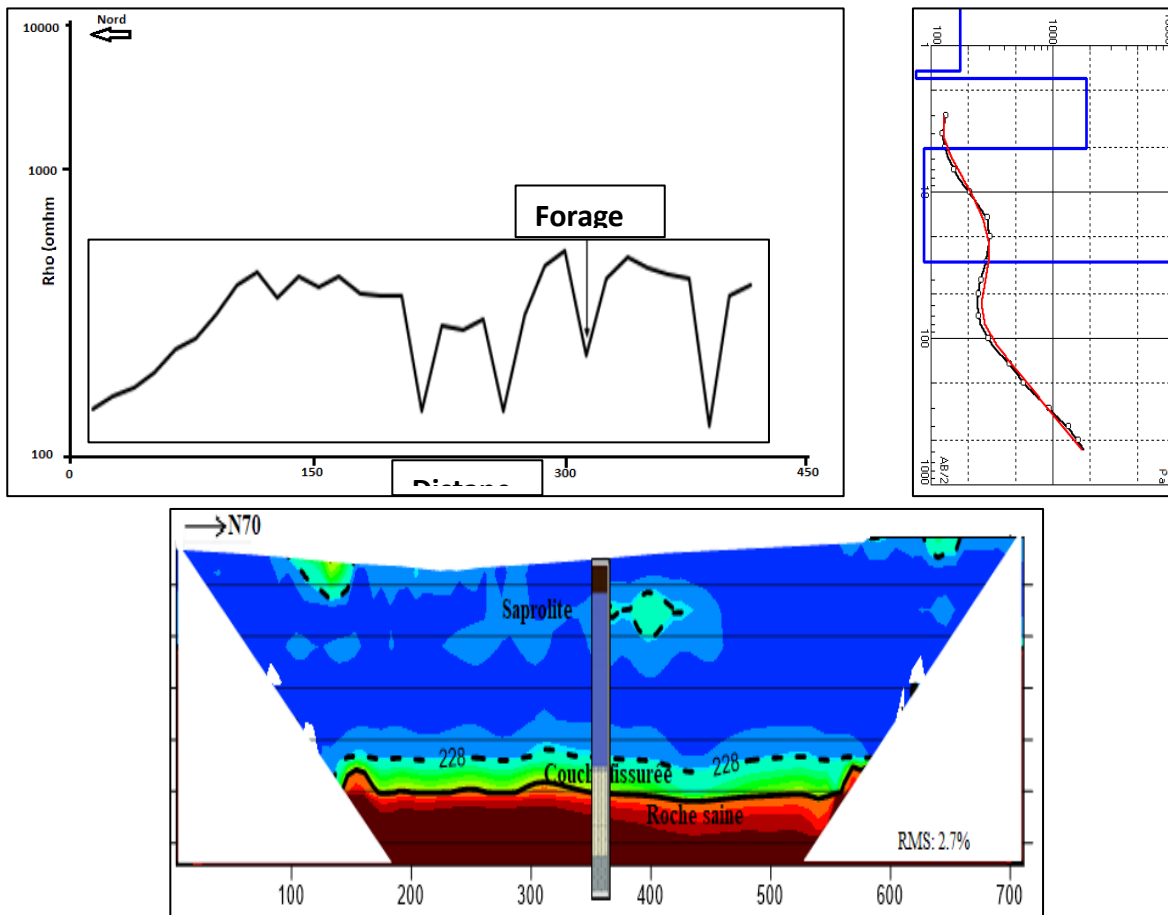


Figure 4 : Synthèses des mesures en surface : ERTs, profils et sondages a Kada

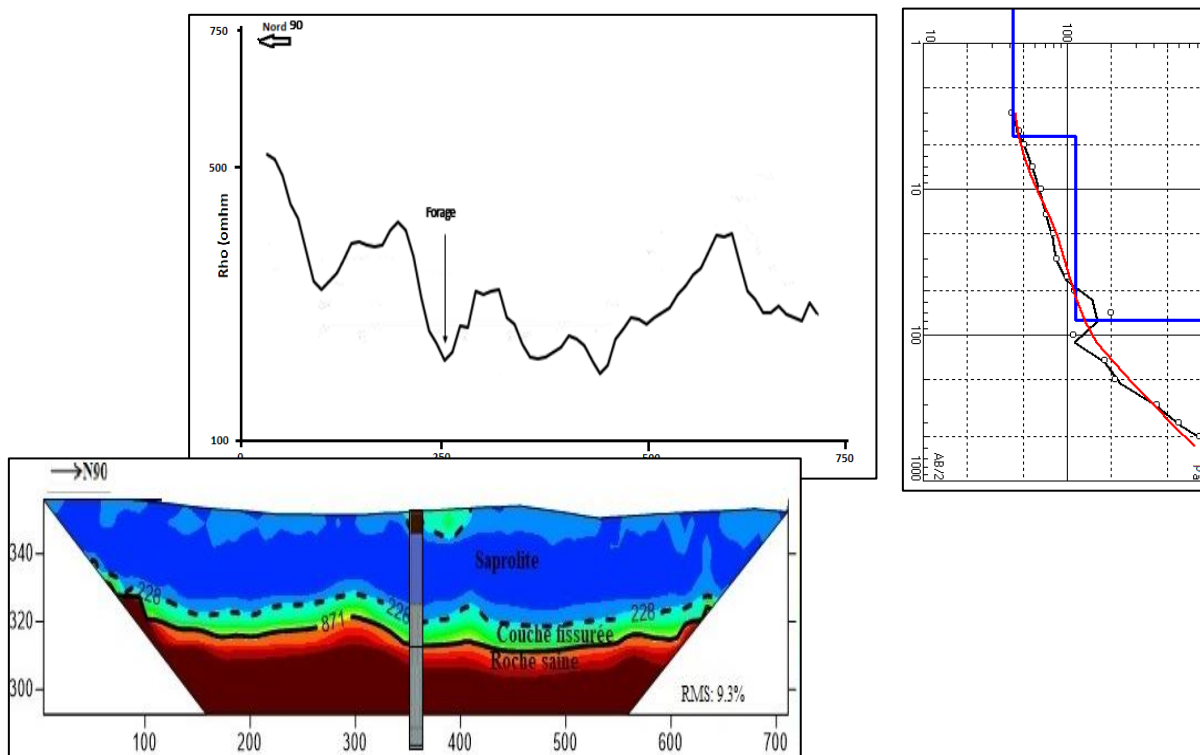


Figure 5 : Synthèses des mesures en surface : ERTs, profils et sondages a Koukin

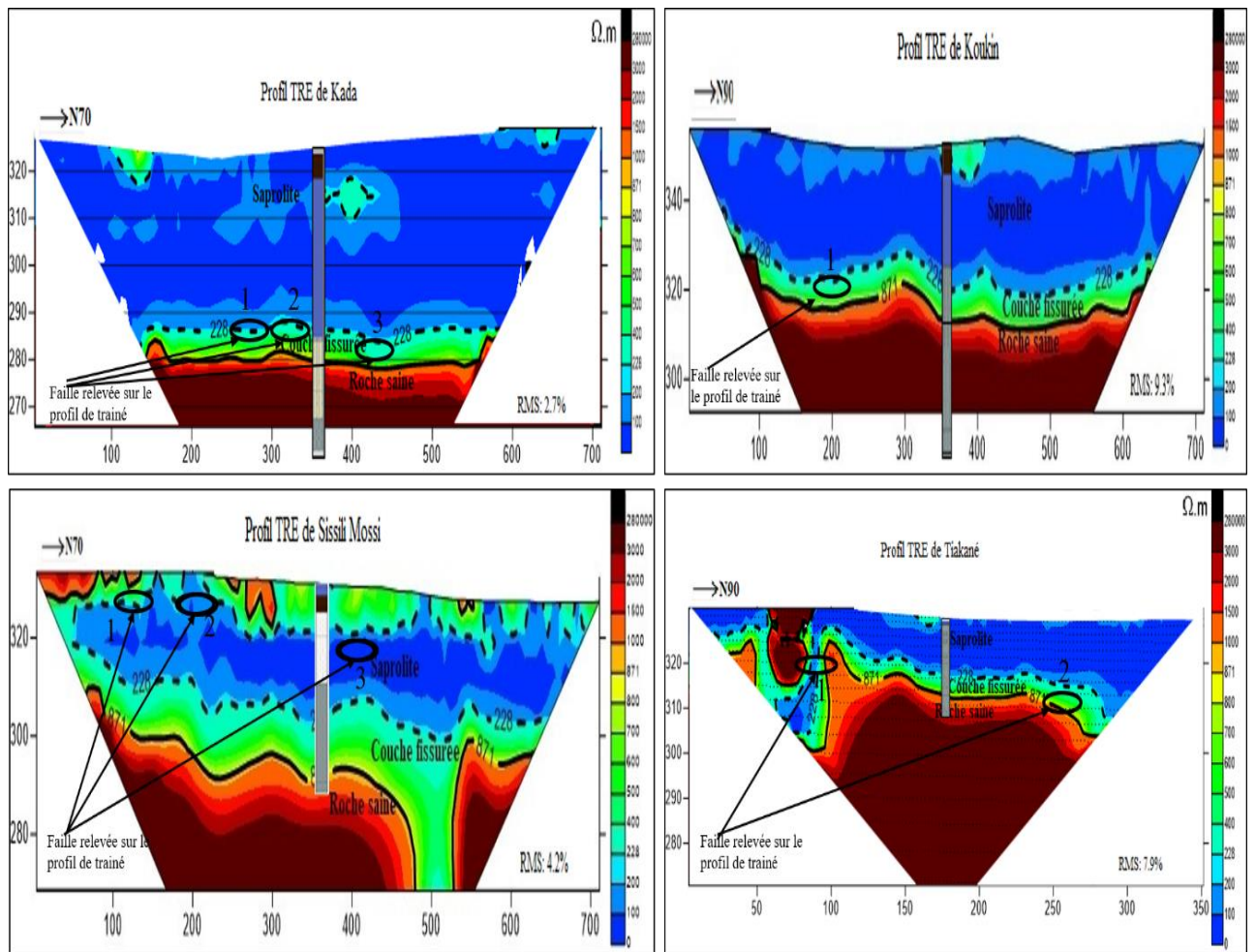
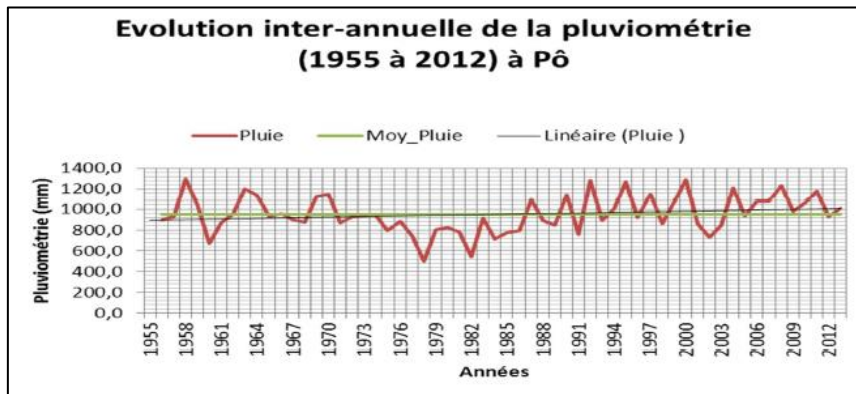
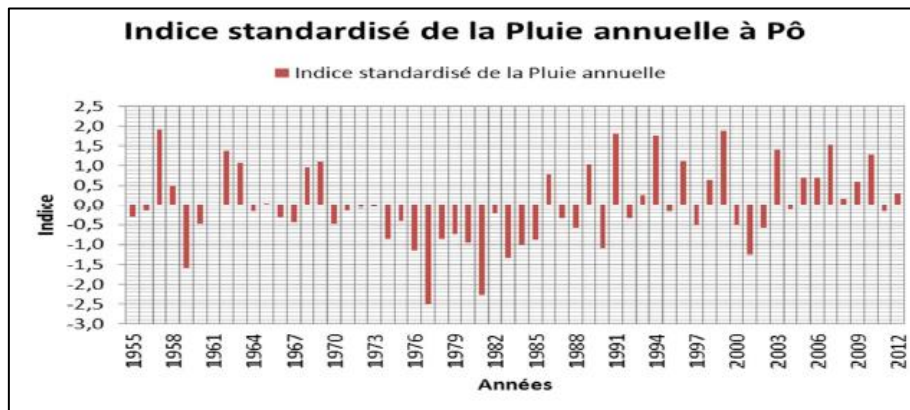


Figure 6 : Zone de superposition des profils de trainé sur les profils de TRE

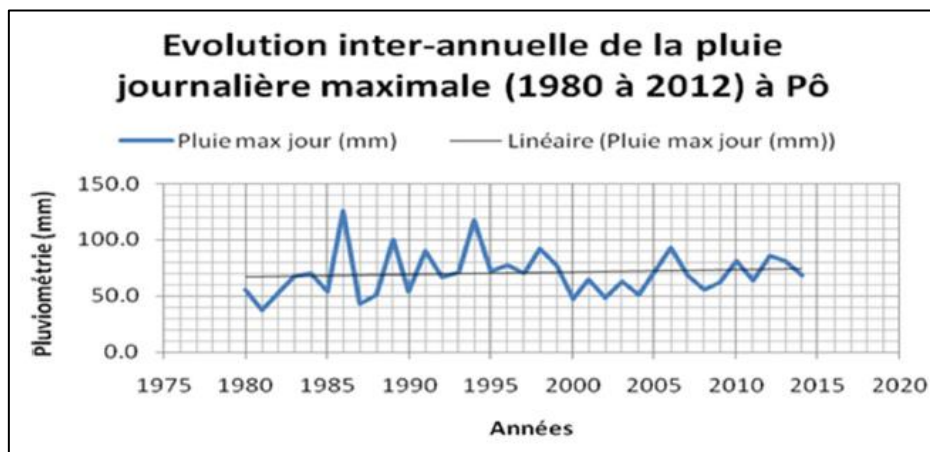
Annexe 5 : Analyse de la pluviométrie



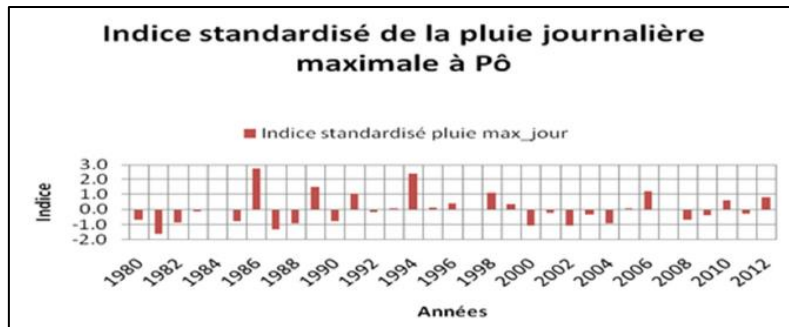
Graphique 1 : Evolution interannuelle de la pluviométrie-zone soudanienne



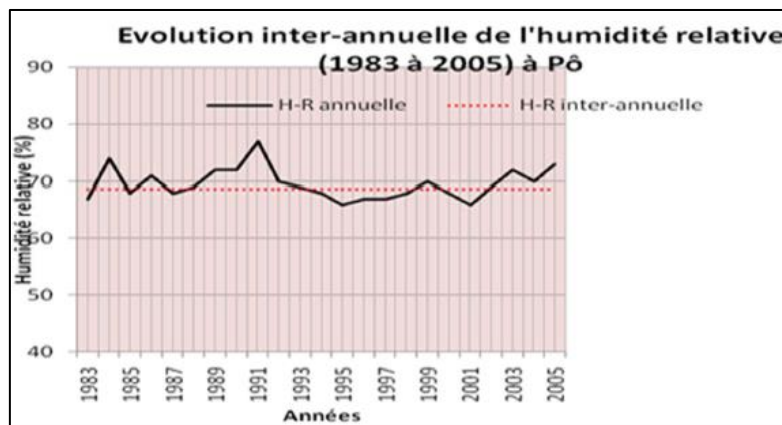
Graphique 2 : Indice de pluie annuelle standardisé-zone soudanienne



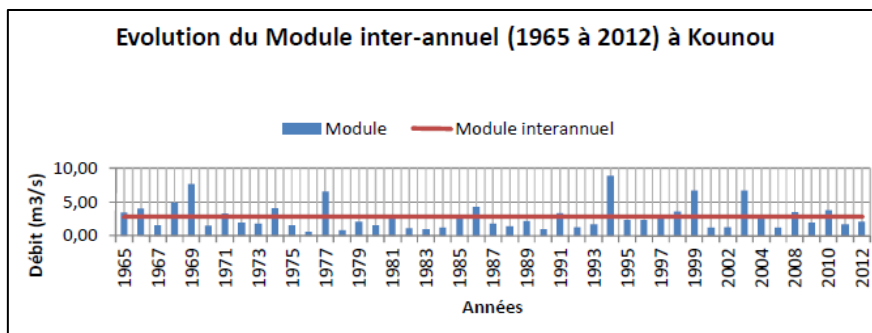
Graphique 3 : Evolution interannuelle de la pluie journalière maximale



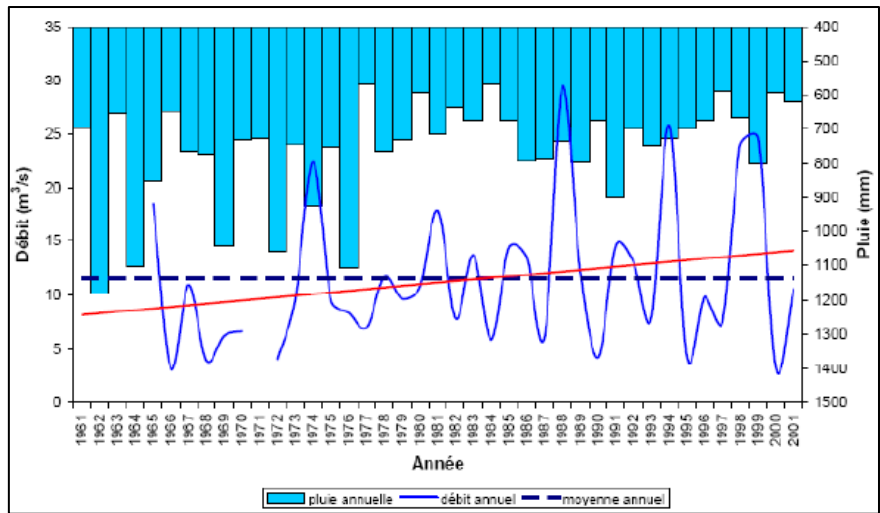
Graphique 4 : Indice standardisé de la pluie journalière maximale



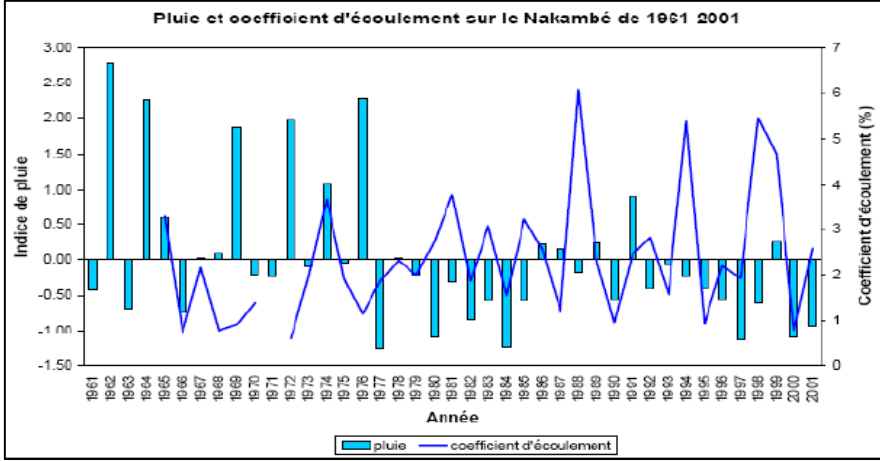
Graphique 5 : Evolution de l'humidité relative-zone soudanienne



Graphique 6 : Evolution du module hydrologique du Sissili



Graphique 7 : Evolution des débits moyens annuels du Nakanbé à Wayen (1961-2001)



Graphique 8 : Indice de pluie et coefficient d'écoulement sur le bassin du Nakanbé (période 1961 – 2001)

Annexe 6 : ARTICLES

Article produit dans le cadre de la présente thèse

Faye, M.D., Biaou, A.C., Soro, D.D., Leye, B., Koïta, M., Yacouba, H. Understanding groundwater pollution of Sissili catchment area in Burkina-Faso. **LARHYSS**, 2020. Journal P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782 0, 121-144–144.

Article produit

Faye, M.D., Kafando, M.B., Sawadogo, B., Panga, R., Ouedraogo, S., Yacouba, H. Groundwater Characteristics and quality in the Cascades region of Burkina Faso. **Resources** 2022., 11, 61. <https://doi.org/10.3390/resources11070061>.

Article en collaboration

Kafando, M.B.; Koïta, M.; Le Coz, M.; Yonaba, O.R.; Fowe, T.; Zouré, C.O.; **Faye, M.D.**; Leye, B. Use of Multidisciplinary Approaches for Groundwater Recharge Mechanism Characterization in Basement Aquifers: Case of Sanon Experimental Catchment in Burkina Faso. **Water** 2021, 13, 3216. <https://doi.org/10.3390/w13223216>.

Actes de colloques ou conférences

Faye, M.D., 2022. Understanding of geophysical prospection (1D) of groundwater resources of Sissili Catchment Area in Burkina Faso. Livre de résumé “3rd International Conference on Irrigation and Agricultural Development” (**IRAD 2022**) University for development studies, international conference center, TAMALE CAMPUS, Ghana.

Faye, M.D., 2022. Contribution de la prospection géophysique (1D) à la connaissance des ressources en eau souterraine du sous-bassin versant de la Sissili Burkina –Faso. Communication orale. Présentée aux journées scientifiques de **l’université de Dédougou**.

Faye, M.D., 2021. Understanding of geophysical prospection (1D) to the knowledge of groundwater resources of Sissili catchment area in Burkina Faso. Communication Orale. Présentée aux Doctoriales en ligne du Réseau d’Excellence des Sciences de l’Ingénieur de la francophonie (**RESCIF**).

Faye, M.D., 2017. Caractérisation et modélisation du transfert de polluants dans un aquifère fracturé en milieu de socle : cas du bassin versant de la Sissili Burkina –Faso. Communication Orale. Présentée aux **Doctoriales 2iE**, Ouagadougou.

Faye, M.D., 2016. Étude de la qualité de l’eau liée à un excès de Fer des eaux de forages pour une solution à moindre coût pour les populations cas de la région de Koudougou Burkina -Faso. Communication Orale. Présentée aux **Doctoriales 2iE**, Ouagadougou.