

# CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DE TAOUDENI (BORDURE SUD-EST, BURKINA FASO)

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE  
MASTER

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

---

Présenté et soutenu publiquement le 21 Janvier 2019 par  
Malundama Succès KUTANGILA  
(2015 0413)



**Directeur de mémoire : Dr Mahamadou KOITA, Maître de Conférences, enseignant-chercheur en Hydrogéologie**

**Encadrant 2iE : Dr Mahamadou KOITA, Maître de Conférences, enseignant-chercheur en Hydrogéologie**

**Maître de stage : Dr Justine YOFE-TIROGO, Chef de Service Hydrogéologie (DGRE/DEIE)**

Structure d'accueil du stage : DGRE/DEIE

Jury d'évaluation du stage :

**Président : Prof. Harouna KARAMBIRI, Professeur titulaire, enseignant-chercheur**

**Membres et correcteurs : Dr Chabi Angelbert BIAOU, Maître Assistant, enseignant-chercheur**

**Mme Radegonde RUSAGARA, Doctorante (LEHSA)**

**Promotion [2017/2018]**

## AVANT-PROPOS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet régional de coopération technique RAF 7019 intitulé : « *Ajout de la dimension eau souterraine à la compréhension et à la gestion des ressources en eau partagées dans la région du Sahel* ». Piloté par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), il couvre la période de 2018 à 2021 et est mis en œuvre dans 13 pays qui sont : l'Algérie, le Bénin, le Burkina Faso, le Cameroun, la République centrafricaine, le Tchad, le Ghana, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Nigéria, le Sénégal et le Togo. Il porte sur les efforts coopératifs dans la gestion de cinq bassins transfrontaliers :

- Bassin de Taoudéni ;
- Bassin du lac Tchad ;
- Le système aquifère d'Illumedén ;
- Le bassin Sénégal-Mauritanien ;
- Le Liptako-Gourma-Volta supérieur.

Le principal objectif de ce projet est de contribuer à la caractérisation, la surveillance et la gestion des ressources en eaux souterraines dans la région du Sahel afin d'aider à une meilleure prise de décision.

Pour le volet concernant le bassin du Taoudéni dont le Burkina Faso fait partie, le projet poursuit les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier les lacunes nationales dans la compréhension, les données et les informations hydrologiques en prenant en compte les recommandations et les activités non réalisées dans le cadre du précédent projet RAF7011 ;
- Renforcer les capacités institutionnelles et techniques pour combler les lacunes identifiées dans la compréhension, les données et l'information hydrologiques ;
- Elaborer une synthèse hydrogéologique des différents systèmes aquifères du bassin (peu profonds et profonds) en prenant en compte l'harmonisation de la nomenclature des aquifères, la mise à jour des cartes hydrogéologiques et l'établissement de coupes transversales de la zone partagée, l'établissement de cartes piézométriques ;
- Mettre en place de réseaux de surveillance de la qualité et des isotopes des eaux souterraines et mettre à jour des bases de données hydrologiques, hydrochimiques et isotopiques ;

- Effectuer des campagnes d'échantillonnage (pluie, eau de surface, eau souterraine) et des analyses chimiques et isotopiques visant la compréhension de la dynamique des eaux souterraines, l'identification des sources de contamination (nitrate pour le cas du Burkina) et l'établissement de cartes de vulnérabilités et de risques ;
- Développer et/ou consolider des modèles d'écoulement des eaux souterraines conceptuels et numériques de systèmes aquifères partagés comme outil d'aide à la définition des scénarios pour la gestion durable des ressources en eau ;
- Évaluer l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines ;
- Renforcer la collaboration entre les pays participants et les organisations partenaires impliquées dans la gestion des ressources en eaux souterraines partagées.

## IN MEMORIAM

*J'aurai voulu que tu sois la première personne à qui je présenterais ce diplôme, fruit de ce que tu as semé en moi par ton affection, tes conseils et tout ce que tu as été pour moi. Hélas, le temps en a décidé autrement et tu es parti avant que je n'entame ma dernière année. Je te resterai reconnaissant à jamais tendre père, Révérend KUTANGILA Mahidika Abraham.*

## DEDICACES

*Au Seigneur Dieu Tout-Puissant, source de vie et de mon inspiration, maître des temps et des circonstances, l'auteur de ma réussite.*

*A ma chère mère BIDIAKUTATA S. Odette et à mes frères germains pour leur affection et attention soutenue sur ma personne.*

*Aux professeurs Hartmut FRANK, Gerhard BRINGMANN, Karine NDJOKO et Virima MUDOGO pour leur soutien indéfectible et pour avoir cru en moi.*

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à l'endroit de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement pour la formation et les compétences que j'ai acquises à l'issue de ce cycle d'ingénieur. Je pense spécialement à tous les enseignants pour leur souci et leur implication pour nous transmettre une connaissance de qualité, une mention spéciale aussi au personnel administratif sans l'apport duquel l'organisation ne serait pas si simple.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr Mahamadou KOÏTA, directeur du présent mémoire qui, malgré ses multiples occupations, n'a ménagé aucun effort pour m'aider dans la réalisation du présent travail, cela par son expertise, son encadrement et son tutorat. Je reste marqué par sa rigueur, son sens d'excellence et du travail bien fait, il constitue un de mes modèles.

Je présente mes remerciements à la DGRE (à la DEIE particulièrement) pour cette opportunité qu'elle m'a offerte de passer le stage ainsi que pour le traitement dont j'ai bénéficié dans ses installations ; j'étais très à l'aise et tous les agents se sont montrés très coopératifs à mon égard.

Puisse Dr. Justine YOFE-TIROGO, maître de stage et encadreur externe du présent travail, trouver ici ma profonde gratitude. En effet, par sa rigueur, ses interventions, suggestions et commentaires qui ont été un fil conducteur pour ce travail, elle est un des modèles scientifiques pour moi.

J'exprime aussi ma reconnaissance envers au président du jury de la soutenance de ce mémoire Pr Harouna KARAMBIRI ainsi qu'aux rapporteurs Dr Angelbert Chabi BIAOU et Mme Radegonde RUSAGARA pour leurs remarques et suggestions dans en vue de l'amélioration du présent document.

Je remercie l'ONG Förderverein Uni Kinshasa e.V. et la Fondation Else Kröner Fresenius qui, par le système de bourse d'excellence BEBUC, ont accepté de supporter financièrement cette formation de Master.

Mes remerciements vont à l'endroit de ma famille biologique : ma mère et tous mes frères biologiques (les KUTANGILA) pour tout l'appui qu'ils ont été pour moi et leur affection à mon égard.

Je remercie toute la grande et attentionnée famille qui s'est créée autour de moi ici au Burkina Faso (Eglise Béthel Shamma, Cellule El-Victoire, Communauté Congolaise) ainsi que tous les amis et camarades. Vous avez été d'un grand soutien spirituel et moral pour moi.

Puissent tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail et dont l'anonymat n'insinue pas qu'ils soient oubliés, trouver ici l'expression de ma considération et ma gratitude.

## RESUME

Ce travail vise à améliorer les connaissances sur l'hydrogéologie des aquifères du bassin de Taoudéni (partie burkinabè). Ces connaissances serviront d'outil pour une meilleure gestion des ressources en eaux souterraines transfrontalières. L'approche méthodologique adoptée à cet effet, a consisté dans un premier temps à élaborer une synthèse des informations existantes sur la géologie et l'hydrogéologie de ces aquifères. Dans un second temps, la productivité des aquifères ainsi que leur comportement hydrodynamique ont été caractérisés respectivement à l'aide d'outils statistiques et de la méthode de la fluctuation piézométrique (WTF).

La synthèse a été réalisée en inscrivant les résultats dans un cadre régional dans la perspective d'harmoniser la nomenclature. Ainsi deux grandes formations constituent le bassin sédimentaire de Taoudéni dans sa partie burkinabé, l'Infracambrien (comportant neuf formations) et le Continental Terminal. Sur le plan hydrogéologique, ces formations essentiellement gréseuses (et carbonatées) constituent des roches réservoirs potentielles sur les trois-quarts ( $\frac{3}{4}$ ) de l'épaisseur de la série sédimentaire.

L'analyse statistique portant sur un échantillon de 116 forages a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle le bassin de Taoudéni regorge d'un système aquifère puissant avec l'aquifère GGQ qui est le plus productif ( $Q_{exp} = 42,78 \text{ m}^3/s$  ;  $T = 3,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2/s$ ). L'analyse temporelle de la piézométrie a révélé une tendance générale à l'élévation du niveau piézométrique sur l'ensemble du bassin. L'analyse spatiale de la piézométrie et la caractérisation des échanges horizontaux entre aquifère a révélé que l'écoulement est bimodal avec une composante suivant la topographie et une autre composante majeure plus profonde qui peut au niveau d'un gradient régional SW-NE présenter des écoulements dirigés depuis les hauts reliefs vers les sources de Nasso. Dans la zone des sources (bassin de Kou), la recharge maximale moyenne, calculée par la méthode WTF, varie entre 35 et 48,70 mm par an pour la période 2012-2014.

### Mots Clés :

- 
- 1 – Aquifères sédimentaires
  - 2 – Bassin du Taoudéni
  - 3 – Caractéristiques hydrodynamiques
  - 4 – Hydrogéologie
  - 5 – Piézométrie





## ABSTRACT

This work aims at improving knowledge on the hydrogeology of aquifers in the Taoudeni basin (Burkina Faso part). This knowledge will serve as a tool for better management of transboundary underground resources. The methodological approach adopted for this purpose consisted initially in elaborating a synthesis of existing information on the geology and hydrogeology of these aquifers. Then, the aquifer productivity and their hydrodynamic behavior were characterized respectively by using statistical tools and the Water Table Fluctuation method.

The synthesis was carried out by placing the results in a regional framework with a view to harmonizing the nomenclature. Thus, two large formations constitute the sedimentary basin of Taoudéni in its Burkinabe part, the Infracambrian (with nine formations) and the Continental Terminal. Hydrogeologically, these formations essentially composed by sandstone (and carbonate) constitute potential reservoir rocks over three-quarters ( $\frac{3}{4}$ ) of the thickness of the sedimentary series.

Statistical analysis has of a sample of 116 holes data confirmed the hypothesis that the Taoudeni Basin has a powerful aquifer system with the GGQ aquifer being the most productive ( $Q_{exp} = 42,78 \text{ m}^3/s$ ;  $T = 3,86 \times 10^{-3} \text{ m}^2/s$ ). Temporal analysis of the piezometry revealed a general tendency to the elevation of the piezometric level over the entire basin and helped us to approach the recharge value by WTF method. Spatial analysis, through the piezometric map analysis and the horizontal exchanges characterization between aquifers, confirmed that the flow is bimodal with a component following the topography and another major and deeper component that can present a SW-NE regional gradient directed flows from the high reliefs to the Nasso springs. In the source area (Kou Basin), the average maximum recharge calculated by the WTF method varies between 35 and 48.70 mm per year for the 2012-2014 period.

### Mots Clés :

- 
- 1 – Hydrodynamic characteristics**
  - 2 – Hydrogeology**
  - 3 – Piezometry**
  - 4 – Sedimentary Aquifers**
  - 5 – Taoudeni basin**



## LISTE DES ABBREVIATIONS ET SIGLES

AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
CT	Continental Terminal
CIEH	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
DEIE	Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
GFB	Grès de Fo-Badiangara
Gfg (GFG)	Grès fins glauconieux
Gfr	Grès fins roses
Ggq (GGQ)	Grès à granules de quartz
Gi (GI)	Grès inférieur
GKS	Grès de Kawara-Sindou
ICT	Infracambrien Terminal
IWAVE	The IAEA Water Availability Enhancement
LEHSA	Laboratoire Eau, HydroSystème et Agriculture
MNT	Modèle Numérique de Terrain
ONEA	Office National de l'Eau et Assainissement
PVREO	Programme Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest
Q	Débit
Qs	Débit spécifique
RESO	Ressources en Eau du Sud-Ouest
S	Coefficient d'emmagasinement
SAC 1	Les Siltstones, Argilites et Carbonates de Guena-Souroukoundinga
SAC 2	Les Siltstones, Argilites et Carbonates de SamandeniKiebani
SIG	Système d'Informations géographiques
SQ	Les Siltstones et quartzites de la passe de Fo
T	Transmissivité
VREO	Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest
WTF	Water Table Fluctuation

## SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	5
II.	OBJECTIFS DU TRAVAIL .....	7
III.	MATERIEL ET METHODES .....	8
III.1.	Cadre général de la zone d'étude .....	8
III.1.1.	Situation géographique .....	8
III.1.2.	Relief et hydrographie .....	9
III.1.3.	Sols et végétation.....	10
III.1.4.	Climat .....	10
III.1.5.	Contexte géologique .....	12
III.1.6.	Contexte hydrogéologique.....	13
III.2.	Données utilisées .....	14
III.3.	Méthodes.....	16
III.3.1.	Description de la géologie et de l'hydrogéologie de la bordure Sud Est du bassin de Taoudéni .....	16
III.3.2.	Caractérisation hydrodynamique des aquifères .....	17
IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	26
IV.1.	Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude.....	26
IV.1.1.	Contexte géologique général du bassin de Taoudéni .....	26
IV.1.2.	Géologie de Bordure Sud-Est du bassin de Taoudéni .....	28
IV.1.3.	Hydrogéologie de la bordure Sud–Est du bassin de Taoudéni.....	40
IV.1.4.	Conclusion partielle sur la géologie et l'hydrogéologie de la zone.....	45
IV.2.	Caractérisation hydrodynamique des aquifères .....	47
IV.2.1.	Caractéristiques hydrodynamiques et productivité des aquifères.....	47
IV.2.2.	Comportement hydrodynamique .....	54
V.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	69
VI.	RECOMMANDATIONS.....	71
VII.	BIBLIOGRAPHIE .....	72
	ANNEXES .....	78

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude .....	8
Figure 2: Relief et Hydrographie de la zone d'étude .....	9
Figure 3: Répartition des zones climatiques (1971-2000) au Burkina Faso (Yofe, 2016).....	11
Figure 4: Evolution générale de la pluviométrie dans la zone d'étude.....	11
Figure 5: Grands ensembles géologiques du Burkina Faso(modifiée de Castaing et al., 2003) .....	12
Figure 6 : Illustration de la superposition des niveaux aquifères .....	13
Figure 7 : Carte des données 1 .....	15
Figure 8 : Carte des données (2).....	15
Figure 9 : Exemple de section de colonne.....	17
Figure 10 : Mesure de la charge piézométrique .....	21
Figure 11: Données utilisées pour la carte piézométrique .....	22
Figure 12: Piézomètres et stations piézométriques considérés dans la zone d'étude .....	23
Figure 13: Zone de calcul de la recharge .....	24
Figure 14 :Grands ensembles géologiques de l'Afrique de l'Ouest (Trompette, 1973) .....	26
Figure 15: Log lithostratigraphique de la bordure Sud-est du Bassin de Taoudéni, harmonisé (Modifié à partir Taupin, 2017).....	27
Figure 16: Carte géologique de la bordure Sud-Est du bassin de Taoudéni (Burkina Faso) (actualisée à partir de Castaing et al., (2003)).....	28
Figure 17: Corrélations pour la coupe géologique C-4.....	35
Figure 18: Coupe géologique C-4 .....	35
Figure 19: Corrélations pour les coupes géologiques C3 et C2 .....	35
Figure 20: Coupes géologiques C2 et C3 .....	36
Figure 21: Coupe géologique C0 .....	38
Figure 22 Coupe Hydrogéologique et Géologique de la région de Bobo-Dioulasso(Sogreah Ingénierie, 1994) .....	43
Figure 23: Fréquence des débits et Transmissivités par classe .....	49
Figure 24: Répartition spatiale des classes de transmissivité.....	50
Figure 25: Moyenne arithmétique des débits et transmissivités observés dans chaque aquifère .....	52
Figure 26 : Répartition des forages selon leur résultat par aquifère.....	53

Figure 27: Bordure Sud-Est du Bassin de Taoudéni : Géologie et répartition spatiale des classes des Transmissivités .....	54
Figure 28: Evolution temporelle de la piézométrie dans le GGQ (1) .....	55
Figure 29 : Prélèvements mensuels de l'ONEA dans le GGQ et le SAC1.....	55
Figure 30: Evolution temporelle de la piézométrie dans le GGQ (2) .....	56
Figure 31 : Evolution temporelle de la piézométrie dans le SAC1 (1) .....	56
Figure 32 : Evolution temporelle de la piézométrie dans le SAC1(2) .....	57
Figure 33: Evolution piézométrique dans le GFR.....	57
Figure 34: Evolution piézométrique dans le SAC2 (Kouka) .....	58
Figure 35: Evolution piézométrique dans le SAC2 (Dingasso).....	58
Figure 36: Evolution piézométrique dans le GFB.....	59
Figure 37: Carte piézométrique (A) antérieure (2008) et (B) actualisée (2018).....	60
Figure 38: Carte piézométrique (A) antérieure (2008) et (B) actualisée (2018) : Lignes de courant et isopièzes .....	61
Figure 39: Dépression piézométrique et topographique aux environs de Seguere .....	62
Figure 40: Carte piézométrique de la bordure Sud-Est de Taoudéni : Bassin versant.....	63
Figure 41 : Coupe topographique et piézométrique SW-NE .....	64
Figure 42: Coupe topographique et piézométrique NW-SE .....	65
Figure 43: Evolution de la piézométrie dans le SAC1 et le GFR .....	66
Figure 44: Evolution piézométrique dans le SAC 2 et le GFR .....	66

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I: Classification des débits.....	18
Tableau II: Classification des transmissivités .....	19
Tableau III: Classification des débits spécifiques .....	19
Tableau IV: Répartition des données par aquifère .....	20
Tableau V: Quelques caractéristiques des piézomètres de la zone d'étude.....	20
Tableau VI: Caractéristiques des piézomètres utilisés pour la recharge .....	25
Tableau VII : Synthèse des paramètres hydrodynamiques des aquifères du bassin de Taoudéni .....	47
Tableau VIII: Statistiques descriptives des paramètres de productivité des aquifères .....	48
Tableau IX : Classification des débits et transmissivité dans les aquifères les plus représentés .....	51
Tableau X : Effectifs des forages analysés pour le taux de succès .....	52
Tableau XI : Calcul de la recharge.....	67
Tableau XII : Recharge estimée par diverses méthodes et divers auteurs .....	67



## I. INTRODUCTION

Dans un contexte global de changement climatique, de raréfaction de la ressource en eau et de pression démographique intensifiant la demande en eau pour les besoins anthropiques, l'Afrique de l'Ouest en général et le Sahel en particulier est une des parties les plus défavorisées de par ses conditions naturelles.

En effet, La région du Sahel est soumise à une forte variabilité climatique marquée par une faible pluviométrie. Pourtant, la pluie représente la principale source d'eau d'une grande partie de cette région. Autour des années 70, le Sahel a connu des sécheresses récurrentes qui ont duré jusqu'au début des années 90. Les sécheresses ont fait plus d'un million de morts dans la région (AIEA, 2018).

La multiplicité de ces sécheresses justifie entre autres le recours aux eaux souterraines comme principale source d'eau pour les divers usages dans certaines parties du Sahel. Les eaux de surfaces constituées par des cours d'eau non pérennes, des plans d'eau naturels et artificiels, y sont généralement précaires. De plus, leur mobilisation est souvent très onéreuse.

En Afrique de l'Ouest, les principales réserves d'eau souterraine sont logées dans des aquifères sédimentaires qui sont généralement partagés par plusieurs pays. Ces eaux souterraines partagées représentent une ressource essentielle et stratégique dont la pérennité repose sur leur bonne gestion. La justesse et la pertinence des décisions prise dans le cadre de la gestion de ces ressources dépendent quant à elles de la disponibilité et de la qualité de l'information scientifique sur laquelle elles doivent s'appuyer. (Boisvert et al., 2008b).

Si les bassins hydrographiques en Afrique de l'Ouest ont fait l'objet depuis plusieurs décennies d'une attention particulière en matière de connaissance et de règles communes de gestion, il n'en est pas de même pour les systèmes aquifères transfrontaliers. Leurs ressources sont souvent très mal connues et de plus en plus menacées par : l'augmentation de la demande en eau, la variabilité climatique, la dégradation de leur qualité à cause de pollutions d'origines diverses et de l'appel d'eaux profondes parfois très minéralisées (ANTEA Group et JMB\_Consult, 2012, 2013).

Ceci justifie le projet RAF7019 piloté par l'AIEA qui vise la prise en compte de la dimension eau souterraine à la compréhension et à la gestion des ressources en eau partagées dans la région du Sahel. Le bassin sédimentaire de Taoudéni qui fait partie des cinq bassins concernés par ce projet, est partagé par plusieurs pays de l'Afrique sahélienne, et a la caractéristique de renfermer un puissant système aquifère multicouches présentant des potentialités

d'exploitation très importantes : il constitue un vecteur non négligeable de développement économique pour tous les pays qu'il occupe (Burkina Faso, Mali, Guinée, Guinée Bissau, Mauritanie, Sénégal, Algérie, Sierra Léone) (Derouane et Dakouré, 2006).

La réalisation de ce projet régional, qui vise l'amélioration de la compréhension de l'hydrodynamique local mais aussi régional pour une meilleure gestion des ressources en eau souterraine partagées passe nécessairement par une mise à disposition des informations disponibles dans chaque pays. Après le constat des disparités entre pays et lacunes qui ont entravé la mise en œuvre efficace du précédent projet RAF 7011, il est préconisé la réalisation de cette synthèse pour permettre aux différents intervenants du projet d'avoir une bonne connaissance de base géologique et hydrogéologique sur l'ensemble du système aquifère. Il s'agira donc de développer une synthèse hydrogéologique des différents systèmes aquifères du bassin (peu profonds et profonds) basée sur l'harmonisation de la nomenclature des aquifères, Ces travaux préliminaires portent également sur l'analyse du comportement hydrodynamique, de l'écoulement des eaux souterraines des aquifères et de leur éventuelle interconnexion à l'aide de cartes piézométriques. Cette étude hydrodynamique délimitera les différents aquifères, tant en profondeur que latéralement et devrait fournir de nouvelles connaissances sur le comportement hydrogéologique du bassin.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de ces travaux préliminaires. Il vise, pour la partie burkinabé du bassin de Taoudéni, à contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'hydrogéologie. Cette contribution se fera, premièrement en termes de synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques à partir de différents travaux réalisés dans la zone ; et deuxièmement, il s'agira d'une caractérisation hydrodynamique des aquifères.

## **II. OBJECTIFS DU TRAVAIL**

L'objectif général de ce travail est de contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'hydrogéologie de la bordure Sud-est du bassin de Taoudéni.

Cet objectif se décline en deux objectifs spécifiques qui sont :

- Décrire la géologie et l'hydrogéologie de la bordure Sud-est du bassin de Taoudéni ;
- Caractériser l'hydrodynamique des aquifères

Ce travail s'articule autour de deux grandes parties :

La première partie consistera à présenter le contexte physique de la zone d'étude, le matériel utilisé ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs fixés ;

La deuxième partie, quant à elle, consistera à mener une analyse des résultats obtenus tout en portant une discussion sur ces derniers.

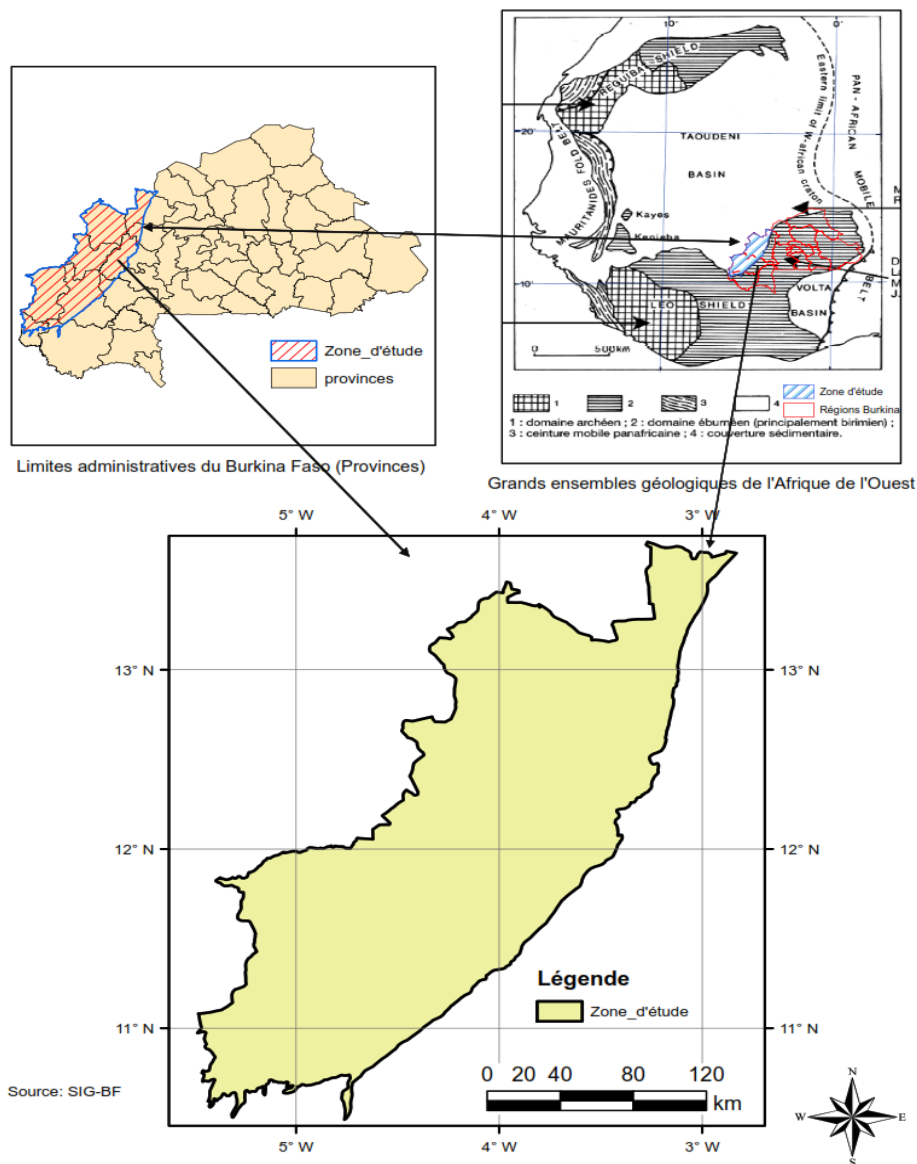
Une conclusion, des perspectives et recommandations termineront cette étude.

### III. MATERIEL ET METHODES

#### III.1. Cadre général de la zone d'étude

##### III.1.1. Situation géographique

La bordure sud-est du bassin de Taoudéni s'étend du nord à l'ouest du Burkina Faso, elle est située entre les longitudes 6 et 2°W et les latitudes 9 et 14°N (Figure 1). Occupant une surface d'environ 45 000 km<sup>2</sup>, elle est située à l'amont des bassins versant internationaux de la Volta et de la Comoé. Cette zone traverse quatre régions du Burkina Faso, notamment celles du Nord (provinces de Yatenga), de la Boucle du Mouhoun (les provinces de la Kossi, des Banwa, du Mouhoun, du Sourou et du), des Hauts-bassins (Provinces du Kéné Dougou, de Tuy et du Houet) et des Cascades (provinces de la Comoé et de la Léraba).



### III.1.2. Relief et hydrographie

Ce paragraphe est rédigé à partir de la synthèse des auteurs suivants : Gombert(1998) et Ouedraogo (2006).

D'une manière générale le Burkina Faso est un pays plat. La région d'étude consiste en un domaine sédimentaire du Néoprotérozoïque dont les roches forment un plateau de 500 m d'altitude moyenne (Figure 2). Ce plateau est caractérisé par des lignes douces et des vallonnements peu marqués. Les cuirasses latéritiques sont abondantes et couvrent près de la moitié de la superficie du plateau. De même, des collines isolées aux altitudes parfois supérieures à 700 m se dégagent de ce plateau. Ainsi, la colline de Bérégadougou culmine à 717 m et le Ténakourou avec 747 m d'altitude, constitue le plus haut sommet du Burkina Faso. En bordure du socle, le plateau sédimentaire forme une falaise de hauteur variable mais ne dépassant guère 200 m. (Ouedraogo, 2006)

Le fleuve Mouhoun (ex.Volta noire), est le principal cours d'eau qui traverse la zone. Long d'environ 750 km, c'est un cours d'eau pérenne dont les principaux affluents sont : Mouhoun supérieur, le Sourou et Mouhoun inférieur. A côté du Mouhoun, il y a le cours d'eau de la Comoé et celui du Banifing (Figure 2).

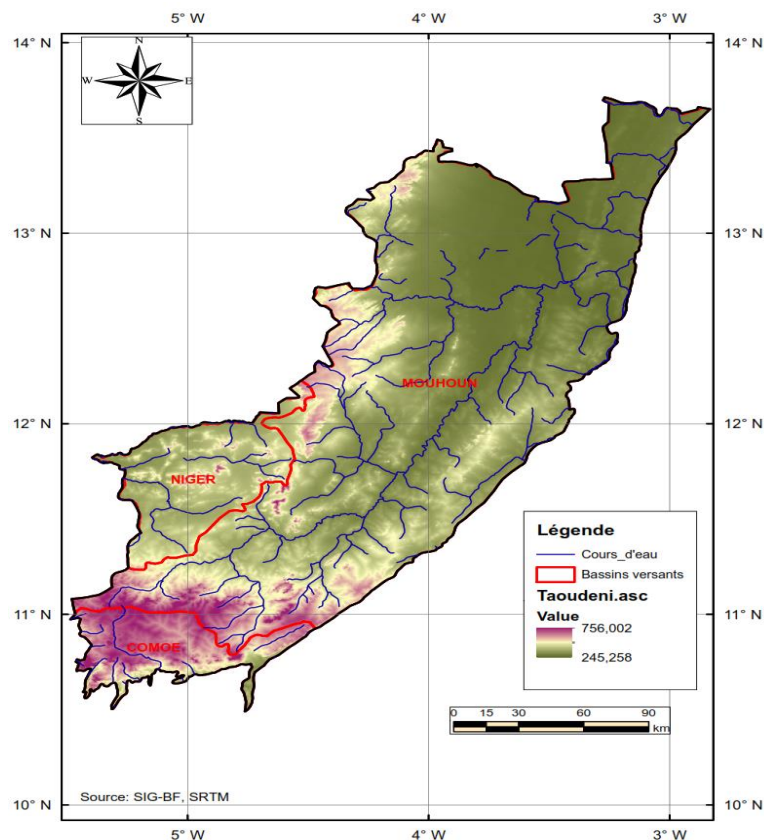


Figure 2: Relief et Hydrographie de la zone d'étude

### ***III.1.3. Sols et végétation***

La pédologie de la zone d'étude peut se résumer à quatre types de sol (Dipama, 2005; Ndiaye, 2008) :

- Sols à pédogenèse nulle ou trop réduite, Lithosols
- Sols à pédogenèse embryonnaire : Sols peu évolués
- Sols à pédogenèse marquée par l'hydromorphie : Sols hydromorphes
- Sols à pédogenèse ferrugineuse sur complexe d'altération kaolinitique : Sols ferrugineux lessivés

La végétation est dominée par la savane arbustive à arborée et boisée. La composition floristique de ces formations végétales est très riche. Elle est constituée de plusieurs espèces dont *Anogeisus leicarpus*, *Burkea africana*, *Butyrespernum Parkii*, *Parkia biglobosa*, *Bombax Costatum*, *Elacis Guinensis*... D'autres espèces naturelles sont introduites par les services de l'environnement. Il s'agit des tecks, des eucalyptus, des neems... Les espèces telles que *Parkia biglobosa* peuvent atteindre une profondeur racinaire de 60 m.

### ***III.1.4. Climat***

Le climat du Burkina Faso est de type soudano-sahélien subdivisé en trois grandes zones (Figure 3) (Dipama, 2005).

- La zone sahélienne au Nord (au-dessus de la parallèle 13°5' N) dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 600 mm avec une forte évapotranspiration, des températures élevées et une saison pluvieuse courte (2 à 3 mois).
- La zone soudano-sahélienne (entre 11°3' et 13°5' de latitude nord) qui enregistre une pluviométrie comprise entre 600 et 900 mm sur 4 à 5 mois. Les températures enregistrées sont généralement comprises entre 20 et 30°C ;
- La zone soudanienne occupe la portion Sud (au sud de la parallèle 11°3'N), où la saison pluvieuse dure de 5 à 6 mois avec des hauteurs d'eau pouvant atteindre ou même dépasser 1100 mm par an. Ce domaine est marqué par de faibles amplitudes thermiques (20-25 °C).

La zone d'étude s'étend sur deux zones climatiques qui sont : la zone soudano-sahélienne et la zone soudanienne.

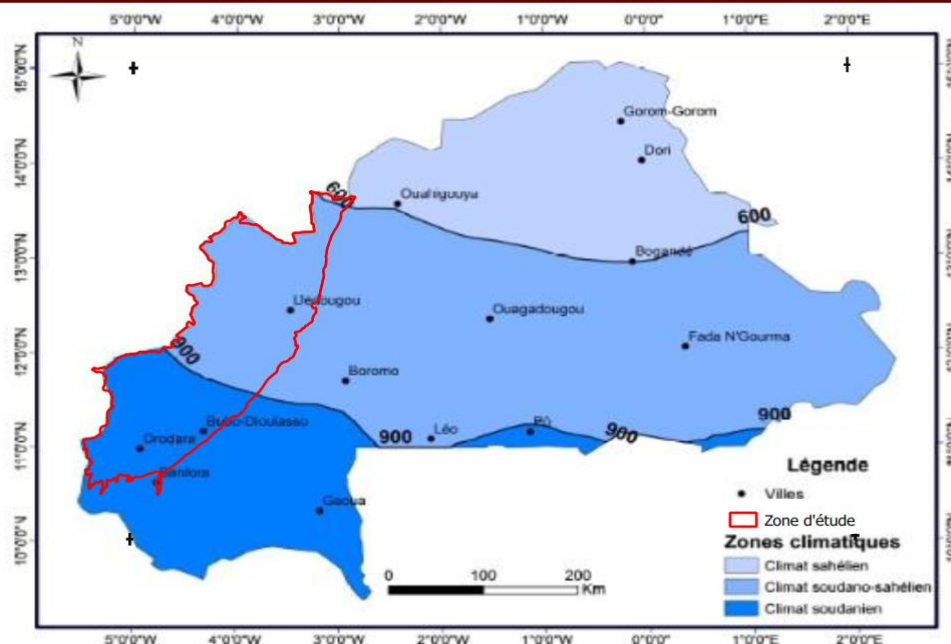


Figure 3: Répartition des zones climatiques (1971-2000) au Burkina Faso (Yofe, 2016)

- **Aperçu général de l'évolution temporelle de la pluie**

La Figure 4 présente un aperçu global de l'évolution de la pluie dans la zone d'étude de l'an 1987 à l'an 2017.

On retient que de l'an 1987 à environ l'an 2001, la tendance est à la baisse et de l'an 2001 à 2017, la tendance est plutôt à la hausse de la pluie. Il s'en dégage donc une tendance générale à l'augmentation des hauteurs pluviométriques au niveau de Solenzo, Dedougou et une tendance à la baisse pour Bondokuy. Le pluviomètre de Bobo Dioulasso enregistre les plus fortes hauteurs pluviométriques et est quasi stable. Nous remarquons, dans l'ensemble une forte variabilité de la pluviométrie (très marquée à Solenzo).

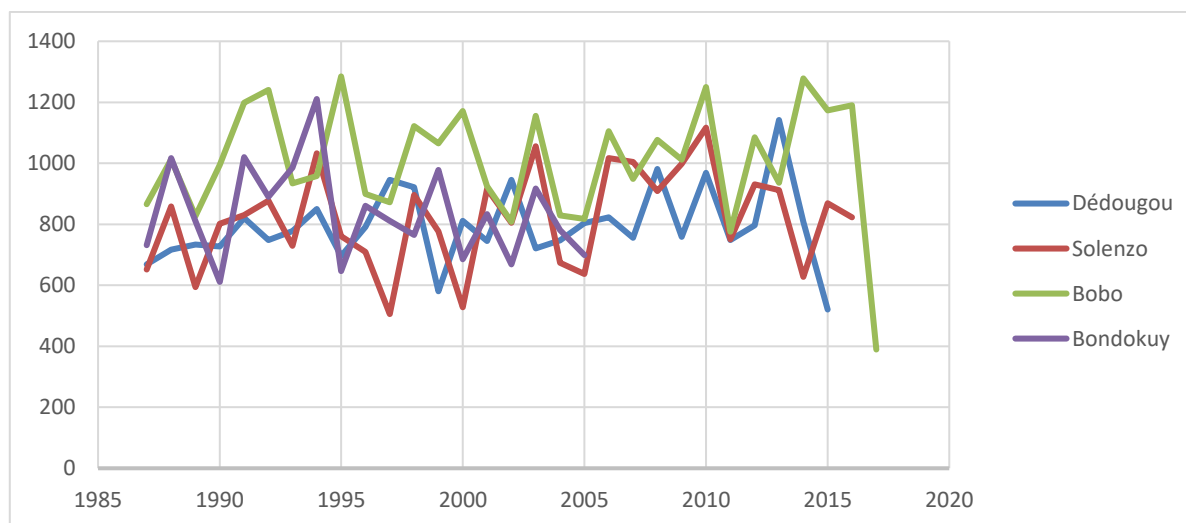


Figure 4: Evolution générale de la pluviométrie dans la zone d'étude



### III.1.5. Contexte géologique

Les principales études géologiques réalisées sur l'ensemble du Burkina Faso révèlent que la superficie du Burkina est constituée à 80% par un bloc de formations cristallines du Paléoprotérozoïque (Précambrien D et C dans l'ancienne littérature) à Mésozoïque. Ce bloc est recouvert de façon discordante aux frontières Nord et Nord-Ouest du pays par les sédiments du Néoprotérozoïque (Précambrien A) du bassin de Taoudéni, et sur la frontière Sud-Est, par ceux de la bordure septentrionale du bassin Voltaïen datée du Précambrien à Eocambrien (Hottin et Ouedraogo, 1975; C. Ouedraogo, 1981; Castaing et al., 2003). Les dépôts continentaux tertiaires appelés Continental Terminal se superposent aux formations infracambriennes à l'extrême Nord-Ouest, aux formations paléo à mésoprotérozoïques à l'Est (voir Figure 5).

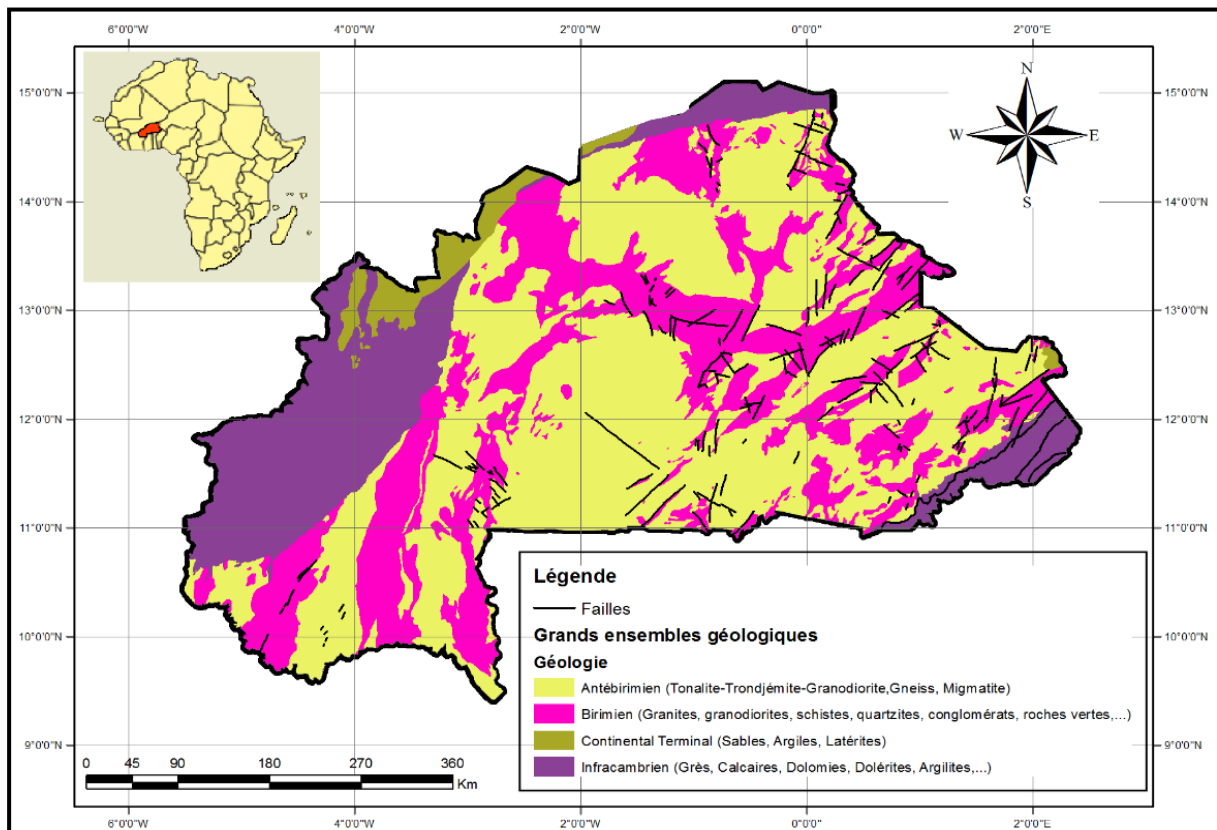


Figure 5: Grands ensembles géologiques du Burkina Faso(modifiée de Castaing et al., 2003)

La zone d'étude correspond au bloc Nord-Ouest qui est essentiellement constitué des formations du bassin de Taoudéni.



### **III.1.6. Contexte hydrogéologique**

On distingue au Burkina Faso, le système aquifère de la zone de socle et le système aquifère de la zone du sédimentaire ancien et récent (Continental Terminal). En fonction de la porosité, ces systèmes aquifères sont classés selon Dakouré, (2003); Gilli et al.,( 2008), Sauret, (2008) en :

- *Aquifères discontinus* : la ressource est localisée et circule à travers les failles/fractures des roches massives du socle : granites, dolérites, calcaires, silexites, grès, ou dans les roches plastiques ;
- *Aquifères semi-continus* : La ressource est localisée dans le milieu poreux, et circule dans les fractures et les joints de liage de grès, de roches carbonatées, des cuirasses, et des schistes ;
- *Aquifères continus* : les eaux circulent à travers les pores intergranulaires et microfissures issus de l'altération : altérites surmontant le socle, alluvions, sables, grès friables.

A part la formation du Continental Terminal, on distingue, aussi bien en milieu sédimentaire qu'en milieu de socle, la même superposition des niveaux aquifères du bas vers le haut (voir Figure 6) (Sauret, 2008) :

- la roche saine ou dure ;
- la zone altérée ;
- les latérites.

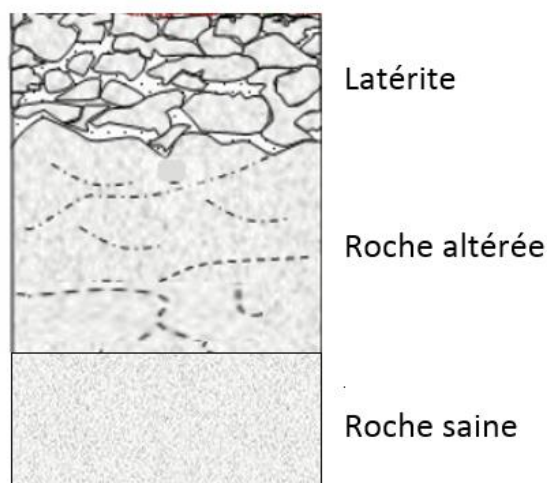


Figure 6 : Illustration de la superposition des niveaux aquifères

Dans la zone d'étude, la roche dure est représentée par les grès, calcaires, silexites et schistes traversés par des réseaux de failles.

### **III.2. Données utilisées**

Pour la réalisation de nos travaux, nous avons collecté des données techniques de forages issues généralement de projets et programmes (IWACO, RESO, VREO) auprès des structures telles que : BUMIGEB, ONEA et la DEIE. Nous avons également collecté des données piézométriques, des données climatiques auprès de la DEIE et de l'Agence Nationale de la Météorologie. Les principales données mises à notre disposition sont les suivantes :

- Une centaine de logs de forage réalisés dans la zone ;
- Les données relatives aux paramètres hydrodynamiques (Transmissivité et coefficient d'emmagasinement) déterminés sur plus 400 forages dans la zone ;
- Les données de suivi piézométrique de 7 piézomètres de la DEIE couvrant la période allant de 2000 à 2017 ;
- Les données de suivi piézométrique de 11 piézomètres de l'ex projet VREO (1989 à 2017).
- Les données pluviométriques se rapportant aux stations situées aux environs des piézomètres suivis ;
- Les données piézométriques de la zone de Bobo Dioulasso (fournies par l'ex projet VREO) ;
- Les informations sur le niveau statique se rapportant à 2 300 forages réalisés dans la zone et ses environs (fournies par la DEIE)

Avant d'analyser l'ensemble de ces données, un prétraitement a consisté à :

- Un apurement des données pour ne retenir que celles qui sont bien géoréférencées et qui sont situées dans la zone d'étude ;
- Sélectionner les données des paramètres hydrodynamiques obtenus par des essais de pompage de longue durée ;
- Extraire l'altitude des forages disposant d'information sur le niveau statique à l'aide du modèle numérique de terrain de type SRTM (30 m de précision) sous ARCGIS.

Les cartes (voir Figure 7 et Figure 8) ci-dessous rendent compte de l'ensemble des données ci-haut citées après le prétraitement.

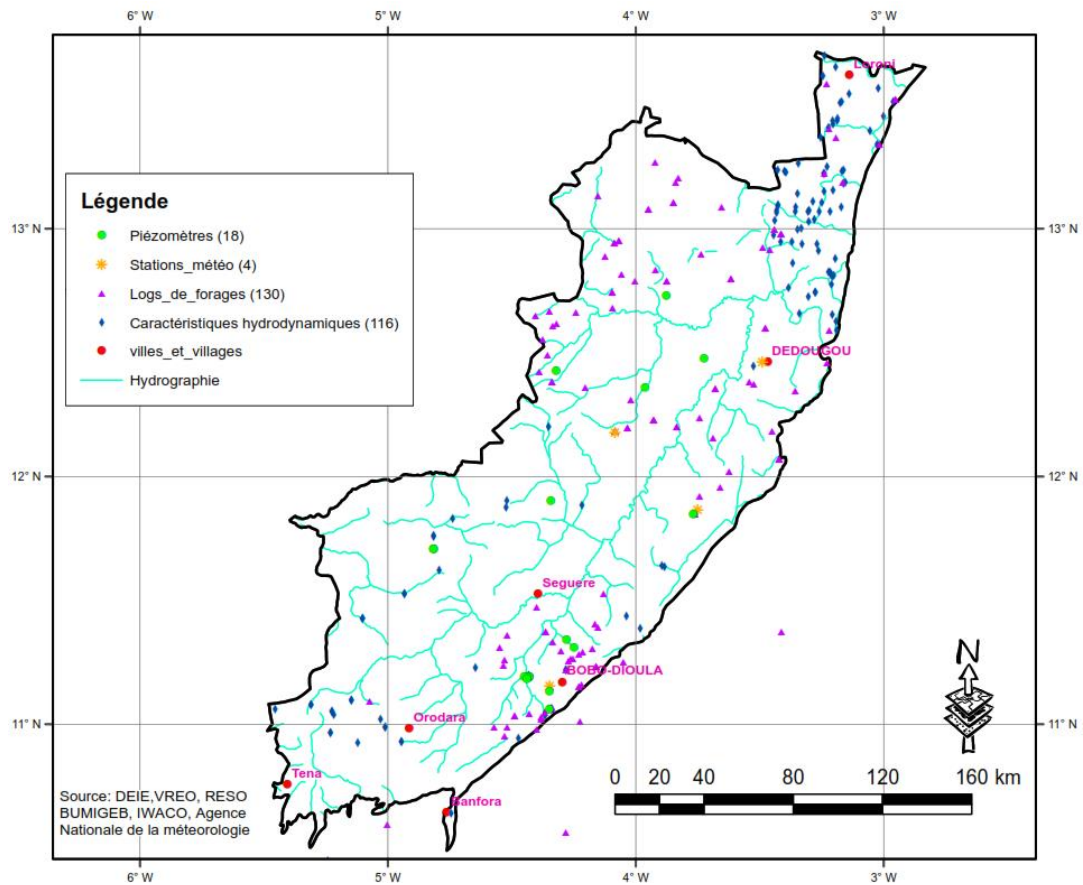


Figure 7 : Carte des données 1

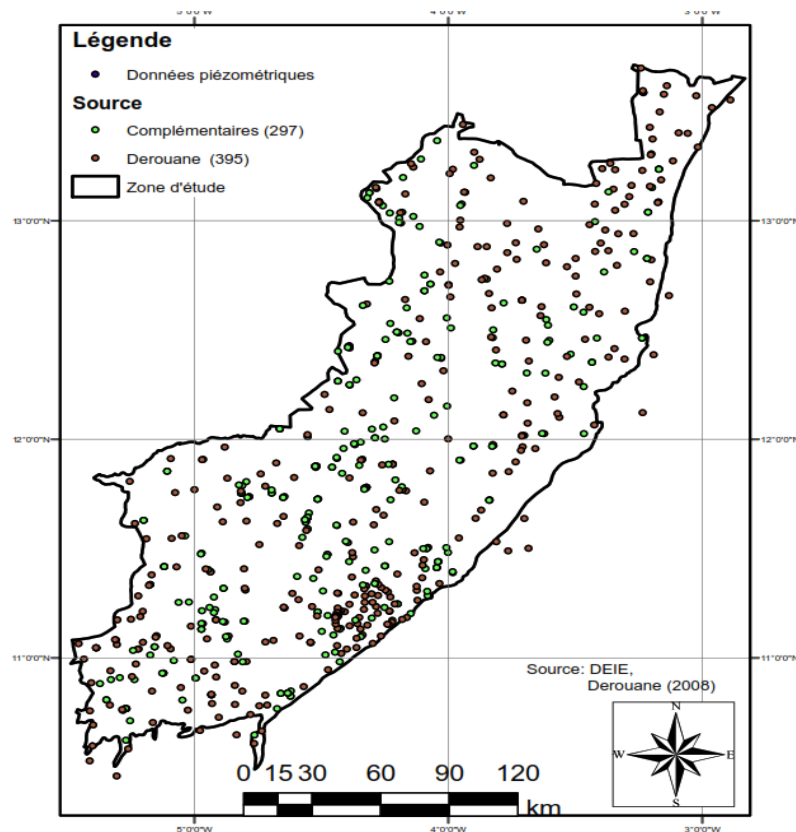


Figure 8 : Carte des données (2)

### **III.3. Méthodes**

#### ***III.3.1. Description de la géologie et de l'hydrogéologie de la bordure Sud Est du bassin de Taoudéni***

La connaissance du contexte géologique et hydrogéologique constitue la base indispensable de toute étude visant la compréhension du fonctionnement hydrogéologique des aquifères (Blaise et J.P. Marchal, 2006; Gilli et al., 2008). Ces connaissances portent sur leur structure, leur géométrie, leur lithologie et leurs caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emménagement). Dans le cas des aquifères transfrontaliers, il existe généralement une disparité entre pays dans la disponibilité des données et les connaissances sur les aquifères partagés comme dans le cas du bassin de Taoudéni.

Pour sa partie Burkinabè, les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du bassin ont été produites à partir des investigations faites dans le cadre de projets ou programmes (RESO, VREO, bilan d'eau) à partir de prospections géophysiques, de tests sur forages de reconnaissance (essai de pompage, diagraphie), des analyses géochimiques et isotopiques (C. Ouedraogo, 1981, 1983, 2006; I. Ouedraogo, 1994; Gombert, 1998; Dakouré, 2003; Sauret, 2013; Koussoubé, 2010; Huneau et al., 2011).

La synthèse prendra en compte l'ensemble de ces travaux pour fournir une description détaillée de la géologie (lithologie, pétrologie et tectonique générale) et de l'hydrogéologie de la zone (géométrie, structure, lithologie, propriétés hydrodynamiques) avec la réalisation des coupes géologiques sur base des logs de forages en notre disposition. Cette synthèse doit se faire en tenant compte de la nomenclature régionale des aquifères qui les regroupe dans de grands ensembles tels que le Cambrien, l'Infracambrien, le Continental Intercalaire et le Continental Terminal pour permettre de l'inscrire dans un contexte régional.

Pour la description géologique, les aspects pétrographiques des formations de l'Infracambrien ont été synthétisés à partir des travaux de Ouedraogo (2006) et de Gombert (1998). Les travaux de Koussoubé (2010) ont permis de mieux expliciter les formations du CT. Les aspects pétrologiques sont mieux synthétisés par les travaux de C. Ouedraogo (2006). Les travaux de I. Ouedraogo (1994) et Sogreah Ingénierie (1994) ont été utilisés pour les questions de tectonique générale.

En ce qui concerne les aspects hydrogéologiques, la synthèse s'est basée sur les travaux de Gombert (1998) et de Sogreah Ingénierie (1994) pour des questions pétrographiques et structurales. Les autres auteurs apportent des informations supplémentaires (I. Ouedraogo,

1994; Dakouré, 2003; Yofe, 2016). Les travaux de Sauret (2013) ont été utilisés spécialement pour les aquifères du Quaternaire. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été synthétisées à partir de l'ensemble de travaux suscités.

Les coupes géologiques ont été réalisées à partir des sections de colonne ; Celles-ci consistent en un certain nombre de colonnes stratigraphiques simplifiées montées côte à côte pour illustrer comment la stratigraphie change d'un endroit à l'autre. (Lislie et al., 2011). Il s'agit de corrélation entre les logs des forages (Figure 9).

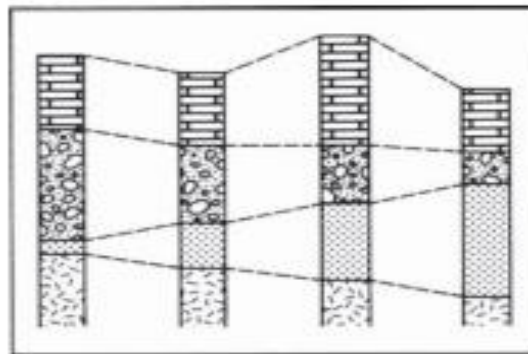


Figure 9 : Exemple de section de colonne

Le choix de ce coupes géologiques en section de colonne se justifie par le fait que les rares affleurements des formations sédimentaires du Néoprotérozoïque sont recouverts de cuirasses latéritiques ou sont fortement érodés. Seules les données recueillies lors des forations peuvent permettre de faire une reconstitution géologique (Ouedraogo, 1994).

Pour y arriver, nous nous sommes servis du logiciel GEO5 pour la représentation des logs de forages et des logiciels ARCGIS et Inkscape pour dessiner les coupes géologiques. Les nouvelles données de forage nous ont permis de réaliser des coupes géologiques.

### ***III.3.2. Caractérisation hydrodynamique des aquifères***

Cette partie va compléter les connaissances disponibles et qui ont fait l'objet de la synthèse, en se basant sur l'analyse de données récentes.

Dans le cadre de cette étude, il n'est pas prévu de faire des investigations sur le terrain. Les données produites par des travaux récents seront exploitées afin d'améliorer la caractérisation des aquifères du bassin de Taoudéni. Les données dont nous disposons pour cette étude (logs de forage, rapports d'essais de pompage longue durée, données de campagne de mesure du niveau statique et de suivi périodique de la piézométrie) nous amènent à nous limiter à l'approche piézométrique en nous servant des outils statistiques et de cartographie. Cette approche ainsi que ces outils sont employés dans le but de contribuer à l'amélioration des

connaissances en procédant à la caractérisation hydrodynamique des aquifères de la zone d'étude.

Cette caractérisation sera traitée en deux axes. En premier lieu il sera question d'utiliser les outils statistiques en vue d'analyser les paramètres hydrodynamiques et la productivité des aquifères. En second lieu, en adoptant l'approche piézométrique, il sera question d'analyser les données issues des campagnes de mesure du niveau statique et de suivi périodique de la piézométrie en vue de réaliser une étude spatiale et temporelle du comportement hydrodynamique des aquifères.

### **III.3.2.1. Productivités des aquifères**

Dans le but de classifier les différents aquifères du bassin en fonction de leur productivité, nous avons mené une analyse des débits d'exploitation et des paramètres hydrodynamiques. Il s'agit de la transmissivité qui représente la capacité de mobilisation de l'eau et que le coefficient d'emmagasinement représente la capacité à libérer de l'eau (Castany et Margat, 1977) et renseigne de cet fait la pérennité en exploitation (Assemian et al., 2014 ; Gnamba et al., 2014 ; Koudou et al., 2016; Mboudou, 2017).

La productivité étant liée notamment au choix d'un rabattement admissible (Castany et Margat J., 1977), il sera aussi question d'analyser la productivité en termes de débit spécifique que représente le rapport du débit d'exploitation par rapport au rabattement impliqué (Tableau III).

La distribution de ces débits et de ces transmissivités (Tableau I et Tableau II)

a été faite suivant la classification proposée par divers auteurs selon la classification CIEH (Yao et al., 2010; Mboudou, 2017) :

*Tableau I: Classification des débits*

Intervalles	Classe
de 0 à 1 $m^3/h$	débits très faibles
de 1 à 2,5 $m^3/h$	débits faibles
de 2,5 à 5 $m^3/h$	débits moyens
de 5 à 10 $m^3/h$	débits forts
supérieur à 10 $m^3/h$	débits très forts

Tableau II: Classification des transmissivités

Intervalles	Classe
$T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ;	Classe faible
$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	Classe moyenne
$T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	Classe forte

Tableau III: Classification des débits spécifiques

Intervalles	Classe
$Qs < 0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique villageoise
$0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} < Qs < 0,36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de la petite hydraulique agricole (jardins)
$0,36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} < Qs < 1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique agricole
$Qs > 1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique urbaine

Les valeurs de transmissivités reportées consistent en des moyennes de transmissivité calculée par la méthode de Theis (équation 1, 2) et celle de la remontée de Theis-Jacob (équation 4), avec les données de la remontée dans 116 puits de pompage après l'arrêt du pompage longue durée. (Gombert, 1998; Dakouré, 2003; C. Ouedraogo, 2006)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)(l) \text{ avec } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$T = \frac{QW_0}{4\pi s_0} (2)$$

$$S = \frac{4Tt_0}{r^2(1/u_0)} (3)$$

Avec,

Q : le débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ; T : la transmissivité ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ; r : la distance du point considéré à l'axe du puits de pompage (m) ; S : le coefficient d'emmagasinement (adimensionnel) ; s : rabattement (m) ; t : la durée de pompage (s) ; W(u) une fonction connue et tabulée.  $s_0$ ,  $t_0$ ,  $1/u_0$  et  $W_0$  sont obtenus en superposant, par glissement parallèlement aux axes, la courbe  $\log s = f(\log t)$  à la courbe expérimentale de Theis  $[\log W = f(\log(1/u))]$ . A la superposition, un point quelconque  $M_0$  aura dans les deux systèmes d'axes, des coordonnées  $M_0(s_0, t_0)$  et  $M_0(1/u_0, W_0)$ .

$$T = \frac{0,183Q}{a} (4)$$



$a$  est la pente de la droite définie par  $S_r = f \left[ \log \left( \frac{t_p + t_r}{t_r} \right) \right]$  où  $S_r$  représente le rabattement résiduel,  $t_p$  la durée de pompage et  $t_r$  la durée de remontée.

Tableau IV: Répartition des données de forage par aquifère

GI	1
GKS	1
GFG	49
GGQ	21
SAC1	6
GFR	1
SAC2	8
SQ+GFB	3
CT	26

### III.3.2.2. Etude du comportement hydrodynamique

L'étude du comportement hydrodynamique est réalisée par l'analyse de la piézométrie des aquifères. Cette analyse permettra d'apprécier de façon globale les conditions d'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leurs conditions d'alimentation et de drainage, et la variation de leurs réserves. (Gilli et al., 2008).

Cette analyse est réalisée à partir des données de piézométrie au pas de temps mensuel enregistrées de 1989 à 2017 dans 8 des piézomètres localisés à divers endroits du site

(Tableau V).

Tableau V: Quelques caractéristiques des piézomètres de la zone d'étude

Village	Altitude (m)	Profondeur (m)	Formation	Aquifère	période de suivi
Dingasso F1	340,07	124,00	SAC2	SAC2	1989-2017
Dingasson F2	340,07	27,00	SAC2	SAC2	1989-2017
Nouna	277,14	15,90	GFR	GFR	2004-2017
Bondokuy	364,76	20,85	GGQ	GGQ	2004-2017
Gombio	265,87	22,50	SAC1	SAC1	2004-2017
Tansila	443,83	16,31	GFB	GFB	2004-2017
Kossoba	283,87	65,98	SAC2	SAC2	2004-2017
Kouka	324,24	18,50	SAC2	SAC2	2004-2017
Pz15	346,00	156,00	GGQ	GGQ	1993-2015

La piézométrie est représentée par la charge hydraulique définie par la formule suivante :

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

- $H(m)$  : la charge hydraulique



- $z$  : la cote du plan d'eau
- $P$  : la pression
- $\rho$  : la masse volumique de l'eau
- $g$  : l'accélération de la pesanteur
- $v$  : la vitesse du fluide

Or dans l'environnement souterrain, l'on se retrouve confronté à des vitesses d'écoulement très faibles. D'où, l'on néglige l'énergie cinétique représenté par le terme  $v^2/2g$ , nous obtenons donc :

$$H = z + \frac{P}{\rho g} \quad (6)$$

Cette charge se calcule par rapport à un repère qui est le plus souvent le niveau zéro des mers, ainsi la charge hydraulique se résume dans ce cas à la cote du plan d'eau dans l'ouvrage au niveau duquel la charge est déterminée (voir Figure 10 et Equation (7))

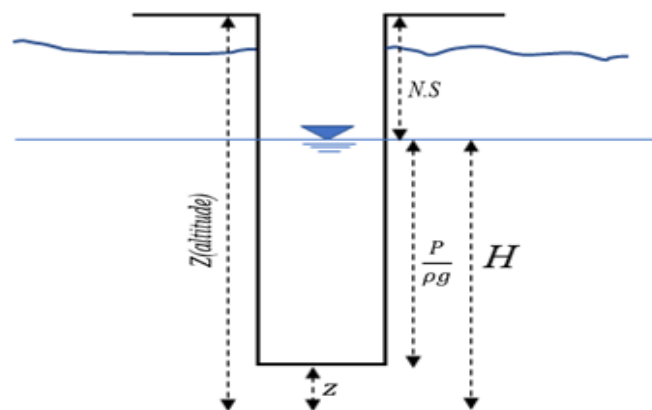


Figure 10 : Mesure de la charge piézométrique

$$H = Z - N.S \quad (7)$$

avec  $H$ , la hauteur piézométrique,  $Z$ , l'altitude du forage par rapport à la margelle de l'ouvrage et  $N.S$  le niveau statique

La variation des écoulements souterrains est appréhendée à l'aide de la carte piézométrique. Pour la zone d'étude, il existe une carte piézométrique réalisée par Derouane (2008) sur base de 395 points (Figure 11 a) couvrant la période de 1995 à 2006. Dans le but d'apporter plus de précisions sur le comportement hydrodynamique, nous avons, à partir des données recueillies auprès de la DEIE, ajouté 297 points (Figure 11 b) des données de basses eaux (Mars à Juin) de la période allant de 2000 à 2008. Le choix de cette période se justifie par la quasi stabilité de la piézométrie de basses eaux dans le temps, matérialisée par la faible variation du inter mensuelle du niveau piézométrique.

L'association de ces deux catégories de données apporte plus de précisions sur la piézométrie puisqu'elle permet de mieux couvrir la zone (Figure 11 c). Ces données proviennent de forages (piézomètres) qui captent la nappe à une profondeur inférieure à 200 m donc les horizons superficiels de l'aquifère.

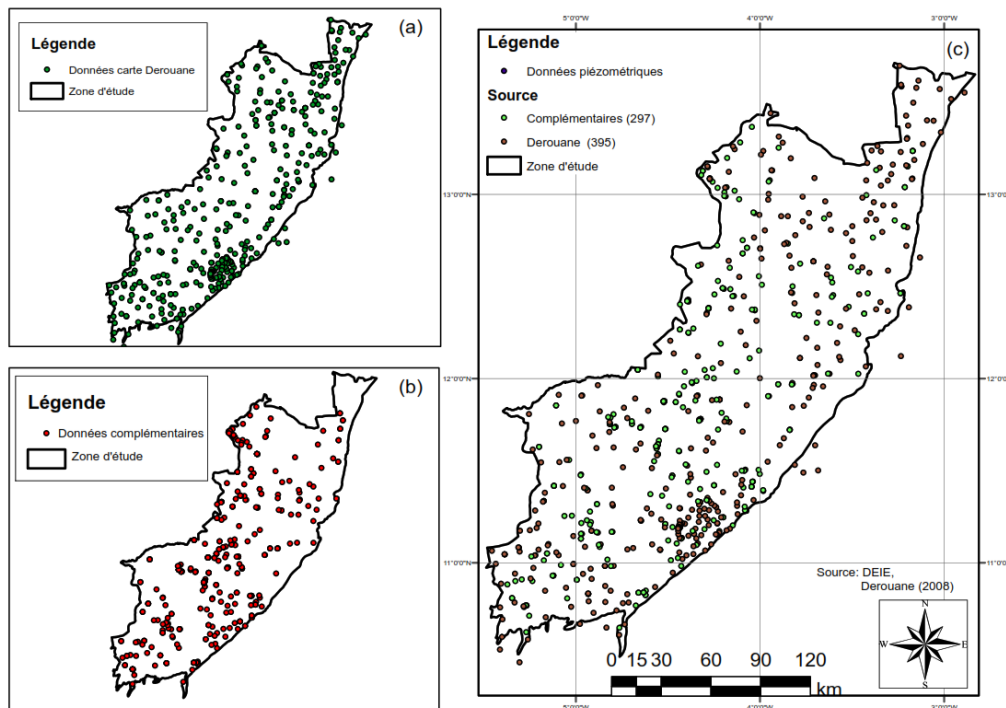


Figure 11: Données utilisées pour la carte piézométrique

- **Caractérisation des échanges horizontaux**

En plus de la variation des réserves, l'analyse temporelle et spatiale des données de suivi piézométrique nous a permis de caractériser les échanges latéraux entre réservoirs de l'aquifère. Cette analyse a porté sur cinq aquifères du bassin de Taoudéni (voir Figure 12 et Tableau V).

Les échanges horizontaux dans la nappe sont étudiés par le truchement de la triangulation de piézomètres (Dara, 2017; Koïta et al., 2017). Pour mieux apprécier cet aspect, ces échanges ont été étudiés pour les aquifères qui se superposent selon la stratigraphique. Ainsi, cette étude a concerné les aquifères SAC1, GFR et SAC2 dans la zone climatique soudanienne.

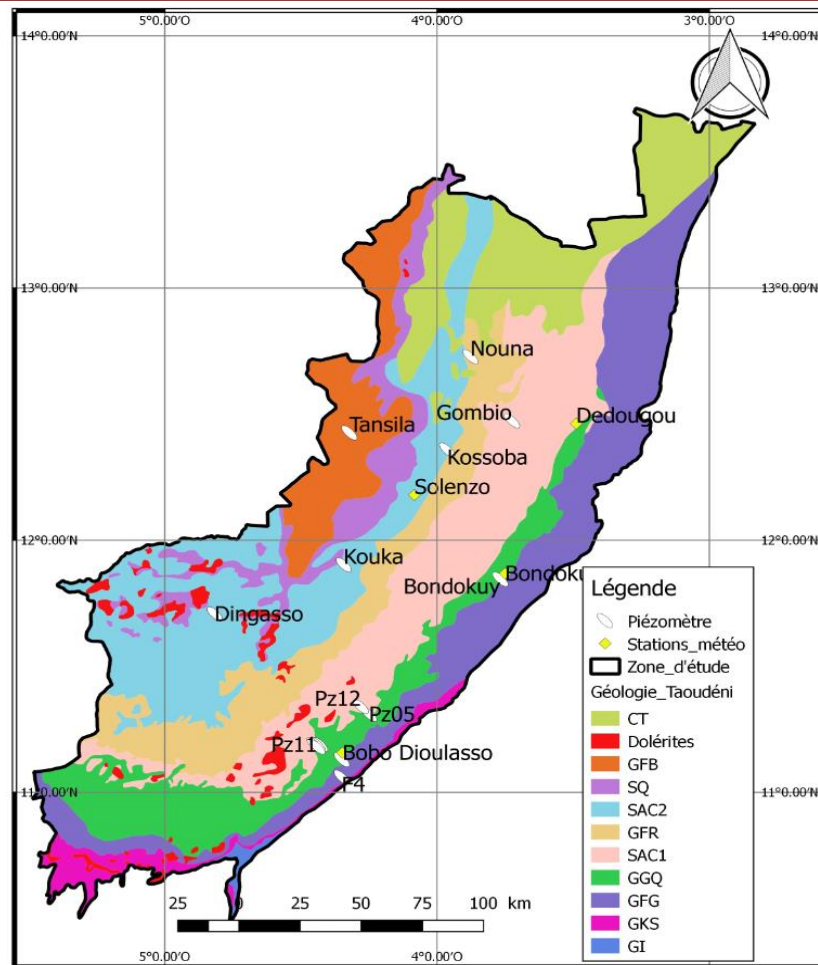


Figure 12: Piézomètres et stations piézométriques considérés dans la zone d'étude

- **Estimation de la recharge**

L'estimation précise de la recharge des nappes est extrêmement importante pour une gestion appropriée des systèmes aquifères. A partir des données piézométriques disponibles, nous allons faire une estimation de la recharge par la méthode d'analyse de fluctuation piézométrique. (Koïta et al., 2017).

L'intérêt de la méthode d'analyse des fluctuations de nappe ("*Water Table Fluctuation*") dans les publications internationales) tient en sa simplicité et dans son insensibilité aux conditions climatiques. (Healy and Cook, 2002 ; Koïta et al., 2017). Elle s'applique uniquement aux nappes libres. Son choix dans ce cadre réside dans le fait que la plupart des piézomètres considérés ne captent pas de grandes profondeurs, on peut donc supposer qu'ils captent des nappes libres. En plus, comme on le verra au point IV.1.4, à l'état actuel des connaissances, la série sédimentaire de Taoudéni serait caractérisée par une nappe d'eau souterraine unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche avec existence des niveaux imperméables (de faible extension) séparant différents horizons géologiques de la série.



Tableau VI: Caractéristiques des piézomètres utilisés pour la recharge

N° Piezo	Z	Profondeur	Formation géologique	Aquifère capté
Pz02	406	182	GFG	GFG
Pz05	345	60	GGQ	GGQ
Pz12	332	58	SAC/GGQ	GGQ
Pz15	346	156	GGQ	GGQ
Pz16	346	52	GGQ	GGQ
F4	350	86	SAC	SAC
Pz20		46	SAC/GGQ	SAC
Pz20BIS	352	40	SAC	SAC
Pz10	348	78	SAC/GGQ	SAC/GGQ

## IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### IV.1. Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude

Les notions et termes développés dans cette section sont basés sur la synthèse bibliographique des travaux de C. Ouedraogo (1981, 1983, 2006), I. Ouedraogo (1994), Sogreah Ingénierie (1994), Gombert (1998).

#### IV.1.1. Contexte géologique général du bassin de Taoudéni

Situé sur le craton Ouest africain (Figure 14), le bassin de Taoudéni constitue le plus grand synclinal sédimentaire du nord-ouest africain. Il s'est formé dans la deuxième moitié du protérozoïque. Sa période active de subsidence s'est poursuivie jusqu'au milieu du Paléozoïque, où s'est produite l'orogénèse hercynienne et où il s'est trouvé exondé. Il est constitué d'une épaisseur de 6 000 m de sédiments du Précambrien terminal (Infracambrien) et du Paléozoïque.

Il couvre près 1,5 millions de km<sup>2</sup> à l'ouest et au nord de l'Afrique. Il s'étend largement au Mali, en Mauritanie et dans les deux Guinées et déborde légèrement en Algérie, Burkina Faso, Sénégal et Sierra Leone.

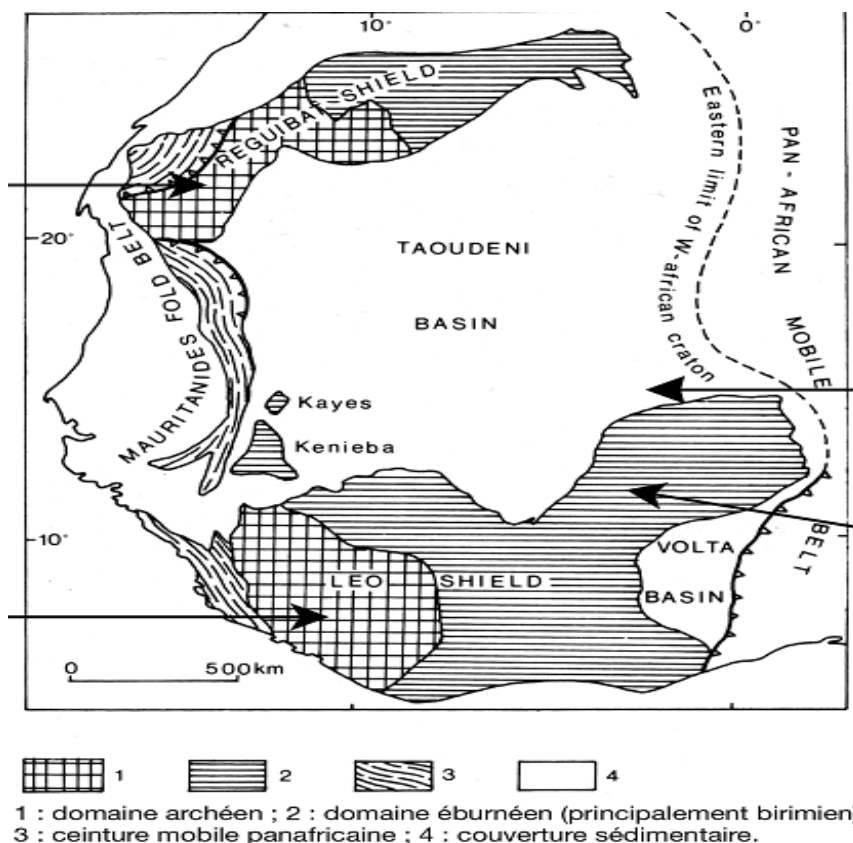


Figure 14 : Grands ensembles géologiques de l'Afrique de l'Ouest (Trompette, 1973)

Il est çà et là recouvert de fins dépôts continentaux du mésozoïque-cénozoïque, comprenant notamment des dunes du quaternaire et des systèmes lacustres. Ces derniers dépôts témoignent de la continuité géographique entre plusieurs bassins, à savoir le bassin de Taoudéni/Tanezrouft au nord et celui de Taoudéni qui communique avec le bassin des Iullemeden à l'est (Taupin, 2017).

La zone d'étude fait partie de la bordure Sud-Est de ce bassin de couvrant une superficie d'environ 260.000 km<sup>2</sup> dont environ 20% (soit 45.000 km<sup>2</sup>) sont situés au Burkina Faso. Dans cette partie, la géologie du bassin est constituée de bas en haut par : (Figure 15)

- L'Infracambrien (Précambrien Terminal) ;
- Le Continental Terminal
- Le Quaternaire

On y rencontre aussi les intrusions doléritiques et grabbro-doléritiques datant probablement du Permien.

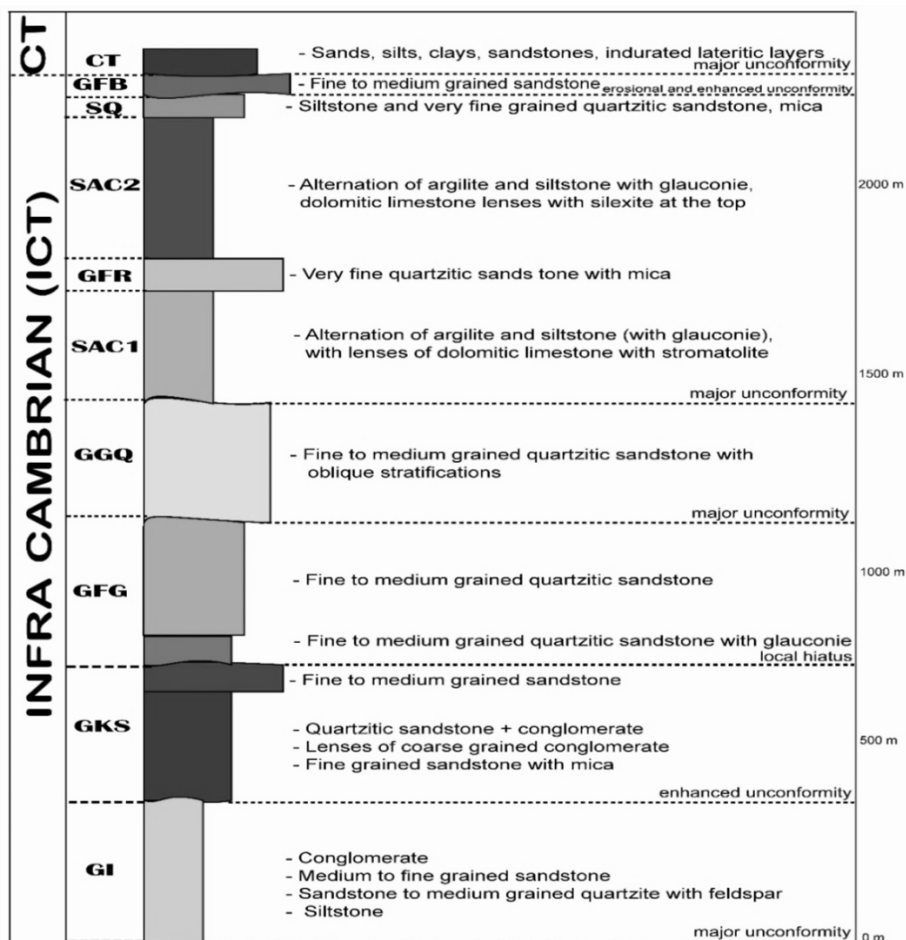


Figure 15: Log lithostratigraphique de la bordure Sud-est du Bassin de Taoudéni, harmonisé (Modifié à partir Taupin, 2017)



#### IV.1.2. Géologie de Bordure Sud-Est du bassin de Taoudéni

La carte ci-dessous (Figure 16) présente l'ensemble des formations de la zone d'étude groupée selon la nomenclature harmonisée. Nous signalons que la couverture du quaternaire n'y sont pas représentées

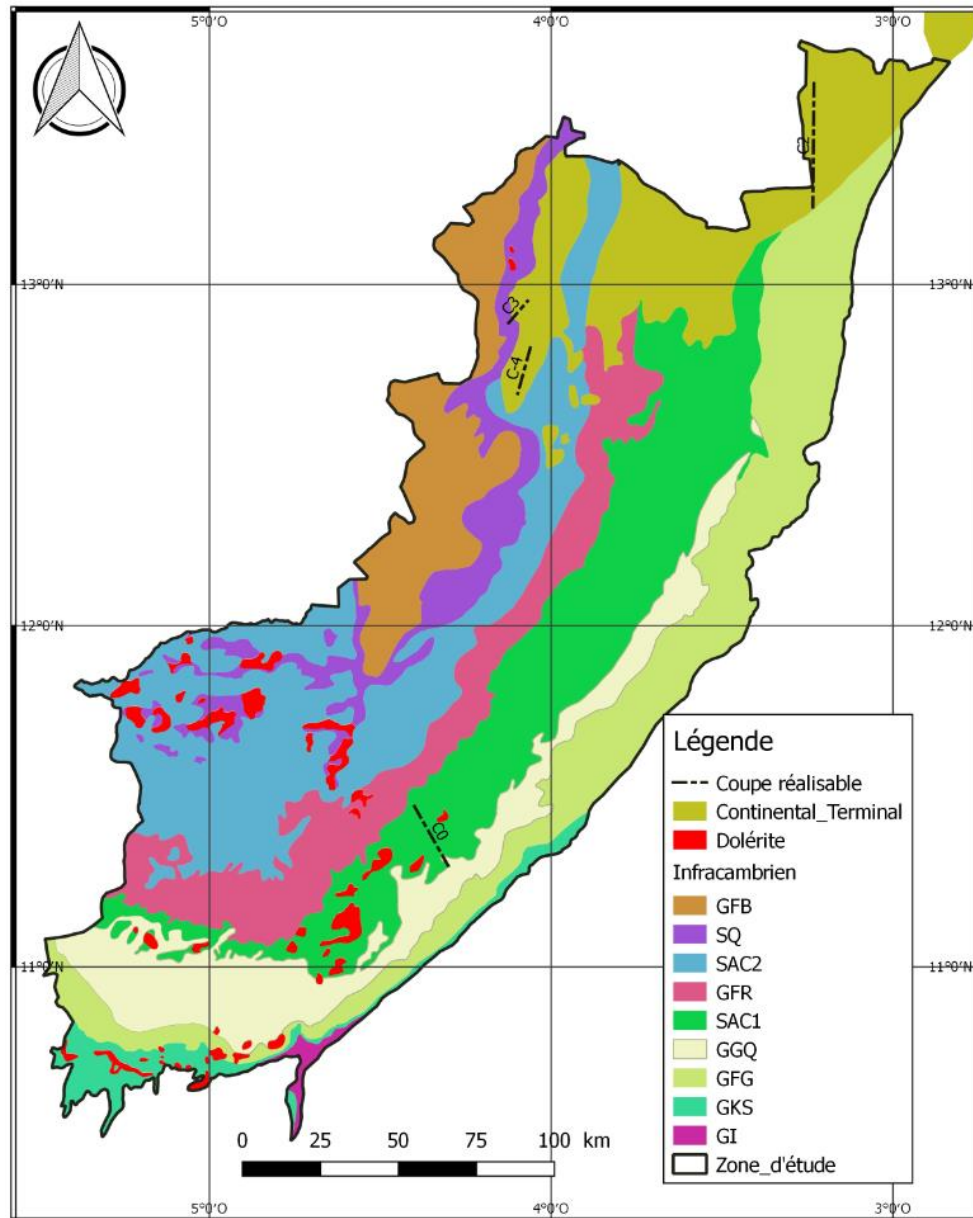


Figure 16: Carte géologique de la bordure Sud-Est du bassin de Taoudéni (Burkina Faso) (actualisée à partir de Castaing et al., (2003))



#### ***IV.1.2.1. Formation de l'Infracambrien***

##### ***a. Les Grès inférieurs (GI) :***

Reposant en discordance sur le socle granitique ou sur des schistes peu perméables, ils constituent le terme de base du bassin sédimentaire. Ils se localisent dans la langue de Banfora et sur une quinzaine de kilomètres de part et d'autre, soit sur 180 km<sup>2</sup> de superficie avec 300 m d'épaisseur.

Pour ce qui est de la pétrographie, la formation est constituée par des argilites et des siltites verts ou rouges alternant avec des grès et grès-quartzite fin à moyen à passées de grès feldpathiques grossiers microconglomératiques. Sa caractéristique essentielle en forage est sa couleur fortement marquée, à dominante rouge, ainsi que la présence de nombreuses zones fracturées ou fissurées.

Sur le plan pétrologique, ils représentent un témoin résiduel d'une sédimentation marine peu profonde, basculé et plissé en synclinal par un événement tectonique antérieur au dépôt de la formation sus-jacente.

##### ***b. Les Grès de Kawara-Sindou (Grès de base, GKS) :***

La formation des grès de Kawara-Sindou, anciennement appelée « grès de base », représente la seconde formation de la série sédimentaire. Ces grès forment l'essentiel de la falaise de Banfora à l'exception du rebord supérieur qui est occupé par les grès fins glauconieux autour de Toussiana. D'une épaisseur comprise entre 60 et 350 m, cette formation repose en discordance sur les Grès Inférieurs dans la région de Banfora et partout ailleurs, elle repose directement sur le socle.

La formation se subdivise en deux faciès :

- La partie inférieure (Faciès de Kawara) présente une granulométrie variable. A l'Ouest, on a des grès grossiers conglomératiques qui s'affinent au sommet. Vers l'Est, on passe à des grès fins de plus en plus grossier au sommet avec des passées conglomératiques lenticulaires à gros galets décimétriques. Ce faciès comporte des figures sédimentaires tels que ripplemarks dissymétriques ou symétriques à crêtes rectilignes, stratifications obliques tabulaires ou en gouttières, quelques structures de type "herring bone" et "quick sand".
- La partie supérieure (Faciès de Sindou) est constituée de grès fin gris-blanc, bien classé, en minces bancs centimétriques et qui devient de plus en plus grossier vers le

sommet avec des passées conglomératiques. Ce faciès présente également des stratifications obliques et quelques ripple-marks, il est affecté par une intense diaclasation qui lui donne, à l'érosion, un aspect ruiniforme ou en aiguille très typique dans la région de Sindou.

Postérieurement aux dépôts de la formation **GI** intervient une nouvelle transgression généralisée. Les niveaux de base de la formation **GKS** marquent en effet l'installation d'un milieu de plate-forme marin peu profond, avec d'abord des dépôts de plage (ripple-marks en diapason, etc.) auxquels succèdent des dépôts de milieu intertidal à subtidal (structure de type « herring bones », « quick-sand », etc.). Vers le sommet, les horizons conglomératiques marquent la progradation de dépôts deltaïques. Le sommet du lithofaciès de Sindou présente un caractère franchement fluvial.

### *c. Grès fins glauconieux (Gfg)*

Les grès fins glauconieux représentent la troisième formation de la série sédimentaire. Cette formation regroupe actuellement les anciennes appellations de grès de Sikasso, de grès de Sotuba et, pour partie à leur base, de grès de Bobo-Dioulasso. Sa puissance maximale est estimée entre 150 et 600 m. Vers le Nord-Est, elle recouvre directement le socle cristallin et partout ailleurs, elle repose en concordance sur la formation **GKS** sous-jacente de manière progressive.

Les Gfg forment le rebord supérieur de la falaise de Banfora. La partie inférieure des Gfg commence par un conglomérat grossier et est dominée par une alternance de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès très fins, silteux à débit schisteux. La partie supérieure est constituée de grès-quartzite fin ou fin à moyen, à passées de grès grossiers gris, à nombreuses stratifications obliques tabulaires et plus rarement des structures en arête de poisson. Au sommet, leur contact avec les Ggq est souvent masqué à l'affleurement par des latérites.

Sur le plan pétrologique, on assiste à une nouvelle transgression marine avec, au début de la sédimentation, des périodes d'émersion. Puis s'installent des conditions marines franches de plateforme relativement profonde sans influence continentale, avec des régimes de courant assez faibles. La partie supérieure correspond à un environnement de moins en moins profond dominé pour l'essentiel par l'action des vagues.

***d. Grès à granules de quartz (Ggq)***

Les grès à granules de quartz représentent la quatrième formation de la série sédimentaire : il s'agit des « grès à yeux de quartz » des anciens auteurs. Ils reposent en discordance de ravinement sur le toit des grès fins glauconieux. L'épaisseur de cette formation varie donc de 0 à 500m environ.

Sa base est assez peu connue ; l'essentiel de la formation est constitué de grès-quartzite feldspathique fin ou fin à moyen à passées de grès grossiers microconglomératiques. Localement on observe des intercalations de grès très fin bien classé, finement lité et micacé dans les lits et de rares argilites rougeâtres bien litées. Cette formation est bien fracturée. En forage, on note un contact grès contre grès entre les Gfg et les Ggq, parfois par l'intermédiaire d'un niveau argilo-gréseux apparemment localisé autour de la zone de Nasso. Vers le sommet de la formation, des intercalations schisto-quartzeuses annoncent le passage à au SAC1 sus-jacent, il s'agit d'un niveau de grès plus coloré et plus fin (sauf autour de Nasso).

Les Ggq sont dépourvus de glauconie et sont très hétérogènes indiquant un retour à une sédimentation de type fluvio-littoral, témoin de conditions marines peu profondes dans un environnement climatique en détérioration.

***e. Les Siltstones, Argilites et Carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC1)***

Constituant la cinquième formation de la série sédimentaire, les siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoudinga représentent l'étage grésoschisto-dolomitique des anciens auteurs. On les trouve le long d'une large bande qui semble, contrairement aux autres formations, se rétrécir à l'affleurement en direction de l'Ouest. Les siltstones-argilites-carbonates affleurent sur 3 960 km<sup>2</sup> et environ 300 m d'épaisseur.

Elle débute par une dizaine de mètres de grès grossiers brun-roux, glauconieux, contenant de minces intercalations de grès très fin, silteux, rose, bien lité et micacé et d'argilite verdâtre. Vient ensuite une alternance de grès-quartzite fin feldspathique et glauconieux, gris cendre à rosé, de siltite roux à débit en plaquettes et d'argilite verdâtre, micacée, à débit schisteux. Cette alternance argilite – siltite semble constituer l'essentiel de la formation avec par endroits de gros bancs de dolomie et calcaire dolomitique à stromatolites. Vers le Nord-Est, dans la région de Dédougou, passé la ligne Kona – Sanaba, la base grossière semble disparaître au profit des siltites, argilites et niveaux carbonatés.

Les horizons carbonatés ont jusque-là été considérés comme des niveaux lenticulaires. Les forages d'hydraulique exécutés dans le cadre de divers projets d'hydraulique villageoise (Programme RESO, « 500 forages BAD », etc.) ont recoupé à plusieurs endroits des niveaux carbonatés mais leur continuité latérale n'a pu être vraiment bien établie. Par contre, ces forages permettent de mettre en évidence au moins quatre niveaux stratigraphiques d'horizons carbonatés. Ces roches carbonatées présentent deux faciès : les roches carbonatées granulaires (à oncolithes, endoclastes, rares oolithes, etc.), les roches carbonatées homogènes qui comportent des stromatolites, de rares éléments détritiques terrigènes, des passées brêchiques et des passées comportant des fentes de dessiccation en coin.

Le passage de sédiments fluviaux à des sédiments marins francs semble se faire progressivement et correspond à une nouvelle transgression marine. Les structures sédimentaires et organiques indiquent un milieu de sédimentation marin peu profond, subtidal à intertidal, sous un paléoclimat plutôt chaud et aride avec une salinité variable, faiblement agitées et de faibles apports détritiques.

#### *f. Grès fins roses (GFR)*

Les grès fins roses représentent les grès de Bonvalé des anciens auteurs. Ils constituent la sixième formation de la série sédimentaire. Ils affleurent sur 2 550 km<sup>2</sup> pour une épaisseur totale estimée à une centaine de mètres. Cette formation est nettement visible sur les photographies aériennes et on peut la suivre depuis l'Ouest dans la région de Samorogouan, jusque vers le Nord-Est dans la région de Nouna. Sur le terrain, elle affleure bien dans les régions de Samorogouan, Bonvalé et Daboura-Sanaba. Elle est concordante sur la formation sous-jacente.

Comme leur nom l'indique, les GFR sont constituées essentiellement des grès-quartzite fin à très fin, roses à cassure rose, micacé et glauconieux, finement lité, à nombreux ripple-marks symétriques à crêtes ondulées. L'important banc gréseux des grès fins roses forme donc un niveau repère d'autant plus caractéristique qu'il s'intercale dans les deux formations plutôt tendres des siltstones-argilites carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC 1) et de Samandéni-Kiébané (SAC 2).

Cette formation représente une période de sédimentation marine peu profonde entièrement détritique terrigène.

***g. Les Siltstones, Argilites et Carbonates de SamandéniKiébani (SAC2)***

Correspondant aux Schistes de Toun des anciens auteurs, les siltstones-argilites-carbonates de Samandéni-Kiébané constituent la septième formation de la série sédimentaire. Ils affleurent en une vaste zone de 6 916 km<sup>2</sup>. Leur épaisseur totale est estimée à 450 m.

Sa partie inférieure est constituée par une alternance d'argilite silteuse et de siltite glauconieux qui contient des bancs de calcaire dolomitique à stromatolites. Le reste de la formation semble correspondre à des argilites vertes, bien litées, micacées, à débit schisteux et contenant des niveaux de calcaire dolomitique, de calcaire granulaire souvent complètement silicifié, de silexite ainsi que de rares bancs de grès très fin, silteux.

Son contact avec les GFR semble franc : les premiers sont gréseux jusqu'au sommet tandis que la base des seconds serait d'emblée schisteuse ou carbonatée. Le contact entre les schistes de Toun et les formations gréseuses sus-jacentes se fait localement par l'intermédiaire d'un niveau parfois épais d'argile. A Kiébani, le contact semble direct entre les avec les grès de Fo-Bandiagara en l'absence apparente de grès de Koutiala. (SQ)

On assiste à nouveau à une sédimentation marine franche en milieu peu agité avec de faibles apports détritiques.

***h. Les Siltstones et quartzites de la passe de Fo (SQ)***

Correspondant aux Grès de Koutiala selon les anciens auteurs, cette formation constitue la huitième formation de la série sédimentaire. Reposant en concordance sur le SAC2 sous-jacent, elle affleure sur une surface de 2 374 km<sup>2</sup> et son épaisseur est estimée à 50m. Son sommet est raviné par la série sus-jacente.

Elle est constituée de siltites roses à rouge, à minces passées argileuses très micacées, à stratifications obliques tabulaires, passant vers le sommet à des grès-quartzite très fins rose, à pastilles argileuses verdâtres, micacées, à stratifications obliques tabulaires à feuillets plans ou déformés.

On semble passer, avec cette formation, à un milieu marin encore moins profond à sédimentation détritique terrigène et des périodes de dépôts de type « mud flat » qui marquent une tendance à l'émersion.

*i. Grès de Fo-Bandiagara (GFB)*

Connue sous le nom de grès de Bandiagara selon les anciens auteurs, cette formation représente l'étage terminal du l'Infracambrien au Nord-Ouest du Burkina Faso. Ce groupe comprend les formations gréso-argileuses qui constituent au Mali le plateau de Bandiagara ou plateau Dogon. Ce plateau, large de 70km environ, s'allonge sur près de 300 km depuis Douentza au Mali pour se terminer en pointe dans la région de Fo au Burkina.

Au Mali le groupe de Bandiagara comporte plusieurs formations. Au Burkina, il n'est représenté que par une seule formation gréseuse d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur, la formation de Fo-Bandiagara (**GFB**) affleurant sur une surface d'environ 2 971 km<sup>2</sup>.

Cette formation, discordante sur la partie supérieure du groupe de Bobo, est constituée par une alternance de bancs plus ou moins épais de grès grossiers à passées conglomératiques et de grès-quartzites fins à moyens. Les niveaux grossiers contiennent de nombreux galets centimétriques de quartz et grès-quartzite, parfois à facettes de type « dreikanter ». Cette formation comporte de nombreuses stratifications obliques tabulaires ou en gouttières à feuillets généralement courbes quelquefois contournés, soulignés par des galets.

La mer se retire à nouveau pour laisser place à une période d'érosion à laquelle succèdent des dépôts fluviatiles en tresses de courant assez fort dirigé globalement du Sud vers le Nord.

*IV.1.2.2. Le Continental Terminal (CT)*

La formation Tertiaire dite du Continental Terminal est une formation argilo-sableuse plus ou moins bariolée, souvent rubéfiée, discordante et transgressive sur l'Infracambrien. Les 3 coupes représentées par les figures ci-dessous permettent de voir comment le Continental Terminal repose en discordance sur les différentes formations de l'Infracambrien.

Son épaisseur varie entre 10-30 mètres à 100 mètres selon la littérature.

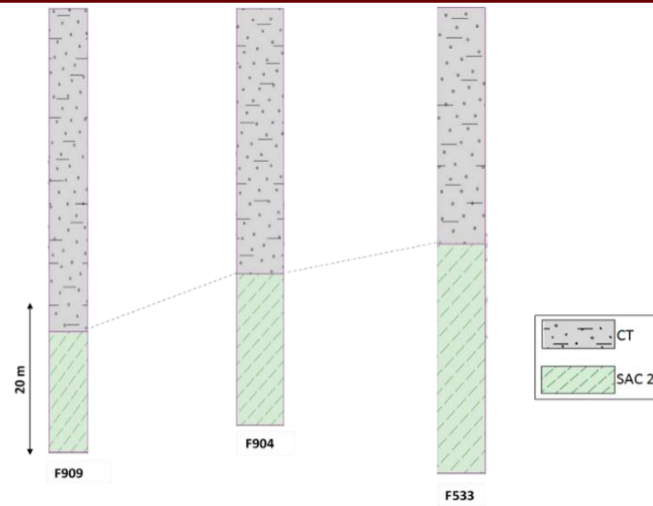


Figure 17: Corrélation pour la coupe géologique C-4

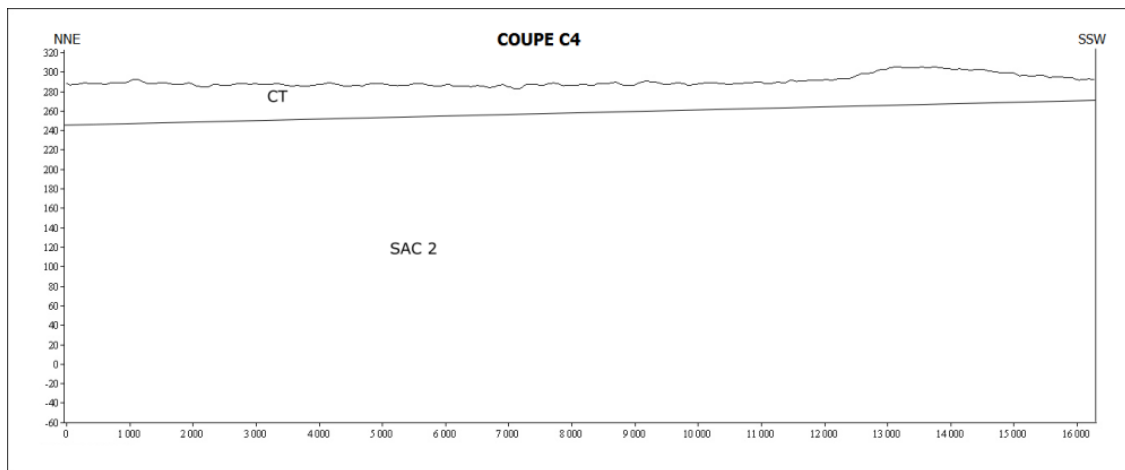


Figure 18: Coupe géologique C-4

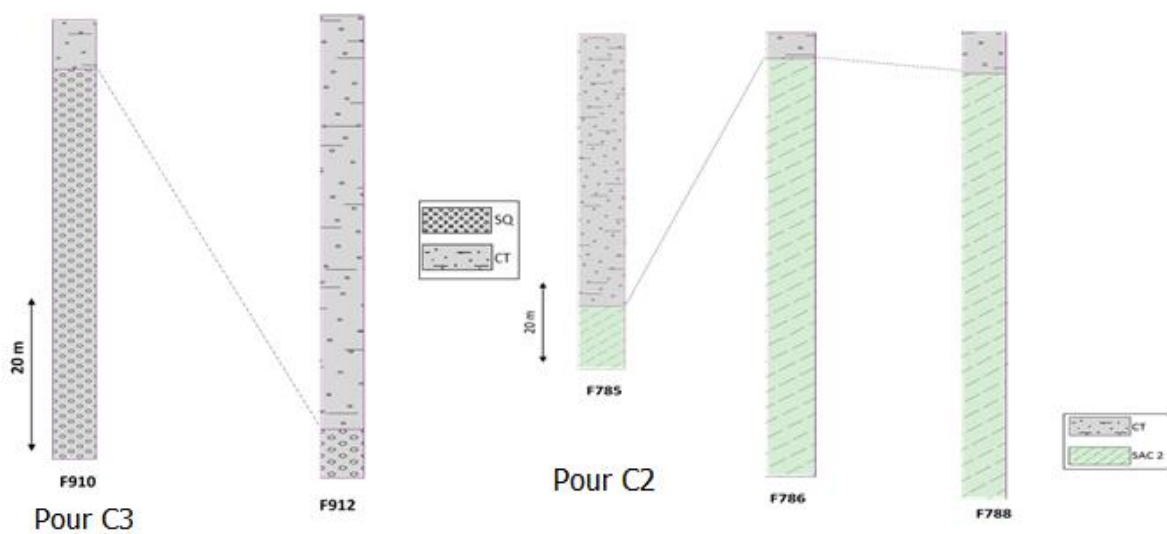


Figure 19: Corrélations pour les coupes géologiques C3 et C2

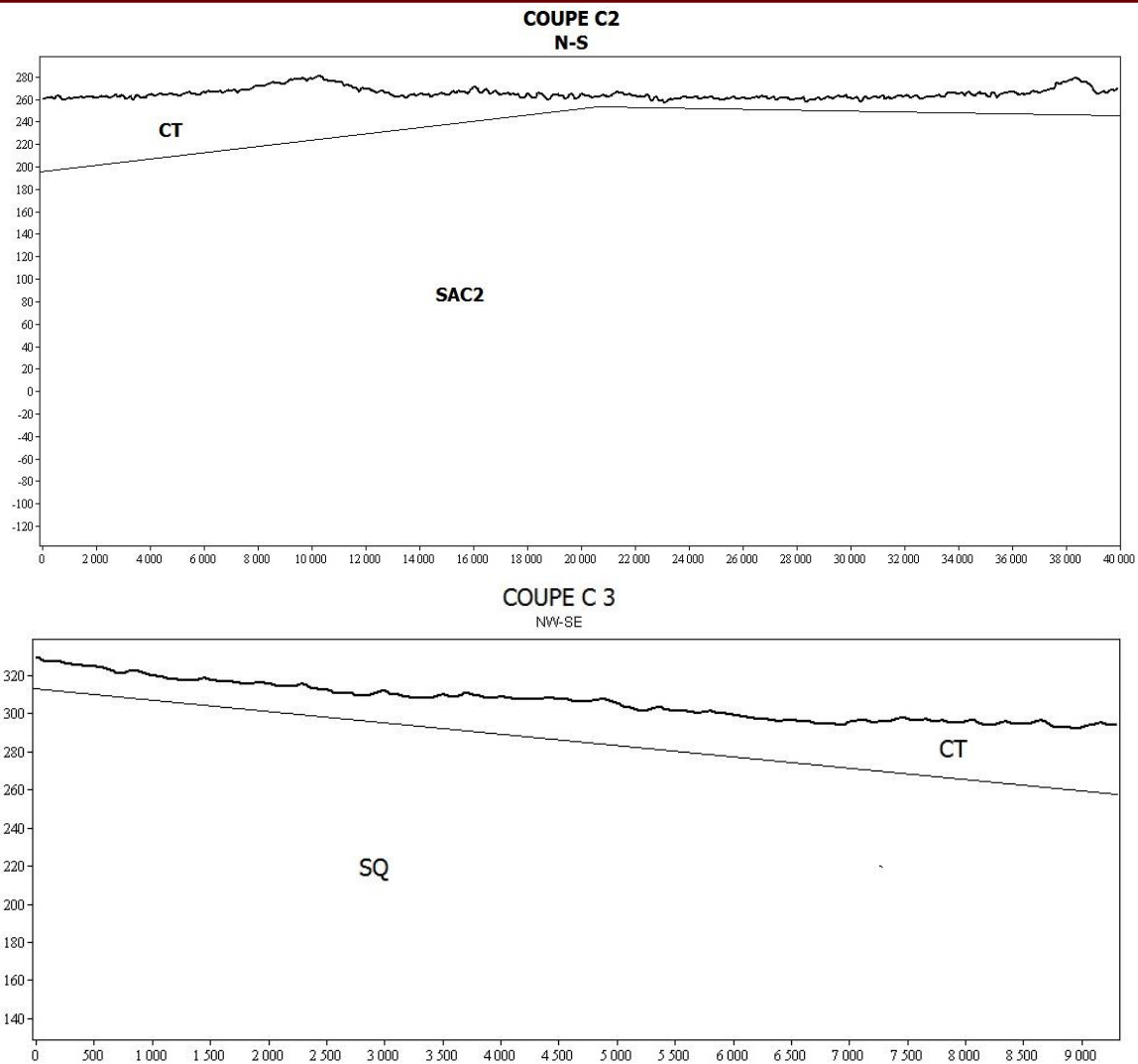


Figure 20: Coupes géologiques C2 et C3

Les formations du Continental Terminal ont été mieux élucidées par les travaux de Koussoubé (2010) dont les lignes qui vont suivre constituent la synthèse.

**a. Le grès très fin argileux**

Au Sud-Ouest, le faciès majeur est constitué de grès très fins ferrugineux rubéfiés, tandis qu'au Nord-Est de Gondo, c'est plutôt le faciès gréseux très fin, argileux (phengite) et finement lité blanchâtre à rouge ocre.

**b. Le grès calcaire et la silixite**

C'est la présence de débris de phénocristaux (brèche) de quartz, de microcline d'orthose avec un ciment calcitique qui indique le caractère détritique de cet horizon. La roche est litée avec des passées de schiste noir et des passées gréseuses et silixitiques.



***c. Les pélites et schistes***

L'épaisseur de cette formation varie entre 23 et 60 m, de haut en bas, il commence par un horizon gréseux très fins et argileux en dessous duquel vient un horizon d'argiles gris à noir (pélites), plus ou moins schisteux. Cet horizon n'est pas rencontré sur toute la longueur du CT, ce qui témoigne d'importantes variations latérales du milieu lacustre et fluviatile ayant présidé aux dépôts du CT.

***d. Les argiles fines bariolées***

Il s'agit des argiles fines sèches de couleur ocre à orangé au-dessus d'un horizon détritique à nodules de matériel alumineux (bauxite) de 1 à 2 cm de diamètre avec un cortex hématitique. Son épaisseur varie de 10 à 60 m.

***e. L'altération ferrugineuse et alumineuse***

Le recouvrement latéritique est très important dans la région. Il se présente sous forme de plateau à surface indurée, horizontale ou pentée, ou sous forme de collines à morphologie douce. Le recouvrement latéritique est un caractère dominant des paysages pénéplaines ou tabulaires qui caractérisent la plus grande partie du secteur d'étude. Ces latérites, qu'on observe partout, se présentent sous forme de plateaux étendus, buttes témoins, cuirasses indurées. L'épaisseur de ces latérites peut atteindre 30 m. Les auteurs y distinguent plusieurs phases d'induration qui jalonnent l'histoire géologique très récente depuis l'éocène jusqu'à l'époque actuelle. La couche latéritique superficielle s'est développée in situ et l'horizon bauxitique est purement allochtone. Ces deux horizons sont séparés par une couche argileuse fine. Cette succession des matériels argileux et d'altération bauxitique et ferrugineuse montre son caractère détritique lacustre à fluviatile.

***IV.1.2.3. Le quaternaire***

Les dépôts quaternaires sont constitués de matériels hydro-éoliens. Il s'agit du sable dunaire, du sable meuble et des alluvions argileuses récentes et actuelles rencontrées le long des principaux cours d'eau.

#### IV.1.2.4. Les dolérites

Elles affleurent abondamment, notamment dans la partie centrale où elles jalonnent les failles subméridiennes. Elles se présentent sous forme de sills grossièrement concordants, de dykes (filons) et de necks d'extension kilométrique à pluri-kilométrique, recoupant l'ensemble des formations. Ces dykes et sills n'affleurent que très rarement et se retrouvent à différents niveaux de profondeur sous les sédiments (voir Figure 21)

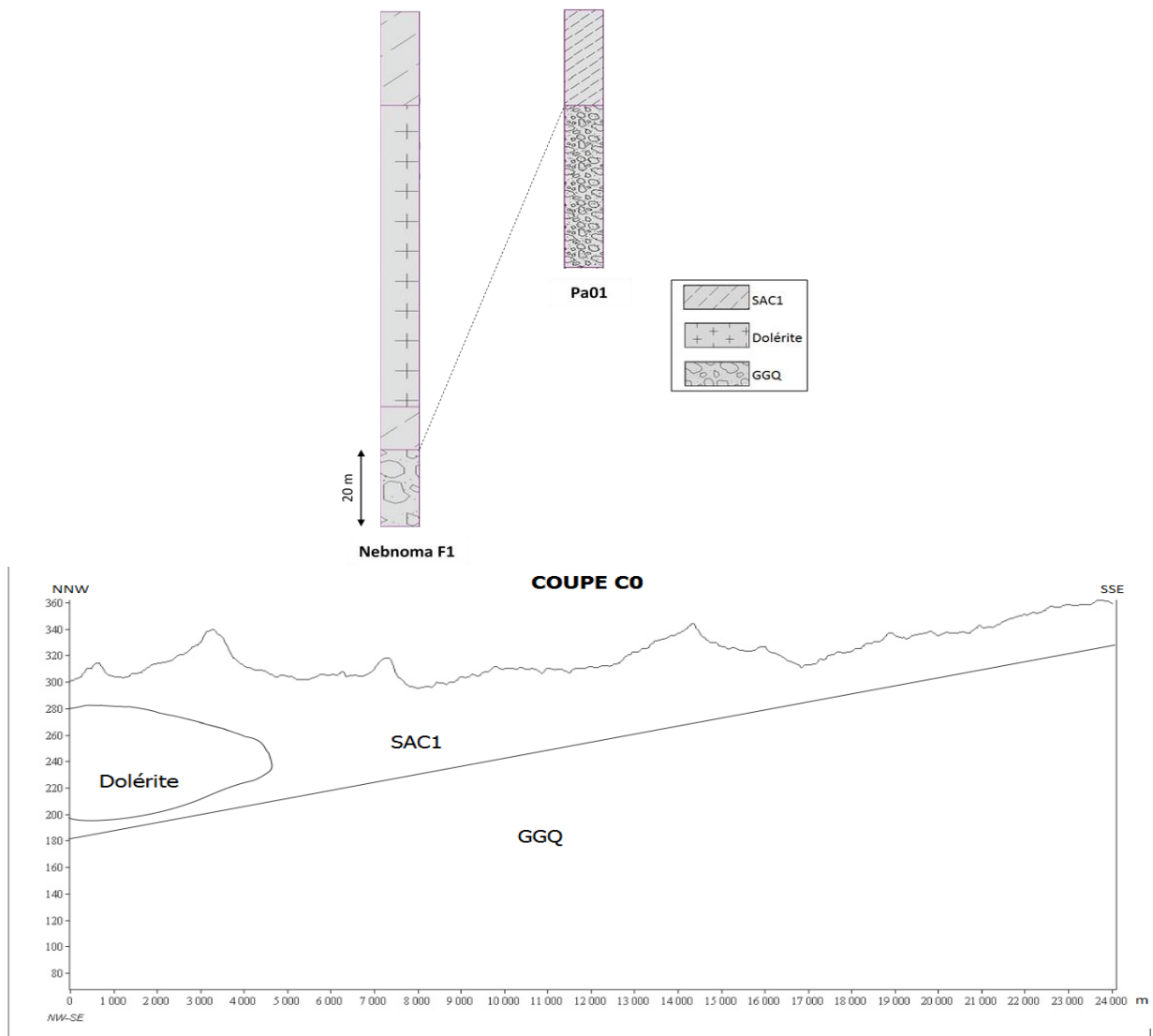


Figure 21: Coupe géologique C0

Le faciès courant est une roche sombre à cassure esquilleuse qui se débite en boules. La structure doléritique est nette sur certains affleurements. Sur d'autres par contre, on observe une différenciation plus grenue, gabbroïque.

Les orientations sont variées, principalement N105, N45, N130 et plus rarement N60. Deux filons caractéristiques, grossièrement parallèles et de direction N45 environ, prennent

naissance au nord de Bobo-Dioulasso et s'étirent presque en continu jusque dans la région de Gassan à environ 50 km au nord de Dédougou (Ouedraogo, 2006). De nombreux sills ont été également mis en évidence à la faveur d'un levé aéroporté réalisé par le BRGM en 2003 dans le cadre du projet Sysmin (Projet 7 ACP BK074) Ces sills sont particulièrement bien développés dans une bande N-S passant à l'ouest de Bobo-Dioulasso (C. Ouedraogo, 2006).

A l'Ouest de Banfora, un échantillon de dolérite recoupant à la fois le socle et les grès du GKS, aurait donné un âge de 250 +/- 13 Ma, par la méthode K/A sur roche totale. D'autres résultats comparables auraient été obtenus au Mali. Nous rattachons donc toutes ces manifestations magmatiques au Permien et plus jeune probablement.

#### *IV.1.2.5. Tectonique général*

La tectonique de la zone d'étude n'est pas assez connue. L'importante couverture sédimentaire masque les manifestations tectoniques dans la région.

Dans l'ensemble, la bordure Sud-Est du synclinal de Taoudéni est orientée SW-NE. Elle est affectée par un plissement important. En plus de la tectonique plissante, les roches ont été le siège d'une tectonique cassante qui affecte surtout la base des sédiments et qui semble correspondre à des rejeux de failles du socle au cours de la première phase de la sédimentation du primaire. (I. Ouedraogo, 1994). Keijer (1990) fait état de structures en horsts et grabens qui encadreraient la plaine du Gondo et IWACO (1987) de structure en touches de piano.

Quant à la structurale, les formations sédimentaires sont presque quasi monoclinales avec un très léger pendage variant de 2 à 6° Nord-Ouest. Avec cette valeur de pendage de 2°, les couches s'enfoncent au minimum de 35 m par km, ce qui amènerait le GKS à près de 4000 m de profondeur vers la frontière malienne. Bien qu'aucun forage n'ait atteint le socle dans ces endroits, cette profondeur paraît excessive et il est possible que le pendage s'atténue vers le nord-ouest. Des pendages contraires qui sont liés à des accidents tectoniques, à des intrusions doléritiques ou à des plissements suivant un axe Fô-Sanaba sont rencontrés localement. (I. Ouedraogo, 1994; Yofe, 2016)

Les formations sont en général assez fracturées, par des diaclases et des failles, surtout dans les niveaux gréseux. Les diaclases sont particulièrement visibles sur le bord de la falaise, où la roche affleure bien. Elles affectent peu les terrains argileux tendres. Elles suivent trois directions principales : SSE-NN0, SONE et NNO-SSE. Elles affectent toutes les formations,

mais surtout le GKS, ce qui est à l'origine de son aspect ruiniforme (aiguilles de Sindou) et le GGQ. Le GFG et le SAC sont moins diaclasés.

Sogreah Ingénierie (1994) renseigne qu'autour de Bobo-Dioulasso, des failles ont été mises en évidence sur le terrain et par les coupes géologiques tracées à partir des données de forage. Ces failles sont à rejet vertical, à orientation SSE-NNO, de l'ordre approximatif d'une centaine de mètres. Une prospection géophysique a montré que la zone des sources de Nasso Guinguette est recoupée par un réseau de failles et diaclases ouvertes qui serait d'ailleurs à l'origine de ces sources. (Yofe, 2016)

Enfin, l'origine de la falaise de Banfora n'est pas encore vraiment éclaircie. Certains indices suggèrent la présence d'une faille, au moins entre Banfora et Bobo-Dioulasso où la falaise constitue par endroit un mur vertical franc d'une centaine de mètres de hauteur. Un forage à Nyanouaré au sud de Toussiana a prouvé l'existence de grès au sud de la falaise, et l'examen des images satellites suggère fortement la présence de roches gréseuses au sud de la falaise sur une extension plus grande que celle qui est actuellement supposée. On peut donc penser que la falaise ne marque pas comme on le pensait le contact entre le bassin sédimentaire et le socle cristallin ; ce point mérite cependant des recherches complémentaires en raison de ses implications hydrogéologiques (existence possible d'un aquifère gréseux au bas de la falaise dans la région de Daramandougou-Dodougou).

#### ***IV.1.3. Hydrogéologie de la bordure Sud–Est du bassin de Taoudéni***

Les notions et termes développés dans cette section sont basés sur la synthèse bibliographique travaux de (I. Ouedraogo, 1994; Sogreah Ingénierie, 1994; Gombert, 1998; Dakouré, 2003; C. Ouedraogo, 2006; Derouane, 2008; Sauret, 2008; Koussoubé, 2010; Yofe, 2016; Gramont et al., 2017)

Les caractéristiques hydrogéologiques de la série du Sédimentaire au Burkina Faso peuvent notamment être évaluées par l'interprétation des données quantitatives et qualitatives disponibles sur la zone d'étude. Sur l'ensemble de cette zone, on dénombre plus d'un millier de forages pour lesquels des données sont disponibles et permettent, selon les cas, une analyse statistique par formation lithologique ou globale sur le bassin.

Il sied de signaler dès à présent que la distinction des neuf formations reprise ci avant répond à des critères typiquement pétrographiques : aucun élément pertinent ne permet d'associer à chacune de ces formations un aquifère distinct.

#### ***IV.1.3.1. Aquifères de l'Infracambrien***

##### ***a. Aquifère des Grès inférieurs***

Son épaisseur est d'environ 300 m. Il s'agit de grès lenticulaires renfermant des shales (argilites) et des grès fins rouges arkosiques, localement conglomératiques avec des galets de grès quartzite et de granite. L'écoulement général de la nappe aquifère serait donc logiquement dirigé, dans cette zone, des affleurements de grès de Kawara-Sindou de la falaise de Banfora en direction du socle via les grès inférieurs. (Dakouré, 2003)

Gombert (1998) renseigne que du fait de l'existence de niveaux d'argilites, la continuité des écoulements souterrains entre les faciès susjacents et des grès inférieurs n'est pas garantie à la base de la falaise : cependant, si ces argilites formaient un véritable écran imperméable, on devrait apercevoir une ligne de sources dans le paysage car les grès de Kawara-Sindou hébergent un bon aquifère. En revanche, la granulométrie plus grossière de cette formation dans la langue de Banfora et son contact étroit - bien qu'anormal - avec le socle induit probablement une continuité hydraulique entre ces formations.

##### ***b. Aquifère des Grès de Kawara Sindou***

D'une épaisseur variant entre 60 et 350 m, l'aquifère des GKS, de type multicouche, est composé de grès tendres, de grès grossiers à très grossiers voire conglomératiques. L'existence essentielle du caractère gréseux plus ou moins grossiers de ses deux faciès en font d'excellents aquifères. Au niveau de la bordure est du bassin, le toit de l'aquifère est constitué d'une formation imperméable (argilites vertes) décrite comme une argilite glauconieuse par Gombert (1998), ce qui rend la nappe localement captive. (Gombert, 1998 ; Yofe, 2016)

Le contact entre les grès de Kawara-Sindou et le socle se fait localement par l'intermédiaire d'un mince banc conglomératique : il doit ainsi exister une continuité hydraulique entre ces formations. Le contact avec les grès inférieurs, grès sur grès, doit également assurer la continuité des écoulements souterrains : on a vu que des passées d'argilites existent localement dans ces derniers mais elles ne se retrouvent pas d'un forage à l'autre et semblent donc être discontinues. (Gombert, 1998)

**c. Aquifère des Grès fins glauconieux**

Cet aquifère débute par une alternance de grès grossier conglomératique glauconieux, mais il est surtout formé de minces niveaux de grès très fin silteux rougeâtre ou verdâtre. Son toit est formé par une couche quasi imperméable d'argiles à passées gréseuses, ce qui rend la nappe captive. Quant à son mur, il consiste en de argiles ocre de couleur rouge ou verte imperméables.

L'aquifère des Gfg a une épaisseur d'environ 100 à 150 m et sa nappe est sollicitée par l'ensemble des industries de la ville de Bobo-Dioulasso.

**d. Aquifère des Grès à granules de quartz (Ggq)**

L'aquifère est composé de grès quartzites fins à moyens avec des passées de grès grossiers à gros galets, ce qui favorise une parfaite continuité d'un bout à l'autre de cet aquifère. Son épaisseur varie de 300 à 600 m.

Les forages n'ont pas permis de distinguer avec précision le toit et le mur de l'aquifère. Il serait séparé de l'aquifère GFG sous-jacent par une couche d'argile ou de grès imperméables plus ou moins continue.

Les analyses chimiques faites dans cet aquifère sur les eaux des sources de Nasso conduisent à penser qu'il contient deux nappes. Des diagraphies ont effectivement montré la présence à certains endroits d'une couche argileuse de 15 m d'épaisseur. En forage, près de Nasso (F3), une couche de 10 m d'argile sableuse ocre et rouge a été recoupée à 120 m de profondeur. Cependant, pour ce dernier cas, selon Gombert (1998) la conductivité électrique de l'eau ne varie pas significativement de part et d'autre (40 à 60  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et cette couche ne paraît pas susceptible d'isoler un aquifère distinct. Il s'agit probablement d'un niveau discontinu : cependant, on note que la conductivité augmente dès 160 m de profondeur pour atteindre 190  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 200 m, bien que l'on reste toujours dans un même faciès de grès grossier.

Cet aquifère donne lieu à de nombreuses sources (la Koba, Diolé, Diéri...). Il est très perméable, mais son toit, constitué des niveaux quasi-imperméables de la base du SAC1, explique la présence de nombreuses sources et leur important débit. Son niveau statique est généralement profond à l'amont du bassin (plus de 60 m par endroit) alors qu'autour des sources de Nasso/Guinguette et à l'aval du bassin, il est généralement à moins de 20 m de profondeur voire à l'affleurement.

Il sied de signaler que l'aquifère des GFG et des GGQ serait libre à l'amont du bassin du Kou, à sa frontière avec les falaises de Banfora dans les sous bassins du Yengué/Farakoba. A ce



titre, ces deux aquifères sont exposés à de multiples pollutions dues aux activités agricoles (cultures du coton, de la canne à sucre dans la région de Banfora).

**e. Aquifère des Siltstones, Argilites et Carbonates de Guena-Souroukoundinga (SAC1)**

Au contact de l'aquifère des sources de Nasso, cette formation est composée de grès rouges très grossiers et glauconieux qui forment l'aquifère principal, mais aussi de niveaux de grès quartzites très fins et arkosiques. Son toit est formé d'une épaisse couche de calcaires dolomités très peu perméable et non karstifiés, alors que son mur est constitué d'une série d'argiles rouges ou jaunes plus ou moins épaisses (de plus de 100 m à quelques dizaines de m). Cette série argileuse disparaît au voisinage des sources où une faille d'effondrement NNW-SSE met en contact hydraulique les SAC1 et les GGQ (Figure 22). Le toit de la nappe est constitué par une épaisse couche de calcaires dolomités, imperméables et sans aucun signe de karstification. (Sogreah Ingénierie, 1994; Sauret, 2008; Gramont et al., 2017)

Son épaisseur pourrait dépasser 300 m. Par endroits il forme des collines protégées de l'érosion par des couches de dolérites.

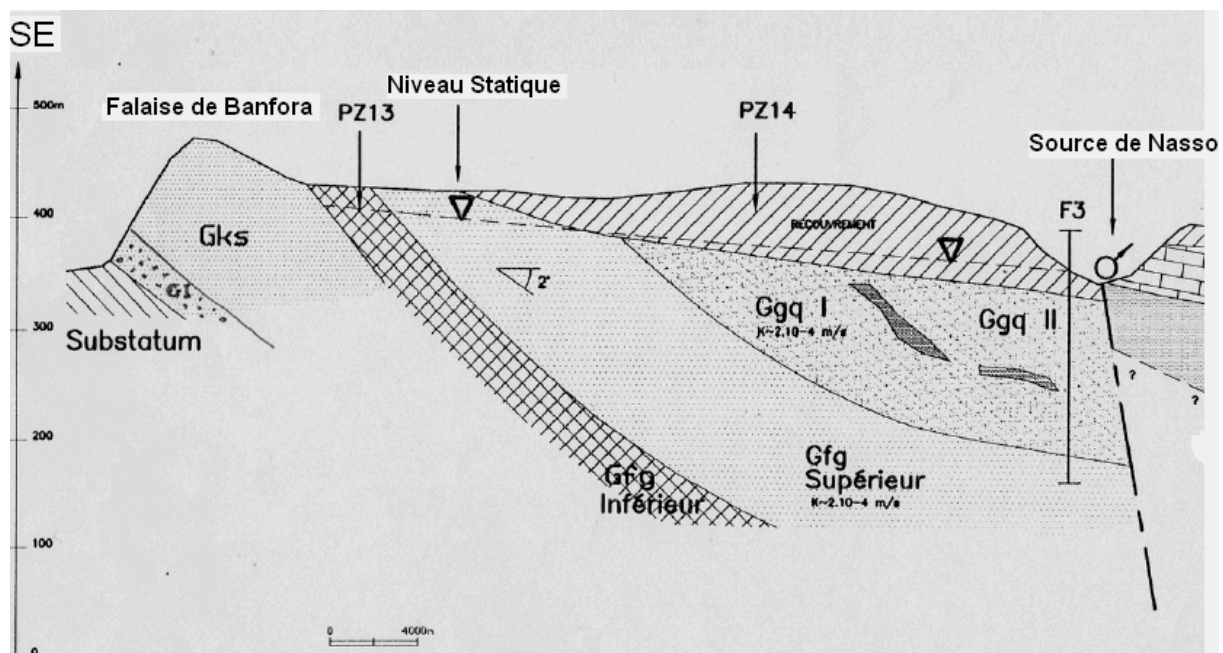


Figure 22 Coupe Hydrogéologique et Géologique de la région de Bobo-Dioulasso(Sogreah Ingénierie, 1994)

**f. Aquifère des Grès fins roses (GFR)**

De faible extension, cet aquifère est constitué de grès quartzites très fins, micacés et glauconieux, généralement de couleur rose. Il contient une nappe peu épaisse, avec des niveaux statiques très peu profonds, de l'ordre de 11. Cette nappe est captée par les puits traditionnels villageois dans les départements de Bama et de Sakaby.

L'important banc gréseux des grès fins roses forme donc un niveau repère d'autant plus caractéristique qu'il s'intercale dans les deux formations plutôt tendres des siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC 1) et de Samandéni-Kiébané (SAC 2). Une certaine continuité hydraulique peut exister d'Est en Ouest dans cette formation du fait de la présence de cet important banc gréseux recoupé dans tous les forages. (Gombert, 1998).

***g. Aquifère des Siltstones, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiébané (SAC2)***

Les SAC 2 sont formés d'une alternance irrégulière d'argilites et de siltstones intercalés de bancs carbonatés et gréseux. En forages, ces terrains sont comparables à ceux des siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoudinga. Ils s'en différencient par la fréquence d'apparition des argilites, leur finesse granulométrique et la silicification de nombreux bancs carbonatés. Toutes ces caractéristiques jouent plutôt en défaveur du potentiel hydrogéologique de cette formation : argilites imperméables, niveaux silicifiés extrêmement durs à forer et recimentés par de la silice. L'épaisseur totale de cette formation est estimée à 450 mètres.

***h. Aquifère des Siltstones et quartzites de la passe de Fo (SQ) et des Grès de Fo-Bandiagara***

Les grès de Koutiala et de Fo-Bandiagara affleurent en une zone ovale, d'axe grossièrement Nord- Sud, dans la région de Fo. En forage, les grès de Koutiala et de Fo-Bandiagara montrent les mêmes faciès gréseux, assez difficiles à individualiser. Ils sont formés de grès fins à très fins pour les premiers (avec présence de siltstones), et moyens à conglomératiques pour les seconds.

L'épaisseur cumulée ne dépasserait pas 100 mètres. Mais au Mali, la série de Bandiagara dépasserait 2000 m d'épaisseur.

La formation des SQ se trouve à un niveau piézométrique plus bas par rapport à l'ensemble de la série sédimentaire (à l'exception des GI). L'écoulement général de la nappe aquifère se ferait donc dans deux sens opposés avec les grès de Koutiala comme exutoire.

***IV.1.3.2. Aquifère du Continental Terminal (CT)***

Formation fluvio-lacustre datant du Néogène, le CT forme une nappe de grande extension au Burkina, son épaisseur varie de 10-30 m à 100 m. C'est une formation argilo-sableuse plus ou moins bariolée, souvent rubéfiée, discordante et transgressive sur le Précambrien inférieur.



Cette nappe, médiocre, est exploitée par les villages à l'aide de puits traditionnels, ou de forages à faible débit. (Gramont et al., 2017).

#### ***IV.1.3.3. Aquifère du Quaternaire (Alluvions récentes et latérites)***

Les formations latéritiques sont très développées notamment dans le domaine sédimentaire. Elles se présentent sous forme de plateau à surface indurée, horizontale ou pentée, ou sous forme de colline à morphologie douce. Les alluvions argileuses récentes se rencontrent le long des principaux cours d'eau.

Jusqu'à-là, ce type d'aquifère a été abordé par Sauret (2013) dans le contexte restreint du bassin de Kou. Cette étude révèle que les alluvions se situent le long de la rivière du Kou et sont constituées majoritairement d'argiles et de latérites. Au centre du bassin, elles sont constituées de dépôts argilo-sableux de moins de 15 m d'épaisseur et en aval, elles sont constituées d'argiles, de latérites et de grès altérés avec une épaisseur pouvant atteindre 45 m (Sauret, 2013). En amont, les dépôts argilo-sableux constituent un aquifère peu perméable ( $K = 10^{-4} \text{ m/s}$ ) drainé toute l'année par la rivière du Kou. En aval, les alluvions sont plus perméables ( $K = 10^{-5} \text{ m/s}$ ) et drainent toute l'année la rivière.

Il existe une connexion hydraulique entre les alluvions et les grès sous-jacents, caractérisée par des échanges de flux de la nappe des grès vers celle des alluvions.

#### ***IV.1.4. Conclusion partielle sur la géologie et l'hydrogéologie de la zone***

De ce qui précède, on retient que la géologie du bassin de Taoudéni est constituée essentiellement par deux grands ensembles de bas en haut :

- L'Infracambrien : GI, GKS, GFG, GGQ, SAC 1, GFR, SAC 2, SQ, GFB
- Le Continental Terminal

On peut aussi observer de nombreuses intrusions doléritiques et gabbro-doléritiques probablement d'origine permienne, sous forme de seuils rocheux, de necks et de dykes de plusieurs kilomètres de long ainsi que les formations récentes du quaternaire.

Ces différentes formations, à dominante gréseuse pour la plupart, s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches subhorizontales affectées d'un léger pendage vers le Nord-Ouest (2° environ), et s'épaississent généralement vers l'Ouest.

L'ensemble de ces formations est caractérisé par la dominance gréseuse des sédiments et une grande variabilité granulométrique, témoin de conditions sédimentologiques changeantes. En effet, la présence généralisée d'éléments conglomératiques parfois très gros (plusieurs

dizaines de centimètres) témoigne de conditions sédimentologiques littorales alors que celle de la glauconie dans plusieurs formations atteste d'une sédimentation marine. Nous avons aussi noté l'existence probable de plusieurs phases de ravinement (transitions GFG/GGQ, GGQ/SAC, GFB/SQ), de lacunes locales (entre GKS et GFG) et de discordance angulaire (entre GI et GKS, entre SQ et GFB), qui traduisent des arrêts de sédimentation avec phases érosives lors de périodes d'émergence.

Sur le plan hydrogéologique, par rapport au niveau actuel d'information, la série sédimentaire au Burkina Faso peut être conceptuellement représentée, à l'échelle de la zone d'étude, par une nappe d'eau souterraine unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche. En effet, bien qu'il existe des niveaux imperméables séparant différents horizons géologiques de la série, l'extension horizontale de ces niveaux localisés reste limitée par rapport à la superficie du bassin : ces niveaux contribuent dès lors uniquement à mettre en charge une partie de la nappe aquifère.

De par sa géologie, la série sédimentaire est majoritairement constituée de roches réservoirs potentielles sur plus des 3/4 de son épaisseur : il s'agit surtout de grès et de carbonates. Ainsi, du socle à la base du SAC1, on observe systématiquement un contact grès sur grès sur environ 1 000 m d'épaisseur, à l'exception d'un banc discontinu d'argilite qui, à la base des grès fins glauconieux, rend localement captif les grès de Kawara-Sindou (Derouane, 2008). Les niveaux imperméables évoqués ci-haut seraient notamment liés à la présence observée d'épaisses couches d'argilites localement imperméables dans les formations SAC1 et SAC2. Cependant la continuité latérale et en profondeur de ces « aquicludes » n'est nullement prouvée puisque des forages productifs existent de part et d'autre, dans le même niveau stratigraphique.

Par ailleurs, les discontinuités observées à différents niveaux (fissures, fractures, failles) sont à l'origine, au sein de la roche réservoir, d'un réseau interconnecté de vides potentiellement aquifères : cette porosité secondaire se superpose à la porosité primaire, matricielle, de la roche réservoir, et permet localement la circulation d'eau souterraine au sein de terrains réputés imperméables comme les argilites (Derouane, 2008).

## IV.2. Caractérisation hydrodynamique des aquifères

### IV.2.1. Caractéristiques hydrodynamiques et productivité des aquifères

#### IV.2.1.1. Synthèses des paramètres hydrodynamiques des aquifères

Le Tableau VII présente les paramètres hydrodynamiques des aquifères de la zone d'étude selon la disponibilité de l'information dans la littérature, complétée l'analyse des données sur quelques forages fournies par la DEIE.

Il s'avère que les données disponibles à ce jour sont insuffisantes pour évaluer par formation une valeur de coefficient d'emmagasinement. En effet, la plupart des rapports d'essais de nappe réalisés dans la zone montrent que ceux-ci ont été menés sans un piézomètre d'observation. Dans le cadre du programme RESO, celui-ci est évalué, en moyenne sur toute la série sédimentaire, à  $1,1 \times 10^{-4}$  (Derouane, 2008). Les valeurs de coefficient d'emmagasinement présentées correspondent à l'ordre de grandeur des aquifères captifs (de Marsily, 1986). La nappe étant perçue comme étant libre, le taux de captivité a été estimé à 31 % (Derouane & Dakouré, 2006).

Tableau VII : Synthèse des paramètres hydrodynamiques des aquifères du bassin de Taoudéni

Nomenclature harmonisée	Aquifère	Epaisseur (m)	Nombre de forages	Profondeur moyenne des forages (m)	Q moyen ( $m^3/h$ )	T ( $m^2/s$ ) $\times 10^{-4}$	N.S (m)	S $\times 10^{-4}$
Infracambrien	GI	300	18 – 21	75	5,1	9,4	6 – 23	
	GKS	60-350	44 – 69	48	5,1	2,30 – 10	16 – 40	1,00 – 38,10
	GFG	100-500	140 – 166	80	9,1	0,97 – 7	2 – 30	0,063
	GGQ	300-600	222 – 271	62	13	0,37 – 33	0,5 – 80	0,29 – 368
	SAC1	300	158 – 179	66	13,4	5,6 – 200	1,08 – 111	
	GFR	100	55 – 58	62	4,9	1,7	0,5 – 41	
	SAC2	400-700	80 – 99	53	4	2,00 – 3,0	1,4 – 61	
	SQ+GFB	100	4 – 9	56	3,8	0,55	1,4 – 48	
CT	CT	10 – 100	7 – 15	50	2,9	4,35	1,8 – 65	

Nous notons également un grand écart entre les valeurs extrêmes de la transmissivité pour le SAC1 et du coefficient d'emménagement pour le GKS et le GGQ ainsi qu'une différence selon les auteurs. Cet écart pourrait être justifié par le caractère hétérogène et variable de ces caractéristiques au sein d'un même aquifère. En termes de débit, le GGQ et SAC 1 représente les aquifères les plus productifs de la série.

#### *IV.2.1.2. Analyse de la productivité*

##### *a. Statistiques descriptives*

Les résultats statistiques sur les caractéristiques des aquifères sont repris dans le Tableau VIII. Les valeurs de transmissivité calculées sur 116 forages sont comprises entre  $3,7 \times 10^{-6}$  et  $2,5 \times 10^{-2} m^2/s$ , soit sur trois classes, avec une moyenne de  $1,27 \times 10^{-3}$ . Le débit spécifique varie entre 0,001 et  $264 m^3/h/m$  avec une moyenne de  $6,180 m^3/h/m$ . Quant aux débits d'exploitation, ils sont compris entre 0,01 et  $262 m^3/h$  avec une moyenne de  $14,520 m^3/h$ . Le coefficient de variation (CV), qui représente le rapport de l'écart-type sur la moyenne, traduit la dispersion des données au sein d'un échantillon. Les valeurs des CV de ces paramètres dépassent 100 %. Elles confirment la forte dispersion de ces paramètres hydrodynamiques.

*Tableau VIII: Statistiques descriptives des paramètres de productivité des aquifères*

Statistique	Q (m3/h)	s (m)	T(m2/s)	Qs(m3/h/m)
Nb. d'observations	116	116	116	116
Minimum	0,010	0,050	3,70E-06	0,001
Maximum	262,640	90,720	2,50E-02	264,000
Moyenne	14,520	11,937	1,27E-03	6,180
Ecart-type	37,636	14,241	3,37E-03	25,409
Coefficient de variation	2,581	1,188	2,634	4,094

La Figure 23 présente les fréquences des débits et Transmissivités par classe. Les débits forts ( $5 \text{ à } 10 m^3/h$ ) et très forts ( $Q > 10 m^3/h$ ) représentent respectivement 37 et 34% des données observées, alors que les débits moyens ( $1 \text{ à } 2,5 m^3/h$ ), faibles ( $1 \text{ à } 2,5 m^3/h$ ) et très faibles ( $Q < 1 m^3/h$ ) n'occupent respectivement que 10, 11 et 8% d'observations.

Quant aux débits spécifiques, le domaine de l'hydraulique urbaine représente 55% de données d'observations, le domaine de l'hydraulique agricole (irrigation) occupe les 20% et les domaines de la petite hydraulique villageoise et de la petite hydraulique agricole (jardins) occupent respectivement 10 et 13%.

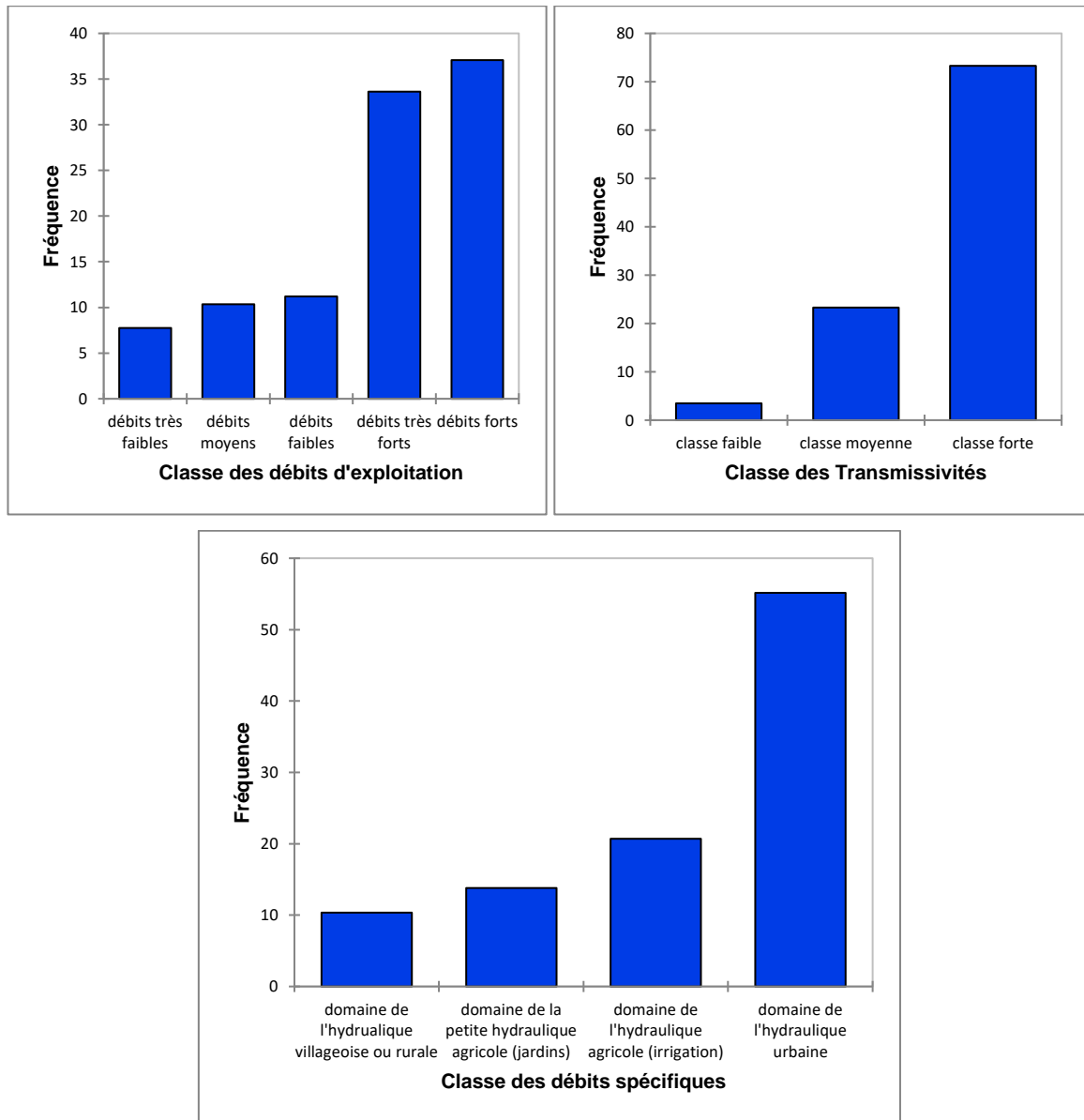


Figure 23: Fréquence des débits et Transmissivités par classe

La Figure 24 présente la répartition des classes des transmissivités dans la zone d'étude. Elle montre qu'une grande partie de la zone d'étude (principalement dans les aquifères de l'infra-cambrien) se situent dans la classe de forte transmissivité ( $T > 10^{-4} m^2/s$ ). La figure 18 indique que 72% d'observations appartiennent à la classe forte, 23% d'observations à la classe moyenne ( $10^{-5} m^2/s < T < 10^{-4} m^2/s$ ) et 5% à la classe faible ( $T < 10^{-5} m^2/s$ ). Ces

résultats montrent que le bassin de Taoudéni constitue un aquifère très productif avec une transmissivité forte.

Ceci va dans le même sens que l'affirmation de Dakouré et Derouane (2006) stipulant que ce bassin constitue un système aquifère puissant ainsi que les travaux de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (ANTEA Group et JMB\_Consult, 2013) où cette partie est identifiée comme zone à fort potentiel en eaux souterraines.

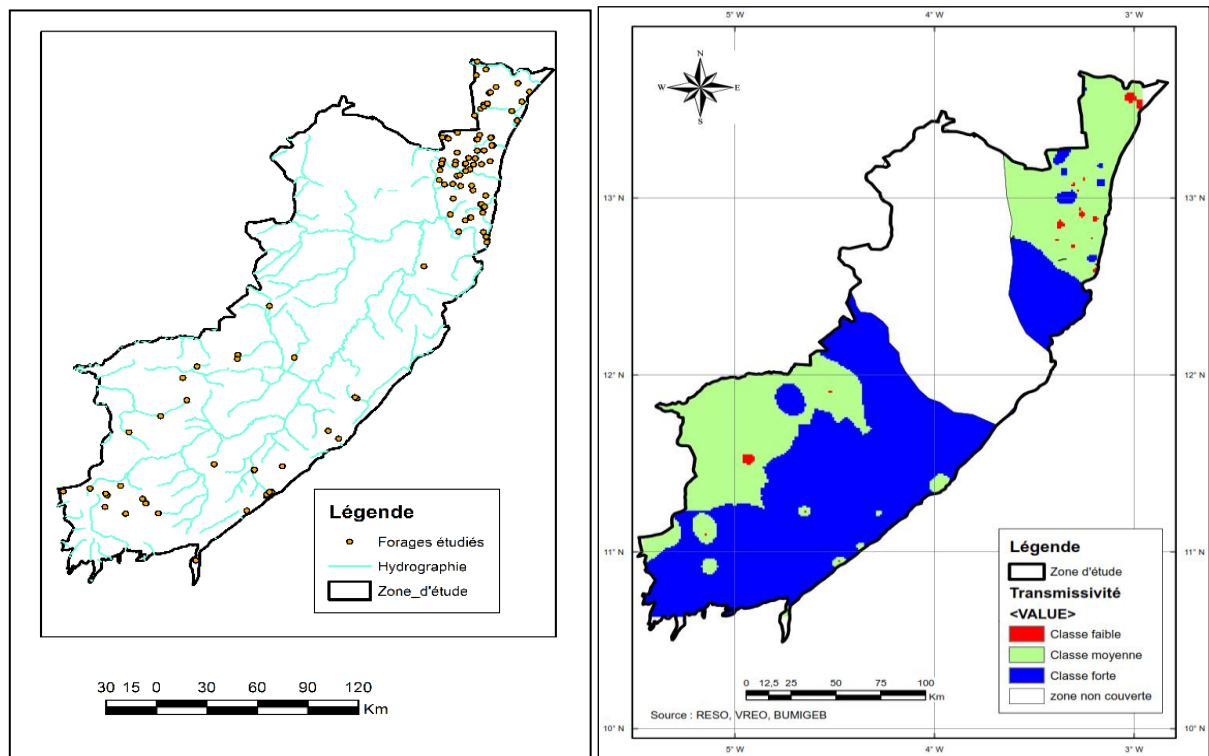


Figure 24: Répartition spatiale des classes de transmissivité

### ***b. Productivité selon les types d'aquifères***

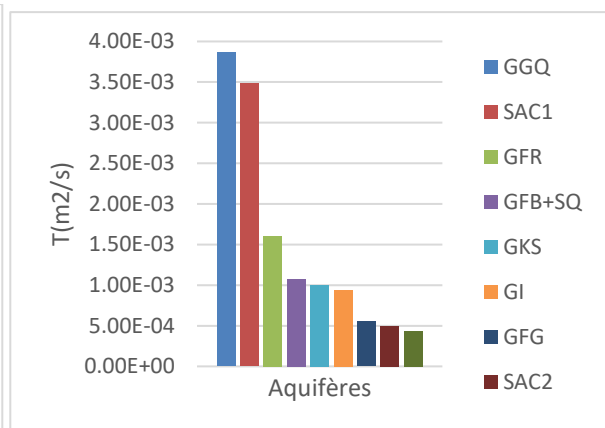
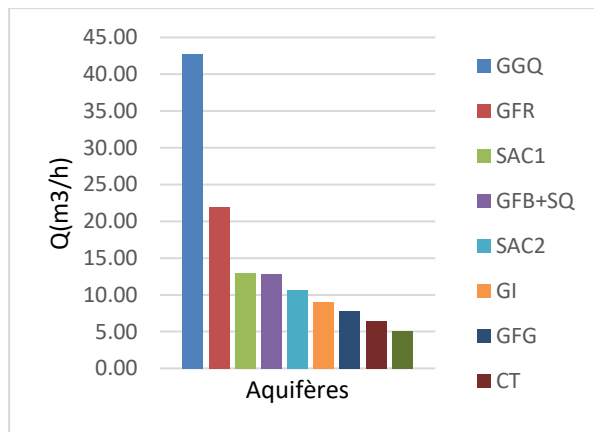
La Figure 25 représente les classifications des aquifères en ordre de grandeur décroissante de leur débit moyen d'exploitation et de leur transmissivité et le Tableau IX présente la classification des débits et des transmissivités dans les aquifères dont nous disposons de plus 15 observations, dont l'aquifère GGQ (Annexe)

On en retient que l'aquifère GGQ présente la plus grande moyenne de débit d'exploitation. Quant aux paramètres hydrodynamiques, l'aquifère GGQ constitue celui qui a la plus grande valeur de transmissivité. En plus, une analyse statistique d'environ 1 023 forages que nous avons réalisée dans la zone d'étude révèle un taux de succès très élevé pour les forages réalisés dans le GGQ, puis dans le SAC 1 (Figure 26 et Tableau X).

Ces deux éléments nous permettent d'affirmer que le GGQ est l'aquifère le plus productif de la série sédimentaire en étude. Ceci est confirmé par la présence de nombreuses sources d'eau dans cette partie, avec des débits intéressants (Nasso, Koba, Diolé,...) (Gramont et al., 2017; Sogreah Ingénierie, 1994; Yofe, 2016).

Tableau IX : Classification des débits et transmissivité dans les aquifères les plus représentés

	Aquifère	CT	GGQ	GFG
Débits	Modalités	Fréquence (%)	Fréquence (%)	Fréquence (%)
	débits très forts	19,24	57,14	26,53
	débits forts	46,15	4,76	32,65
	débits moyens	15,38	-	12,24
	débits faibles	11,54	38,10	16,34
	débits très faibles	7,69	-	12,24
Transmissivités	classe forte	80,77	85,71	61,22
	classe moyenne	19,23	14,29	30,61
	classe faible	-	-	8,16



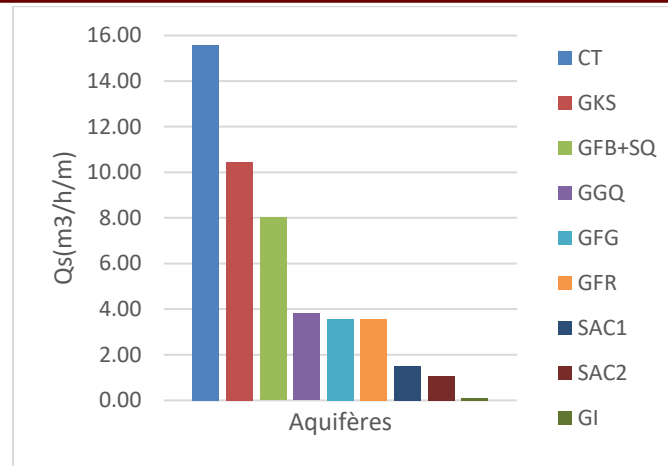


Figure 25: Moyenne arithmétique des débits et transmissivités observés dans chaque aquifère

Tableau X : Effectifs des forages analysés pour le taux de succès

Aquifère	Taux de succès (%)	Nombres de forages analysés
GI	66,67	6
GKS	71,43	42
GFG	76,92	143
GGQ	86,73	211
SAC1	84,38	256
GFR	81,56	141
SAC2	80,00	150
SQ	91,67	24
GFB	79,31	29
CT	100,00	8
Dolérite	92,31	13



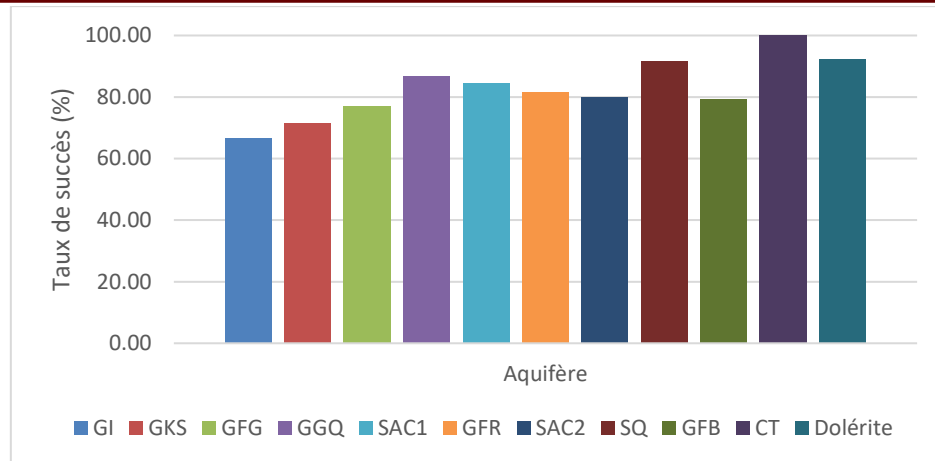


Figure 26 : Répartition des forages selon leur résultat par aquifère

Cette forte productivité serait due en partie à la structure de cette formation (GGQ). En effet le fait qu'il soit composé de grès quartzites fins à moyens avec des passées de grès grossiers à gros galets, favorise une parfaite continuité d'un bout à l'autre de cet aquifère.(Gombert, 1998). Cette continuité serait renforcée par la présence d'un réseau de failles probablement à l'origine des sources de Nasso.

En conclusion, nous retenons qu'en termes de productivité, l'aquifère GGQ est le plus productif, suivi du SAC1 alors que le CT est le moins productif du bassin. Quant à la transmissivité, l'aquifère GGQ présente les plus fortes valeurs de productivité et le SAC2 en présente les plus faibles.

La carte ci-dessous (Figure 27) superpose la répartition spatiale des classes des transmissivités à la lithologie des formations géologiques de la zone d'étude.

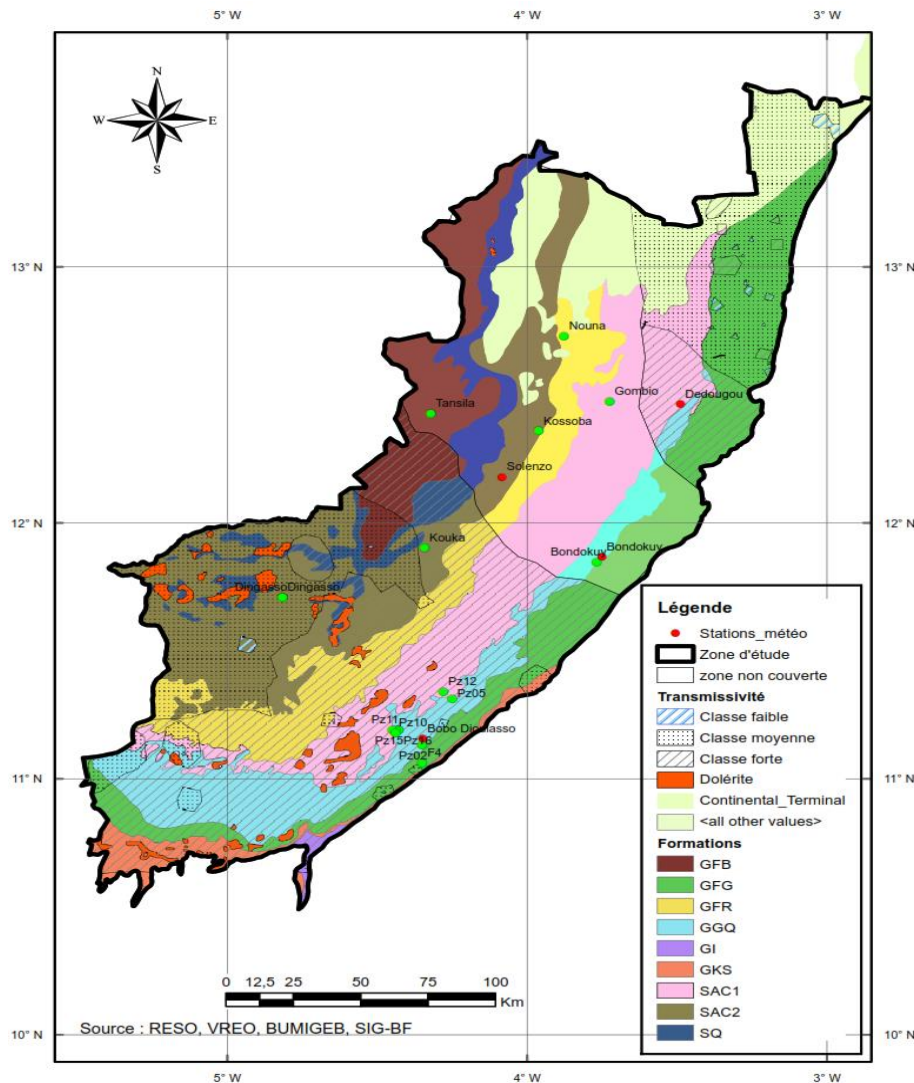


Figure 27: Bordure Sud-Est du Bassin de Taoudéni : Géologie et répartition spatiale des classes des Transmissivités

## IV.2.2. Comportement hydrodynamique

### IV.2.2.1. Variations temporelles de la piézométrie

- Aquifère GGQ : La Figure 28 montre les fluctuations de la piézométrie observées de 1993 à 2016 dans un des piézomètres captant l'aquifère GGQ. Sur le plan climatique, ces piézomètres se situent dans la zone soudano-sahélienne. On retient que la tendance générale est à la baisse contrairement à celle de la pluviométrie. La baisse générale du niveau piézométrique approche la valeur de 2 m. Ce piézomètre, situé dans la zone des prélèvements l'ONEA, se trouve donc fortement influencé (La Figure 29 illustre quelques prélèvements de l'ONEA) ; en effet, comme présenté au point IV.2.1.2, c'est dans cette zone que se trouvent les puissants forages et sources exploités par l'ONEA.

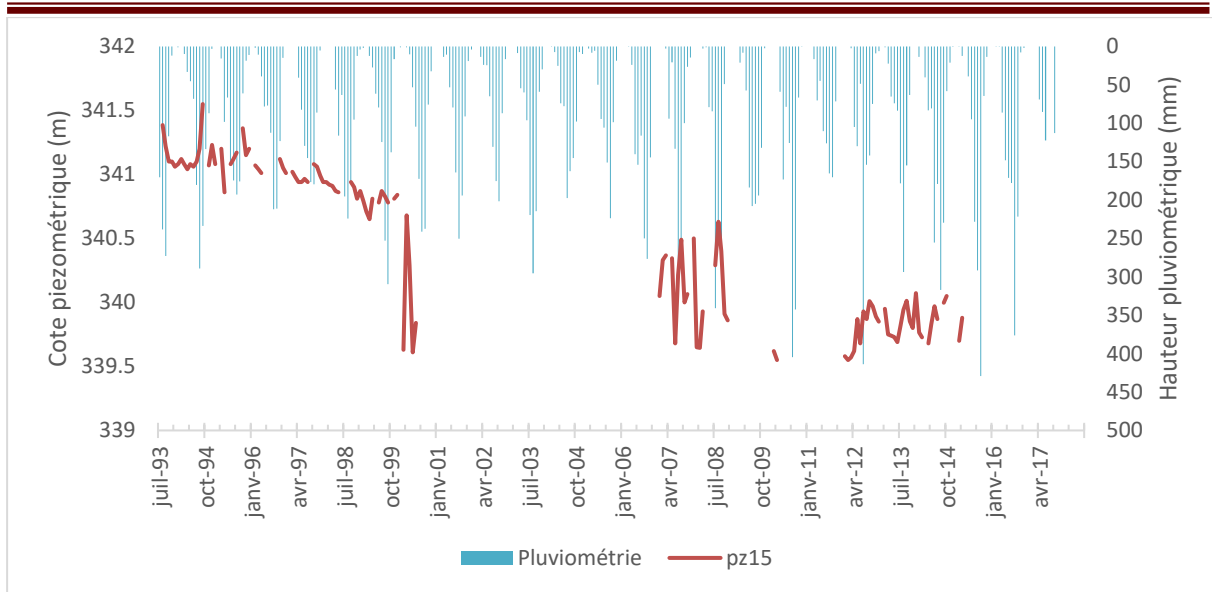


Figure 28: Evolution temporelle de la piézométrie dans le GGQ (1)

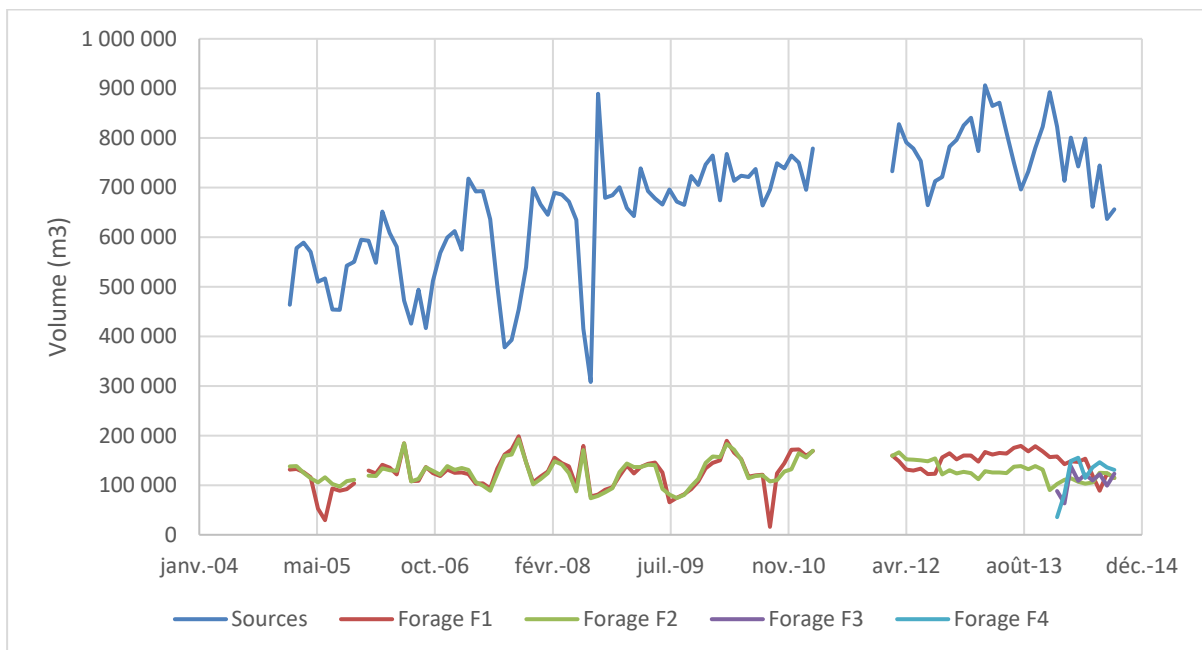


Figure 29 : Prélèvements mensuels de l'ONEA dans le GGQ et le SACI

La Figure 30 montre l'évolution piézométrique dans le même aquifère pour un piézomètre bien plus éloigné de la zone de prélèvements de l'ONEA. Il s'en dégage une tendance générale à la hausse, liée notamment à la hausse de la pluviométrie.

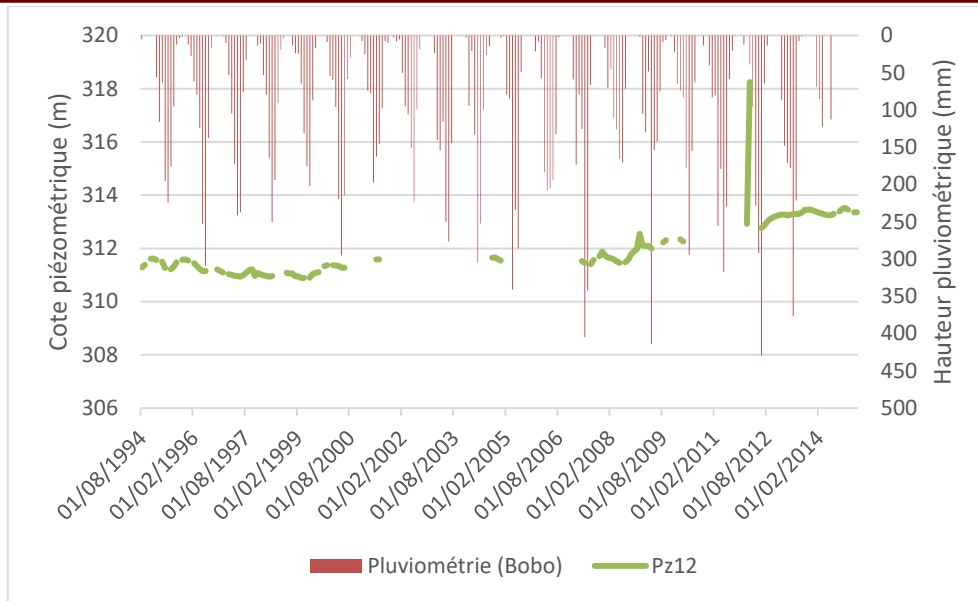


Figure 30: Evolution temporelle de la piézométrie dans le GGQ (2)

- Aquifère SAC 1 : La tendance générale est à la hausse dans le SAC1 pour ce piézomètre situé hors de la zone de prélèvements de l'ONEA (Figure 31). On retient une réaction générale positive et plus légèrement retardée par rapport à la pluie. On note aussi une des fluctuations très élevées (maximum=4,70 m), l'amplitude générale de l'élévation du niveau de la nappe est d'environ égale à 6 m. Il est situé dans la zone climatique soudanienne. Cette hausse serait liée directement à celle de la pluviométrie ainsi qu'aux valeurs élevées de la transmissivité de cet aquifère. En effet, les pics piézométriques interviennent quelques temps après les pics pluviométriques.

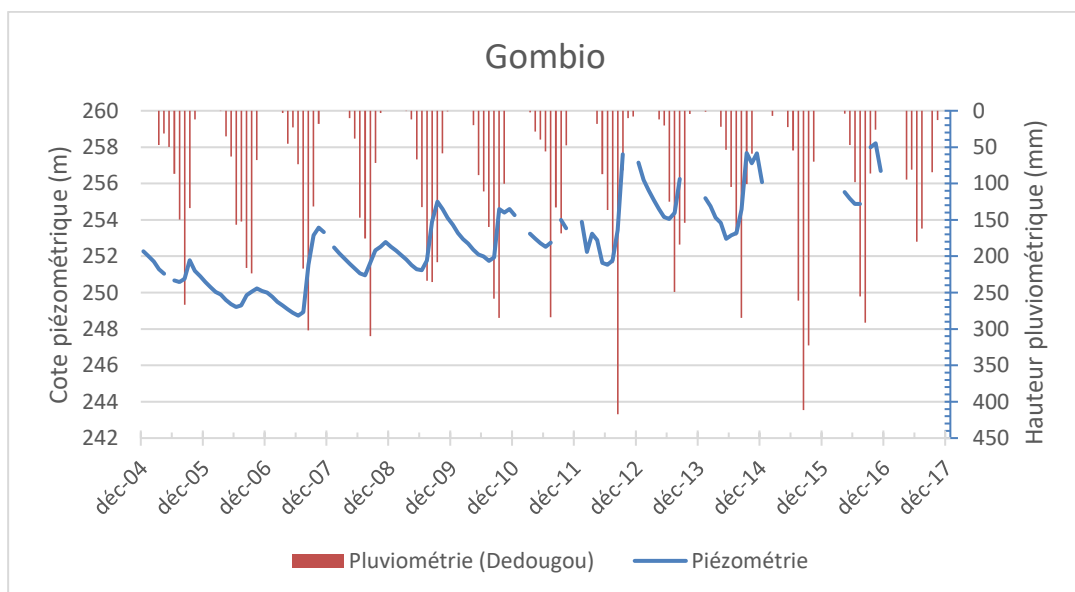


Figure 31 : Evolution temporelle de la piézométrie dans le SAC1 (1)

Comme au niveau des GGQ, la Figure 32 montre la tendance générale à la baisse pour un piézomètre situé dans la zone des prélèvements de l'ONEA.

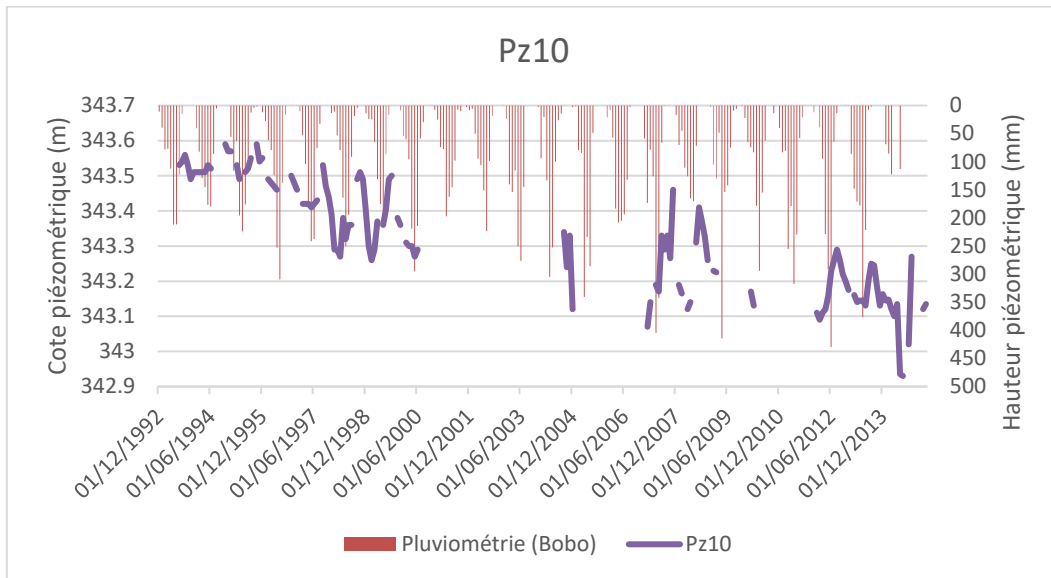


Figure 32 : Evolution temporelle de la piézométrie dans le SAC1(2)

- Aquifère GFR : Nous notons une tendance générale stable (Figure 33) mais avec des fortes fluctuations saisonnières avec des amplitudes pouvant atteindre 2,5 m au niveau du piézomètre de Nouna situé dans la zone climatique soudanienne. Ce piézomètre est situé presque dans la même zone que celui de Gombio (SAC 1) mais présente un comportement différent. Ceci serait dû au fait que l'aquifère des SAC1 présente des valeurs de transmissivité qui lui permettent de mieux réagir à la pluie. L'aquifère des GFR, de par sa granulométrie (fine), réagit difficilement aux faibles valeurs de pluviométrie.

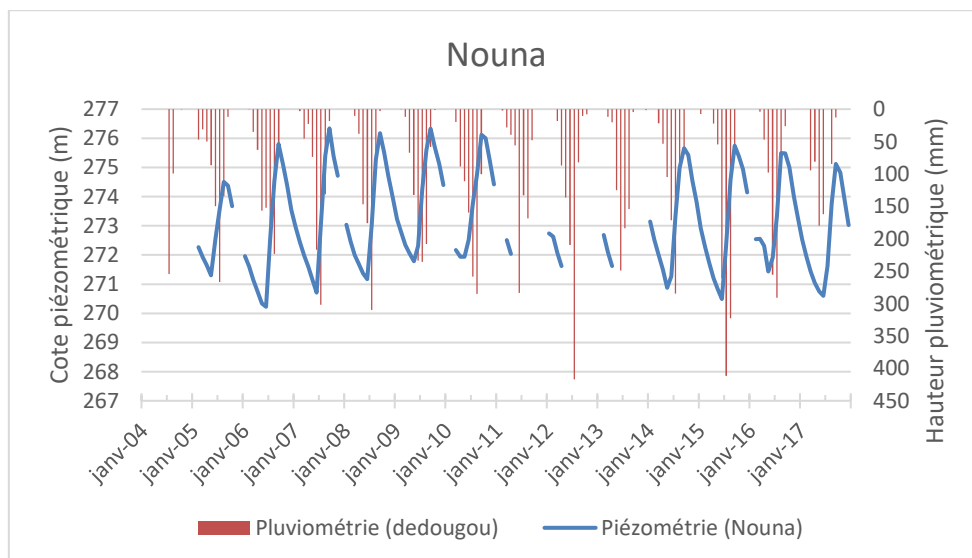


Figure 33: Evolution piézométrique dans le GFR

- Aquifères SAC2 : Les deux piézomètres considérés sont situés en zone soudano sahélienne. Les piézomètres de Kouka (Figure 34) présente une tendance générale à la hausse avec des fortes fluctuations contrairement à celui de Dingasso (Figure 35) qui est en légère baisse (moins de 1 m). Les deux piézomètres, quoique captant les mêmes aquifères et appartenant dans la même zone climatique se comportent différemment. Ceci s'expliquerait par le caractère hétérogène des caractéristiques hydrodynamiques. En effet, le piézomètre de Dingasso est localisé à la zone des transmissivités moyennes alors que celui de Kouka se trouve dans la zone des fortes transmissivités. Nous notons une réaction positive à la pluie et décalée de 2 mois en moyenne. Cette tendance générale à la hausse serait donc liée directement à la pluviométrie.

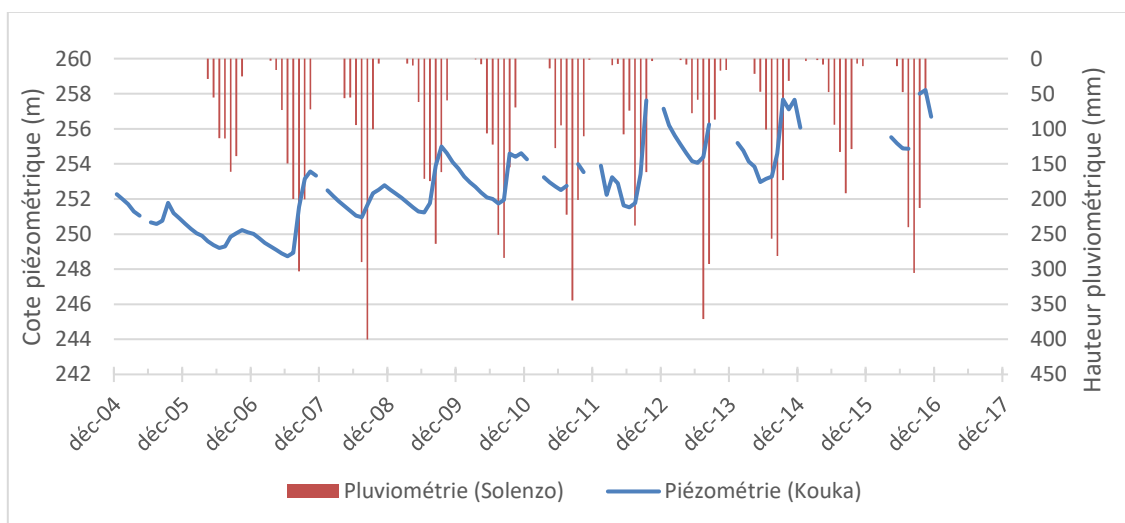


Figure 34: Evolution piézométrique dans le SAC2 (Kouka)

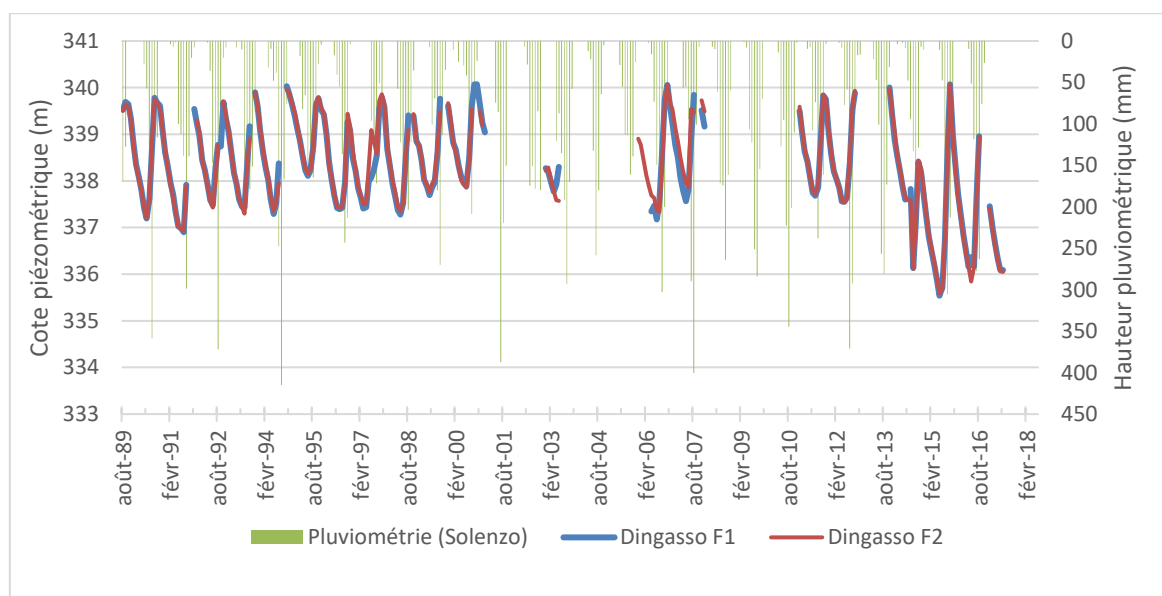


Figure 35: Evolution piézométrique dans le SAC2 (Dingasso)

- Aquifères GFB : Le piézomètre de Tansila (Figure 36), situé dans la zone soudanienne, montre une tendance générale à la hausse avec des fortes fluctuations. La réaction à la pluie est positive et retardée généralement de 1 à 2 mois. La tendance à la hausse serait donc liée directement à celle de la pluie. Nous serions en face d'un comportement naturel de la nappe de par le fait qu'il n'y ait pas de pompage important dans les environs de la piézométrie.

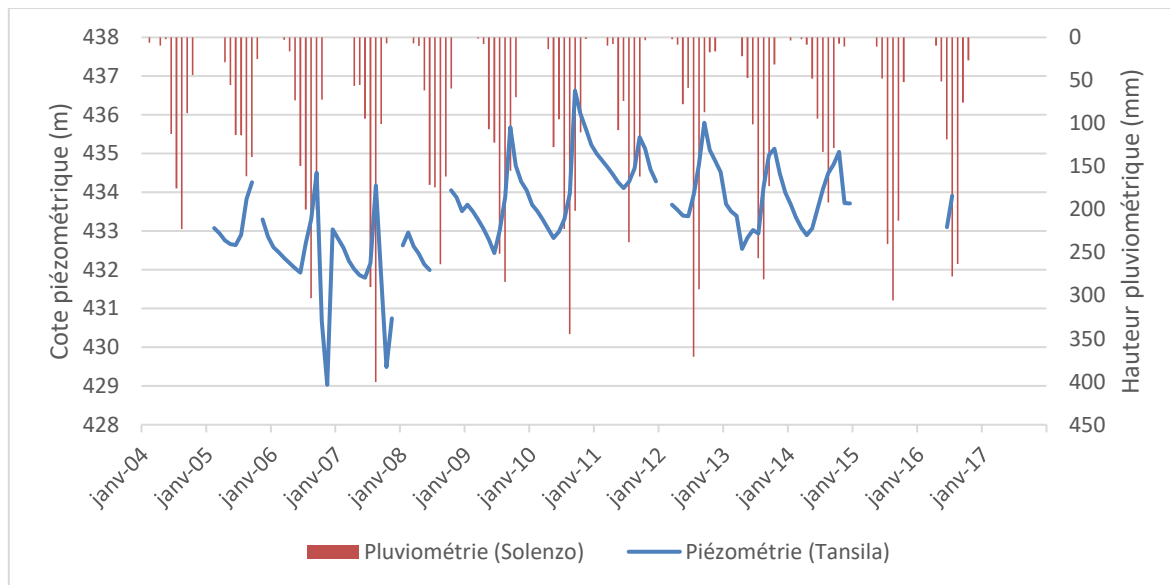


Figure 36: Evolution piézométrique dans le GFB

De manière globale, on retient ce qui suit :

- L'évolution de la piézométrie présente une tendance générale à la hausse dans les périodes d'étude respectives ; il existe néanmoins quelques endroits où la tendance est à la baisse. Cette tendance générale à la hausse de la piézométrie serait liée à celle de la pluie.
- La réaction des nappes intervient généralement avec un retard de 1 mois à 2 mois par rapport à la pluie, la recharge intervient généralement entre Août et Octobre en réaction des pics pluviométriques qui interviennent entre Juillet et Août. Les basses eaux sont observées entre Avril et Juin. Ceci traduit une réaction relativement lente de la nappe que l'on peut lier aux faibles vitesses d'écoulement dans le domaine souterrain.
- En plus de la réaction à la variation pluviométrique, l'évolution du niveau piézométrique semble être lié à la nature géologique ou aux caractéristiques hydrodynamiques qui sont hétérogènes au sein d'un même aquifère. Les pompages à

gros débit tels ceux de l'ONEA entraînent une baisse du niveau de la nappe et cela est observé sur les piézomètres situés dans la zone de pompage (GGQ et SAC1)

#### IV.2.2.2. Evolution spatiale de la piézométrie

Les Figure 37 et Figure 38 présentent la carte piézométrique actualisée et celle réalisée par Derouane (2008). Cette carte reflète la continuité hydraulique de la nappe d'eau sur toute la surface. Nous pouvons constater certaines précisions obtenues grâce au supplément de données dans les zones moins couvertes sur la carte antérieure.

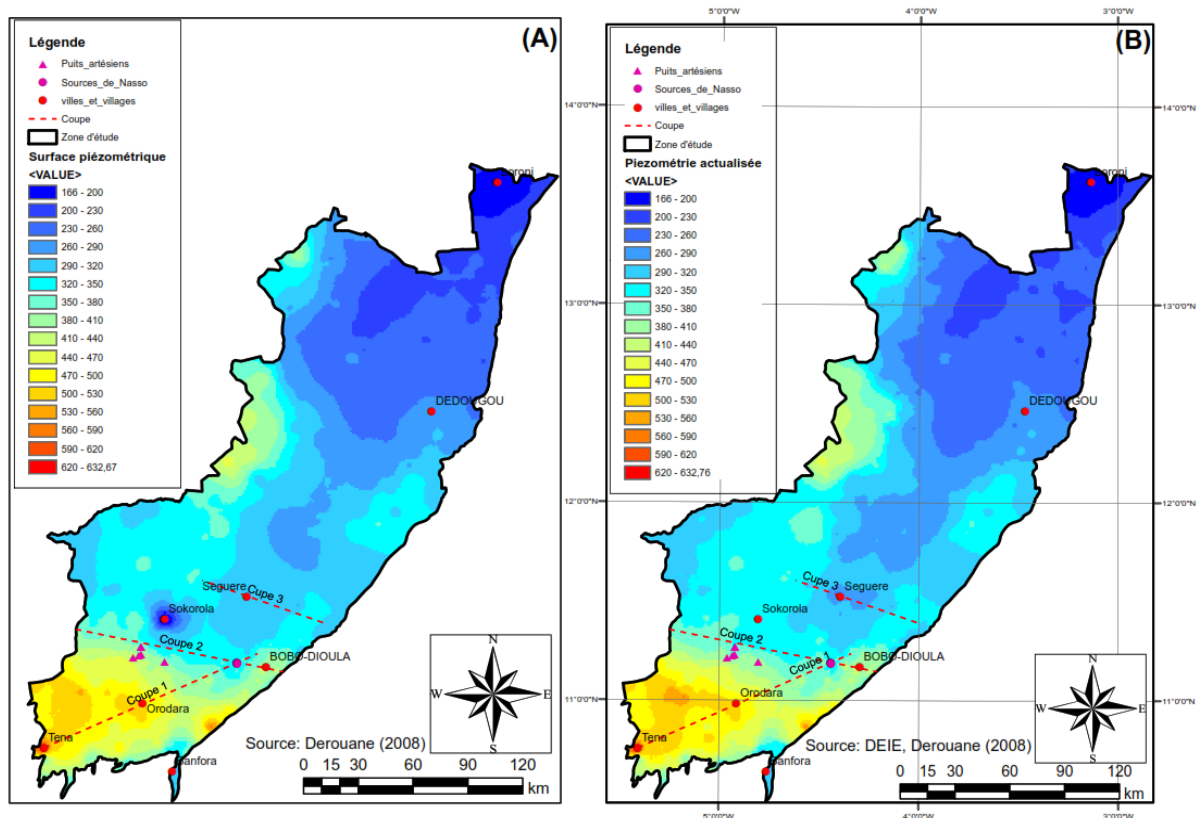


Figure 37: Carte piézométrique (A) antérieure (2008) et (B) actualisée (2018)



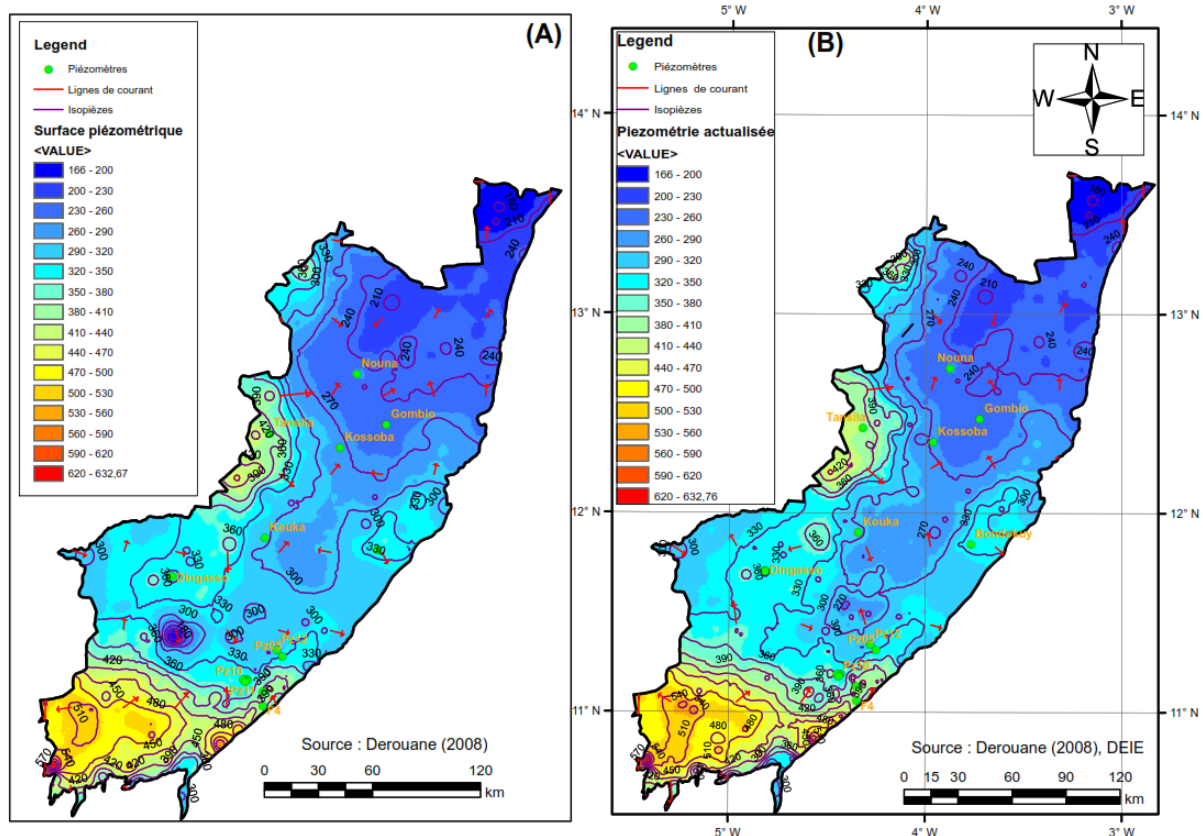


Figure 38: Carte piézométrique (A) antérieure (2008) et (B) actualisée (2018) : Lignes de courant et isopiëzes

En effet, en comparaison avec l'ancienne carte :

- Les cotes piézométriques restent comprises entre 166 et 633 m, mais avec une modification de la forme des isopiëzes ; modification allant dans le sens de l'augmentation générale du niveau de la piézométrie. L'allure de la carte indique un écoulement qui se fait globalement du Sud-ouest vers le Nord-est.
- On remarque que les aires d'alimentation sont plus étendues (Sud-Ouest, Nord-Ouest)
- Comme remarqué par Yofe (2016), le principal exutoire semble toujours être situé au nord au niveau du Continental Terminal où les eaux s'écoulent vers la partie sédimentaire du Mali. On note aussi des directions d'écoulements secondaires se distinguent à l'ouest et au sud-ouest. Il s'agit d'un écoulement vers le nord-ouest en direction de la partie sédimentaire et passant par la cuvette piézométrique du Banifing à l'ouest du bassin et d'un écoulement en direction du socle cristallin au sud-ouest du bassin.
- On peut facilement observer la disparition de la zone de dépression autour de Sokorola. Cependant on peut repérer une zone de dépression piézométrique dans les

environs du village Seguere, dont la Figure 39 traduit le comportement piézométrique et topographique (Coupe 3).

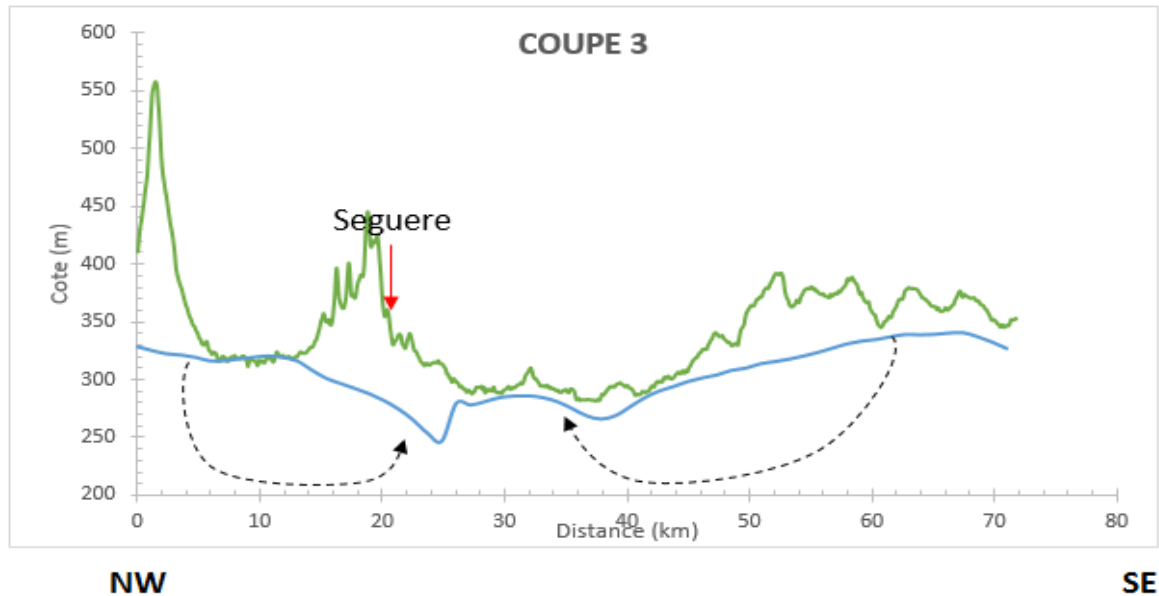


Figure 39: Dépression piézométrique et topographique aux environs de Seguere

Quant aux crêtes hydrogéologiques présentes sur la zone d'étude au Burkina Faso permettant de distinguer différents bassins d'alimentation hydrogéologiques, la concordance entre les crêtes topographiques définissant les principaux bassins versants (Mouhoun, Comoé, Banifing), et les crêtes hydrogéologiques identifiées reste très grande comme présenté par Derouane (2008). Il en découle donc, au niveau des écoulements d'eau souterraine dans les aquifères du sédimentaire, une concordance presque homogène entre les bassins hydrogéologiques identifiés et les principaux bassins versants hydrographiques avec néanmoins quelques différences au niveau de leurs limites (Figure 40).

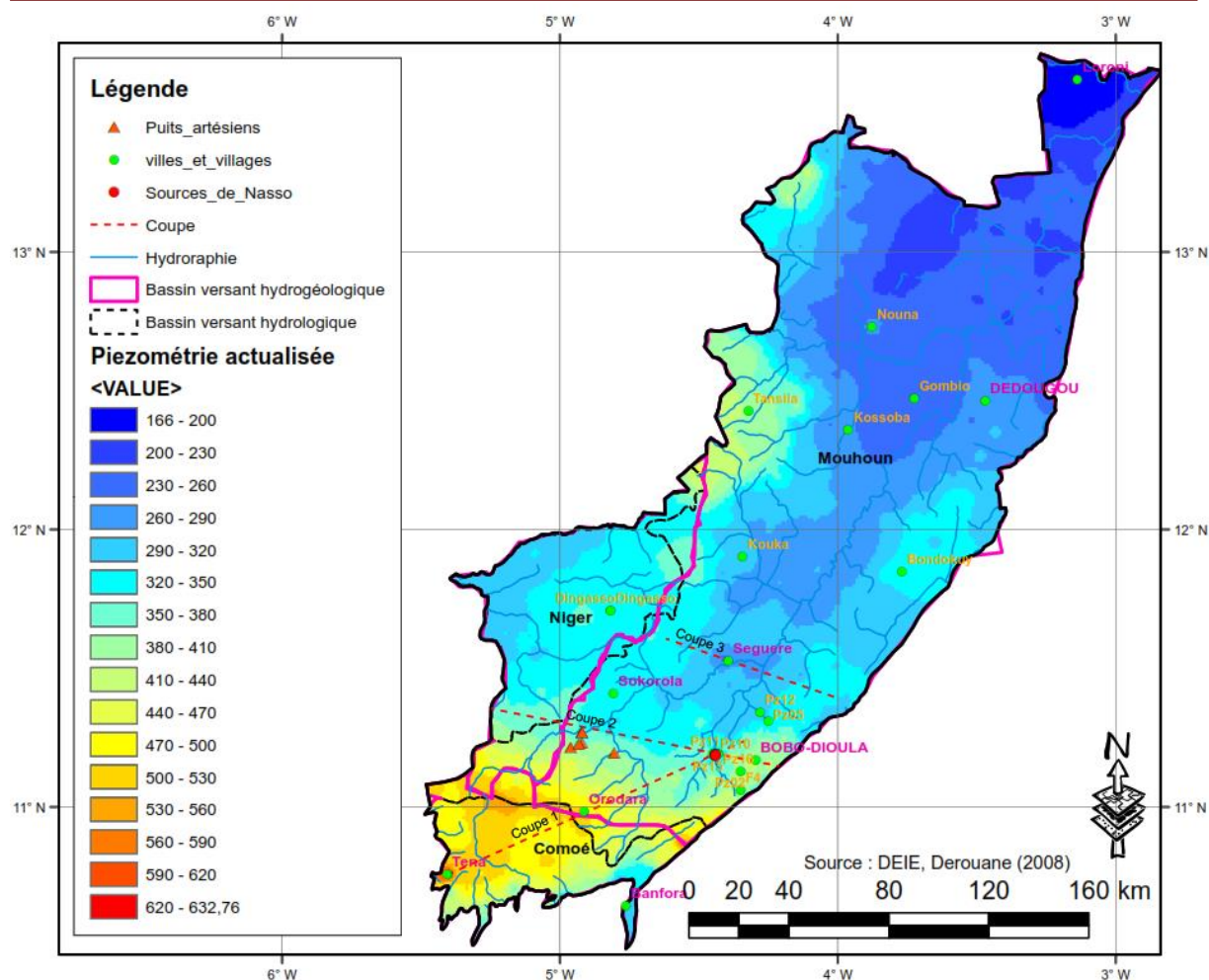


Figure 40: Carte piézométrique de la bordure Sud-Est de Taoudéni : Bassin versant

Nous y identifions donc 3 bassins hydrogéologiques :

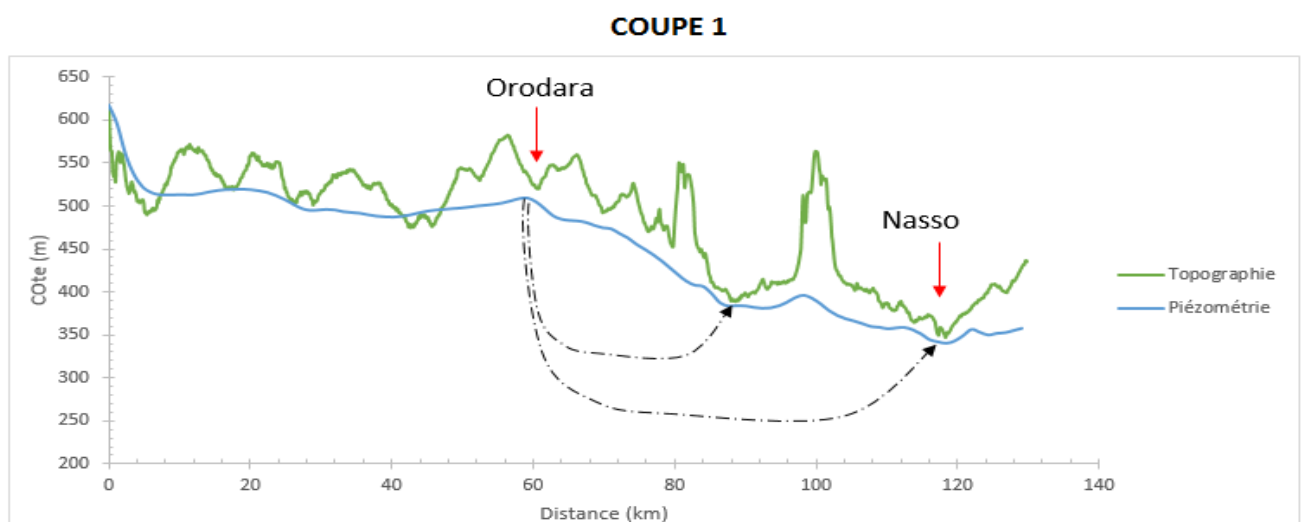
- Le bassin hydrogéologique du Mouhoun qui couvre environ 75% de la zone d'étude. Il draine la grande majorité des eaux souterraines de la zone sédimentaire du Burkina avec un écoulement orienté de Sud-Ouest vers le Nord-est, globalement dans le même sens que les écoulements superficiels. Ceci matérialise le caractère drainant du cours d'eau Mouhoun. Il apparaît que la zone de recharge de ce bassin hydrogéologique semble entièrement située dans la zone d'étude. On notera par ailleurs que ce bassin d'alimentation hydrogéologique recoupe tous les horizons géologiques présents dans la zone d'étude selon la typologie retenue.
- Le bassin hydrogéologique de la Comoé : il occupe l'extrême sud-ouest de la zone d'étude. C'est dans cette partie que se trouve le point culminant de la surface piézométrique. Les eaux s'écoulent globalement vers l'ouest en direction du Mali, et

vers le sud où ils quittent la zone sédimentaire à l'intérieur du Burkina Faso en direction du socle cristallin.

- Le bassin hydrogéologique du Banifing (Niger) : il draine les eaux souterraines suivant un axe nord-ouest en direction du Mali. Les flux d'eau souterraine sortants de la zone d'étude sont localisés en ce bassin au niveau de la frontière malienne. Le caractère drainant du cours d'eau Banifing y est aussi identifié par l'allure piézométrique

La coupe 1 (Figure 41), tracée suivant le sens principal d'écoulement, permet de visualiser le comportement hydrodynamique de la nappe à partir de la crête piézométrique (Zone d'alimentation) jusqu'aux environs des sources Nasso. On retient un écoulement bimodal avec une composante superficielle qui suit approximativement la topographie au niveau des différents sous-bassins et une composante majeure plus profonde qui peut au niveau d'un gradient régional SW-NE présenter des écoulements dirigés depuis les hauts reliefs (Orodara) vers les sources de Nasso.

La coupe 2 (Figure 42), tracée suivant l'un des sens secondaires d'écoulement, permet de mettre en évidence une autre zone d'alimentation de la nappe, cette crête constitue aussi une des zones d'alimentation de la source de Nasso.



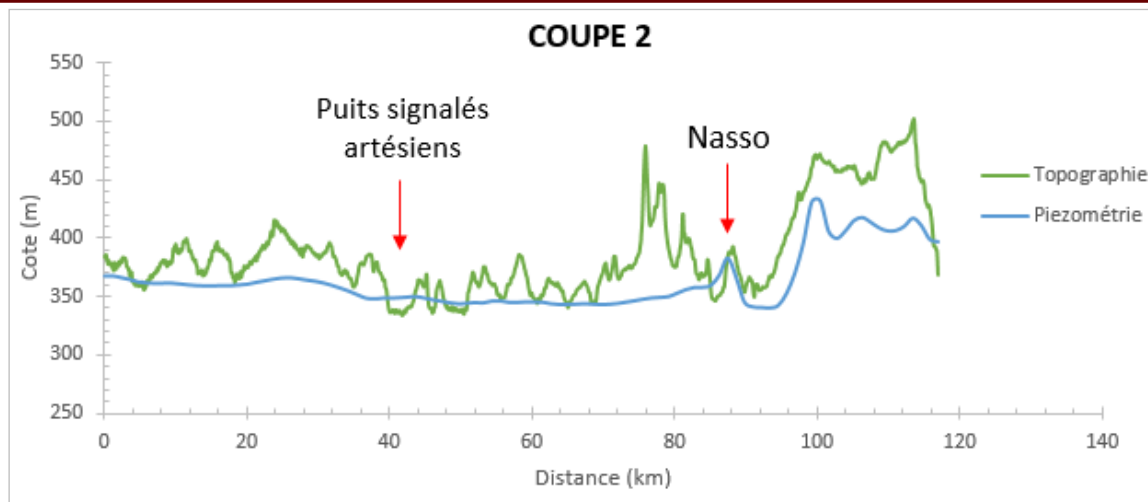


Figure 42: Coupe topographique et piézométrique NW-SE

Il sied de mentionner que sur chacune des coupes présentées ici, nous remarquons qu'il y a des endroits où la ligne piézométrique est au-dessus de la ligne topographique ; Il s'agit des zones où le niveau piézométrique est supérieur à la cote topographique, ce qui correspond notamment au phénomène d'artésianisme. En effet, certains puits réalisés dans les environs de ces zones sont signalés artésiens. Néanmoins, il est important de rappeler que les 200 points supplémentaires traités dans ce cadre ont fait l'objet d'un nivellement topographique avec un MNT de 30 m de précision. Or, les points utilisés pour la première carte ont été nivelés grâce à une campagne de nivellement organisée spécialement à cet effet. Il y aurait donc une petite marge d'erreur glissée par lors du processus du nivellement avec le MNT.

#### IV.2.2.3. Caractérisation des échanges horizontaux

- Echanges SAC 1 – GFR : La Figure 43 montre le comportement des piézomètres situés respectivement dans le SAC1 (22,50 m de profondeur) et le GFR (15,90 m de profondeur) ; les deux sont piézomètres sont éloignés d'environ 30 km. Les courbes sont quasi parallèles expliquant un comportement similaire de ces deux aquifères en ce qui concerne les conditions de recharge et de décharge ainsi que la réaction face à la pluie. Le sens des écoulements reste, au fil du temps, commandé par la piézométrie générale et correspond à la succession définie par la stratigraphie ; l'eau coule des GFR vers les SAC 1 sous-jacents.

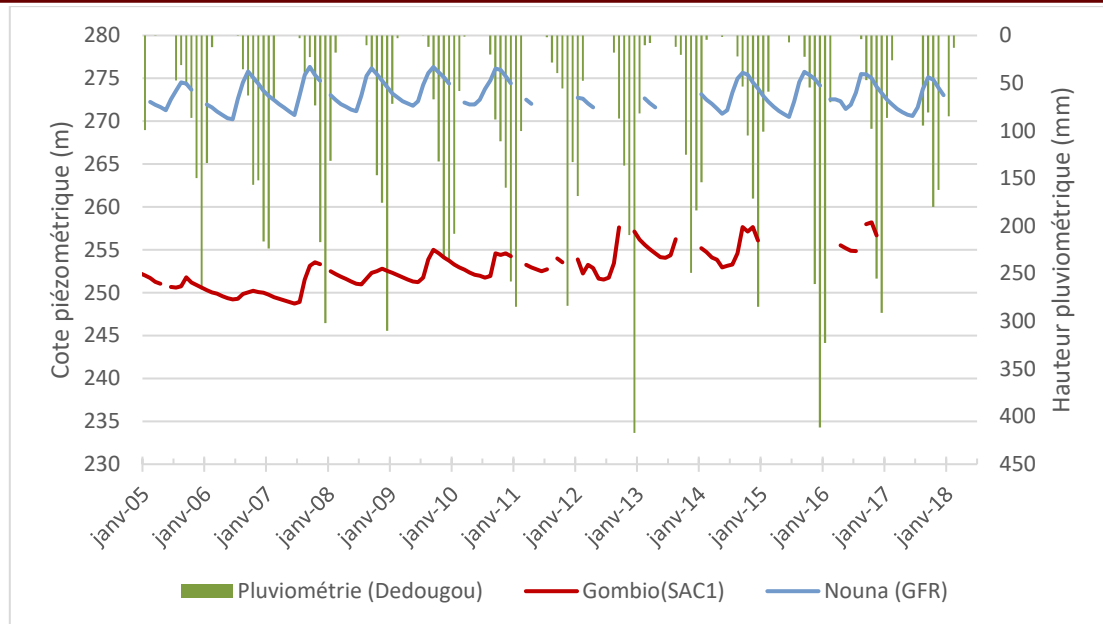


Figure 43: Evolution de la piézométrie dans le SAC1 et le GFR

- Echanges GFR – SAC2 (Figure 44) : éloignés d'environ 43 km, les piézomètres de Nouna et de Kossoba (65 m de profondeur) présentent des comportements hydrodynamiques différents par rapport à la pluie. Comme précédemment, le sens des écoulements reste conditionné par la piézométrie générale et correspond à la succession stratigraphique ; l'eau coule donc des SAC 2 vers le GFR sous-jacent.

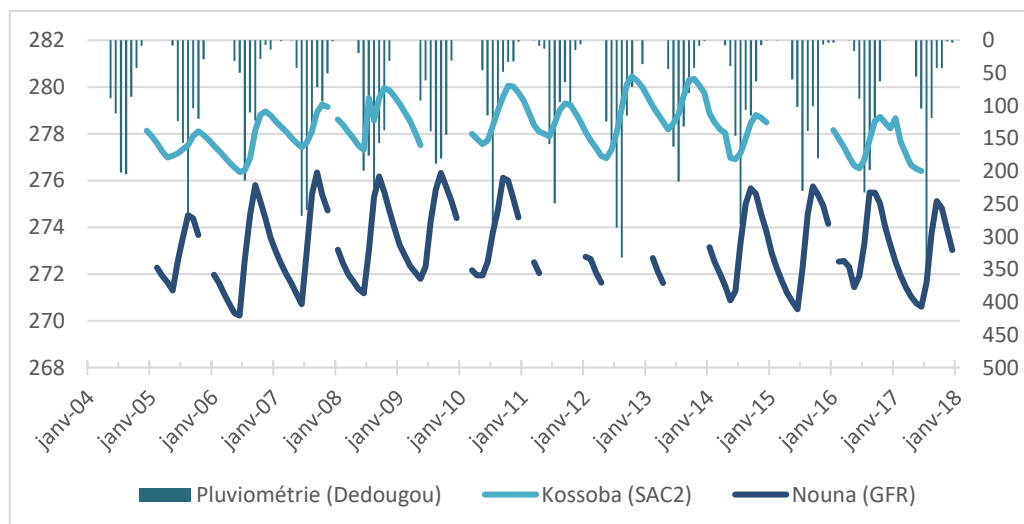


Figure 44: Evolution piézométrique dans le SAC 2 et le GFR

De manière globale, on retient que les échanges entre aquifères sont unidirectionnels. Le sens d'écoulement entre deux aquifères successifs dans la stratigraphie reste imposé par la piézométrie générale de la zone et globalement par la succession stratigraphique. Dans les cas

de la partie située vers le Sud-Ouest (vers le point de hauteur piézométrique culminant), le sens de la piézométrie l'emporte sur la succession stratigraphique.

#### IV.2.2.4. Estimation de la recharge

Les résultats du calcul de la recharge sont présentés dans le Tableau XI. Ce tableau montre que la valeur de la recharge maximale varie de 5% (pour 907 mm de pluie) à 3% (pour 1095 mm de pluie) entre les années 2012 et 2014, soit 48 mm en 2012-2013 et 35 mm en 2013-2014. Ces valeurs sont inférieures à celles obtenues par Ndiaye (2008) en utilisant quasiment la même approche. Néanmoins, elles restent dans la fourchette générale des valeurs de recharge, notamment inférieure à 10% (Dakouré, 2003).

Tableau XI : Calcul de la recharge

Piezo	2012-2013		2013-2014	
	Rmin (mm)	Rmax (mm)	Rmin (mm)	Rmax (mm)
F4	7,54	49,30	12,02	78,62
Pz02	15,47	101,15	19,07	124,67
Pz05	10,20	66,72	2,90	18,98
<b>Pz10</b>	2,60	17,00	1,56	10,20
Pz11	13,65	89,25	6,74	44,09
Pz12	6,89	45,05	6,11	39,95
Pz15	5,98	39,10	4,97	32,51
Pz16	24,44	159,80	21,47	140,36
Pz20	2,21	14,45	1,43	9,35
Pz20BIS	5,59	36,55	4,22	27,62
Moyenne	7,45	48,70	5,55	35,13
R/P(%)	0,82%	5,37%	0,51%	3,21%

D'autres auteurs dont Ndiaye (2003) obtiennent des valeurs plus élevées de la recharge en utilisant la méthode de Thornthwaite (**Erreur ! Référence non valide pour un signet.**). Cette méthode semble donner des valeurs un peu plus grandes que la méthode des fluctuations piézométriques.



Tableau XII : Recharge estimée par diverses méthodes et divers auteurs

Auteurs	Méthode	Résultats (mm/an)
SOGREAH Ingénierie, 1994	Thornthwaite	248
Derouane, 2008	Thornthwaite	26 – 42
Dakouré (2003)	Thornthwaite	75 – 120
	Modèle à réservoirs	127
	Cubature des variations piézométriques	<16
	Modélisation hydrogéologique	0 – 47
Ndiaye (2008)	Thornthwaite	77
	Fluctuation piézométrique	12 – 81

Ces faibles valeurs sont dues aux faibles amplitudes de fluctuation piézométrique (généralement inférieure à 1 m) observées pendant cette période malgré une tendance générale à l'élévation du niveau de la pluie. Ce qui laisse entendre que le taux de renouvellement de la nappe reste très faible. Ce taux de représente une réserve renouvelée de 2 milliards de  $m^3$  pour la réserve totale de 200 milliards de  $m^3$  (soit un taux de renouvellement avoisinant 1%) (Gombert, 1998; Yofe, 2016).



## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a porté sur les aquifères du bassin sédimentaire de Taoudéni dans la partie burkinabé. Il a consisté d'une part à réaliser une synthèse des connaissances sur la géologie et l'hydrogéologie de ses aquifères et d'autre part à la caractérisation hydrodynamique de ces aquifères. Ceci dans le but d'améliorer les connaissances sur l'hydrogéologie de cette zone.

Pour ce qui est de la synthèse des connaissances sur la géologie et l'hydrogéologie, elle s'est basée sur les travaux antérieurs et quelques données récentes. Il en ressort que la géologie de cette bordure du bassin de Taoudéni est essentiellement constituée l'Infracambrien regroupant des formations essentiellement gréseuses présentant une stratigraphie hétérogène qui indique des conditions de sédimentation très changeantes, avec alternance de phases marine, littorale et continentale. Ces formations, connaissant de nombreuses intrusions doléritiques et gabbro-doléritiques (d'âge permien), sont recouvertes par des formations argilo-sableuses du Continental terminal et les formations récentes du quaternaire. Nous avons tenté de réaliser des coupes pour aider à mieux comprendre la structure géologique mais les données disponibles n'étaient pas suffisantes pour cela. Généralement, les forages ne recourent par entièrement une formation.

De par cette géologie, la série sédimentaire est donc majoritairement constituée de roches réservoirs potentielles sur plus des 3/4 de son épaisseur (de grès et de carbonates). L'ordre de grandeur des valeurs du coefficient d'emmagasinement ( $6,3 \times 10^{-6}$  à  $3,81 \times 10^{-2}$ ) met en évidence le caractère captif de la nappe. La transmissivité est comprise entre  $0,55 \times 10^{-4}$  à  $2 \times 10^{-2} m^2/s$  ; ce qui traduit la présence de bon aquifère dans la zone.

La caractérisation hydrodynamique a été réalisée par l'analyse de la productivité des aquifères et l'étude du comportement hydrodynamique (approche piézométrique).

L'analyse de la productivité a porté sur un échantillon de 116 observations (essais de pompage longue durée) dont les modalités étaient le débit d'exploitation, la transmissivité et le débit spécifique. Cette analyse a révélé que la plupart des aquifères captés (70% des points) sont dans la classe des débits fort et très forts et 72% d'observations sont dans la classe des transmissivités fortes. L'analyse a révélé que le GGQ est l'aquifère le plus productif, mettant ainsi en évidence l'influence de la structure géologique (granulométrie) sur la productivité.

L'étude du comportement hydrodynamique, par l'analyse spatio-temporelle de la piézométrie, a révélé que la tendance générale est à l'élévation du niveau de la piézométrie entre les années 1993 et 2016 indépendamment de la zone climatique avec une réaction positive à la pluie et

souvent décalé d'un mois. L'utilisation de données supplémentaires pour la réalisation de la carte piézométrique a permis d'affiner et de confirmer les conclusions des travaux précédents, à savoir un écoulement bimodal avec une composante qui coïncide avec le sens de la topographie et une composante généralement orientée NW-SE suivant le gradient général des hautes régions vers les basses régions (Derouane et Dakouré, 2006). Les résultats de la caractérisation des échanges verticaux entre quelques formations ont contribué à consolider cette assertion.

L'estimation de la recharge par la méthode de fluctuation piézométrique a révélé des valeurs maximales comprises entre 35 et 48 mm/an. Ces valeurs, bien que faibles, sont comprises dans la fourchette des valeurs obtenues par d'autres auteurs dans la même zone. Ces faibles valeurs laissent entendre un taux de renouvellement des eaux souterraines très faible.

En termes de perspectives, nous commençons par rappeler que les résultats ci-haut présentés portent sur des données provenant des puits qui ne dépassent pas les 200 m. Ce qui implique premièrement la difficulté de réalisation des coupes géologiques à grande échelle aussi bien verticale qu'horizontale (coupes transversales de la zone commune) par manque des données des forages traversant plus de deux formations et présentant une certaine continuité latérale avec d'autres forages. En second lieu, l'étude du comportement hydrodynamique a été menée sur l'hypothèse d'une nappe d'eau souterraine unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche avec des niveaux imperméables (d'extension horizontale limitée) séparant différents horizons géologiques de la série. Ainsi, l'association de chacune des formations à un aquifère ne répond qu'à des critères d'ordre pétrographiques

En outre la faible représentativité des données utilisées pour l'analyse de la productivité et la difficulté d'estimer le coefficient d'emménagement par manque de données de puits d'observation s'ajoutent à ces limites.

Toutes ces limites offrent de perspectives de recherche qui permettront de mieux comprendre le fonctionnement de ce bassin.

## VI. RECOMMANDATIONS

Dans le but de peaufiner les résultats et avoir une meilleure compréhension du comportement de l'aquifère en résolvant les limites ci-haut présentées, nous recommandons ce qui suit :

- La réalisation et l'interprétation des prospections géophysiques qui permettrait de décrire l'ensemble de formation du bassin sédimentaire (lithologie, structure, etc.)
- La réalisation des forages profonds pouvant traverser tout le bassin sédimentaire.
- La réalisation des essais de pompage longue durée sur ces puits ainsi que des analyses géochimiques et isotopiques.
- L'équipement de certains puits de façon à ce qu'ils ne captent qu'une seule formation afin de tester séparément les aquifères.

Les données fournies par ces investigations permettront de mieux préciser la lithologie, la structure et la géométrie de ces aquifères avec la possibilité de réaliser des coupes géologiques à grande échelle verticale et horizontale. En plus, un nombre élevé d'échantillons (forages profonds, essais de pompage longue durée) sur chaque formation (couvrant jusqu'à la zone commune) permettra de mieux préciser le comportement hydrodynamique et d'infirmer ou de confirmer si la série est constituée d'une seule nappe.

Quant à la gestion de la ressource, nous pensons que le faible taux de renouvellement avec une forte pression entraînerait donc une décharge continue. D'où la nécessité de la part des parties concernées par ce système à adopter une politique de gestion rationnelle de cette ressource qui serait en état de tarissement. D'où la nécessité de mener les études sur l'impact du changement climatique et des gros pompages sur les eaux souterraines ainsi que certaines études sur la vulnérabilité de la nappe à la pollution pour une meilleure protection.

## VII. BIBLIOGRAPHIE

- AIEA. (2018). *Adding the Groundwater Dimension to the Understanding and Management of Shared Water Resources in the Sahel Region* (Project Coordination and IWAVE Consultative Meeting of project No. RAF/7/019). Vienna International Centre.
- ANTEA Group, & JMB\_Consult. (2012). *Gestion Intégrée et Concertées des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Nivger* (Rapport de synthèse Hydrogéologique No. OSS-GICRESAIT no 14) (p. 86). Observatoire du Sahara et du Sahel. Banque Africaine de Développement.
- ANTEA Group, & JMB\_Consult. (2013). *Gestion Intégrée et Concertées des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Nivger* (Synthèse finale No. OSS-GICRESAIT no 19) (p. 86). Observatoire du Sahara et du Sahel. Banque Africaine de Développement.
- Assemian, E. A., Kouamé, F. K., Slaey, M. B., Affian, K., Youan Ta, M., Jourda, J. P. R., & Biemi, J. (2014). Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des Sciences de l'Eau*, 27(1), 81-97.
- Battle, A. J., Brouyere, S., & Gardin, N. (2007). *Mise en œuvre et résultats des essais de traçage réalisés à Nasso, dans le bassin du Kou (Bobo Dioulasso, Burkina Faso)* (p. 49p). Burkina Faso: Appui à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso.
- Blaise, M., & J.P. Marchal. (2006). *Description des aquifères du département de l'Hérault* (1 annexe, 6 ill No. Rapport BRGM/RP-54849-FR) (p. 58).

Castaing, C., Metour, J. L., Billa, M., Donzeau, P., CHEVREMONT, P., Egal, E., ... al.

(2003). *Carte géologique et minière du Burkina à 1/ 1 000 000 du Burkina Faso.*

Burkina Faso: BRGM.

Castany, G., & Margat J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie (Editions du BRGM).

Dakouré, D. (2003). *Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du Bassin de Taoudéni (Burkina Faso-Mali)-Essai de modélisation* (Thèse de Doctorat).

Université Paris VI-Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Dara, A. E. (2017). *Caractérisation des processus de recharge d'un aquifère fracturé en milieu de socle sous climat sahélien : Cas du site de Tougou (Région du Yatenga au Burkina Faso)* (Mémoire de Master). 2iE, Ouagadougou.

Derouane, J. (2008). *Modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire* (Rapport final) (p.

101). Direction Générale des Ressources en Eau. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.

Derouane, J., & Dakouré, D. (2006). Etude hydrogéologique et modélisation du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudéni au Burkina Faso (p. 21). Présenté à Colloque international-Gestion des grands aquifères, Dijon, France.

Dipama, J. M. (2005). Le mécanisme général de la genèse des pluies et leur répartition au Burkina-Faso.

E. Boisvert, E. Bourque, N. Fagnan, R. Fortier, F. Girard, D. Larose-Charette, ... H. Vigneault. (2008). Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées. Bibliothèque et Archive nationales du Québec.

Gilli, E., Magnan, C., & Mudry, J. (2008). Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications (2<sup>e</sup> édition). Paris: Dunod.

Gnamba, F. maxime, Oga, Y. M. solange, Gnangne, T., Lasme, T., Biemi, J., & Kouakou, Y.

K. N. (2014). Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, Vol.10(No. 5), 79-98.

Gombert, P. (1998). *Synthèse sur la géologie et l'hydrogéologie de la formation sédimentaire des grès inférieurs* (Programme RESO. Sous-programme Ressources en Eau No. R53GRINF.DOC) (p. 29).

Gramont, H. M. D., Savadogo, A. N., & Dakoure, D. (2017). *Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au Burkina Faso. P162723. Annexe 1:Diagnostic sur les eaux souterraines*. La Banque Mondiale.

Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>

Hottin, G., & Ouedraogo, O. . (1975). *Notice explicative de la carte à 1/1.000.000 de la République de HAUTE-VOLTA* (édition du B.R.G.M.). Paris.

Huneau, F., Dakoure, D., Celle-Jeanton, H., Vitvar, T., Ito, M., Traore, S., ... Le Coustumer, P. (2011). Flow pattern and residence time of groundwater within the south-eastern Taoudeni sedimentary basin (Burkina Faso, Mali). *Journal of hydrology*, 409(1-2), 423–439.

IWACO. (1987). *Rapport final des travaux de forages. Ouagadougou, Ministère de l'eau*. Ouagadougou: Ministère de l'eau.

Keijer, M. (1990). *Etude hydrogéologique*. Ouagadougou: Ministère de l'eau.

Koïta, M., Sandwidi, W. J. P., & Dara, A. E. (2017). Recharge Estimation of Hard Rock Aquifers under Sahelian Climate Conditions Using Water Table Fluctuation: Case

- Study of Tougou Catchment, Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 09, 1428. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912092>
- Koudou, A., N'Dri, B. E., Niamke, K. H., Adjiri, O. A., Sombo, A. parfait, & Nangoran, K. C. (2016). Productivity analysis and pollution vulnerability estimation for the optimization of boreholes implementation in the hard rock aquifers of N'zi watershed (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, (n°38), 149-164.
- Koussoubé, Y. (2010). *Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (bassin de sourou): Burkina Faso/Mali* (Thèse de Doctorat). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, Paris, France.
- Lislie, R. J., Brabham, P. J., & Barnes, J. W. (2011). *Basic Geological Mapping* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Mboudou, E. G. (2017). Caractérisation de la productivité des aquifères de la région de l'extrême Nord, Caméroun. *Journal of the Cameroon Academy of Sciences*, Vol. 14(No. 1), 25-38.
- Ndiaye, D. (2008). *Description et évaluation de la réalimentation des aquifères de la région de Bobo Dioulasso par les précipitations météorologiques* (Memoire de Master). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Ouedraogo, C. (1981). *Etude géologique des formations sédimentaires du bassin Précambrien supérieur et Paléozoïque de Taoudéni en Haute-Volta. Rapport de mission Février-Mars-Avril 1981* (Rapport de Mission Février-Mars-Avril 1981 No. Série X n°45).

- Ouedraogo, C. (2006). *Synthèse géologique de la région Ouest du Burkina Faso* (Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (P/VREO) No. Rapport définitif). Ouagadougou, Burkina Faso: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.
- Ouedraogo, I. (1994). *Géologie et Hydrogéologie des formations sédimentaires de la Boucle du Mouhoun (Burkina Faso)* (Thèse de Doctorat). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar, Sénégal.
- Sauret, E. S. G. (2008). *Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou* (Mémoire de DEA). Université de Liège (ULG), Liège, Belgique.
- Sauret, E. S. G. (2013). *Etude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso)* (Thèse de Doctorat). Université de Liège (ULG), Liège, Belgique.
- Sogreah Ingénierie. (1994). *Etude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo Dioulasso* (No. Rapport final). Ouagadougou, Burkina Faso: Direction des Etudes et de la Planification. Ministère de l'Eau.
- Taupin, J. D. (2017). *Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins protégés de la région du Sahel. RAF/7/011. Bassin de Taoudéni*. Vienne, Autriche: AIEA.
- Trompette, R. (1973). *Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (bordure occidentale du bassin de Taoudeni, Afrique de l'Ouest), un exemple de sédimentation de craton. Étude stratigraphique et sédimentologique -*



*TOME 2 (Séries 2 et 3)* (Thèse de Doctorat). Université de Provence - Aix-Marseille I.

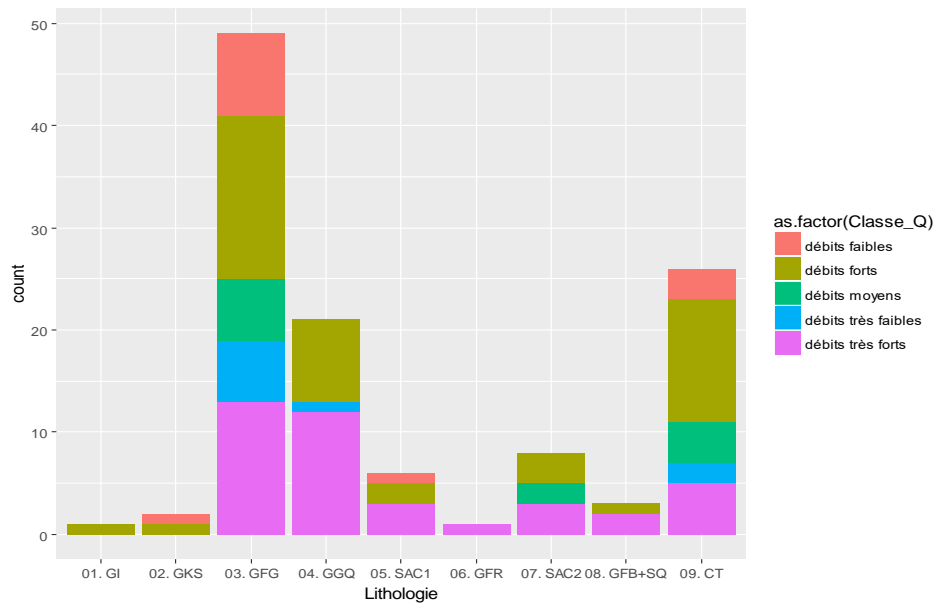
Consulté à l'adresse <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00695813/document>

Yao, K. A., Kouassi, A. M., Koffi, Y. B., & Biemi, J. (2010). Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 18(26).

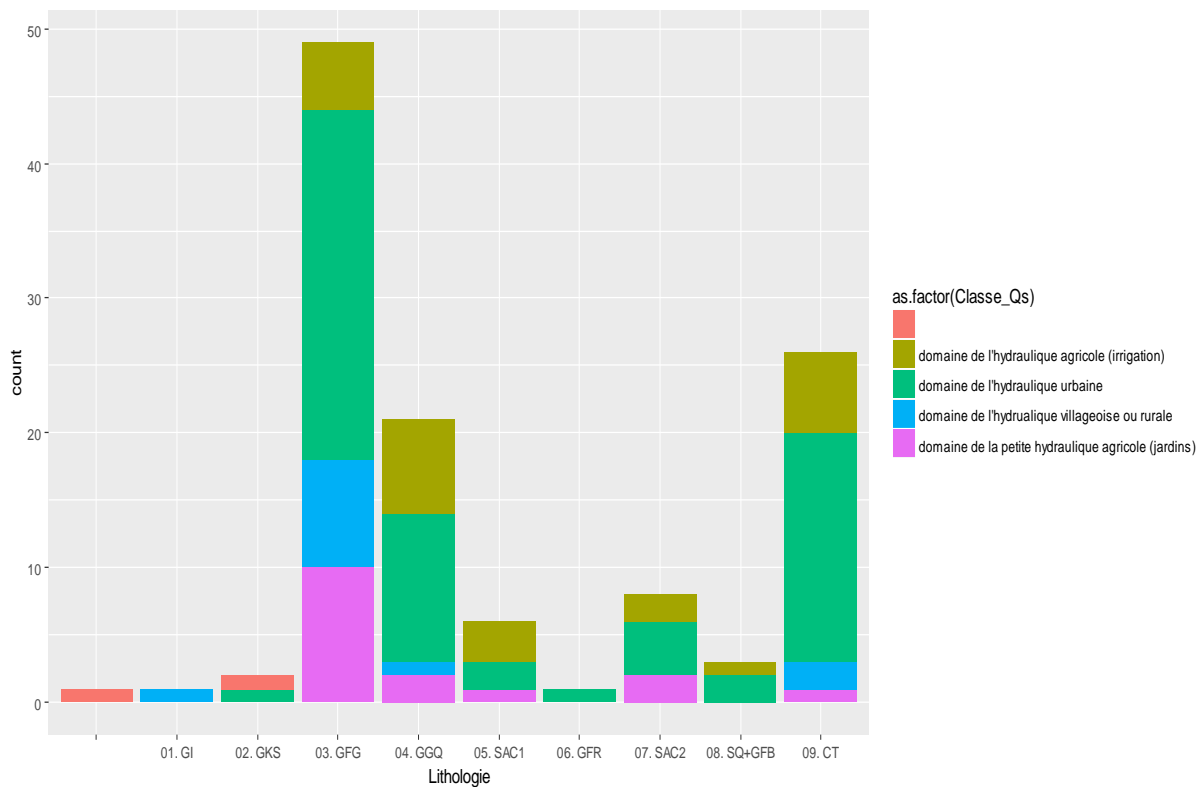
Yofe, T. J. (2016). *Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin de kou au Sud-Ouest du Burkina Faso* (Thèse de Doctorat). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)-Université Pierre et Marie Curie (UPMC).

## **ANNEXES**

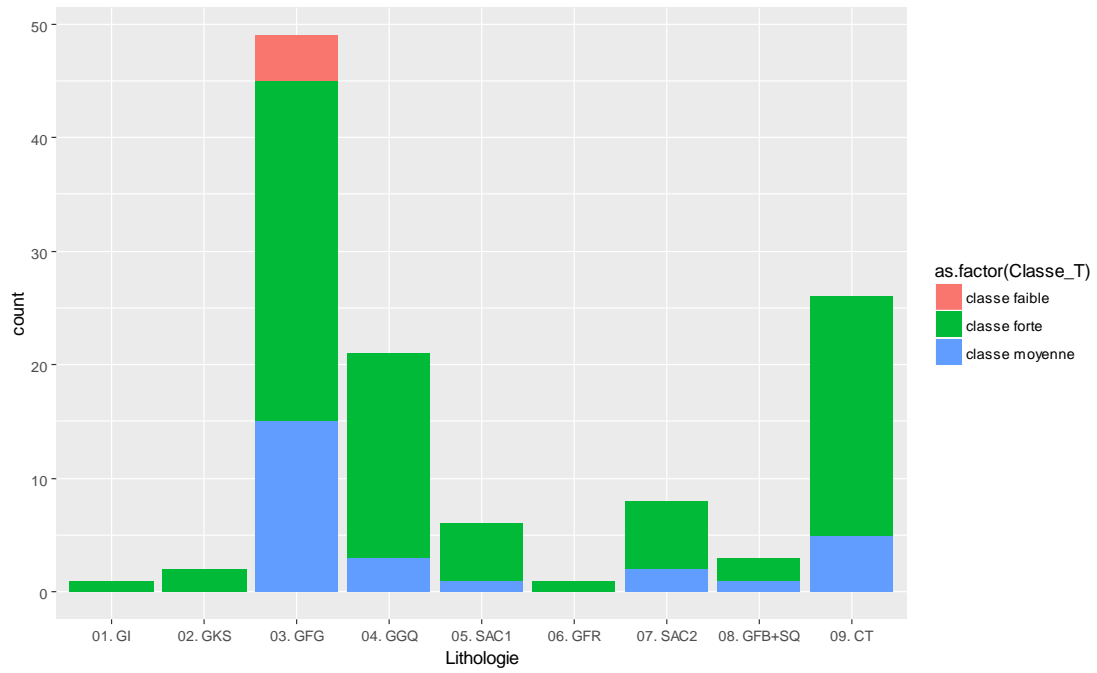
*Statistiques des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères*



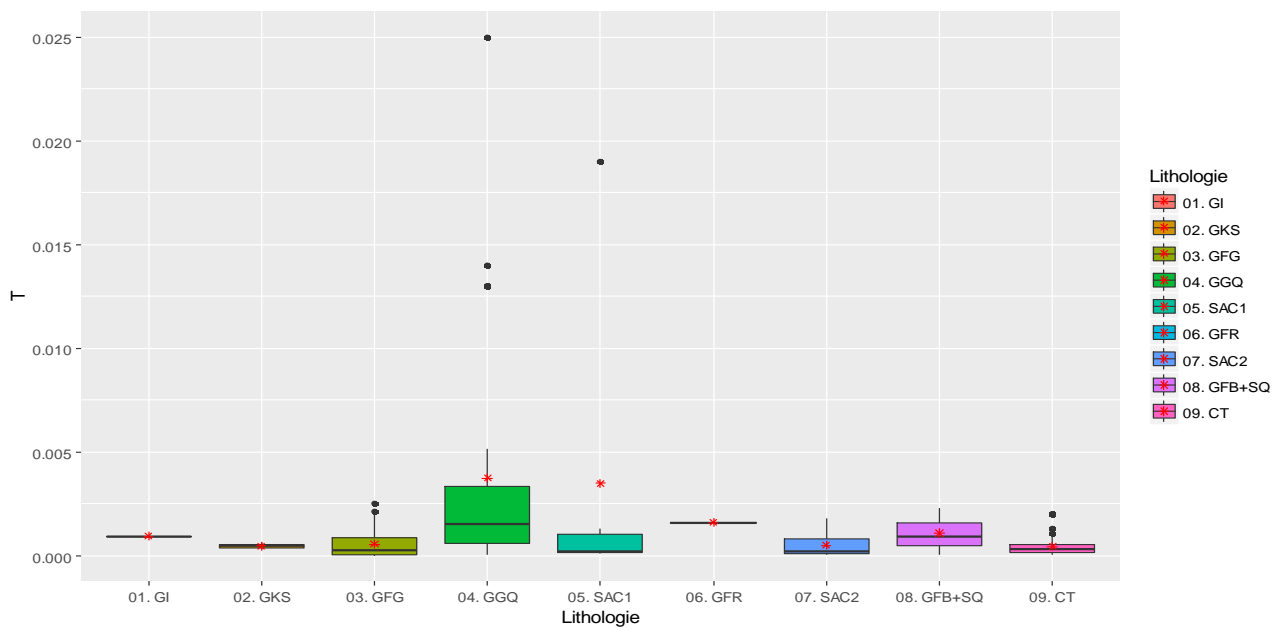
*Répartition des classes de débits d'exploitation par Lithologie*



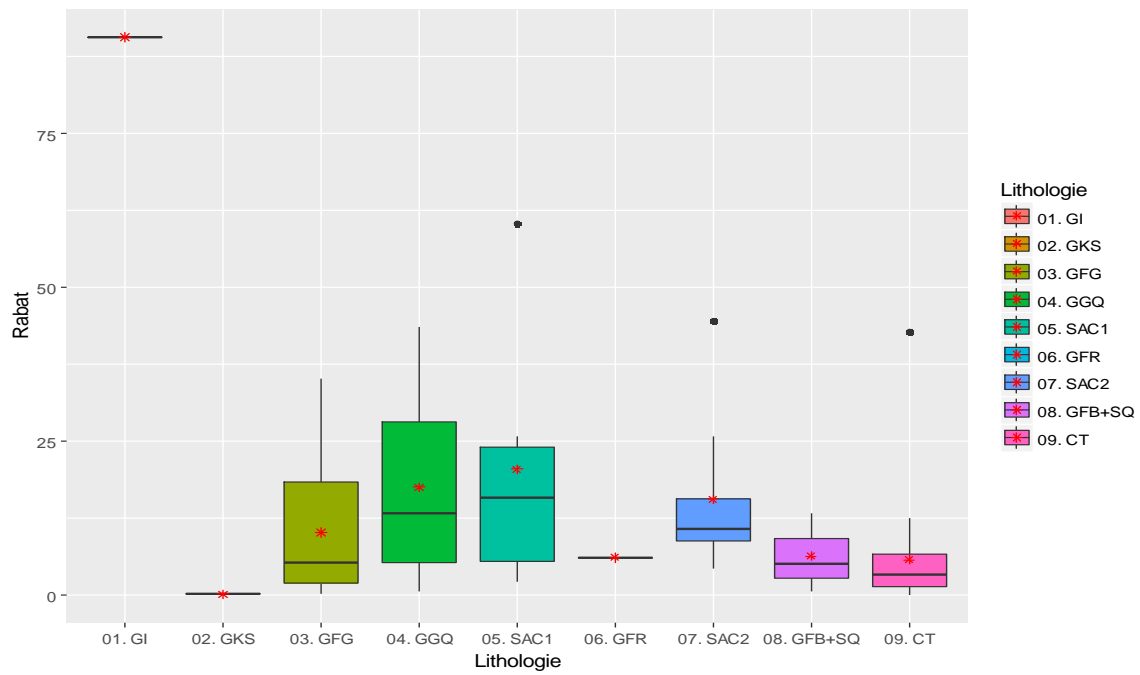
*Répartition des classes de débits spécifiques par Lithologie*



*Répartition des classes de transmissivités par Lithologie*



*Transmissivité par Lithologie*



*Rabatement par lithologie*