



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2018-2019

N° D'ORDRE : 0271/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002355

MASTER

GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

Option : HYDROGEOLOGIE

THEME:

**CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES
AQUIFERES FISSURES DANS LE PERMIS
D'EXPLOITATION DE LA MINE D'OR D'ANGOVIA
(Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

KONAN OI YAO NOEL XAVIER

JURY

Président : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : M. MANGOUA Oi Mangoua Jules, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement
le : 10 / 06 / 2020

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
DEDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS	v
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTES DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	4
1.1. Aspect géographique	5
1.1.1. Localisation d'Angovia	5
1.1.2. Relief	5
1.1.3. Sol.....	6
1.1.4. Végétation.....	6
1.1.5. Climat	6
1.2. Aspect hydrographique	7
1.3. Aspect socio-économique du bassin de la Marahoué.....	8
1.3.1. Populations	8
1.3.2. Activités économiques.....	8
1.3.2.1. Agriculture et élevage	8
1.3.2.2. Secteurs industriels et commerciaux.....	8
1.4. Contexte géologique et hydrogéologique.....	9
1.4.2. Géologie.....	9
1.4.3. Contexte hydrogéologique.....	10
1.5. Historique de la mine d'Angovia	11
1.6. Impacts d'une activité minière sur la disponibilité de la ressource en eau souterraine.....	12
1.6. Description de la caractérisation hydrogéologique	12
Conclusion partielle.....	12
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	14
2.1. Matériel	15
2.1.1. Données	15
2.1.1.1. Données climatologiques	15
2.1.1.2. Données cartographiques	15
2.1.1.3. Données d'essais de pompage et de piézométrie	15

2.1.2. Outils de traitement de données.....	16
2.2. Méthodes	16
2.2.1. Cartographie des linéaments.....	16
2.2.1.1. Prétraitement d'image Landsat Oli 8	17
2.2.1.2. Traitement numérique des images pour l'extraction des linéaments.....	17
2.2.1.3. Validation de la carte des linéaments.....	18
2.2.1.4. Analyse statistique de la fracturation	18
2.2.2. Evaluation de la variation du niveau d'eau	19
2.2.2.1. Estimation de la recharge.....	19
2.2.2.2. Etude piézométrique	21
2.2.3. Détermination des propriétés hydrauliques du système aquifère	22
2.2.3.1. Détermination de la transmissivité.....	22
2.2.3.2. Perméabilités des aquifères.....	22
2.2.3.3. Débits spécifiques	23
2.2.3.4. Relations entre les paramètres de productivité	23
Conclusion partielle.....	24
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	25
3.1. Résultats	26
3.1.1. Cartes des linéaments	26
3.1.2.2. Analyse statistique des linéaments.....	27
3.1.2.1. Validité de la carte des linéaments.....	28
3.1.2.3. Distribution des intensités de fracture.....	29
3.1.2. Variation du niveau d'eau.....	30
3.1.2.1. Recharge estimée.....	30
3.1.2.2. Etude piézométrique	31
3.1.2.2.1. Variation spatiale de la piézométrie.....	31
3.1.2.2.2. Variation temporelle de la piézométrie.....	33
3.1.2.2.3. Evolution de la piézométrie en fonction de la pluviométrie	37
3.1.3. Propriétés hydrauliques du système aquifère	39
3.1.3.1. Transmissivité	39
3.1.3.2. Perméabilités du système aquifère.....	39
3.1.3.3. Débits spécifiques	40
3.1.4.4. Corrélation entre paramètres de forage.....	40
3.2. Discussion	43

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46
REFERENCES.....	48

DEDICACE

À la mémoire de mon père **KOUADIO Konan Marcellin** et de ma mère **FRONO Kan** !
Sachez que vos efforts et souffrances pour moi n'ont pas été vains ! Que Dieu, lui-même, se souvienne de tout cela et vous maintienne le plus longtemps en vie afin que vous bénéficiiez des fruits de vos efforts.

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail, nous voudrions remercier tous ceux qui, à travers un appui scientifique ou un soutien moral, financier et affectif nous ont aidé à réaliser ce mémoire. Nous rendons grâce à "**Dieu Tout Puissant**" sans qui rien n'est possible ici-bas.

Nous tenons à remercier le premier responsable de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, en occurrence le **Prof. TIDOU Abiba Sanogo épouse Koné**, Professeur Titulaire, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) pour avoir accepté notre inscription en Master de Génie de l'Eau et de l'Environnement et pour la formation de qualité dont nous avons bénéficiée.

Nous exprimons notre gratitude au Directeur de l'UFR Environnement, **Dr KOUASSI Kouakou Lazare**, Maître de Conférences, pour le travail acharné qu'il accomplit à la tête de l'UFR. Docteur, vous n'êtes pas seulement Directeur mais bien plus, vous êtes un grand travailleur, un père attentif et prêt à tout pour que vos enfants que nous sommes soient toujours dans les meilleures conditions d'apprentissage. Vous êtes une source d'inspiration pour nous en nous inculquant l'amour du travail et surtout du travail bien fait.

Nous tenons également à exprimer toute notre gratitude envers les personnes qui ont contribué à l'amélioration de ce travail. Il s'agit de :

- **Dr DIBI Brou**, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), de nous avoir fait confiance et d'avoir accepté de diriger ce mémoire. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour votre disponibilité, votre engagement tout au long de ce travail de recherche. Vous nous avez communiqué votre passion pour l'hydrogéologie et nous a fait profiter de votre expérience. Merci pour tout !
- **Dr MANGOUA Oi Mangoua Jules**, Maître-Assistant, qui a accepté l'encadrement de ce travail. Nous vous remercions Docteur pour votre disponibilité et vos critiques pertinentes. Merci infiniment pour votre inestimable soutien scientifique et moral, pour vos précieux conseils et pour votre sympathie ! Vous nous avez beaucoup appris. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Merci à **YAO Michel de la société Perseus Yaoure Sarl** de la mine d'Or d'Angovia pour les données techniques qu'il nous a fournies .

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos aînés du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour leur soutien et encouragement, plus particulièrement **M. KOUADIO Kouamé Jean Olivier, M. OUATTARA Gningéri Souleymane, M. TOURE Fanraban Fabrice, M. KOFFI Bérenger, M. KOUASSI Kouassi Jean Michel et M. KONAN Yao Emile Desmond.**

A tous nos aimables amis de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement, nous leur disons merci pour le soutien.

Merci à toute ma famille spirituelle, en particulier **M. GBEHI Mobio et M. KAPO Zika François,** les guides, pour leurs conseils et prières qui sont porteurs de grands biens.

A ma tante, **Mlle. SAHI Monhan,** qui ces années durant, n'a cessé de m'apporter son assistance dans les moments les plus difficiles. Merci pour tout le service rendu puisse Dieu te le rendre au centuple.

Nos remerciements vont également à l'endroit des parents sans exception pour tout le soutien dont nous avons bénéficié durant cette quête du savoir, en particulier mes frères, cousins et nièces avec qui je vis au quotidien. Les mots ne suffiront pas pour exprimer la gratitude. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Cette liste est non exhaustive ; ainsi que tous ceux qui de loin comme de près nous ont aidé à la réalisation de ce mémoire et dont les noms n'y figurent pas, reçoivent ici l'expression de notre gratitude.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

DHH	:	Direction de l'Hydraulique Humaine
SIG	:	Système d'Information Géographique
UJLOG	:	Université Jean Lorougnon Guédé
LSTE	:	Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à Angovia de 2009-2018.	31
Tableau II : Différentes classes de Transmissivité dans la zone d'Angovia	39
Tableau III : Résultats des perméabilités des aquifères	40
Tableau IV : Résultats des débits spécifiques.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	5
Figure 2 : Diagramme Ombrothermique du complexe sucrier de Zuénoula sur la période de 1983-2015.....	7
Figure 3 : Réseau hydrographique d'Angovia	7
Figure 4 : Carte géologique de la zone d'Angovia	10
Figure 5 : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Lachassagne <i>et al.</i> , 2011).	11
Figure 6 : Répartition des ouvrages hydrauliques sur la zone d'étude	16
Figure 7 : Image traitée par filtre Sobel de direction NO-SE rehaussant les linéaments.....	26
Figure 8 : Carte des linéaments détaillés du site minier d'Angovia.....	27
Figure 9 : Rosaces directionnelles des linéaments	27
Figure 10 : Rosaces directionnelles selon Adon <i>et al</i> (2019) et Koffi <i>et al</i> (2013)	28
Figure 11 : Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique et les linéaments	29
Figure 12 : Carte de densité de fracturation exprimée en longueur cumulée de (5 km×5 km)	30
Figure 13 : Carte piézométrique de basses eaux Janvier 2015.....	32
Figure 14 : Carte piézométrique des hautes eaux Mai 2015.	33
Figure 15 : Nappe à cotes piézométriques de faible amplitude de variation	35
Figure 16 : Nappe à cotes piézométriques de fortes amplitudes de variation.....	37
Figure 17 : Variation des cotes piézométriques en fonction de la pluviométrie en	39
Figure 18 : Distribution des débits en fonction des classes	41
Figure 19 : Corrélation entre débit et profondeur totale.....	41
Figure 20 : Corrélation entre transmissivité et débit.....	42
Figure 21 : Corrélation transmissivité et profondeur totale	42
Figure 22 : Corrélation entre Arrivée d'eau et profondeur totale	43

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau, source de vie, est nécessaire pour le développement économique et social de toutes les nations. Son absence et/ou sa présence peut être source de conflits. En effet, lorsque les ressources en eau sont réduites et que différents groupes d'intérêts se manifestent, des réactions concurrentielles et conflictuelles peuvent apparaître (BAD, 2000). Partout dans le monde, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur les ressources en eau de surface est à la hausse, principalement en raison de la demande croissante, de la dégradation de la qualité de l'eau Mangoua *et al.* (2019) et des changements climatiques (Yao, 2015). Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines sont considérées comme l'une des sources les plus appropriées pour l'approvisionnement en eau potable du fait de leur grande capacité de stockage ainsi que leur faible exposition aux polluants (Guergazi & Achour, 2005) ; (Ehoussou *et al.*, 2018). Cependant, l'accès à cette ressource précieuse devient très difficile à cause de la méconnaissance du fonctionnement du système aquifère surtout dans les régions situées en milieu de socle (Kouassi *et al.*, 2019). En Côte d'Ivoire, elle est utilisée par les populations pour l'adduction en eau potable, surtout en milieu rural, par la réalisation des puits traditionnels, des systèmes d'Hydraulique Villageoise (HV) et d'Hydraulique Villageoise Amélioré (HVA). Le site minier d'Angovia qui est notre cadre de travail, est situé dans une zone rurale, où l'approvisionnement en eau potable des populations se fait généralement avec les eaux souterraines à partir de puits et de forages. Toutefois, cette ressource reste menacée par l'exploitation minière. En effet, pendant l'extraction des minerais cette eau est souvent pompée pour dessécher les fosses d'exploitations. Ces pompages en vue de maintenir les galeries et les fosses à sec afin d'extraire le minerai, pourraient abaisser le niveau d'eau de la nappe phréatique, affecter les écoulements souterrains et occasionner le tarissement de certaines sources d'eau destinées à la consommation par les populations locales (Ferrand & Villeneuve, 2001). Nous avons l'exemple des mines dans le nord-est du Nevada qui ont occasionné le pompage de plus de 580 milliards de gallons d'eau entre 1986 et 2001 (Ferrand & Villeneuve, 2013). Or sur le site minier d'Angovia aucune étude sur le fonctionnement du système aquifère n'a été menée. Les caractéristiques de ce système aquifère doivent être déterminées, afin de garantir les différents besoins en eau, et éviter aux populations de se tourner vers des eaux superficielles polluées pouvant transmettre de nombreuses maladies hydriques (ver de guinée, ulcère de burilli, dysenterie, etc.). C'est dans ce contexte que cette étude a été menée en vue de connaître les caractéristiques hydrogéologiques du système aquifère d'Angovia. Ainsi, trois objectifs spécifiques ont été définis ; il s'agit de :

- ✓ Elaborer la carte linéamentaire de la mine d'or d'Angovia ;
- ✓ Evaluer la variation du niveau d'eau du système aquifère ;

INTRODUCTION

- ✓ Déterminer les propriétés hydrauliques du système aquifère.

Pour mener à bien cette étude, ce travail a été subdivisé en trois parties qui se présentent comme suit :

- ❖ Partie 1 : Généralités qui font une description des aspects géographique, hydrographique, socio-économique, hydrogéologique et géologique ;
- ❖ Partie 2 : Matériel et Méthodes qui sont utilisés pour la réalisation de ce travail ;
- ❖ Partie 3 : Resultats et Discussion qui analysent et interprètent les principaux résultats obtenus. Une conclusion qui fait la synthèse des principaux résultats obtenus, et des perspectives mettent fin à cette étude.

PARTIE 1 : GENERALITES

GENERALITES

1.1. Aspect géographique

1.1.1. Localisation d'Angovia

La mine d'or d'Angovia située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire dans la région de la Marahoué est comprise entre les longitudes 5°19 et 5°31 Ouest et les latitudes 6°53 et 7°05 Nord et couvre une superficie de 50 km² (Figure 1). Le site est un gisement économiquement exploitable de 6 800 000 onces (environ 222,27 kg) de ressources minérales, le plus important dans le secteur aurifère en Côte d'Ivoire Anonyme 1 (2015). Il est situé dans une zone rurale, à mi-chemin entre les villes de Yamoussoukro et Bouaflé (Affian *et al.*, 2004).

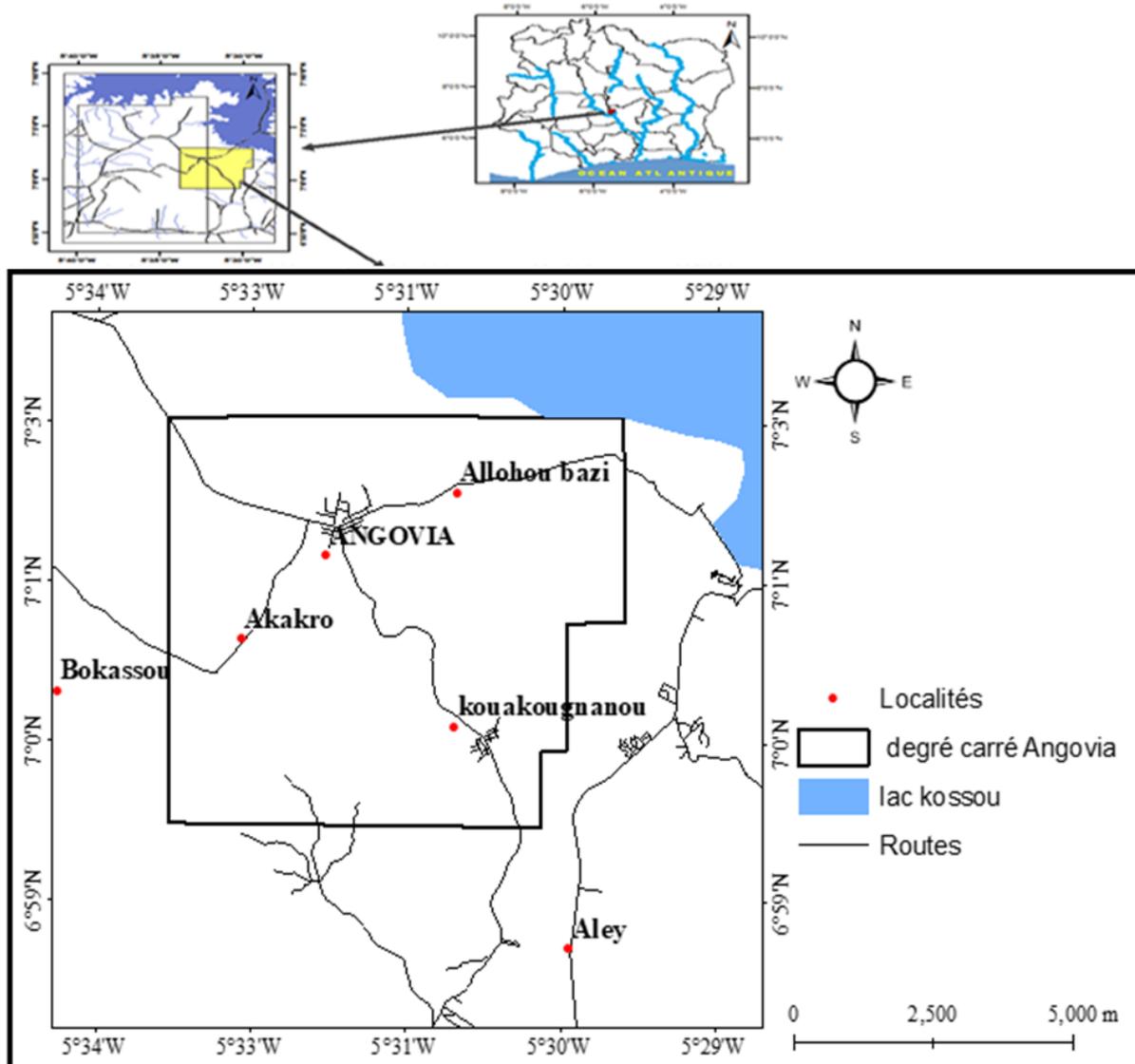


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.1.2. Relief

Le relief de la région de la Marahoué est constitué de plateaux, de plaines et très peu accidenté avec une altitude moyenne de 250 mètres. Cependant on y trouve quelques élévations dont le

GENERALITES

Mont Lotanzia (652 m) de la chaîne Baoulé qui s'étend à l'Est de Bouaflé (Kouamé & Koffi, 2007).

1.1.3. Sol

Les sols sont pour la plupart ferrallitiques, moyennement désaturés à dominance argilo-sableux. Ils se caractérisent par un horizon humifère peu épais mais riche en matières organiques, faiblement acide et bien structuré. Ces sols offrent une bonne aptitude agricole et se prêtent bien à la cacao culture (Kouamé & Koffi, 2007).

1.1.4. Végétation

La végétation se présente comme une mosaïque de forêt semi-décidue et de savane. La savane dans cette région ressemble à une zone intermédiaire entre la savane herbeuse et les savanes arborée et arbustive (Dibi *et al.*, 2008). Elle est perturbée par les activités agricoles pratiquées surtout au bas et sur les flancs des collines, ainsi que par les activités de prospection et d'exploitation minière. On note toutefois la présence de forêt galerie, plus dense, aux abords des rives du Bandama blanc, des îlots forestiers au niveau des montagnes et des collines avec des végétaux tels que les Caesalpiniaceae, des Convolvulaceae, des Apocynaceae, des Poaceae et des Asteraceae et caractérisée par un sous-bois touffu et influencé par la présence des plantes épineuse (Kouamé & Koffi, 2007).

1.1.5. Climat

La région de la Marahoué est soumise à un climat tropical de transition avec une saison sèche et une saison pluvieuse. La saison sèche part de Novembre à Février et la saison des pluies débute en Mars et prend fin en Octobre (Figure 2). La pluviométrie moyenne de la région de la Marahoué enregistrée dans le complexe sucrier de Zuénoula sur la période 1983 à 2015 est de 1190 mm. Le mois le plus sec est Janvier avec 10,2 mm et le mois le plus humide est celui de Septembre avec une hauteur de pluie moyenne annuelle de 191,6 mm.

La température moyenne annuelle est de 26,9°C. L'amplitude thermique est de 3,5 °C. Le mois le plus chaud de l'année est celui de mars avec une température moyenne de 29 °C. Le mois d'Août est le plus froid de l'année, la température moyenne est de 25,6 °C (Figure 2).

GENERALITES

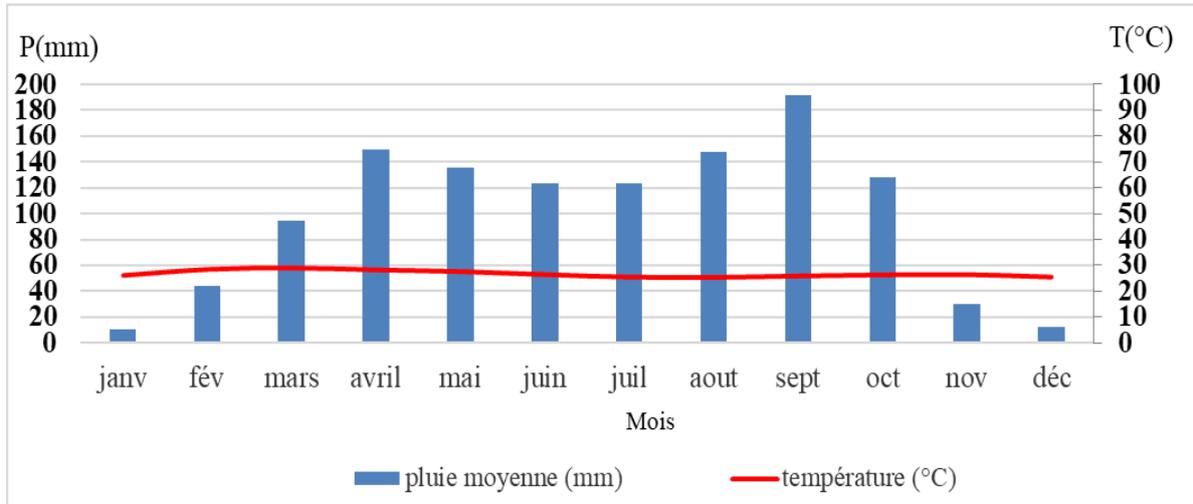


Figure 2 : Diagramme Ombrothermique du complexe sucrier de Zuénoula sur la période de 1983-2015

1.2. Aspect hydrographique

La région de la Marahoué est drainée par le fleuve Bandama dont les affluents sont le Bandama blanc et le Bandama rouge. Quant à la zone aurifère, elle est drainée par le lac kossou et des cours d'eaux non permanents (figure 3).

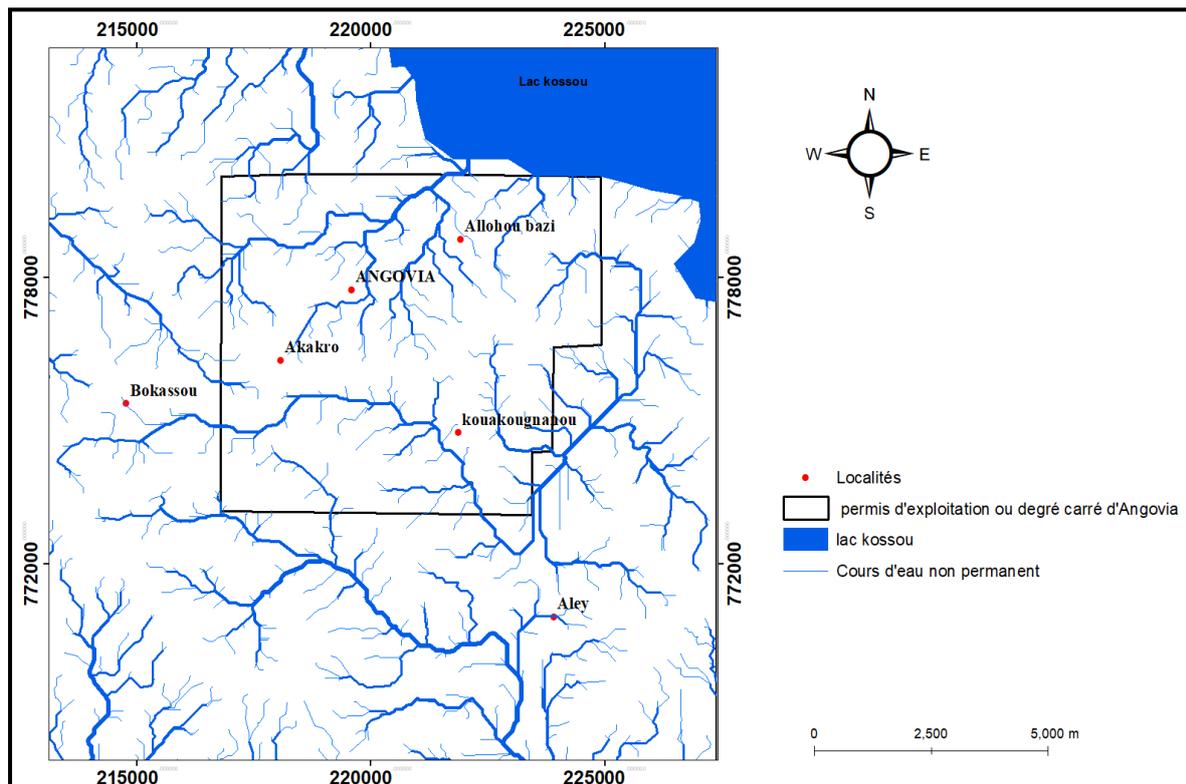


Figure 3 : Réseau hydrographique d'Angovia

GENERALITES

1.3. Aspect socio-économique du bassin de la Marahoué

1.3.1. Populations

La population du bassin de la Marahoué est estimée à 862 344 habitants en 2014 (INS, 2015). Elle est constituée de communautés ethniques différentes selon les régions. Ainsi, on y rencontre majoritairement : les peuples Gouros, Baoulé et Yaouré (dans les régions Sud de Bouaflé et au Nord de Zuénoula), puis les Malinkés et les Sénoufos peuplant majoritairement les régions septentrionales du bassin. Certains peuples tels que les Mona et les Ouan occupent les zones de Konahiri et Kongasso. De nombreuses populations de la sous-région ouest africaine se sont installées dans les zones forestières sud du bassin, attirées par des terres plus productives (Djè bi, 2015). Le site minier d'Angovia qui est le cadre de travail, est le gisement le plus important dans le secteur aurifère en Côte d'Ivoire. Il est situé dans une zone rurale, avec une population d'environ 2400 habitants (Ouattara, 2015).

1.3.2. Activités économiques

1.3.2.1. Agriculture et élevage

L'agriculture est la première activité génératrice de revenu et elle contribue à la subsistance des populations de ces régions. Elle est essentiellement pluviale aussi bien pour les cultures de subsistances que de rentes (MINAGRI, 2004). Les cultures de subsistance ou vivrières (la banane plantain, l'igname, le maïs, le riz et le manioc occupent une place importante dans le tissu économique de la Marahoué. A celles-ci s'ajoutent les maraîchères (tomate, choux, poivron...).

1.3.2.2. Secteurs industriels et commerciaux

Le tissu industriel se résume en grande partie à l'artisanat (tisserand, forgeron) et aux compagnies intervenant dans le domaine agroalimentaire. Ces compagnies sont entre autres SUCRIVOIRE à Zuénoula et SOLIBRA à Bouaflé. Aussi, la zone yaouré, en allant de Bozi jusqu'à Kouakougnanou, Angovia, Allahou-Bazi, Akakro, N'dakoffiyobouékro constitue un centre d'intérêt minier pour la production d'Or.

L'on distingue deux (02) circuits commerciaux : traditionnel et moderne. L'activité du circuit traditionnel s'exerce sous des marchés couverts et des hangars. Elle porte sur le commerce de denrées alimentaires d'origine agricole et halieutique ainsi que certains produits de première nécessité. Le commerce moderne est détenu par des opérateurs d'origine étrangère, notamment de la CEDEAO et du Liban avec une minorité d'Ivoiriens.

GENERALITES

1.4. Contexte géologique et hydrogéologique

1.4.2. Géologie

La Figure 4 présente la carte géologique du site minier d'Angovia réalisée par Anonyme 2 (2008). Dans cette unité, le Yaouré forme un synclinal de tholéitiques métavolcaniques recouverts par des sédiments volcaniques plus acides (Anonyme 2, 2008) *in* (Ouattara, 2017). Les roches tholéitiques sont supposées avoir été formées à la suite de modifications hydrothermales. Les acides recouvrant les roches sédimentaires sont considérés comme représentants pyroclastiques et des coulées pyroclastiques acides. Toutes les roches au-dessus ont été pénétrées à la base par des roches ultra plutoniques et des roches volcano-plutoniques acides intermédiaires calco-alcalines et l'ensemble est recouvert à son tour par le conglomérat polygénique Benou. Toutes ces roches ont été déformées par une série de cisaillement d'Est en Ouest et recoupées par des veines de quartz grisâtre. Des profils d'altération latéritique primaire et secondaire sont également développés tout au long de la zone au-dessus du conglomérat. La minéralisation aurifère semble être principalement située dans des zones d'altération contrôlée par la structure dans des roches volcaniques intermédiaires (Anonyme 2, 2008).

GENERALITES

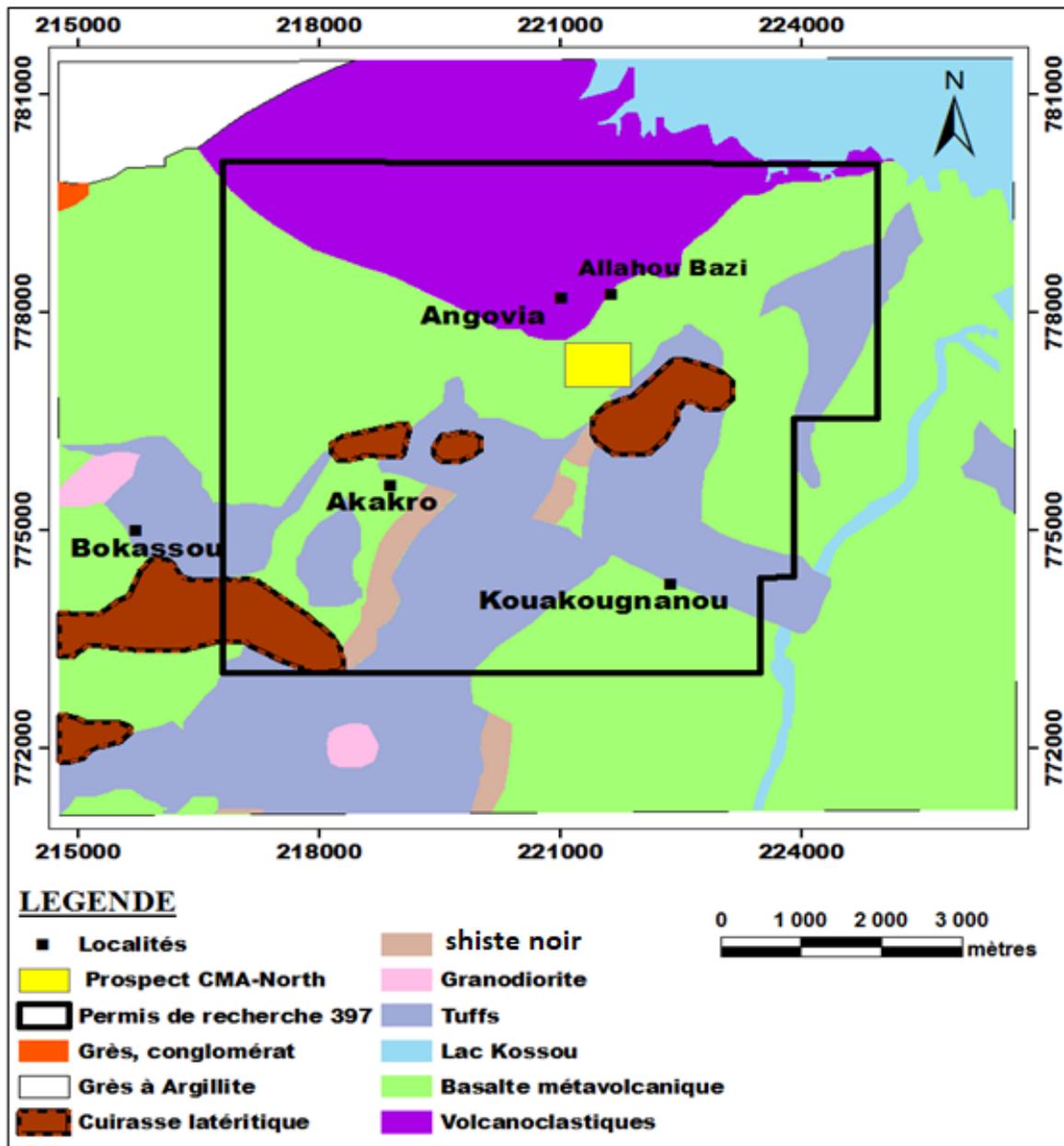


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'Angovia

1.4.3. Contexte hydrogéologique

Dans la zone d'étude, il existe deux types d'aquifères : les aquifères d'altérites et les aquifères fracturés. Les aquifères d'altérites sont des formations de surface résultant des processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ils se développent dans les formations argilo-sableuses et dans les arènes granitiques. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie. Son niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). Les réserves d'eau dans ces réservoirs sont tributaires de la perméabilité et de l'épaisseur de ces altérites. Les aquifères de fissures qui sont sous-jacents aux aquifères d'altérites constituent des

GENERALITES

réservoirs beaucoup plus importants. Ces aquifères naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre (Sawadogo, 1984) (Figure 5). Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites (Maréchal *et al.*, 2003). Les possibilités de formation des aquifères de fissures sont liées à la densité et à l'importance de la fracturation de ceux-ci (Sawadogo, 1984; Biémi, 1992). Leur importance est liée à l'existence de fractures ouvertes (Soro, 2002). A l'affleurement, les fractures se présentent sous forme de diaclases, de joints, de fentes et de failles de différentes dimensions. Leur cartographie est possible à partir des travaux de géophysiques, de géomorphologie, de photographies aériennes, d'images satellitaires, etc.

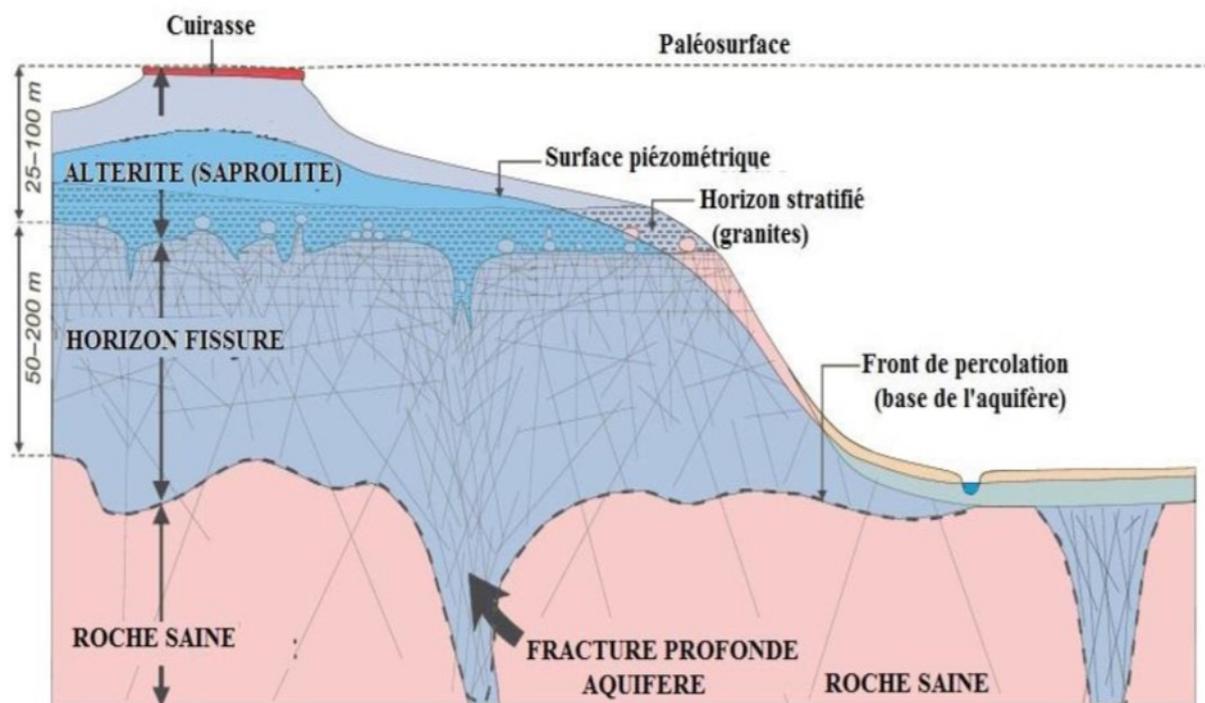


Figure 5 : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Lachassagne *et al.*, 2011).

1.5. Historique de la mine d'Angovia

Les travaux de prospection dans la région du "Yaouré", ont commencé depuis les années 1920 par des prospecteurs travaillant pour leur propre compte ou celui de compagnies privées. Ces travaux se sont poursuivis avec la Direction des Mines de l'Afrique Occidentale Française (AOF), puis par le Bureau de Recherches Géologique et Minière (BRGM, France) pour aboutir à la découverte d'un gisement d'or en 1993. Le permis d'exploitation a été attribué à une société dénommée « Compagnie Minière d'Afrique (CMA) » qui a exploité une partie du gisement de 1998 à 2003. Le permis a été ensuite repris par la compagnie CLUFF GOLD (WA) Côte

GENERALITES

d'Ivoire qui a développé, de 2004 à 2007, des travaux de certification et entamé en fin 2007, l'exploitation du gisement additionnel des "Monts Yaouré". La mine d'or de yaouré à Angovia couvre une superficie 50 Km² (Kokobou, 2017).

1.6. Impacts d'une activité minière sur la disponibilité de la ressource en eau souterraine

L'extraction de l'or peut épuiser des bassins d'eau souterraine et de surface. Au Nevada, l'Etat le plus sec des États-Unis, l'eau est drainée de la Humboldt river jusqu'à Carlin Trend pour l'extraction de l'or. Ainsi, 580 milliards de gallons d'eau ont été pompé par les miniers entre 1986 et 2001 (assez pour alimenter les robinets de New-York pendant plus d'une année). En Arizona du Sud, l'eau souterraine pompée du bassin Santa Cruz pour une usine de cuivre, réduit de plus en plus la nappe phréatique et assèche la rivière (FEPS, 2008). Aussi, la prospection et l'exploitation des ressources minérales et énergétiques en Afrique, impliquent des activités qui potentiellement peuvent affecter de manière significative la quantité des ressources en eau souterraine existantes dans ces zones. Ce dénoyage des ouvrages souterrains est une composante normale de toute exploitation minière. Ce dénoyage abaisse nettement la nappe phréatique, ce qui affecte les écoulements souterrain et l'assèchement des aquifères peu profonds. À l'échelle locale, il peut y avoir des pénuries d'eau pour les communautés en raison de l'assèchement d'eau de surfaces (ruisseaux, rivières, étangs, marécages, lacs) (AGW-NET, 2015).

1.6. Description de la caractérisation hydrogéologique

La caractérisation hydrogéologique est l'action de caractériser les systèmes aquifères. C'est le fait de distinguer les différents éléments qui conditionnent l'eau dans le souterrain. Ainsi, faire une caractérisation hydrogéologique revient à déterminer la géométrie des aquifères (différentes formations de la zone et leurs différentes épaisseurs), déterminer les propriétés hydrodynamiques (transmissivité, conductivité hydraulique, la porosité efficace) et d'étudier le fonctionnement du système aquifère (piézométrie). Concrètement, elle a pour but de faire le suivi de la piézométrie, de voir si cela s'organise en une nappe continue, et d'interpréter les essais de pompage pour tirer des informations sur les paramètres de l'aquifère (Ouédraogo, 2016).

Conclusion partielle

La présente partie a servi à faire une description des aspects géographique, hydrographique, socio-économique, hydrogéologique et géologique ainsi qu'une description succincte de la

GENERALITES

caractérisation hydrogéologique. Au plan hydrographique, le permis d'exploitation qui a une superficie d'environ 50 km², est situé en zone de climat de tropical de transition et est caractérisé par un relief très peu accidenté. La température moyenne annuelle est de 26,9°C et la hauteur moyenne de pluie annuelle est de 191,6 mm sur la période de 1983 à 2015. Le réseau hydrographique est composé essentiellement du lac Kossou et de quelques cours d'eaux temporaires. Sur le plan géologique, le site est situé en zone de socle dans un synclinal de tholéitiques métavolcaniques recouverts par des sédiments volcaniques plus acides. Sur le plan hydrogéologique, deux types d'aquifère ont été mis en évidence dans les travaux antérieurs. Il s'agit des aquifères d'altérites et des aquifères fissurés. La caractérisation hydrogéologique a permis de mettre en évidence les différents les différents concepts indispensables à la compréhension du comportement de l'eau dans le souterrain.

Dans la partie suivante du travail nous présenteront le matériel d'étude ainsi les méthodologies adoptées pour la caractérisation hydrogéologique.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

2.1.1. Données

Pour mener à bien cette étude, nous avons utilisé des données climatologiques, des données de cartographie, de forages et de piézomètres.

2.1.1.1. Données climatologiques

Les données climatologiques proviennent de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Ce sont les données de pluies et de températures observées dans le complexe sucrier de Zuénoula sur la période 1983 à 2015 et à la station d'Angovia sur la période 2009-2018. Ces données ont permis respectivement de tracer le diagramme ombrothermique et de faire le bilan hydrologique de la Zone.

2.1.1.2. Données cartographiques

Les données cartographiques utilisées sont les images satellitaires de Landsat Oli 8 enregistrées le 17/02/2020 et concernent la zone 30 de l'hémisphère Nord de résolution 30 m × 30 m. Elles nous ont permis d'établir la carte du réseau des linéaments.

2.1.1.3. Données d'essais de pompage et de piézométrie

Les données d'essai de pompage proviennent respectivement des fiches d'essai de pompage de 11 forages notés ESIAG1, ESIAG2, ESIAG3, ESIAG4, ESIAG5, ESIAG6, ESIAG7, ESIAG8, ANGOVIAF2, YRC0765, YRC0766 et YRC0767 (Figure 6). Ces données ont été recueillies à la direction territoriale de l'hydraulique (DTH) de Bouaflé et auprès de la nouvelle société d'exploitation de la mine. Ces données concernent les épaisseurs d'altérites (EA), les arrivées d'eau (AE), la profondeur totale (Pt) et le niveau statique (NS). Les essais réalisés sont de courte durée (2 heures avec 2 heures de remontée). Les données piézométriques utilisées couvrent la période 2015 à 2017.

MATERIEL ET METHODES

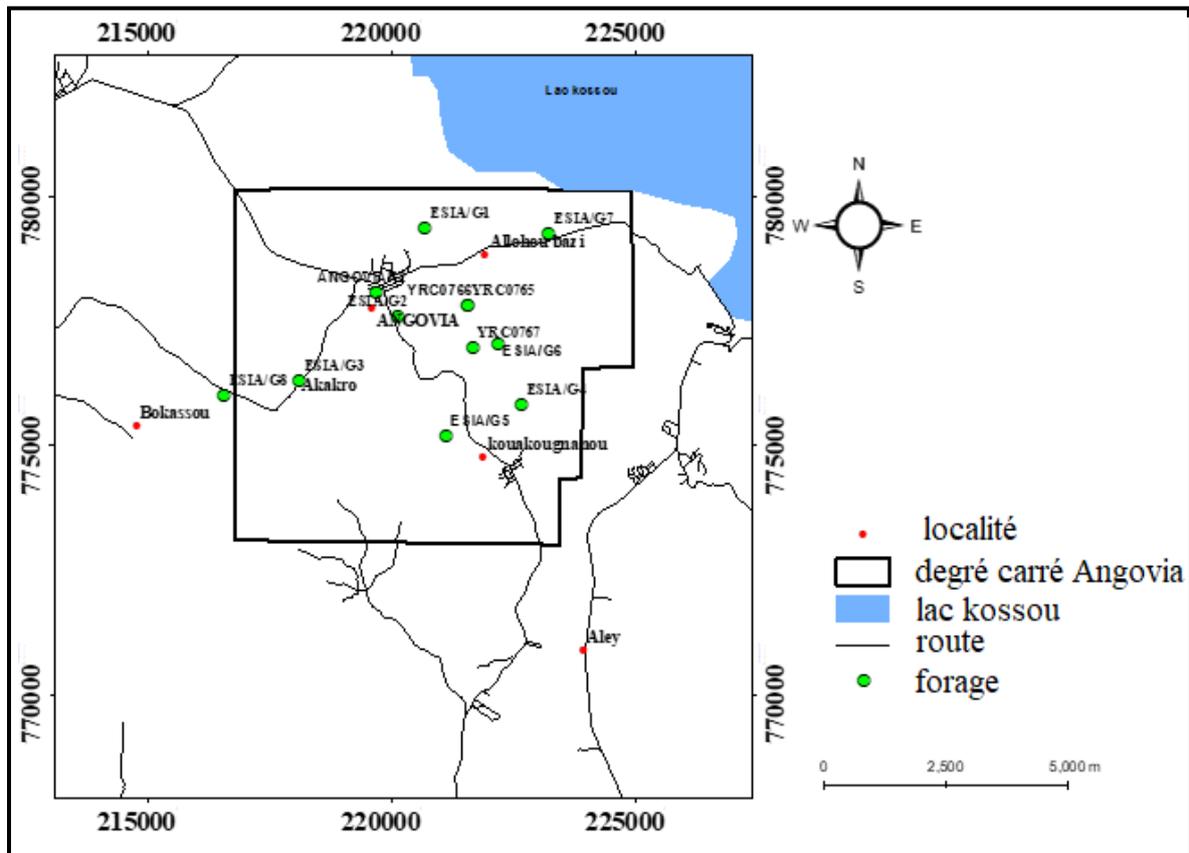


Figure 6 : Répartition des ouvrages hydrauliques sur la zone d'étude

2.1.2. Outils de traitement de données

Les outils de traitement de données nécessaires pour la réalisation de cette étude sont :

- le tableur Excel 2016 pour le traitement des données climatologiques et de forages;
- le logiciel ArcGIS 10.4.1 pour tracer les linéaments et réaliser les différentes cartes ;
- le logiciel Linwin 2.1 pour l'analyse statistique des fractures ;
- le logiciel Surfer 13 qui a permis la réalisation des cartes piézométriques.

2.2. Méthodes

2.2.1. Cartographie des linéaments

L'étude de la fracturation constitue la phase préliminaire à la recherche des réservoirs d'eau souterraine (Mangoua, 2013). Des études ont montré que le champ de fracturation issu des images satellitaires fait ressortir beaucoup d'informations intéressantes, notamment grâce à sa vision synoptique et surtout aux diverses techniques de traitement des images numériques de haute qualité (Maréchal *et al.*, 2003; N'go *et al.*, 2010). Ainsi, la recherche des indices d'eau souterraine ne peut se faire avec certitude qu'à partir des images satellitaires ou Radar. L'interprétation des images consiste à l'identification et à l'emplacement des éléments et des

MATERIEL ET METHODES

traits liés à la présence, à la nature, à la forme des aquifères et de leur potentialité. Une cartographie de la structure, avec des accents particuliers sur l'identification des unités lithologiques qui peuvent offrir des conditions favorables de perméabilité nécessaires à la mise en place des aquifères en profondeur. La cartographie des linéaments va se faire en quatre étapes : le prétraitement, le traitement d'image, la validation et l'analyse statistique des linéaments.

2.2.1.1. Prétraitement d'image Landsat Oli 8

Les prétraitements appliqués sur une image satellitaire sont de nature radiométrique et géométrique. Ils permettent d'éliminer les bruits radiométriques dans les bandes et à corriger les distorsions géométriques, afin de les rendre parfaitement superposables aux cartes thématiques existantes (carte topographiques, géologiques et photo-géologiques) (Jourda, 2005). Les images utilisées sont de types Oli de Landsat 8 enregistrées le 23/12/2017 et concernent la zone 30 de l'hémisphère Nord. La prise de vue étant effectuée en saison sèche, ces images apparaissent sans bruits radiométriques majeurs et ne nécessitent donc pas de prétraitements importants. La zone d'étude a été extraite de la scène 197-055.

2.2.1.2. Traitement numérique des images pour l'extraction des linéaments

Les compositions colorées et le filtrage spatial directionnel ont été appliqués pour le rehaussement des images.

✓ Technique de compositions colorées

Cette méthode se présente comme étant une technique d'amélioration de l'image en vue de permettre une bonne visualisation. On parle de technique RGB (Red (R), Green (G), Blue (B)) ou transformation RBG qui permet d'obtenir une image multichrome à partir de trois images monochromes. Les compositions colorées ont consisté à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu). Les compositions qui ont données les résultats les plus intéressants sont Oli +2, Oli +3 et Oli + 4. Elles permettent la distinction des sols nus, des discontinuités lithologiques, des étendues d'eau et des linéaments régionaux et même très souvent locaux.

✓ Technique de filtrages spatiaux et extraction des linéaments

Le filtrage spatial permet de mettre en évidence les frontières entre deux paysages ou des particularités de l'image telles que les linéaments, routes, etc. En Côte d'Ivoire, les filtres directionnels de Sobel et le gradient de dimension (7x7) utilisés par plusieurs auteurs ont donné de très bons résultats. Ces auteurs sont entre autres Biémi (1992) dans la Marahoué, Kouame (1999) dans les chaînes des toura, Jourda (2005) à Korhogo, Mangoua (2013) dans le bassin de

MATERIEL ET METHODES

la Baya et (Yao, 2015) sur la Lobo. Le relevé des linéaments structuraux proprement dit a été réalisé par voie manuelle avec une analyse visuelle à l'écran. La méthode consiste à représenter par un segment de droite les discontinuités-images et les changements brusques de tonalité observés sur les images traitées. Auparavant, une procédure d'élimination des linéarités d'origine anthropique (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de haute tension) à l'aide de couches vectorielles a été effectuée.

2.2.1.3. Validation de la carte des linéaments

La phase de contrôle et de validation des linéaments extraits à partir du traitement numérique d'images satellitaires est nécessaire pour préciser leur signification structurale (Razack, 1984). Les linéaments identifiés à partir des images OLI+ de Landsat 8 ont fait l'objet d'une analyse fréquentielle permettant de faire ressortir les directions principales. En effet, l'orientation des fractures constitue l'un des paramètres essentiels intervenant dans l'écoulement des eaux souterraines en milieu de socle. Selon leur orientation les fractures peuvent favoriser et faciliter le drainage des eaux souterraines. Pour la validation de ces linéaments, les directions obtenues sont d'abord comparées à celles obtenues dans les travaux antérieurs réalisés par Adon *et al.* (2019) dans la Marahoué, par Affian *et al.* (2004) et par Koffi *et al.* (2013) dans la mine d'or d'Angovia. Ensuite, la superposition de la carte des linéaments à celle des forages implantés de façon géophysique (Jourda *et al.*, 2006) permet de mettre en évidence les coïncidences entre les grands traits tectoniques et les forages les plus productifs. En effet, selon Jourda *et al.* (2006), les forages les plus productifs sont situés sur les accidents majeurs et peuvent donc être un outil essentiel à la validation des linéaments.

2.2.1.4. Analyse statistique de la fracturation

Le traitement statistique du champ de fracturation de la mine d'or d'Angovia a pour but de construire la rosace directionnelle. L'approche adoptée ici est la discrétisation du champ de fracturation en mailles en considérant la surface élémentaire représentative (SER) de la fracturation. Les dimensions de cette dernière pour laquelle la répartition directionnelle des linéaments (fractures) est cohérente dans le champ de fracturation réalisée est de 5×5 km (maille régulière). En effet, lorsque la taille de la maille augmente, les données intégrées (nombres de linéaments) sont très nombreuses et l'on observe une variation de la répartition directionnelle. Au-delà de 10 km, l'information directionnelle est estompée. Dans chaque maille, il est déterminé le nombre total de fractures et la longueur de chaque fracture. L'intérêt de cette carte est de mettre en évidence, la variabilité spatiale de l'intensité de la fracturation à petite échelle

MATERIEL ET METHODES

d'investigation. Pour ce faire, la carte de fracturation est géoréférencée afin d'être reconnue par le logiciel Linwin 2.1. Le programme du logiciel permet d'établir à la fois l'histogramme, la rosace, la longueur cumulée et le nombre de linéaments.

2.2.2. Evaluation de la variation du niveau d'eau

2.2.2.1. Estimation de la recharge

La connaissance du taux de renouvellement des eaux souterraines est un facteur essentiel dans tout programme de développement durable basé sur l'exploitation et la gestion des réserves en eaux souterraines. Ce renouvellement est appelé recharge. Il est le flux d'eau qui reconstitue ou réapprovisionne un aquifère, essentiellement par percolation à travers le sol. La recharge peut être faite verticalement ou latéralement à partir d'un autre système aquifère. Elle peut être naturelle et provenir des précipitations et/ou des écoulements de surface, ou artificielle et provenir d'un apport intentionnel d'eau au sol. Les mécanismes régissant la recharge naturelle des aquifères peuvent être décrits comme suit (Kingumbi, 2006) :

- la recharge par percolation verticale des précipitations à travers la zone non saturée, appelée recharge directe ;
- la recharge à partir d'eau en provenance d'autres aquifères ;
- et la recharge par percolation de l'eau à travers les lits des cours d'eau appelée recharge indirecte. Cette description qui peut apparaître très simpliste et ne reflète pas toute la complexité des mécanismes de recharge qui peuvent se dérouler simultanément. En effet, la recharge d'un aquifère par la précipitation est contrôlée par le processus complexe de l'infiltration, de l'écoulement dans la zone non saturée et du phénomène de l'évapotranspiration (Healy & Cook, 2002). Malgré cette complexité, une estimation de la recharge des nappes est indispensable pour une gestion optimale des ressources en eaux souterraines. Par ailleurs, elle est un élément clé dans tout modèle d'écoulement des eaux souterraines ou de transport des contaminants (Healy & Cook, 2002).

Il existe plusieurs méthodes de détermination de la recharge et le choix d'une ou de plusieurs méthodes peut être guidé par les données disponibles, l'échelle de l'étude et la précision des résultats recherchés (Soro, 2017). Dans cette étude, la recharge a été estimée par la méthode de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) suivie de l'approche du bilan hydrologique. La méthode de Thornthwaite utilise uniquement les données de pluie et de température. En fonction de la nature du sol, une valeur de Réserve Facilement Utilisable (RFU) est fixée. Pour les sols de nature argilo-sableuse comme celle de la Marahoué (Djè, 2015) la

MATERIEL ET METHODES

RFU est fixée à 100 mm au mois de plus grande hauteur de pluie de l'année pour commencer les calculs.

Le bilan hydrologique permet de connaître les apports et les pertes en eau du bassin et donc de quantifier de façon globale les ressources en eau. En effet, il traduit de manière quantifiable le cycle de l'eau au niveau d'une région ou d'un bassin versant. Il exprime le partage des précipitations entre les différentes composantes du cycle de l'eau (Equation 1).

$$P = R + ETR + I \quad (\text{Eq.1})$$

avec :

P : précipitation (mm)

R : lame d'eau ruisselée (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

I : lame d'eau infiltrée (mm)

Le ruissellement (R) représente la part de la pluie qui alimente le réseau de surface. Il est très dépendant des facteurs physiques et morphologiques du bassin versant, notamment le relief, le contexte géologique, le couvert végétal, la forme, l'orientation et la densité du réseau hydrographique. Son estimation fait intervenir les facteurs climatiques dont la pluie (type, intensité, durée, distribution spatiale et temporelle), l'évaporation, la température, l'insolation, les vents, l'humidité de l'air) et l'interception. Les approches permettant de répartir le surplus disponible entre l'écoulement et l'infiltration ne tiennent pas compte des nombreux facteurs environnementaux, morphologiques, géologiques et climatiques énoncés plus haut.

Le ruissellement (R) permet de calculer le coefficient de ruissellement (r) de la région. Les expressions respectives de ces paramètres sont les suivantes :

$$R = \frac{P \times t}{S} \text{ et } r = \frac{R}{P} \times 100 \quad (\text{Eq 2})$$

R : La lame d'eau ruisselée ;

P : précipitation moyenne annuelle de la période d'observation ;

t : temps en seconde d'une année d'observation (t=3155600 s) ;

S : la superficie totale de la région ;

r : coefficient de ruissellement en pourcentage.

L'évaluation de l'infiltration dans la région est très importante pour une connaissance de la quantité d'eau qui alimente les eaux souterraines chaque année. La détermination de la recharge ou de la réalimentation des aquifères est fondée essentiellement sur le bilan hydrique. Ainsi, la formule de l'infiltration (équation 3) est tirée de celle de l'équation du bilan hydrologique :

MATERIEL ET METHODES

$$I = P - (ETR + R) \quad (\text{Eq 3})$$

2.2.2.2. Etude piézométrique

La piézométrie est la cote de l'eau dans un ouvrage d'observation (piézomètre) par rapport à un référentiel donné. La piézométrie a pour objectif de suivre la variation du niveau de la surface libre de la nappe (sa fluctuation), d'élaborer les cartes des hautes et basses eaux (Ouédraogo, 2016). Elle permet d'identifier les directions et les sens d'écoulements permettant ainsi de savoir les zones de recharge préférentielles, les zones de transition et les exutoires. Pour ce faire, une carte piézométrique est réalisée. La carte piézométrique qui est une synthèse essentielle de l'étude hydrogéologique schématise la fonction conductrice du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Elle représente à une date donnée, la distribution spatiale des charges. Dans le cadre de cette étude, deux cartes piézométriques ont été réalisées dans le but d'évaluer la variation du niveau d'eau en périodes de basses et hautes eaux. Pour calculer les cotes piézométriques la priorité est donnée à la précision du nivellement et à la date à laquelle les mesures ont été effectuées. Les cotes piézométriques sont déterminées à partir de la formule de (Castany, 1982) *in* (Kouassi, 2013) (Equation 4).

$$H = Z - (P - H_m) \quad (\text{Eq 4})$$

Avec :

H : Cote piézométrique (m)

Z : Cote sol ou élévation du terrain naturel (m)

P : Profondeur mesurée (m)

H_m : Hauteur de la margelle (m)

Cette expression de la piézométrie de Castany (1982) est pour les nappes libres. Toutefois pour une question d'indication (appréciation) momentanée du niveau d'eau sur l'ensemble de la zone nous admettons l'hypothèse selon laquelle la formation située sur le socle est un milieu poreux continu. La cote sol Z de tous les points de mesures est inconnue, la cote piézométrique H ne peut donc être déduite. Pour pallier cette difficulté, la surface du sol a été considérée comme le repère avec zéro mètre (0 m). Ainsi, pour chaque profondeur mesurée, et après avoir retranché la hauteur de la margelle (H_m), il lui a été affecté le coefficient (-1) traduisant le sens de mesure du haut vers le bas. Cette méthode a permis de représenter le niveau de l'eau dans chaque ouvrage à partir de la surface topographique.

MATERIEL ET METHODES

2.2.3. Détermination des propriétés hydrauliques du système aquifère

La détermination des paramètres hydrauliques se fait au moyen des essais de pompage réalisés sur les ouvrages (Assémian *et al.*, 2014) et (Ewodon *et al.*, 2017).

2.2.3.1. Détermination de la transmissivité

La transmissivité représente le temps que met l'eau pour traverser une unité de surface. Elle peut renseigner sur la perméabilité du milieu. Selon que cette valeur est élevée ou faible, l'aquifère peut être jugé bon ou mauvais (Mangoua, 2013). La transmissivité et la perméabilité sont les paramètres les mieux indiqués pour la caractérisation des propriétés géométriques d'un aquifère (Soro *et al.*, 2010). La transmissivité a été déterminée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob en remontée (Lasm, 2000 ; Dakouré, 2003) (Equation 7). La méthode repose sur le principe de superposition. En effet, le puits de pompage étant le puits d'observation il est recommandé dans ces conditions d'utiliser les données de la remontée pour les interprétations (Razack & Lasm, 2006). Mais l'application de cette méthode suppose qu'un certain nombre de conditions soit satisfait (Koïta, 2005 ; Fossou, 2010) : l'aquifère a une extension latérale infinie, le diamètre du puits est négligeable, le puits est parfait, l'aquifère est captif, homogène, isotrope, d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage, l'écoulement vers le puits est transitoire. Les nappes étudiées sont prises comme étant captives et de ce fait, on suppose qu'elles répondent aux hypothèses de la méthode de Jacob. C'est pourquoi, cette méthode a été utilisée pour estimer les transmissivités. Mais Dans bien des cas, les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions. Selon Lasm (2000), cette situation n'empêche cependant pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages. Le rabattement S_r est donc la somme des rabattements ($s + s'$) et est appelé rabattement résiduel (Equation 5 et 6).

$$S_r = \frac{Q}{4\pi r^2 T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2 s} - \ln \frac{4LTt'}{r^2 s'} \right) \quad (\text{Eq 5})$$

En supposant que $s = s'$, (éq5) devient :

$$s_r = \frac{0,183}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Eq 6})$$

$$\text{On obtient } T = \frac{0,183Q}{a} \quad (\text{Eq 7})$$

Où a est la pente de la droite obtenue en faisant $s_r = f(\log(t / t'))$

2.2.3.2. Perméabilités des aquifères

La propriété de conduite d'un aquifère est contrôlée par sa perméabilité ou conductivité hydraulique. Celle-ci est la capacité du milieu à laisser circuler l'eau généralement exprimée

MATERIEL ET METHODES

par le coefficient de perméabilité K de Darcy. Elle dépend des caractéristiques du milieu et du fluide. Elle a la dimension d'une vitesse. Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité efficace et la perméabilité, mais pour être perméable la roche doit être obligatoirement poreuse (Castany, 1982). Les possibilités de circulation d'eau dans un aquifère dépendent de K et de son épaisseur mouillée (e) en m. Cela fait appel à la notion de transmissivité T s'exprimant en m^2/s (Equation 8).

$$T = k \times e \quad \text{D'où} \quad k = \frac{T}{e} \quad \text{Eq 8}$$

K = Perméabilités (m/s) ;

T = Transmissivités (m^2/s) ;

e = épaisseurs mouillées (m)

2.2.3.3. Débits spécifiques

Le débit spécifique (Q/s) en l'absence de données de transmissivité est un bon estimateur de la productivité des forages (Bertachini, 1987; Chilton & Foster, 1995). Il se définit comme le rapport entre débit moyen de fin de pompage et le rabattement mesuré lors de l'essai de pompage selon l'Equation 9 (Fossou, 2010). Des auteurs Banks & Frengstad (1992; Huntley *et al.* (1992); El-Naqua (1994); Mace (1997); Meier *et al.* (1998) montrent que l'estimation de la productivité des aquifères à partir du débit spécifique est meilleure, car les mesures de Q/s représentent les réelles caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère par rapport à la transmissivité. Ils s'appuient sur le fait que les valeurs de transmissivités sont obtenues à partir de l'interprétation de formules théoriques. Toutefois, les valeurs de Q/s peuvent être entachées d'erreurs si elles sont mesurées sur des forages isolés comme c'est le cas en Côte d'Ivoire, du fait des pertes de charges quadratiques intervenant lors de la mesure du rabattement. Ces erreurs sont minimisées lorsque le temps de pompage est assez long.

$$Q_{sp} = \frac{Q}{s} \quad \text{(Eq 9)}$$

Q_{sp} = débit spécifique ($m^3/h/m$)

Q = débit moyen de fin de pompage (m^3/h)

S = rabattement de la nappe (m)

2.2.3.4. Relations entre les paramètres de productivité

Pour mieux apprécier l'influence des paramètres sur les débits des forages, des graphiques ont été construits à partir des données de forages de l'ensemble des localités étudiées. Elles ont

MATERIEL ET METHODES

consisté à effectuer une analyse comparative des débits de forages en relation avec les paramètres physiques des forages (profondeur totale, arrivée d'eau, etc) et les paramètres hydrodynamiques.

Conclusion partielle

La présente partie a exposé le matériel utilisé au cours de cette étude et les différentes méthodes développées pour aboutir aux différents résultats. Le matériel est constitué de données climatologiques, de forage et piézométrique ainsi des outils de traitement de données que sont des logiciels. La méthodologie adoptée est fonction des trois objectifs spécifiques. Ainsi, pour établir la carte linéamentaire, d'abord un prétraitement a été appliqué à l'image, ensuite un traitement puis une validation et enfin une analyse statistique. Pour l'évaluation de la variation du niveau d'eau, la méthode de Thornthwaite (1954) a été utilisée pour évaluer la recharge de la nappe puis la méthode de Castany (1982) pour étudier la piézométrie. Pour la détermination des paramètres hydrodynamiques, une interprétation des essais de pompage et des fiches techniques de forages a été faite.

Les résultats obtenus à partir des différentes méthodologies sont présentés dans la partie suivante du mémoire.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Cartes des linéaments

Le traitement des images réalisé à l'aide des techniques de combinaison d'images et l'application des filtres de Sobel (Figure 7) ont permis de mettre en évidence de nombreuses discontinuités images. Ces images ont permis la vectorisation des fractures gouvernant certains affluents du cours d'eau et le plus grand nombre de linéaments dans la zone d'Angovia. Les filtres directionnels rehaussent les linéaments perpendiculaires à leur direction de convolution.

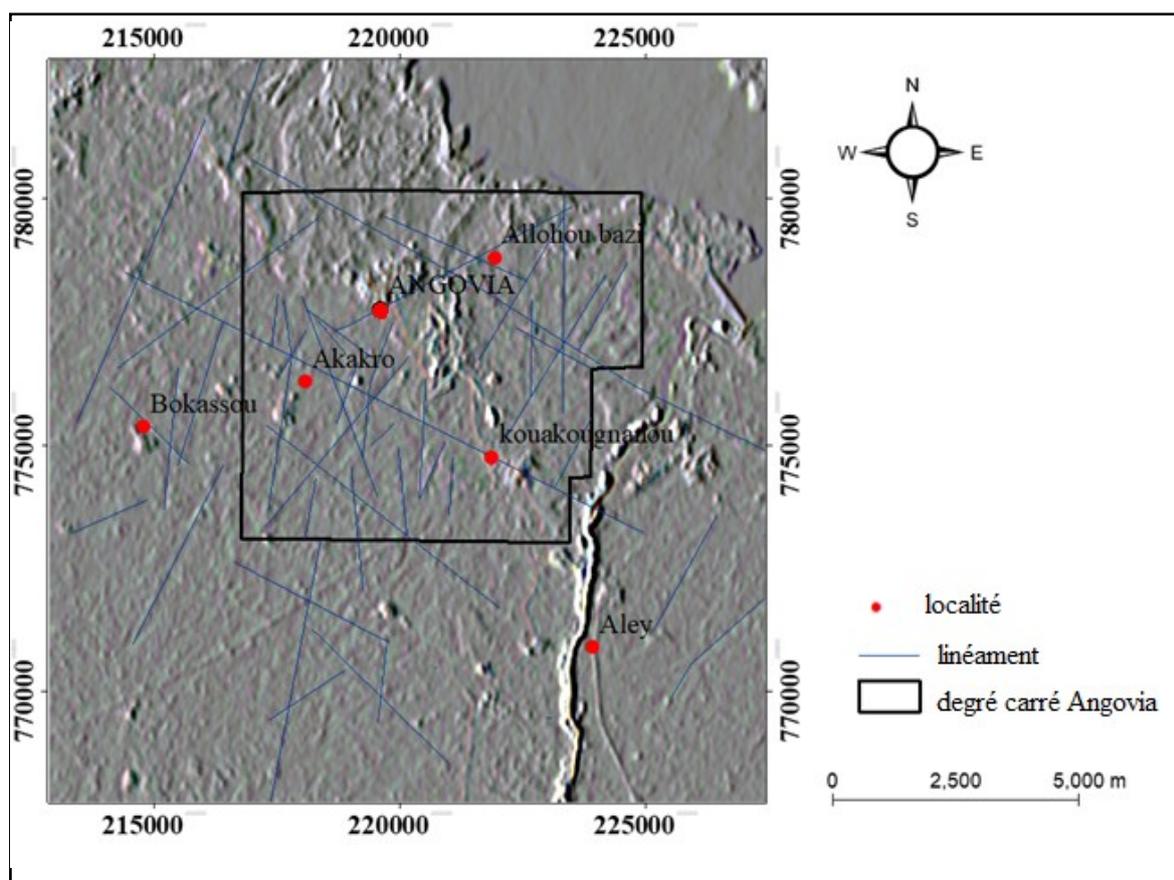


Figure 7 : Image traitée par filtre Sobel de direction NO-SE rehaussant les linéaments

La carte détaillée des linéaments (Figure 8) compte 170 linéaments extraits manuellement à partir de l'interprétation des images dérivées des différentes techniques de traitement. La longueur cumulée des linéaments est égale à 266 Km. L'exploitation de la carte du relevé détaillé des linéaments permet d'élaborer de nombreux fichiers thématiques à partir desquels est définie et caractérisée la géométrie des aquifères souterrains (densité de fracturation, distribution des longueurs et des orientations des linéaments).

RESULTATS ET DISCUSSION

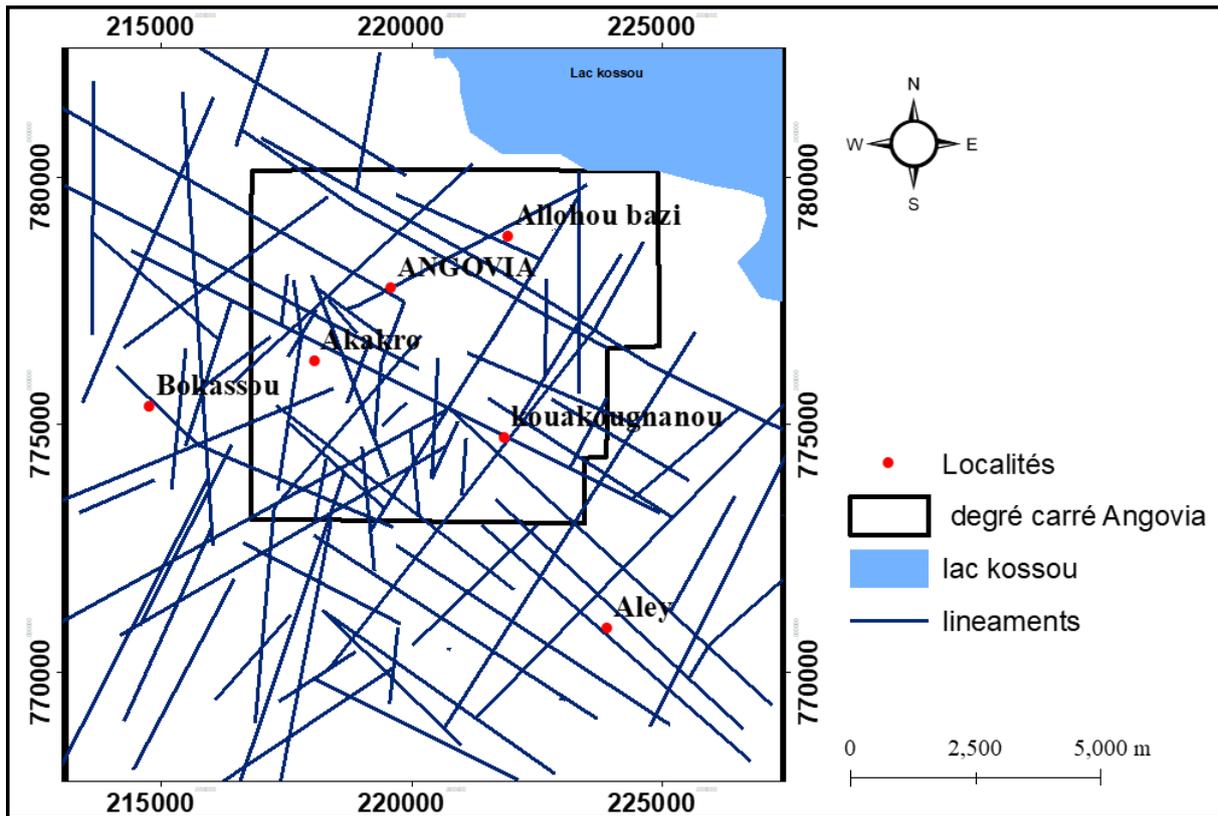


Figure 8 : Carte des linéaments détaillés du site minier d'Angovia

3.1.2.2. Analyse statistique des linéaments

L'analyse statistique des fractures a permis de déterminer les pourcentages en nombre de linéaments et en longueurs cumulées de linéaments. Elle a aussi conduit à la réalisation de rosace directionnelle (Figure 9). La distribution de la fracturation exprimée en nombre et en longueur cumulée sur la rosace directionnelle est presque homogène. Les directions dominantes sont celles qui ont un pourcentage supérieur ou égal à 10%. Ces directions définissent trois orientations majeures que sont les directions N-S (N 0-10°), NE-SO (N 30-40°) et NO-SE (N 50-60°). La direction la plus dominante est la direction N-S.

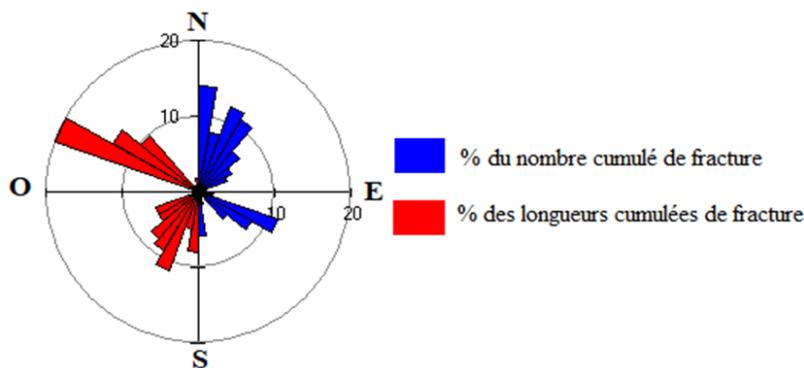


Figure 9 : Rosaces directionnelles des linéaments

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.2.1. Validité de la carte des linéaments

✓ Rosaces directionnelles réalisées dans les travaux antérieurs sur la zone

Les rosaces directionnelles réalisées par Adon *et al* (2019) dans la région de la haute Marahoué ont donné trois directions principales qui sont N-S, NE-SO et E-O (Figure 10 a, b et c). Aussi, (Affian *et al.*, 2004) ont-ils trouvé dans la mine d'or d'Angovia les directions directions N 0°-20° (N-S), N 45°-50°, N 90°-120° (NE-SO), et N 160°-170° (NO-SE). (Koffi *et al.*, 2013) quant à eux ont identifié cinq directions principales dans la mine d'or d'Angovia qui sont N00°-N20°,N50°-N60°, N080°- N100°, N120°-N140° et N150°-N160° (Figure 10 d).

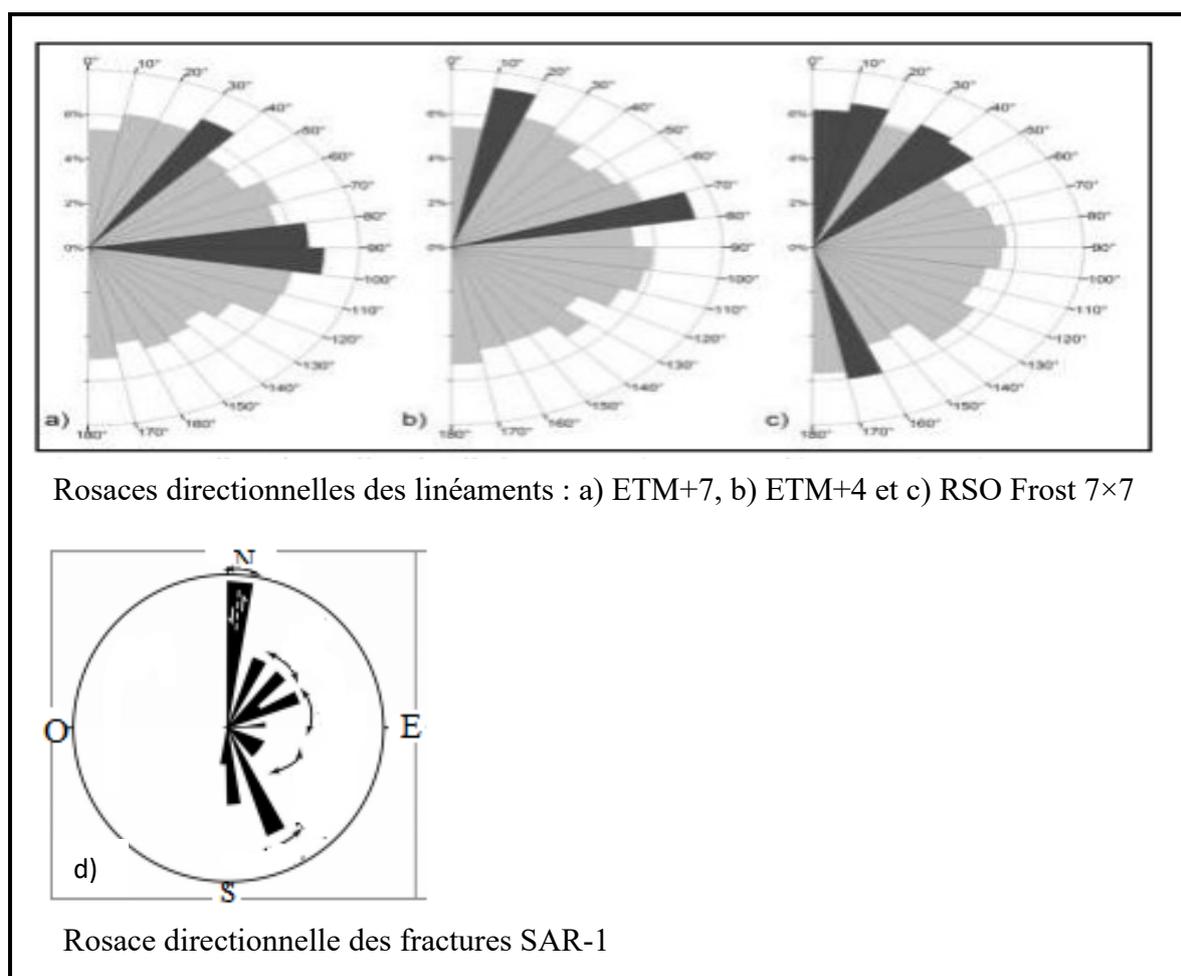


Figure 10 : Rosaces directionnelles selon Adon *et al* (2019) et Koffi *et al* (2013)

✓ Superposition des forages et linéaments

Les forages implantés avec la géophysique ont été superposés à la carte des linéaments issus des images OLi de Landsat 8 (Figure 11). En effet, on remarque que ces forages s'alignent ou sont proches de la plupart des linéaments cartographiés ; même si la plupart de ces forages a un

RESULTATS ET DISCUSSION

débit faible ($< 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Ce résultat montre que les débits les plus importants obtenus dans cette région seraient liés aux fractures majeures.

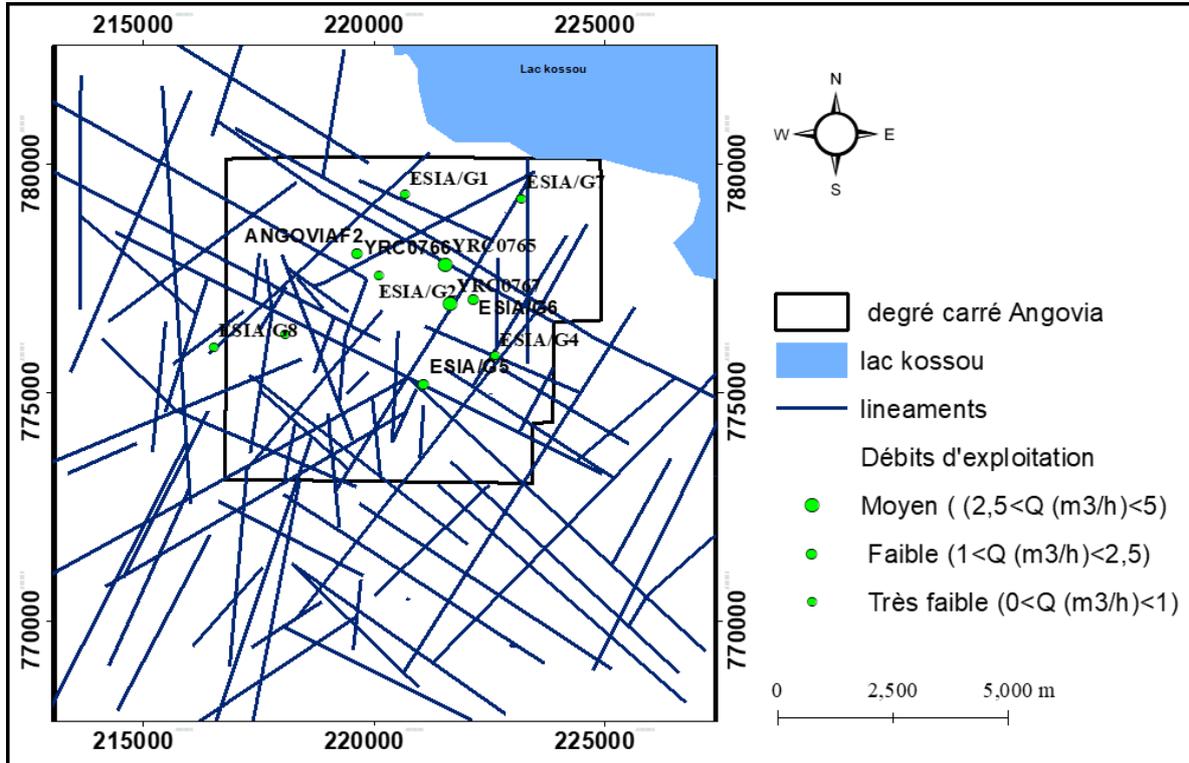


Figure 11 : Superposition des forages implantés à l'aide de la géophysique et les linéaments

3.1.2.3. Distribution des intensités de fracture

La carte de distribution de la densité de fracturation (Figure 12) montre une variabilité spatiale de l'intensité de fracturation. Une analyse globale de cette carte permet de dire que le site minier d'Angovia est faiblement fracturée. En effet, la distribution spatiale de l'intensité de fracturation montre que les classes faible et moyenne densité de fracturation représentent 92% de la surface de la zone d'étude avec 65% pour la classe faible et 27% pour la classe moyenne. Par contre, les zones de forte densité de fracturation occupent 8% de la zone d'étude.

RESULTATS ET DISCUSSION

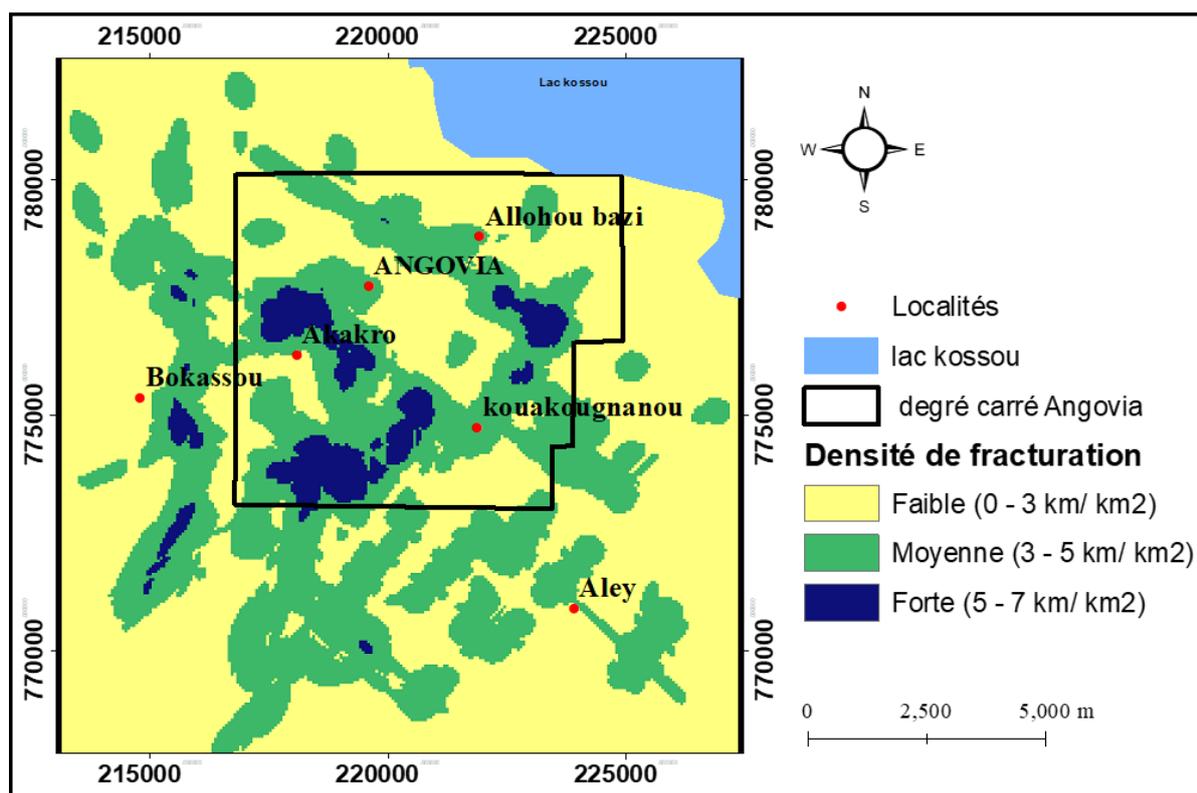


Figure 12 : Carte de densité de fracturation exprimée en longueur cumulée de (5 km×5 km) par maille.

3.1.2. Variation du niveau d'eau

3.1.2.1. Recharge estimée

➤ **Evapotranspiration réelle**

La pluviométrie moyenne annuelle mesurée à la station de la mine d'or d'Angovia est de 1174 mm sur la période 2009 à 2018. Les pertes par évapotranspiration réelle estimées par la méthode de Thornthwaite valent 1124 mm (Tableau I). Ces pertes représentent globalement 95,7 % des précipitations. Ces résultats supposent que les potentialités en eau de surface et souterraine qui en découlent sont relativement peu abondantes. En effet, les écoulements de surface sont estimés à 3,5 mm soit 0,3 % des précipitations moyennes.

➤ **Infiltration et recharge des aquifères**

L'infiltration totale qui contribue à la recharge des nappes est de l'ordre de 46,5 mm/an (Tableau I). Cette lame d'eau représente environ 4 % de la pluie.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau I : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite à Angovia de 2009-2018.

	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)
Janvier	4	234	4
Février	54	186	54
Mars	121	202	117
Avril	165	174	132
Mai	179	167	156
Juin	136	146	124
Juillet	72	125	93
Août	107	125	93
Septembre	121	128	107
Octobre	152	139	125
Novembre	56	141	94
Décembre	8	140	24
TOTAL	1174	1907	1124
R		3,5	
I		46,5	

3.1.2.2. Etude piézométrique

Les résultats de l'étude de la piézométrie sont présentés en deux parties. La première porte sur l'analyse spatiale des niveaux piézométriques et la seconde partie concerne l'analyse des fluctuations interannuelles des charges piézométriques.

3.1.2.2.1. Variation spatiale de la piézométrie

Cette analyse a été faite à partir des cartes piézométriques réalisées avec les données de basses eaux, les données de hautes eaux de la zone d'étude. Ces cartes permettent de rendre compte de l'état de la nappe durant les périodes extrêmes des hautes et basses eaux du cycle hydrologique. Les cartes des figures 13 et 14 ci-dessous présentent la piézométrie de la zone d'étude respectivement pour la période de basses eaux (janvier 2015) et de hautes eaux (Mai 2015) réalisées à partir des mesures des niveaux d'eau dans les forages. Ces deux cartes ne présentent pas de différence notable. Elles présentent une zone de décharge et deux zones de recharge avec un écoulement qui s'effectue dans plusieurs sens notamment les sens Ouest-Est, Nord-Sud et Sud-Nord mais de préférence le sens Ouest-Est (Figures 13 et 14). La zone de décharge est caractérisée par une concentration des eaux dans un endroit précis. Elle se situe dans la partie Nord autour des ouvrages ESIA G1, ESIAG2, et YRC0766 (Figures 13 et 14). Les deux zones de recharges quant à elles sont caractérisées par des zones où prennent naissance les grands

RESULTATS ET DISCUSSION

axes d'écoulement. La première se situe dans la partie Nord-Est autour du forage ESIAG7 et la deuxième vers le Sud au Niveau de ESIAG5 (Figures 13 et 14).

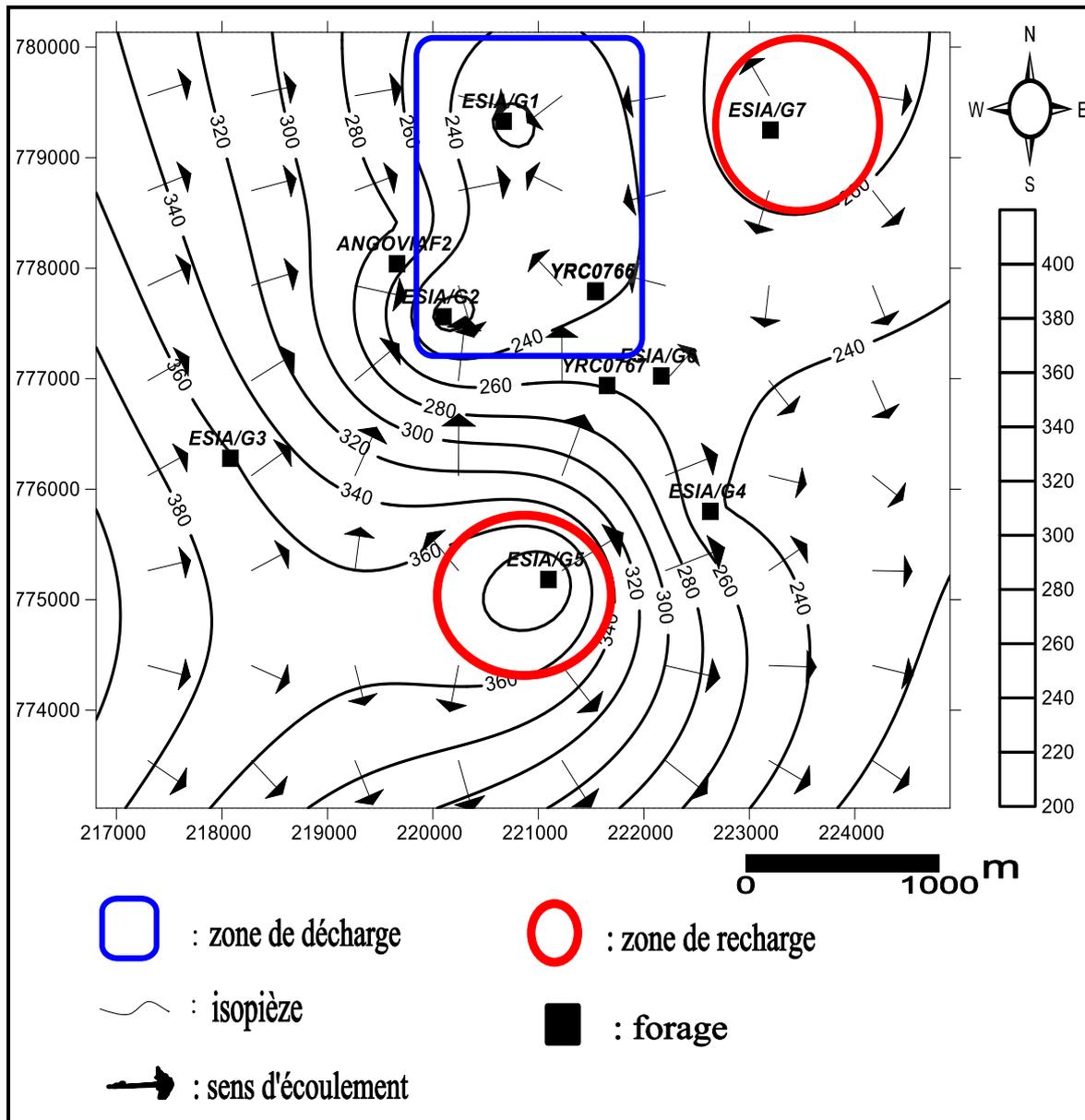


Figure 13 : Carte piézométrique de basses eaux Janvier 2015

RESULTATS ET DISCUSSION

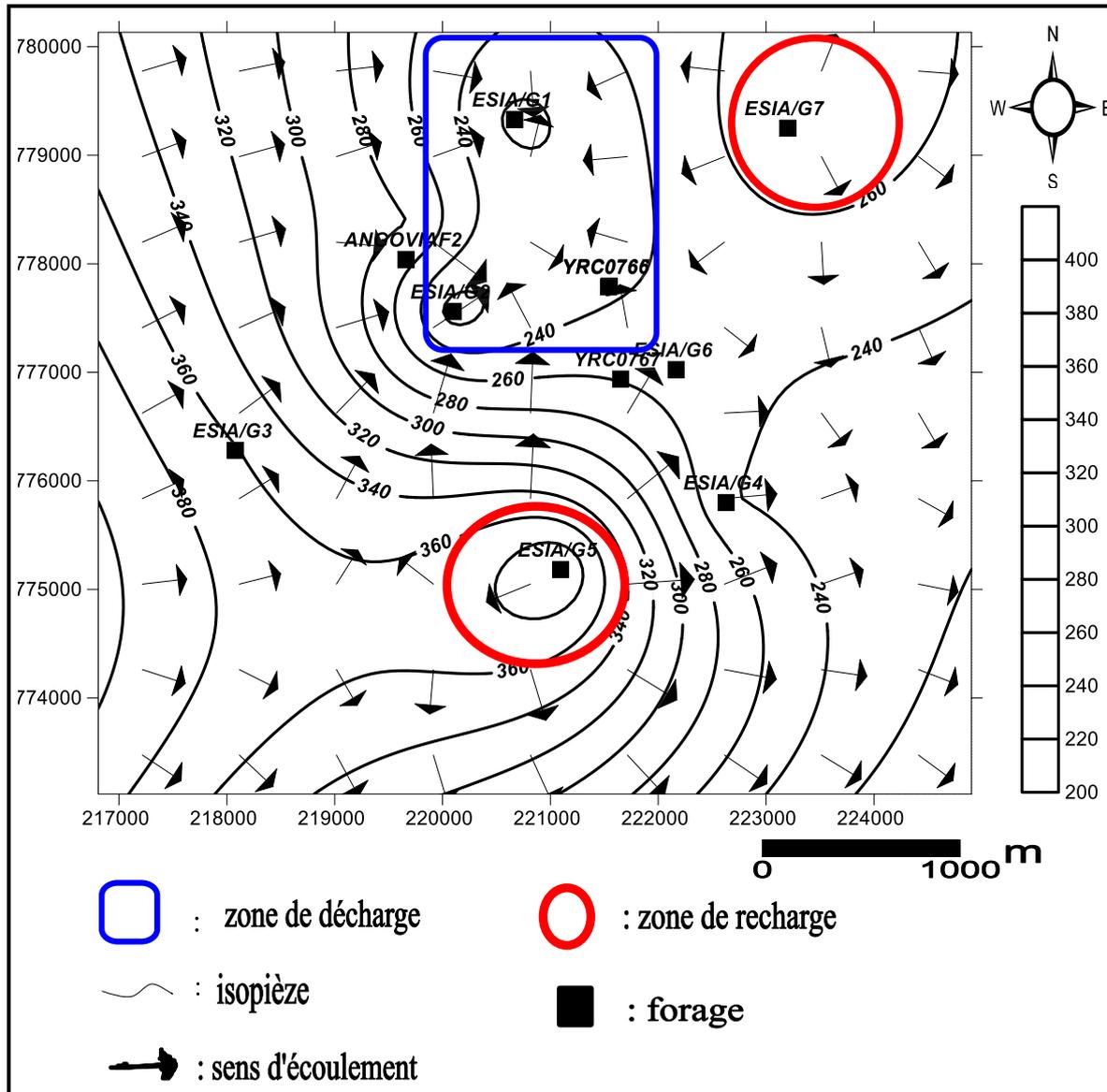


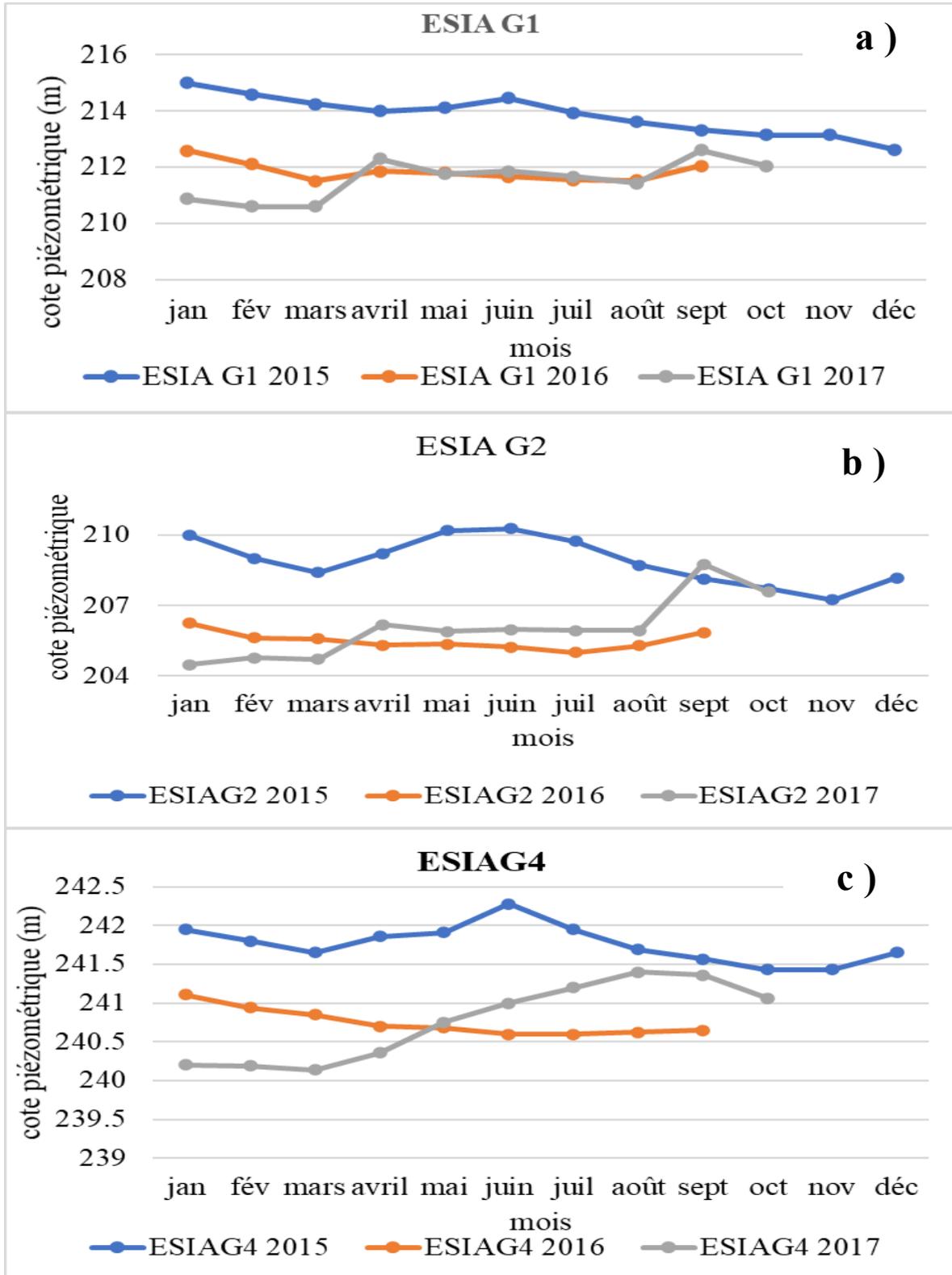
Figure 14 : Carte piézométrique des hautes eaux Mai 2015.

3.1.2.2.2. Variation temporelle de la piézométrie

L'évolution temporelle de la cote d'eau (Figure 15) renseigne non seulement sur les variations opérées au cours du temps et sur la tendance de cette évolution, mais aussi elle permet d'identifier les nappes en présence et les ouvrages captant la même nappe. Sur l'ensemble des forages représentés sur les figures 15 et 16, nous constatons en général que la courbe des cotes piézométriques de 2015 est au-dessus de celles de 2016 et 2017. Ce qui traduit une baisse du niveau d'eau. Par exemple pour le forage ESIA/G1, la cote piézométrique passe de 215 m en 2015 à 211 en 2017 (Figure 14 a) soit une baisse de 4 m du niveau d'eau. Sur l'ensemble des forages, Cette baisse du niveau d'eau se situe entre 2 et 4 m. Aussi constatons nous la présence de deux nappes à la mine d'or d'Angovia :

RESULTATS ET DISCUSSION

- Une caractérisée par une faible amplitude de variation du niveau d'eau au cours de chaque année. Celle-ci est captée par six (6) forages à savoir ESIAG1, ESIAG2, ESIAG4, ESIAG5, ESIAG6 et YRC0765 (figure 15 a, b, c, d, e et f).



RESULTATS ET DISCUSSION

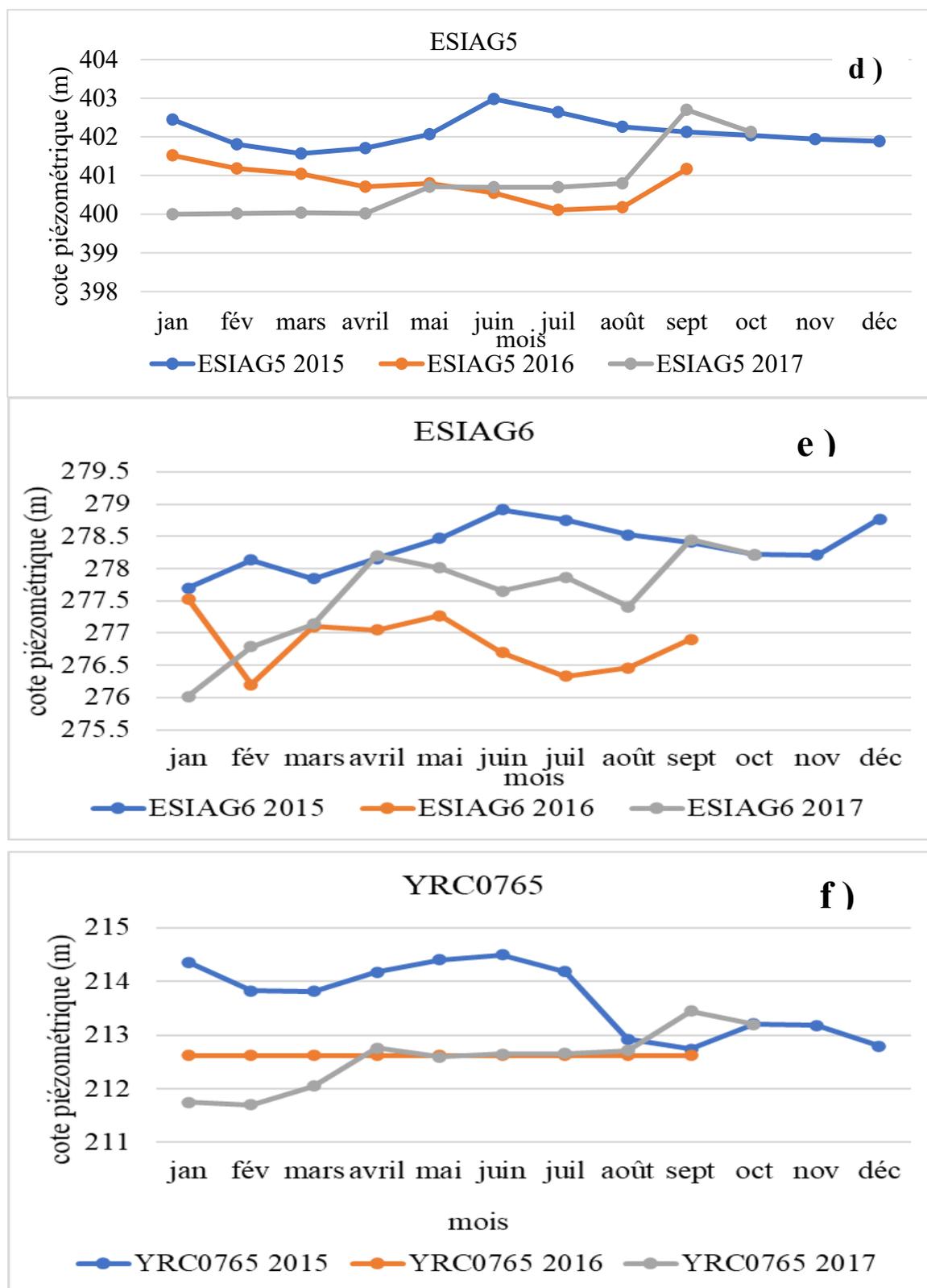
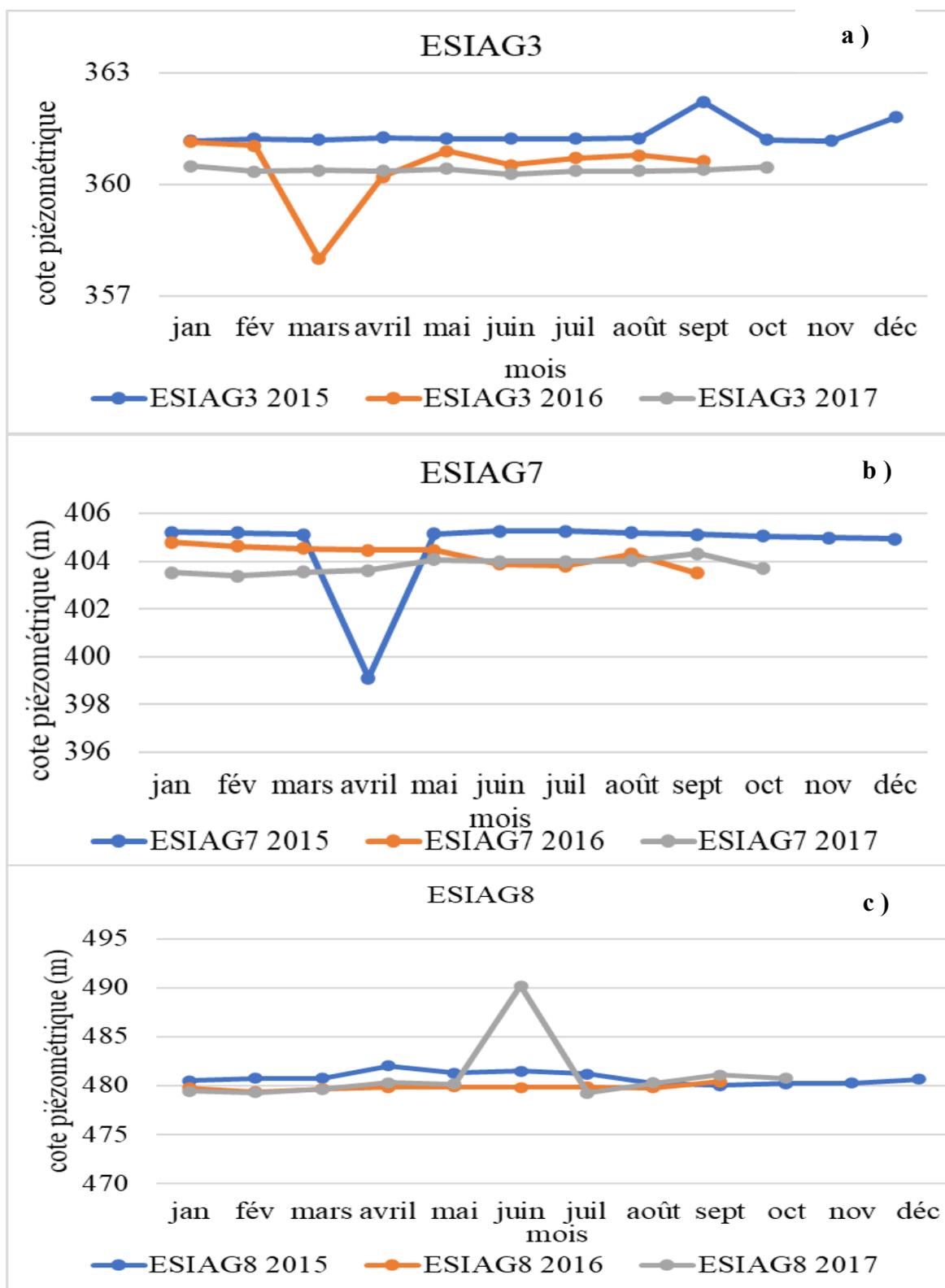


Figure 15 : Nappe à cotes piézométriques de faible amplitude de variation

RESULTATS ET DISCUSSION

- Dans l'autre nappe, contrairement à la première, le niveau d'eau reste presque constant dans la nappe sur les trois années avec une forte amplitude de variation du niveau d'eau en saison sèche et en saison pluvieuse. Cette dernière est captée par cinq (5) forages qui sont ESIAG3, ESIAG7, ESIAG7, YRC076 et YRC0767 (Figure 16 a, b, c, d et e).



RESULTATS ET DISCUSSION

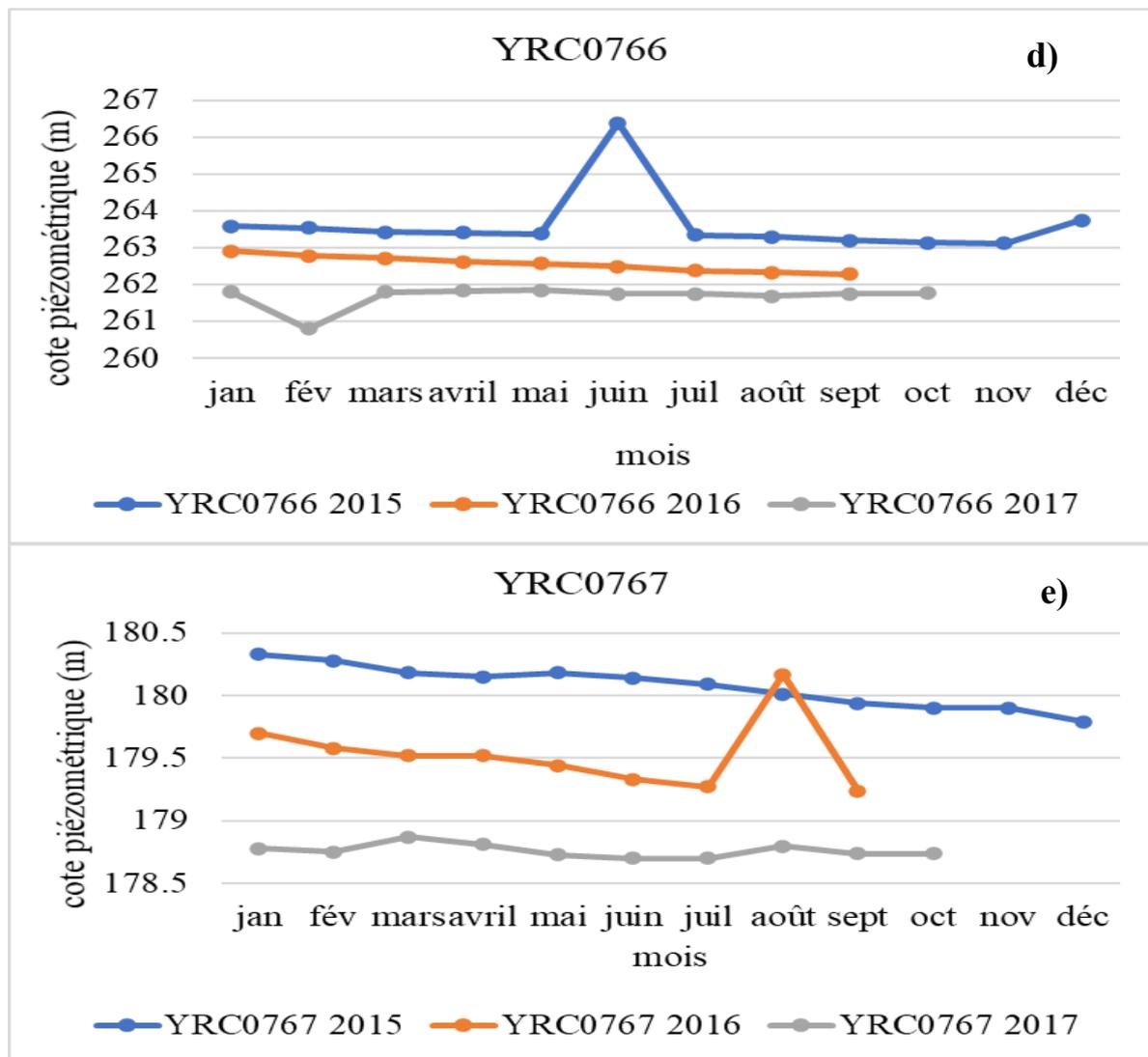


Figure 16 : Nappe à cotes piézométriques de fortes amplitudes de variation

3.1.2.2.3. Evolution de la piézométrie en fonction de la pluviométrie

Les trois graphiques de la Figure 17 ci-dessous montrent que les fluctuations piézométriques sont étroitement liées à la pluviométrie.

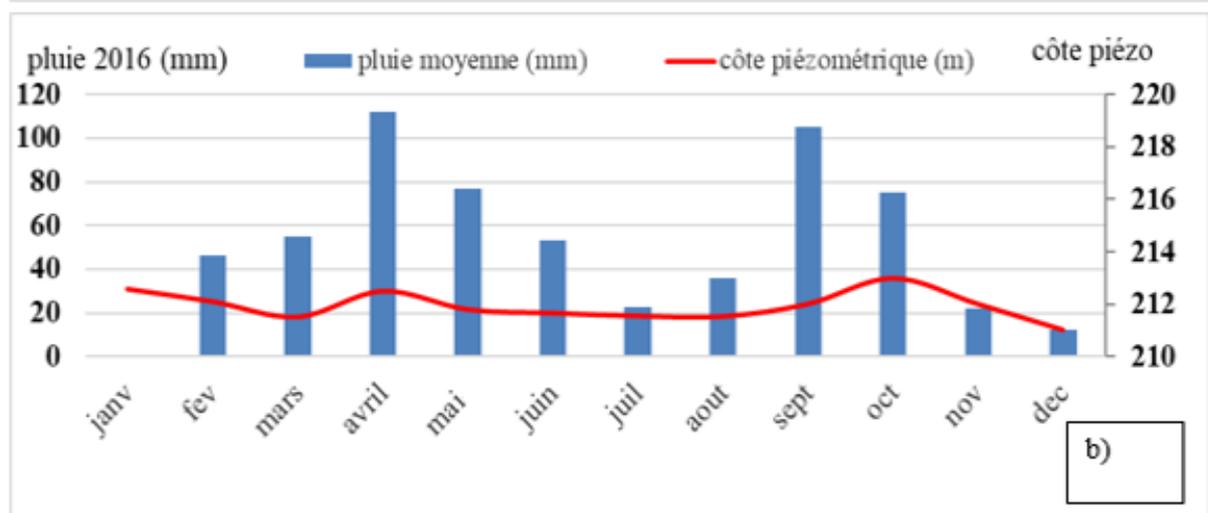
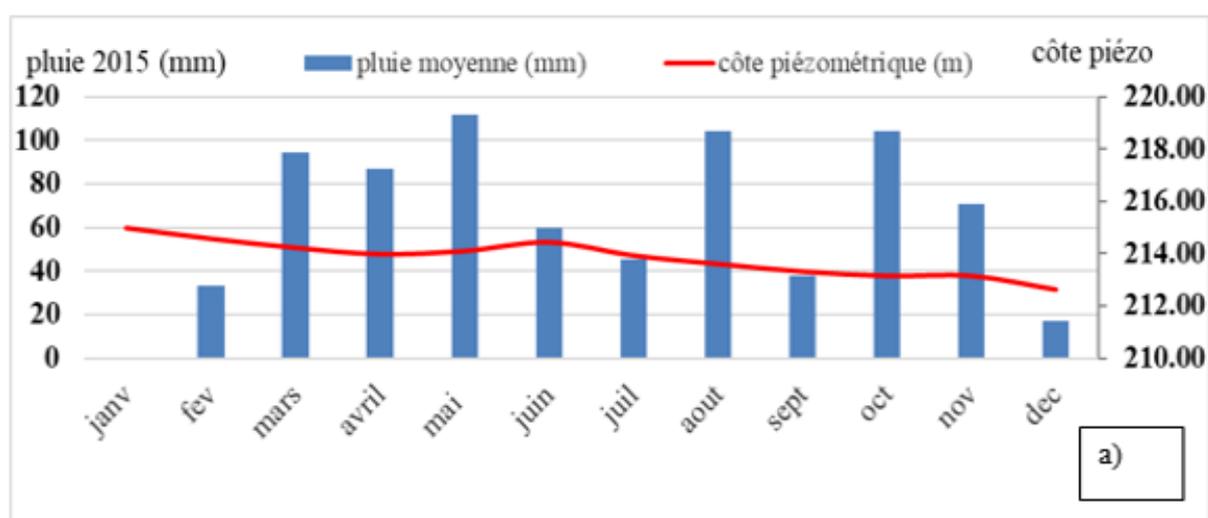
En 2015, le niveau d'eau dans la nappe baisse faiblement de Janvier à Mai puis subit une légère augmentation en Juin pour atteindre un petit pic et diminue à nouveau faiblement jusqu'en décembre (Figure 17 a). L'augmentation du niveau d'eau en juin pourrait s'expliquer par une réponse rapide de la nappe un mois après le mois des hautes eaux qui est Mai 2015.

En 2016, le niveau d'eau baisse de Janvier à Mars puis subit une augmentation en Avril (début hautes eaux) et y atteint un petit pic, redescend faiblement jusqu'en Août. A partir de septembre, le niveau d'eau augmente rapidement pour atteindre un pic un peu plus grand en Octobre puis

RESULTATS ET DISCUSSION

diminue à nouveau jusqu'en Décembre (Figure 17 b). Les deux pics observés en Avril et Octobre) montrent que la nappe répond simultanément aux périodes des hautes eaux ou un mois après.

En 2017, de Janvier à Mars le niveau d'eau baisse dans la nappe. A partir d'Avril le niveau d'eau augmente pour atteindre un pic en Mai (hautes eaux). De Juin à Août le niveau d'eau baisse faiblement (Figure 17 c). De septembre à Octobre, le niveau d'eau augmente pour atteindre un pic en Octobre puis redescend un peu en Novembre et remonte en Décembre. Les deux pics observés traduiraient une réponse immédiate de la nappe pendant les saisons pluvieuses mais mieux pendant ou juste après les hautes eaux.



RESULTATS ET DISCUSSION

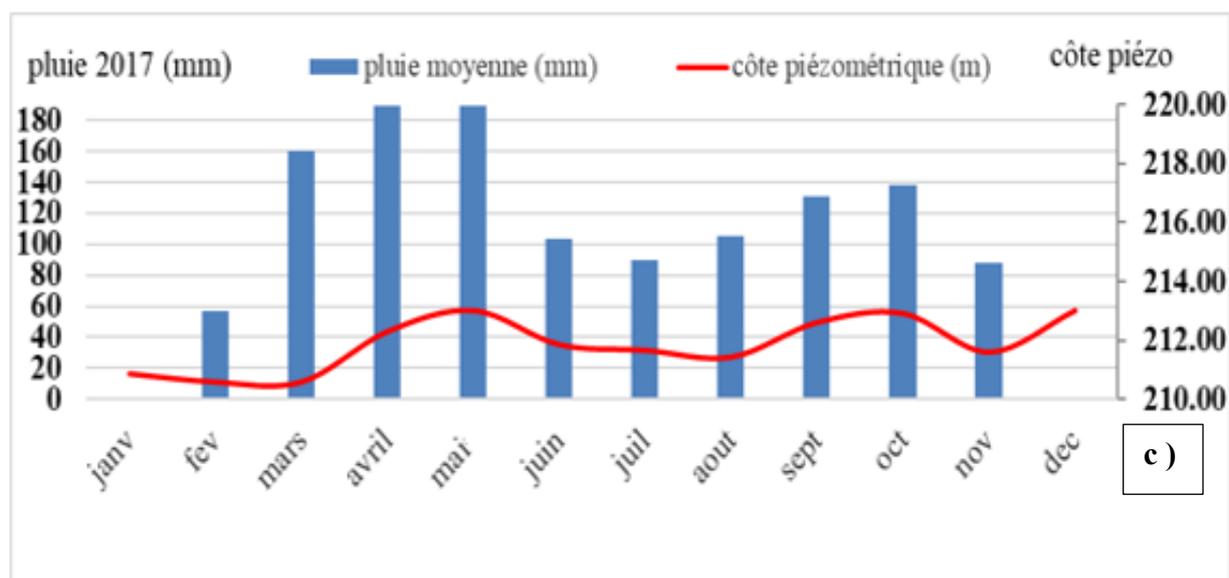


Figure 17 : Variation des cotes piézométriques en fonction de la pluviométrie en 2015, 2016 et 2017

3.1.3. Propriétés hydrauliques du système aquifère

3.1.3.1. Transmissivité

Les valeurs de transmissivité ont été déterminées pour 12 forages repartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Elles sont comprises entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne géométrique de $2,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s. L'écart type est de l'ordre $1,11 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Les classes de transmissivité sont de 10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6} (Tableau II). Mais la classe la plus prépondérante est 10^{-5} et elle représente 50% de l'effectif total des ouvrages.

Tableau II : Différentes classes de Transmissivité dans la zone d'Angovia

Classes	Pourcentage (%)	Moyenne	Min	Max	Ecartype
10^{-4}	16,67	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$
10^{-5}	50				
10^{-6}	33,33				

3.1.3.2. Perméabilités du système aquifère

Le tableau III montre que les perméabilités des aquifères calculées à partir des fiches d'essai de pompage varie de $1,23 \cdot 10^{-7}$ à $1,52 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau III : Résultats des perméabilités des aquifères

Perméabilité (m/s)	
Min	1,23.10⁻⁷
Max	1,52.10⁻⁵
Moyenne	3,37.10⁻⁶
Ecartype	4,52.10⁻⁶

3.1.3.3. Débits spécifiques

Les valeurs des débits spécifiques sont en majorités faibles. Elles oscillent entre 0,05 et 3,6 m³/h/m avec une moyenne de 0,61 m³/h/m (Tableau IV). L'analyse des données montre que seulement un (1) forage du bassin a un débit spécifique supérieur à 1 m³/h/m. ce débit a été enregistré sur le forage ESIA/G4.

Tableau IV : Résultats des débits spécifiques

NOMS	Débit spécifique (m³/h/m)	Moyenne	Min	Max
ESIA/G1	0,07			
ESIA/G2	0,24			
ESIA/G3	0,75			
ESIA/G4	3,60			
ESIA/G5	0,67			
ESIA/G6	0,43	0,61	0,05	3,60
ESIA/G7	0,09			
ESIA/G8	0,40			
ANGOF2	0,05			
YRC0765	0,62			
YRC0766	0,31			
YRC0767	0,12			

3.1.4.4. Corrélation entre paramètres de forage

3.1.4.4.1. Paramètre de productivité

Les débits d'exploitation des forages réalisés varient entre 0,3 m³/h et 3,1 m³/ h avec une moyenne de 1,4 m³/h. Les résultats de la classification des débits des forages (Figure 18) montrent que la classe de débit fort (supérieur à 5 m³/h) n'existe pas dans la zone d'Angovia. Ces résultats montrent aussi que la classe des débits très faibles (50 %), celles de débits faibles (33,67%) représentent 83,67 % des débits de forage de la zone, illustrant que plus de la moitié

RESULTATS ET DISCUSSION

des débits enregistrés sont autour de $1\text{ m}^3/\text{h}$. Dans cette zone, 16,33 % des forages présente des débits moyens ($2,5 \leq 5\text{ m}^3/\text{h}$).

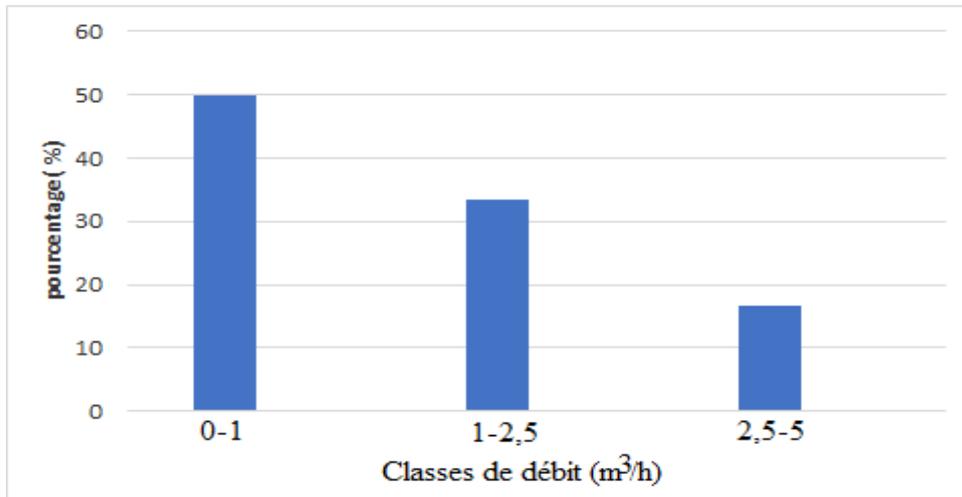


Figure 18 : Distribution des débits en fonction des classes

3.1.4.4.2. Débit (Q) et Profondeur totale (Pt)

L'analyse du graphique de la figure 19 montre l'absence de corrélation significative entre la profondeur totale et le débit.

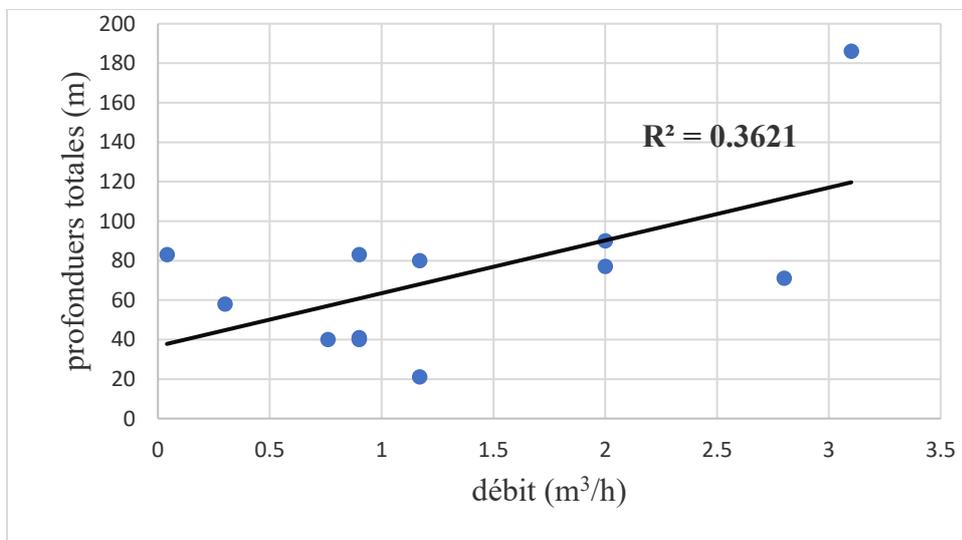


Figure 19 : Corrélation entre débit et profondeur totale

3.1.4.4.3. Débit (Q) et transmissivité (T)

La corrélation entre débit et transmissivité est présentée par la figure 20. Le coefficient de corrélation est de 0,26. Cette valeur est inférieure à 0,6, valeur minimale requise pour qu'il y ait corrélation. Donc il n'y a pas de corrélation entre le débit et la transmissivité. Le plus grand

RESULTATS ET DISCUSSION

nombre de forages ont des débits très faibles, avec des transmissivités de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} m^2/s .

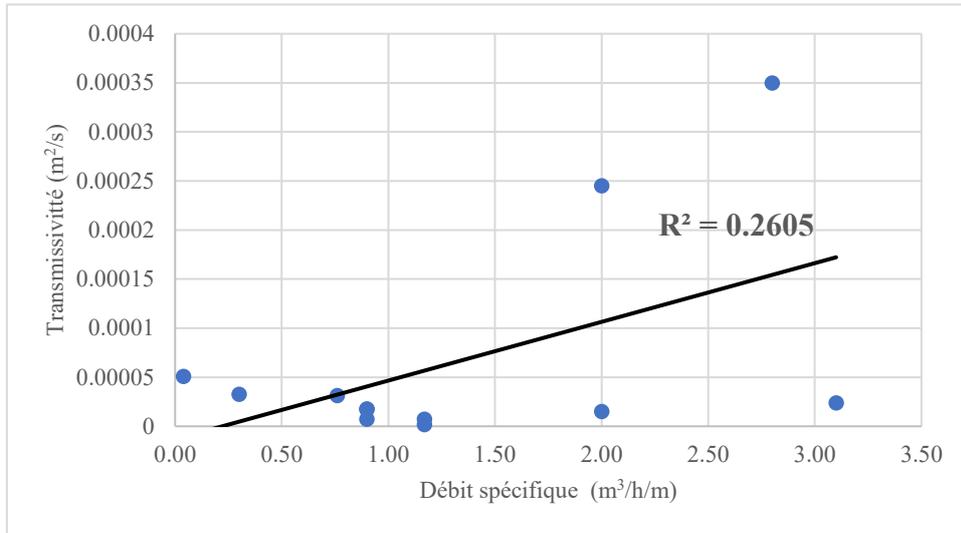


Figure 20 : Corrélation entre transmissivité et débit

3.1.4.4.4. Transmissivité et profondeur totale

La figure 21 représente le graphe de la profondeur totale des forages en fonction de la transmissivité des ouvrages.

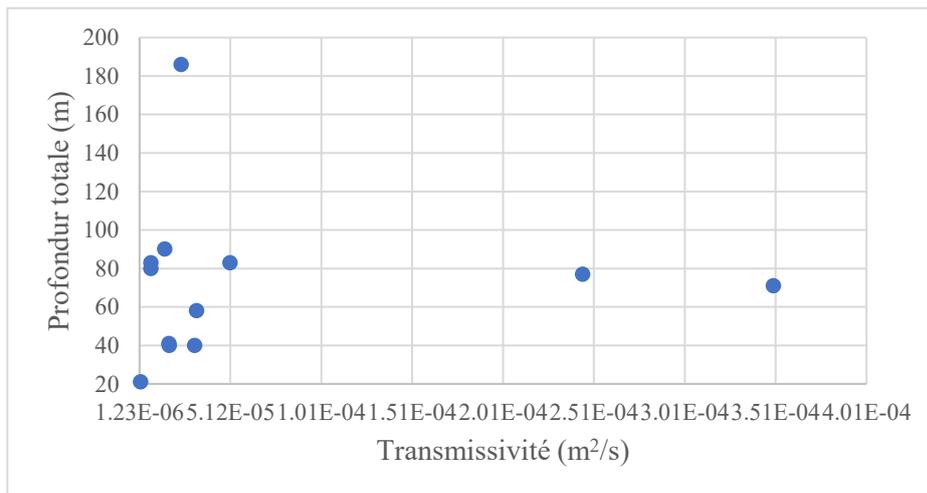


Figure 21 : Corrélation transmissivité et profondeur totale

L'analyse du graphique de cette figure montre l'absence de corrélation significative entre la profondeur totale et la transmissivité. Par contre, la gamme des transmissivités les plus faibles est observée à des profondeurs totales comprise entre 40 et 186 m.

3.1.4.4.5. Arrivée d'eau et profondeur totale

La figure 22 présente le graphique des arrivées d'eau en fonction de la profondeur totale des ouvrages hydrauliques. Le coefficient de corrélation a une valeur de 0,69. Cela démontre

RESULTATS ET DISCUSSION

l'existence d'une corrélation entre les arrivées d'eau et la profondeur totale. Nous remarquons que la plupart des arrivées d'eau se situent entre 30 et 60 m.

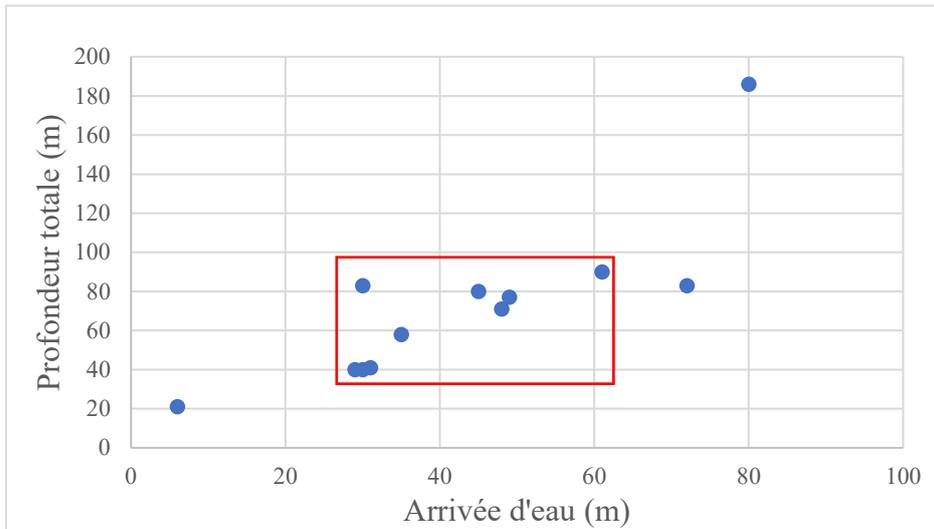


Figure 22 : Corrélation entre Arrivée d'eau et profondeur totale

3.2. Discussion

Les résultats de la cartographie des structures linéamentaires obtenus manuellement ont permis de montrer que la zone du permis d'exploitation minière d'Angovia est faiblement fracturée. Cette faible fracturation pourrait supposer une faible disponibilité en eau souterraine car en milieu de socle, les aquifères de fractures constituent les meilleurs réservoirs. En outre, l'analyse statistique du réseau de fractures a mis en évidence trois directions principales à savoir les directions N-S (N 0-10°), NE-SO (N 30-40°) et NO-SE (N 50-60°). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Adon *et al.*(2019) dans la Haute Marahoué et par Affian *et al.*(2004) et Koffi *et al.* (2013) dans la mine d'or d'Angovia. Les directions principales obtenues par Adon *et al.*, (2019) sont N-S; E-O et NE-SO. Affian *et al.* (2004) ont obtenu quant à eux les directions N 0°-20° (N-S), N 45-50°, N 90°-120° (NE-SO), et N 160°-170° (NO-SE). Toutes les directions de fractures obtenues n'ont pas le même intérêt hydrogéologique. Ainsi les travaux de terrain réalisés par Affian *et al.*(2004) ont montré que sur les affleurements, la direction N 0°-20° correspond à la fois à des directions de fracture, de schistosité de fractures et de filons de quartz. La direction N 45°-50° correspond à des couloirs de cisaillement senestres qui entraînent souvent des fractures et des schistosités de crénulation. La direction N 160°-170° correspond à des couloirs de cisaillement senestres sur certains affleurements et dextres sur d'autres affleurements. La direction N 90°-120° est celle des fractures remplies en quelques

RESULTATS ET DISCUSSION

endroits par de l'aplite. Ces fractures sont recoupées par les cisaillements N 45°-50° et N 160°-170°.

Il ressort du bilan hydrologique global que, l'évapotranspiration réelle (ETR) est le terme le plus dominant avec une valeur de 1124 mm (soit 95,7 % des précipitations). L'importance de ce terme sur le bassin versant est due à la mise à nu des sols due à l'agriculture et à la destruction du couvert forestier Affian *et al.* (2004). Cette valeur reste sensiblement identique à celle obtenue par Kokobou (2017) dans la même zone d'étude qui est de 1045,76 mm (soit 94 % des précipitations). La faible lame d'eau infiltrée, qui est de 46,5 mm reste sensiblement identique à celle obtenue sur la Marahoué (46 mm) par Biémi (1992). Cette faible valeur de la lame d'eau infiltrée pourrait être due aux faibles précipitations (1174 mm) dans la zone. Tout ceci confirme l'importance des précipitations dans la recharge, comme l'a signalé Hughes (2004) en Afrique du sud. Ce dernier a montré que les nappes se rechargent proportionnellement à la précipitation. Aussi, cette faible infiltration pourrait être due à la faible fracturation de la zone et à la destruction du couvert forestier qui favorisent l'érosion et le ruissellement rapide des eaux vers les cours d'eaux (les affluents du Bandama et le lac Kossou) qui drainent la zone d'Angovia. L'étude piézométrique a permis de réaliser deux cartes de l'année 2015 dont une en période de basses eaux et une en hautes eaux. Ces cartes rendent compte du fonctionnement de la nappe pendant les périodes d'extrêmes eaux. Aussi, les fluctuations piézométriques en fonction du temps ont montré deux différentes nappes. Dans l'une, le niveau d'eau reste sensiblement constant au cours des trois années avec seulement des variations ponctuelles en saisons sèche et humide. Dans l'autre, il y a des fortes fluctuations d'un mois à un autre sur les trois années. Ces fluctuations qui sont soit des baisses drastiques ou des augmentations du niveau d'eau dans les forages seraient tributaires de la nature de la nappe, des sollicitations (prélèvements) et ou des saisons climatiques. Les travaux réalisés par Ouédraogo (2016) dans le Bandama blanc ont montré que les amplitudes des fluctuations dues aux prélèvements (pompages quotidiens) sont plus importantes dans certaines localités que dans d'autres. Aussi, Soro *et al.* (2007) dans leurs travaux ont expliqué que la baisse des niveaux statiques des forages serait attribuée aux déficits pluviométriques chroniques relevés en Côte d'Ivoire. De même, Maréchal *et al.* (2006) dans leurs travaux ont montré que cette baisse du niveau piézométrique est souvent due au drainage vers les cours d'eau pérennes ou autres points d'eau environnants.

Les transmissivités calculées varient entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Ces valeurs sont conformes à celles rencontrées par Baka (2012) qui varient de $1,08 \cdot 10^{-06}$ et $8,68 \cdot 10^{-04}$ m²/s dans la région d'Oumé et à celles trouvées par Ouédraogo (2016) dans le bassin du Bandama blanc lesquelles oscillent entre $2,38 \cdot 10^{-6}$ et $7,23 \cdot 10^{-4}$ m²/s. Les valeurs de perméabilités issues de l'interprétation

RESULTATS ET DISCUSSION

de l'essai de pompage sur chaque forage du système aquifère de la mine d'or d'Angovia sont comprises entre $1,23 \cdot 10^{-7}$ et $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$. Dans la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), Kouassi *et al.* (2013) ont obtenu des valeurs allant de $1,79 \cdot 10^{-8}$ et $3,80 \cdot 10^{-6}$ m/s pour une moyenne de $6,35 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les résultats de cette étude sont identiques à ceux obtenus par Kouassi *et al.* (2013) et ce malgré la divergence de méthode. En effet, Cette étude a été menée à partir des valeurs de transmissivité déterminées par la méthode de Cooper-Jacob alors que Kouassi *et al.* (2013) se sont appuyés sur la méthode Hvorslev pour l'estimation de la conductivité hydraulique. La concordance de nos valeurs de transmissivités et de perméabilités avec celles de ces auteurs se justifie par le fait que ces derniers ont travaillé dans les mêmes milieux de socle que le nôtre. L'étude de la corrélation a montré l'absence de relation particulière entre le débit et la profondeur totale. La corrélation obtenue entre transmissivité et débit spécifique est 0,26. Cette corrélation est très faible contrairement à (Konan, 2019) qui a obtenu sur le bassin versant de la Lobo un coefficient de corrélation de 0,61 et Gnamba *et al.* (2014) qui a obtenu dans la région de Katiola un coefficient de corrélation de 0,80. Selon Onétié *et al.* (2011), Cette faible corrélation pourrait s'expliquer par le fait que la relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique peut comporter des incertitudes dues aux effets des pertes de charge dans le puits, si les rabattements mesurés ne sont pas corrigés. Dans la zone d'étude, on peut retenir que les profondeurs varient de 21 à 186 m avec une moyenne de 70,1 m. Le coefficient de corrélation entre les arrivées d'eau et la profondeur totale des forages est de 0,69 et montre que la plupart des arrivées d'eau d'Angovia se situent entre 30 et 60 m. Ceci est conforme aux travaux effectués en Côte d'Ivoire par Jourda (2005); N'Go *et al.* (2005) fixant l'existence de fissures ouvertes entre 50 et 70 m de profondeur. Dans le même contexte de socle, N'Go *et al.* (2005) et Koita *et al.* (2010) suggèrent les profondeurs comprises entre 40 et 70 m comme profondeurs optimales.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

D'abord, l'établissement de la carte du réseau des linéaments de la mine d'or d'Angovia a révélé l'existence de 170 fractures réparties sur une longueur de 266 km. Trois directions préférentielles des linéaments ont été obtenus à savoir les directions N-S, NE-SO et NO-SE à dominance N-S. Ensuite au niveau du bilan hydrologique, la valeur d'ETR obtenue est de 1124 mm/ an sur la période de 2009 à 2018 et représente la fraction la plus importante de la pluie tombée sur la zone d'étude. La lame d'eau infiltrée est de 46,5 mm en moyenne. Elle contribue faiblement à la recharge des aquifères. Le faible taux de lame d'eau infiltré montre que la zone d'étude ne renferme pas d'importantes réserves d'eaux souterraines. Aussi, l'étude piézométrique a-t-elle permis d'établir des cartes qui rendent compte du comportement du système aquifère d'Angovia. Ces cartes ont montré deux zones de recharge de la nappe (une au Nord-Est et l'autre au Sud) et une zone de décharge au Nord. Le sens d'écoulement des eaux souterraines est Ouest-Est (O-E). Sur les trois années d'observation piézométrique, le niveau d'eau diminue et varie en fonction des saisons climatiques ce qui a permis de déterminer deux mois de recharge importante de la nappe à savoir Mai et Octobre. Enfin, l'analyse des fiches d'essai de pompages a permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques du système aquifère d'Angovia. Ainsi, les transmissivités oscillent entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $2,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Les conductivités hydrauliques quant à elles varient entre $1,23 \cdot 10^{-7}$ et $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les débits spécifiques varient entre 0,05 et 3,6 m³/h/m et la moyenne des valeurs est de 0,61 m³/h/m.

Comme recommandations, il faut :

- Etablir des périmètres de protection autour des zones de recharges et de décharges des eaux souterraines de la zone d'Angovia.
- Faire un suivi piézométrique dans les forages simultanément aux dénoyages des fosses minière
- Analyser fréquemment la qualité des eaux des forages et puits pour s'assurer qu'elles ne sont pas polluées.
- Auditer l'entreprise minière pour s'assurer du strict respect de l'environnement

Cette étude ouvre la voie aux perspectives suivantes :

- Faire une étude piézométrique approfondie sur une longue période pour une meilleure connaissance de la variation du niveau d'eau dans le système aquifère d'Angovia.
- Etudier la productivité du système aquifère pour améliorer l'approvisionnement en eau potable.
- Utiliser un modèle d'écoulement pour une meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques suivi d'un modèle de transfert des polluants pour maîtriser le comportement des polluants issus des produits chimiques utilisées sur les sites miniers.

REFERENCES

- Adon G.C., Saley M.B., Oularé S., Kouamé K.A. & Kouamé K.F. (2019). Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire). *International Journal of Engineering Science Invention*, 8(1) : 24-32.
- Affian K., Anoh B.F., Djagoua V.E., Robin M., Azagoh C.M., N'guessan P., Kouamé F., Saley B.M. & Biémi J. (2004). Contribution de la télédétection à la recherche de Gisement d'or dans la région d'Angovia en Côte d'Ivoire. *Contemporary publishing International*, 4(3) : 277–288.
- Anonyme 1 (2015). Amara Mining. Etude d'impact environnemental, projet aurifère du Yaouré, Côte d'Ivoire. *Amara mining plc 4th, 29 – 30 Cornhill London EC3V 3NF. Numéro de carte, 78791 : 4001-4004.*
- Anonyme 2 (2008). SRK Consulting (UK) Ltd. “Technical review of the Angovia gold mine, mount Yaouré, Côte d'Ivoire,” Prepared under National Instrument. *accompanying documents 43-101 F and 43-101CP. Report Prepared for CLUFF GOLD PLC, 24 Queen Anne Gate, London (UK), SW1H 9AA”, 2008, [http:// www.cluffgold.com](http://www.cluffgold.com) : 43–101.*
- Assemian A. E, Kouamé K F, Saley B. F, Affian K, Youan Ta M, Jourda R. P.J & 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.
- BAD (2000). Vision Africaine de l'Eau pour 2025 : Exploitation équitable et durable de l'eau aux fins de développement socio-économique. Rapport principal; BAD/UA/CEA, 64 p.
- Banks D. & Frengstad B. (1992). The chemistry of Norwegian groundwaters: I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *The Science of Total Environment*, 222 : 71-230.
- Bertachini A.C. (1987). Study of the hydrogeologic characteristics of cristalline terrain under humid climate in Jundiai Region, Sao-Paulo State. Thesis, Universidade de Sao-Paulo (Brésil), 639 p.

- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat Ès-Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 479 p.
- Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod Université (Paris), 238 p.
- Chilton P.J. & Foster S.S.D. (1995). Hydrogeological characterisation and water-supply potential of basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology Journal*, 3 (1): 36–49.
- Dibi H.N., Yao C.Y.A., Kouakou E.N., Moussa K. & Yao C.S. (2008). Analyse de la diversité floristique du parc national de la Marahoué, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science* 04(3) : 552 - 579.
- Djè bi D.D. (2015). Evaluation et Planification des ressources en eau du Bassin versant de la Marahoué (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Géosciences et Environnement, UFR Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abibjan, Côte d'Ivoire), 73 p.
- Ehoussou K.M., Kouassi A.M. & Kamagaté B. (2018). Hydrodynamic characterization of the aquifers fissured of the area of the “belier” (Center of Ivory Coast). *Larhyss Journal*, 36: 119–143.
- El-Naqua A. (1994). Estimation of transmissivity from specific capacity data in fractured carbonate rock aquifer. *Environmental Geology*, 23(1) : 73-80.
- FEPS (2008). Exploitation minière et la pollution de l'eau. <http://www.safewater.org/> *Exploitation minière et pollution.*,
- Fossou A. (2010). Contribution hydrogéologique à l'étude des aquifères discontinus du département de Ferkessédougou pour une meilleure alimentation en eau potable. Mémoire DEA, Université Cocody, (Abidjan, Côte d'ivoire), 69 p.
- Guergazi S. & Achour S. (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration. *Larhyss Journal*, 4 : 119–127.

- Healy R.W. & Cook P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 101: 91–109.
- Hobbs (1904). Lineaments of the Atlantic Border Region. *Geological Society of America Bulletin*, 15 : 483-506.
- Hughes A.D. (2004). Incorporating groundwater recharge and discharge functions into an existing monthly Rainfall-runoff model. Institute for Water Research, Rhodes University, Grahamstown 6140 (South Africa) : 297–311.
- Huntley D., Nommensen R. & Steffey D. (1992). The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured-rock aquifer. *Ground Water*, 30(3) : 396–402.
- INS (2015). Répertoire des localités : Région de la Marahoué, 35 p.
- Jourda J.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat D'Etat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 430 p.
- Kingumbi A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de Doctorat, Université Tunis El Manar (Tunisie), 218 p.
- Koffi. G.B, Ouattara G & Yao K.A (2013). Geometry and kinematics of structures controlling the mineralization of Angovia gold mine (Central Ivory Coast, West Africa). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (2) : 1-4.
- Konan Y.E.D. (2019). Caractérisation hydrogéologique du système aquifère du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-ouest de Côte d'Ivoire). Mémoire De Master En Génie de L'Eau et de l'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa (Côte d'Ivoire)), 46 p.
- Kouame K.F. (1999). Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi- montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information

- hydrogéologique à référence spatiale. Thèse De Doctorat 3ème Cycle, Université de Cocody (Abidjan (Côte d'Ivoire)), 194 p.
- Kouamé S. & Koffi A. (2007). Mise en place et entretien des productions végétales et/ou animales : cas du cacao. Institut National Félix Houphouet Boigny de Yamoussoukro, rapport d'étude, 6 p.
- Kouassi K.H (2013). Caractérisation et cartographie des zones humides littorales par l'apport des données radar polarimétriques et optiques : application aux zones de Sassandra, de Grand-Lahou et d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 150 p.
- Kouassi A.M., Okaingni J.C., Kouakou K.E. & Biémi J. (2013). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien : Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2 : 61–71.
- Kouassi W.F., Kouassi K.A., Mangoua M.J., Kamenan Y.M. & Kouadio Z.A. (2019). Evaluation des potentialités en eau souterraine de la portion Ivoirienne du bassin versant du Niger [Assessment of the groundwater resources of the Ivorian portion of the Niger basin]. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 25 : 774-784.
- Lachassagne P., Wyns R. & Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23: 145–161.
- Mace R.E. (1997). Determination of transmissivity from specific capacity test in a karst aquifer. *Ground Water*, 35(5) : 738–742.
- Mangoua M.J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan (Côte d'Ivoire)), 171 p.
- Mangoua M.J., Yao A.B., Douagui G.A., Kouassi K.A., Goula B.T.A. & Biémi J. (2019). Evaluation des potentialités en eau souterraine des aquifères fissurés dans le bassin versant du bandama (côte d'ivoire). *Larhyss Journal*, 37 : 53–74.

- Maréchal J.C., Robert W., Patrick L., Kambhampati S. & Frédéric T. (2003). Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Géosciences*, 335: 451–460.
- Meier P.M., Carrera J. & Sanchez-Vila X. (1998). An evaluation of Jacob's method for the interpretation of pumping tests in heterogeneous porous media. *Water Resources Research*, 34 : 1011–1025.
- MINAGRI (2004). Recensement National de l'Agriculture (Côte d'Ivoire), 90 p.
- N'Go Y.A., Gone D.L., Savane I. & Goble M.M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique science*, 01: 127–144.
- N'go Y.A., Lasm T., Koita M. & Savané I. (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, (9)1 : 33–42.
- Ouattara G.S. (2017). Evaluation de l'impact des exploitations minières sur la qualité des ressources en eau souterraine de la mine d'Angovia (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Génie de L'Eau et de L'Environnement, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé Daloa (Côte d'Ivoire), 55 p.
- Ouédraogo M. (2016). Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la Productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, UFR Sciences Mécaniques et Énergétiques, Matériaux et Géosciences (SMEMAG), Université Paris-Saclay, 199 p.
- Sawadogo A.N. (1984). Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta : étude régionale du bassin versant de Ima Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble (France), 350 p.
- Soro D.D. (2017). Caractérisation et modélisation hydrogéologique d'un aquifère en milieu de socle fracturé : cas du site expérimental de Sanon (région du plateau central au Burkina Faso). Thèse de Doctorat Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

Université Pierre et Marie Curie–Paris 6 (UPMC) - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) (Ouagadougou, Burkina Faso), 237 p.

Soro N. (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implicationn hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat d'Etat Ès Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 256 p.

Soro N., Soro G., Ahoussi K.E., Saley M.B., Lasm T. & Biemi J. (2007). Caractérisation spatiotemporelle des précipitations dans le «V» Baoulé (Centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000. *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, 2 : 89–108.

Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat, UFR des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.

RESUME

L'objectif principal de cette étude est de connaître le fonctionnement du système aquifère d'Angovia. Les données satellitaires, climatologiques (pluie et température) et de forage (fiches d'essai de pompage et levés piézométriques) ont permis de réaliser cette étude. Plusieurs types de méthodes ont été utilisés. Il s'agit d'abord de la télédétection qui a permis d'élaborer la carte détaillée des structures linéamentaires. Aussi le niveau d'eau dans le système aquifère a été évalué à partir du calcul des cotes piézométriques par la méthode de Castany afin de déterminer le comportement du système aquifère. Enfin, l'analyse des fiches d'essai de pompage ont servi à déterminer les propriétés hydrodynamiques. Les résultats obtenus montrent 84 fractures orientées dans les directions N-S, NE-SO et NO-SE. La recharge de la nappe est de 46,5 mm/an. Les eaux souterraines s'écoulent dans le sens Ouest-Est. Les valeurs des transmissivités varient entre $1,85 \cdot 10^{-6}$ et $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $2,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Les conductivités hydrauliques oscillent entre $1,23 \cdot 10^{-7}$ et $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les débits spécifiques varient entre 0,05 et 3,6 m³/h/m et la moyenne des valeurs est de 0,61 m³/h/m.

Mots clés : Caractérisation, hydrogéologie, Aquifères fissurés, mine d'or, Angovia

ABSTRACT

The main objective of this survey is to know the working of the aquiferous system of Angovia. The satellite data, climatologiques (rain and temperature) and of boring (trial cards of pumping and well suvey) permitted to achieve this survey. Several types of methods have been used. It is first about the remote detection that permitted to elaborate the card retailed of the linear structures. Also the level of water in the aquiferous system has been valued from the calculation of the ratings by the method of Castany in order to determine the behavior of the aquiferous system. Finally, the analysis of the trial cards of pumping served to determine the streamlined properties. The gotten results show 84 oriented fault in the N-S directions, NE-SO and NO-SE. The refill of the watertable is of 46,5 mm/an. The underground waters flow out in the West East sense. The values of the transmissivity vary between $1,85 \cdot 10^{-6}$ and $3,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s with an average of $2,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s. The hydraulic conductivities oscillate between $1,23 \cdot 10^{-7}$ and $1,32 \cdot 10^{-5}$ m/s with an average of $3,37 \cdot 10^{-6}$ m/s. The specific debits vary between 0,05 and 3,6 m³/h/m and the average of the values is of 0,61 m³/h/m.

Key words: Characterization, hydrogéology, Aquiferous fissured, gold mine, Angovia,