



REPUBLIQUE DU BENIN

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université d'Abomey-Calavi

Institut National de l'Eau

Département de l'Eau pour l'Agriculture et la Société

Master II

Spécialité : Génie Rural et Maîtrise de l'Eau (GRME)

MEMOIRE DE MASTER

**EVALUATION DES RELATIONS ENTRE LINEAMENT ET
PRODUCTIVITE DES FORAGES EN ZONE DE SOCLE :
IMPLICATION POUR L'AGRICULTURE IRRIGUEE**

Réalisé par :

AIKPE Dagbémabou Mulk

Superviseur :

MC. Dr. ALASSANE Abdoukarim
Hydrogéologie-géophysique

Co-Superviseur :

Dr LAWSON Fabrice

Enseignant chercheur à l'Institut National de
l'Eau

Année académique : 2020-2021

6^{ème} promotion

CERTIFICATION

Nous certifions que ce travail a été réalisé par AIKPE Dagbémabou Mulk, étudiant en Master au Département de l'Eau pour l'Agriculture et la Société, option Génie Rural et Maîtrise de l'Eau (GRME), de l'Institut National de l'Eau (INE) à l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) sous notre supervision.

Le Superviseur

MC. Dr. ALASSANE Abdoukarim

Hydrogéologie-géophysique

Institut National de l'Eau

Université d'Abomey-Calavi

Le Co-Superviseur

Dr. Ir LAWSON Fabrice

Enseignant Chercheur

Institut National de l'Eau

Université d'Abomey-Calavi

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes parents : mon père AIKPE Fortuné et ma mère SOSSOU Juliette pour m'avoir inscrit à l'école, encadré et soutenu au prix d'un sacrifice inoubliable.

REMERCIEMENTS

J'exprime ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, n'ont ménagé aucun effort pour m'assister dans la réalisation de ce travail. Je remercie Dieu Tout Puissant pour son protégé, son amour incommensurable envers ma personne et l'assistance qu'il m'a portée tout le long de la rédaction de ce document.

J'adresse de façon particulière mes sincères remerciements

- A l'endroit de mon maître de stage, le Docteur VOUILLAMOZ Jean-Michel pour ses conseils et son éclairage scientifique tout au long du travail malgré ses multiples occupations ;
- A mes maîtres de stage, le Docteur VOUILLAMOZ Jean-Michel ; et le Docteur LAWSON Fabrice pour leur disponibilité, leur encadrement et pour les nombreux éclaircissements tout le long de ce travail malgré leurs occupations ;
- Au Professeur Luc SINTONDJI, le Directeur du Département Génie Rural et Maitrise de l'eau (GRME), sa rigueur au travail et ses conseils ont été d'une grande utilité pour nous. Que Dieu le Tout-Puissant vous bénisse ;
- A mon aîné LAWSON James, qui ne ménage aucun effort à nous aider.
- A mon collègue TONON Johannot, qui ne ménage aucun effort à m'aider.
- Je m'en voudrais d'occulter le personnel enseignant interne comme externe, à tout le personnel administratif, technique et le corps enseignant de l'Institut National de l'Eau et spécialement celui intervenant au Laboratoire d'Hydrologie et de Maitrise de l'Eau. Nous vous remercions pour les nombreux efforts que vous faites pour que notre formation soit de qualité et pour vos conseils. Puisse Dieu vous accompagner dans chacun de vos projets.
- Tous les responsables de la Formation Professionnelle en Génie rural et maitrise de l'eau à l'INE qui n'ont ménagé aucun effort pour faire de la formation une formation de référence dans le domaine de l'eau au Bénin et en Afrique de l'Ouest.
- Tout le corps professoral de l'INE, le personnel spécialement celui du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) pour ses conseils et son à ma famille, mes parents, mes frères, mes cousins et cousines pour tout leur soutien de quelque ordre. Que Dieu vous bénisse.
- À tous mes camarades avec lesquels j'ai passé ces années de formation.
- À tous les Honorables membres du Jury qui apprécieront ce modeste travail.

SIGLES ET ABREVIATIONS

DG-Eau : Direction Générale de l'Eau

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation

ING : L'Institut Géographique National

LHA : Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

MNT : Model Numérique de Terrain

USGS : United States Geological Survey

DEM: Digital Elevation Model

BAD: Banque Africaine de développement

TABLE DES MATIERES

CERTIFICATION.....	ii
REMERCIEMENTS	iv
SIGLES ET ABREVIATIONS	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ANNEXES	ix
RESUME.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I-1 Définition de quelques concepts	5
1. Le cycle de l'eau (souterraine)	5
2. Aquifères et nappes d'eau	6
3. Le socle.....	7
4. Situation de l'Eau d'irrigation en zone de socle du Bénin	8
5. Irrigation	8
6. Irrigation et besoins en eau des plantes	10
7. Linéament	11
8. Fracture.....	11
9. Productivité de forage.....	11
.....	14
CHAPITRE II : MILIEU D'ETUDE	15
II-1 Situation géographique du milieu d'étude.....	15
II-2 Climat	16
II-3 Relief	16
II-4 Géologie.....	16
II-5 Pédologie	17
II-6 Réseau Hydrographique	18
II-7 Milieu Humain.....	19
II-8 Activités socio-économiques	19
CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE RECHERCHE	21
III-1 Données utilisées.....	21

III-2 Matériels.....	22
III-3 Démarche méthodologique	22
III-3-1 Méthode relative au traitement du modèle numérique de terrain.....	22
III-3-2 Méthode relative au tracé des linéaments de la zone d'étude	23
III-3-3 Méthode relative à la validation des linéaments	23
III-3-4 Méthode relative au calcul de la distance entre forage et linéament.....	24
III-3-5 Méthode relative au calcul du débit nécessaire à l'irrigation	24
III-3-6 Méthode relative à la détermination de quelques paramètres d'irrigation	25
III-3-6 Méthode relative à l'étude des relations entre d'autres paramètres de forages et la distance des forages au linéament le plus proche	26
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	28
IV.1 Résultats obtenus	28
IV.1.1. Traitement du modèle numérique de terrain.....	28
IV.1.2. Traitement du modèle numérique de terrain.....	28
IV.1.3. Tracé de la carte de linéaments de la zone d'étude.....	29
IV.1.4. Superposition des forges aux linéaments.....	30
IV.1.5. Superposition des linéaments à la carte géologique	31
IV.1.6. Résultats de calcul des paramètres d'irrigation	32
IV.1.7. Calcul de la distance entre forage et linéament	33
IV.1.8. Analyse statistique des données de forages	35
IV.2 Discussion	36
CONCLUSION	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39
ANNEXES	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le cycle de l'eau terrestre © BRGM – Michel Villey.....	6
Figure 2 : Formation d'une nappe souterraine ; tirée de Service Eau France, 2019.....	7
Figure 3 : Système d'irrigation par aspersion de VIMAS © MAGNON, 2017	9
Figure 4 : Système d'irrigation goutte à goutte	10
Figure 5 : Arrosage d'une plante par le système d'irrigation goutte à goutte.....	10
Figure 6: Carte administrative de la zone d'étude.....	15
Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude.....	17
Figure 8 : Carte hydrographique de la commune de GLAZOUE	18
Figure 9 : Carte de la zone géographique couverte par le MNT téléchargé.....	23
Figure 10 : Carte MNT de notre zone d'étude	28
Figure 11 : Différentes couches d'ombrages du MNT.....	29
Figure 12 : Ombrage fusionné.....	29
Figure 13: Carte de linéaments de la zone d'étude	30
Figure 14: Carte de linéaments superposés aux forages	31
Figure 15 : Superposition de la carte de linéaments à la feuille géologique.....	32
Figure 16: Histogramme des débits ($\geq 3,6\text{m}^3/\text{h}$) en fonction des distances de forages au linéament	34
Figure 17: Courbe de débit vs distance de forages aux linéaments	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Besoin en eau de cultures maraichères	25
Tableau 2 : Données forage – linéament-débit-distance utilisées pour l’analyse productivité-distance	34
Tableau 3 : Matrice de corrélation entre position et caractéristiques des forages	36

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Données de forages et leurs caractéristiques.....	41
Annexe 2 : Calcul de besoin en eau du riz.....	44
Annexe 3 : Calcul de besoin en eau du piment.....	44
Annexe 4 : Calcul de besoin en eau du riz.....	44
Annexe 5 : Calcul de besoin en eau de la tomate	45

RESUME

La présente étude vise à évaluer les relations entre les linéaments et la productivité des forages en zone de socle ; leurs implications pour une agriculture irriguée dans les communes de Glazoué et Savè. La démarche méthodologique s'est consacrée au tracé manuel des linéaments (éléments rectilignes ou curvilignes que l'on peut percevoir à la croûte terrestre et qui traduisent la présence de phénomènes plus profonds) de la zone d'étude et l'étude des relations entre la productivité et la distance les séparant du linéament le plus proche. Pour ce faire, les données satellitaires (Modèle numérique de terrain ; feuille géologique) et de forages ont été utilisées. Le tracé de linéaments a été réalisé sur le modèle numérique de terrain par le biais du logiciel de QGIS et une analyse des données de forages a été également faite par le biais du même logiciel en calculant la distance entre forage et linéament le plus proche. En se basant sur l'hypothèse selon laquelle, la proximité ou non d'un linéament au forage influence leur productivité, il ressort de l'analyse des données de forages que 18% des forages de la zone d'étude ont un débit nécessaire à l'irrigation ($3,6 \text{ m}^3/\text{h}$) et la proximité ou non d'un linéament au forage n'est pas corrélée à leur productivité. Cela entraîne une insuffisance de débit nécessaire pour l'irrigation des cultures de la zone d'étude. En réaction à une telle situation, et en attendant l'étude des relations entre d'autres paramètres de forages et la proximité ou non des forages au linéament ; une solution immédiate serait l'amélioration de la méthode de tracé de linéament et la mise en réseau de plusieurs forages pour satisfaire le besoin en eau d'irrigation de grandes superficies agricoles.

Mots clés : Linéaments ; Modèle numérique de terrain (MNT) ; Zone de socle ; productivité.

ABSTRACT

This study aims to assess the relationship between lineaments and forage productivity in the basement zone; their implications for irrigated agriculture in the municipalities of Glazoué and Savè. The methodological approach was devoted to the manual drawing of the lineaments (straight or curvilinear elements that can be perceived in the earth's crust and which reflect the presence of deeper phenomena) of the study area and the study of the relationships between productivity and distance separating them from the nearest lineament. To do this, satellite data (digital terrain model; geological sheet) and drilling were used. Lineaments were plotted on the digital terrain model using QGIS software and drilling data was also analyzed using the same software by calculating the distance between the borehole and the nearest lineament. Based on the hypothesis that the proximity or not of a lineament to the borehole influences their productivity, it appears from the analysis of the borehole data that 18% of the boreholes in the study area have a flow rate necessary to irrigation (3.6 m³/h) and the proximity or not of a lineament to the drilling is not correlated with their productivity. This leads to a lack of flow necessary for the irrigation of crops in the study area. In response to such a situation, and pending the study of the relationship between other drilling parameters and the proximity or otherwise of the drilling to the lineament; an immediate solution would be to improve the method of lineament tracing and to network several boreholes to satisfy the need for irrigation water for large agricultural areas.

Keywords: Lineaments; Digital Terrain Model (DTM); Pedestal area; productivity.

INTRODUCTION

L'eau est un élément essentiel, indispensable à la vie, aux écosystèmes naturels et est un bien à caractère socio-économique incontestable. Elle favorise le bien-être des humains. En effet, lorsque les ressources en eau sont restreintes et que différents groupes d'intérêt manifestent en même temps des besoins par rapport à ces ressources, des réactions concurrentielles et conflictuelles apparaissent (BAD, 2000). L'eau intervient dans toutes les activités humaines et dans le développement socioéconomique de tout pays (Protos, 2011). Dans la nature, on la retrouve dans les dépressions topographiques en contact direct avec l'atmosphère (eau de surface), dans les glaciers ou dans les unités géologiques appelées aquifères qui peuvent être consolidés ou non selon le contexte lithologique.

Au Bénin, les roches du socle se sont formées lors de l'orogénèse panafricaine puis ont été altérées et érodées (Biémi, 1992 ; Kouamé, 1999, Akokponhoué et *al.*, 2018). L'exploitation des eaux souterraines dans ces terrains se fait au moyen de deux types de réservoirs : les réservoirs d'altérites et les réservoirs de fractures. Mais les aquifères de fracture, sont les plus recherchés lors des prospections hydrogéologiques, car ils concentrent l'essentiel des réserves en eaux souterraines et sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières (Akokponhoué N., 2020).

Au Bénin, les eaux souterraines représentent la principale source d'alimentation en eau potable et en eau d'irrigation de la population rurale, notamment celle sise sur le socle (Koumassi, 2017b). En effet, ledit socle représente 80 % du territoire, soit 90 400 Km² de superficie (FAO - AQUASTAT, 2005) et contient 97 % des ressources en eau souterraines, (le barbé *et al.*, 1993 in (I. Alle, 2019). Pour l'AEP dans cette zone à partir des eaux souterraines, deux types d'ouvrages sont généralement réalisés : le forage équipé de pompe à motricité humaine ; le forage à gros débit équipé de pompe électrique (MEEM, 2017). Pour l'irrigation, les forages à gros débit équipé de pompe électrique sont les plus utilisés.

Certains de ces forages sont négatifs, d'autres non productifs dû à l'insuffisance de recherche sur la détermination d'éléments rectilignes que l'on peut percevoir sur la croûte terrestre et qui traduisent la présence de phénomènes plus profonds (linéaments) engendré par la géologie des milieux où ils sont implantés. Outre l'AEP, ils peuvent être utilisés à des fins d'irrigation agricole pour pallier au caractère fluviale de l'agriculture béninoise, base de son développement. En Afrique de l'Ouest, l'agriculture occupe une place de premier rang (CEDEAO, 2015) et demeure un facteur essentiel de la réduction de la sous-alimentation. Pour

cela, elle se doit de produire un milliard de tonnes de céréales supplémentaire chaque année (FAO, 2011). Au Bénin, l'agriculture contribue en moyenne à 36% du PIB et emploie plus de 70% de la population (PNUD, 2015).

En revanche, les forages ne présentent pas d'organisation particulière par rapport aux linéaments. Il est à noter que dans certaines zones où sont identifiés des forages à fort débit, sont également présents des forages à faible débit, ce qui tend à démontrer que la productivité (débit spécifique) des forages est localisée et non associée à une zone de socle étendue, dans laquelle les circulations souterraines et la productivité seraient quasi-généralisées. Des cas similaires (forages à faible débit à proximité de forages à fort débit) sont connus dans le bassin de la Rivière Jundiaí au sud-est du Brésil (Neves & Morales, 2007) et à l'ouest de Norvège (Henriksen & Braathen, 2005).

Pour pouvoir répondre aux besoins futurs en alimentation, il est indispensable d'améliorer les connaissances, la recherche, l'innovation et la mise en œuvre pour parvenir à une utilisation plus productive et durable de l'eau, notamment pour la production alimentaire. L'irrigation est l'une des nombreuses méthodes de maîtrise d'eau pour l'agriculture (Houssou *et al.*, 2013). Son efficacité se doit d'être améliorée car, elle est indispensable à l'accroissement de la production alimentaire (Agbossou *et al.*, 2010). En 2013, la Banque mondiale mentionne que l'agriculture irriguée représente 18 % des surfaces et fournit 40 % de la production alimentaire mondiale. Ce pourcentage devrait atteindre 60 % en 2025 selon la FAO.

L'irrigation a un effet d'augmentation de productivité de la terre, d'amélioration des rendements et donc des revenus, de réduction des risques liés à la variabilité du climat (Giordano *et al.*, 2012). Cette activité ne nécessite pas que l'eau de surface mais peut très bien aussi fonctionner avec l'eau souterraine, d'où la possibilité de sa mise en œuvre en zone rocheuse.

Une connaissance plus fine des réservoirs fracturés est donc nécessaire pour une meilleure exploitation, protection et gestion efficaces de leurs ressources (Lasm *et al.*, 2014). En effet, la télédétection est un outil incontestable dans l'étude des discontinuités tectoniques même les plus discrètes pour la prospection hydrologique et la recherche des eaux souterraines dans les milieux fracturés. L'utilisation d'approche couplées Télédétection-SIG ; Géologie-Hydrogéophysique permettent d'identifier les fractures d'origine tectonique susceptible d'être productrice et réduire considérablement les incertitudes dans l'implantation des forages en zone de socle (Akokponhoué *et al.*, 2019).

Ainsi, pour aider à la mise en valeur des aménagements hydrauliques en zone de socle et contribuer à garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement, cette recherche vise à déterminer comment l'étude des relations entre linéaments et productivité des forages en zone de socle peut contribuer à la détermination de forages productifs pour l'irrigation. Comme l'affirmait le chercheur Jean-Michel Vouillamoz à SciDev.Net, « Il existe clairement des

déficits de connaissances qui demandent à être comblés pour mieux valoriser les eaux souterraines. ».

1. Objectifs de l'étude

L'objectif général de la présente étude est de déterminer les relations entre linéaments et productivité des forages en zone de socle pour une agriculture irriguée efficiente. Les étapes permettant d'atteindre celui-ci, sont déclinées en objectifs spécifiques suivants :

- Cartographier les linéaments de la zone d'étude (Glazoué et Savè) ;
- Analyser la relation entre la proximité des forages au linéament et la productivité des forages ;
- Investiguer les relations existantes entre les linéaments et les gros débits d'irrigation

2. Hypothèses

- Les linéaments tracés dans la zone d'étude sont susceptibles d'être des fractures ;
- La proximité ou non d'un linéament aux forages influence leur productivité ;
- Le débit des forages est suffisamment important pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation des cultures dans la zone d'étude.

3. Structuration du document

Le présent travail est structuré en quatre chapitres. Au prime abord, une introduction générale aborde le contexte, la problématique, les objectifs fixés et les hypothèses de l'étude. Le chapitre 1 renseigne sur la synthèse bibliographique, une clarification des concepts et notions clés. Le chapitre 2 quant à lui est consacré à la présentation du milieu d'étude. L'avant dernier chapitre (3) présente le matériel utilisé ainsi que les méthodes adoptées par objectif spécifique pour l'atteinte des résultats. Dans le quatrième chapitre, les résultats obtenus, les commentaires et discussions sont présentés, et enfin la conclusion accompagnée de quelques suggestions.

CHAPITRE I

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre aborde les terminologies (propres à l'hydrogéologie et d'autres disciplines connexes) dont la connaissance aide à la compréhension de notre recherche.

I-1 Définition de quelques concepts

1. Le cycle de l'eau (souterraine)

Avant d'entreprendre son voyage pour alimenter en profondeur nos sous-sols créant ainsi des nappes, l'eau souterraine fait d'abord partie d'un processus connu depuis l'existence de la planète, le cycle de l'eau. Ce fabuleux phénomène comporte plusieurs étapes dont : l'évaporation, la transpiration, la condensation, les précipitations, l'écoulement de surface, les infiltrations, la résurgence des eaux souterraines, le stockage des eaux souterraines (The USGS Water Science School, 2019).

L'eau issue des océans et lacs s'évapore du sol en plus de celle issue de la transpiration des plantes (évapotranspiration) et se dirige vers l'atmosphère. Toutes ces étendues aquatiques de surface passent à l'état gazeux sous l'action de l'énergie solaire. Une fois dans l'atmosphère, lorsque les vapeurs sont assez importantes, elles se condensent (processus par lequel l'eau passe de l'état gazeux à l'état liquide) sur des particules en suspension pour former des nuages. L'eau retombe sur la terre sous forme de précipitations dès lors que les gouttes d'eau contenues dans les nuages deviennent suffisamment lourdes. Elles peuvent rejaillir sous forme de pluies, de grêle ou encore de neige en fonction de la température.

Une partie de l'eau ruisselle sur la surface du sol pour alimenter les réservoirs d'eaux superficielles : lacs, ruisseaux, rivières, etc. Elle compte pour environ 24 % des précipitations tandis que 11 % seulement s'infiltrent dans le sous-sol pour la recharge des nappes (Guillemain & Winckel, 2013) et aquifères. Cette recharge se fait par la percolation qui représente l'écoulement de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous l'influence majeure de la gravité. Ce processus succède à l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines (CSEB, 2005a). Le cycle reprend indéfiniment à partir du moment où les eaux continentales se déversent dans la mer. La figure 1 suivante illustre ce processus.

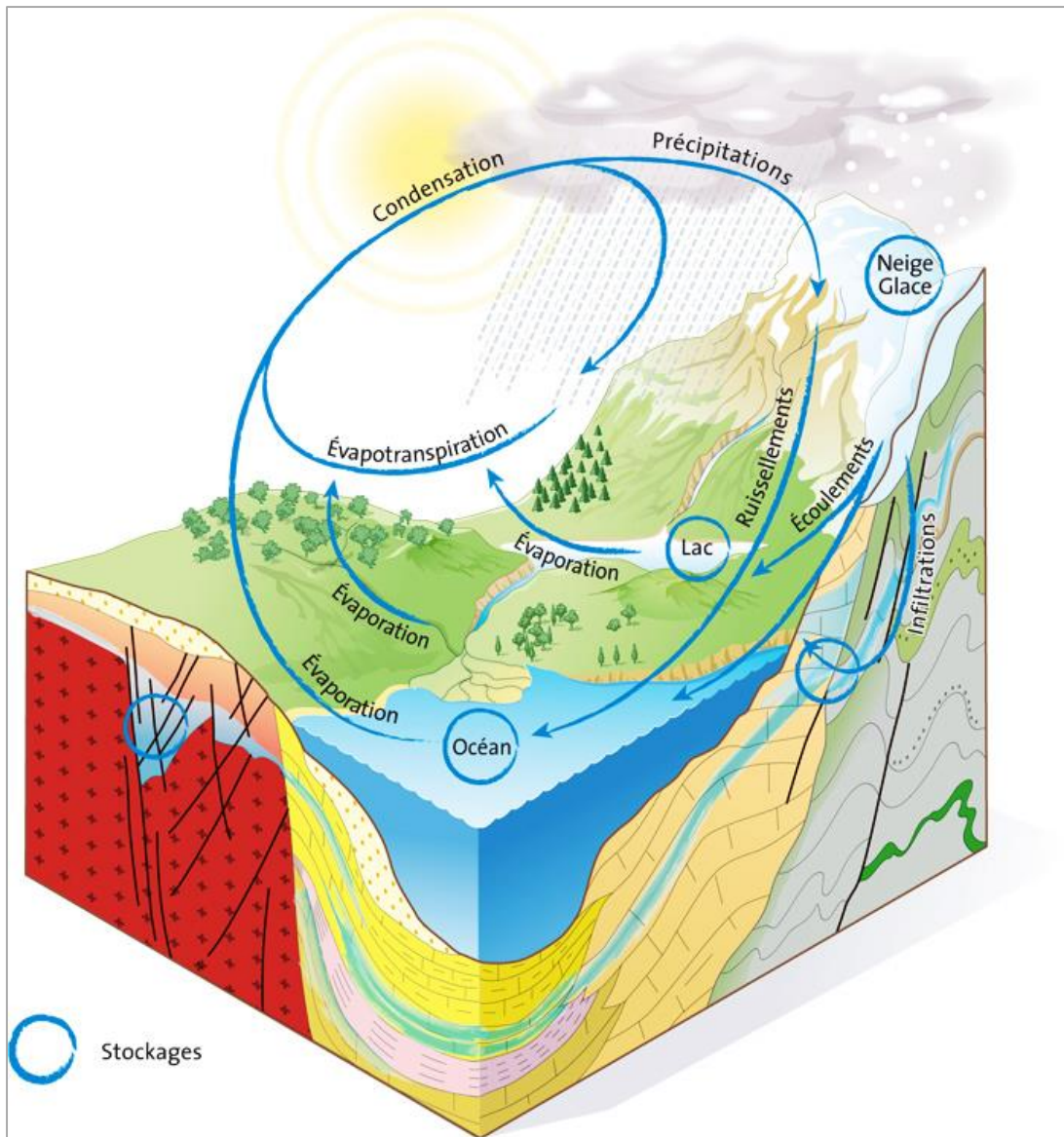


Figure 1 : Le cycle de l'eau terrestre © BRGM – Michel Villey

<https://sigesbre.brgm.fr/Nouveau-Article-sur-le-cycle-de-l-eau.html>

2. Aquifères et nappes d'eau

Le terme aquifère désigne une formation géologique contenant une nappe d'eau souterraine (Margat, 1972). Il est perméable (pouvant se laisser traverser par l'eau) et abrite de l'eau en quantités exploitables (CESEAU, 2021). Les aquifères sont opposés aux aquicludes et aquitards qui sont quasi-imperméables, laissant difficilement passer l'eau. Les couches géologiques de calcaire et de sables sont de parfaits exemples de réservoirs d'eau.

Selon Adam et Baptiste (2003), un aquifère (acque= eau ; fera= je porte) est « une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine

et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques. C'est un système hydrologique, hydrodynamique ». En supposant une coupe de l'aquifère, de haut en bas on distingue (MUDRY, 2021) : un sol susceptible de réguler les flux d'infiltration d'eau, une zone appelée « vadose » communément appelée zone non saturée (ZNS), et un milieu constitué de la roche, l'eau et l'atmosphère souterraines. En fonction des bassins versants et la position topographique considérée, la zone non saturée est constituée par le sol et/ou l'altérite (CSEB, 2005b).

À l'intérieur de l'aquifère l'eau s'infiltré et finit par former une nappe d'eau au niveau de la zone saturée (ZS) ou zone noyée. Cette étendue se constitue principalement de roche et d'eau (nappe d'eau), avec une surface supérieure, appelée surface piézométrique (MUDRY, 2021). Une nappe d'eau souterraine est donc l'eau contenue dans les interstices ou les fractures ou fissures d'une roche du sous-sol. En d'autres termes, c'est de l'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches, saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées (SIGES Occitanie, 2021). L'aquifère est donc le contenant et la nappe, le contenu. Il existe les nappes libres ou phréatiques et les nappes captives. La figure 2 montre la procédure de création d'une nappe d'eau.

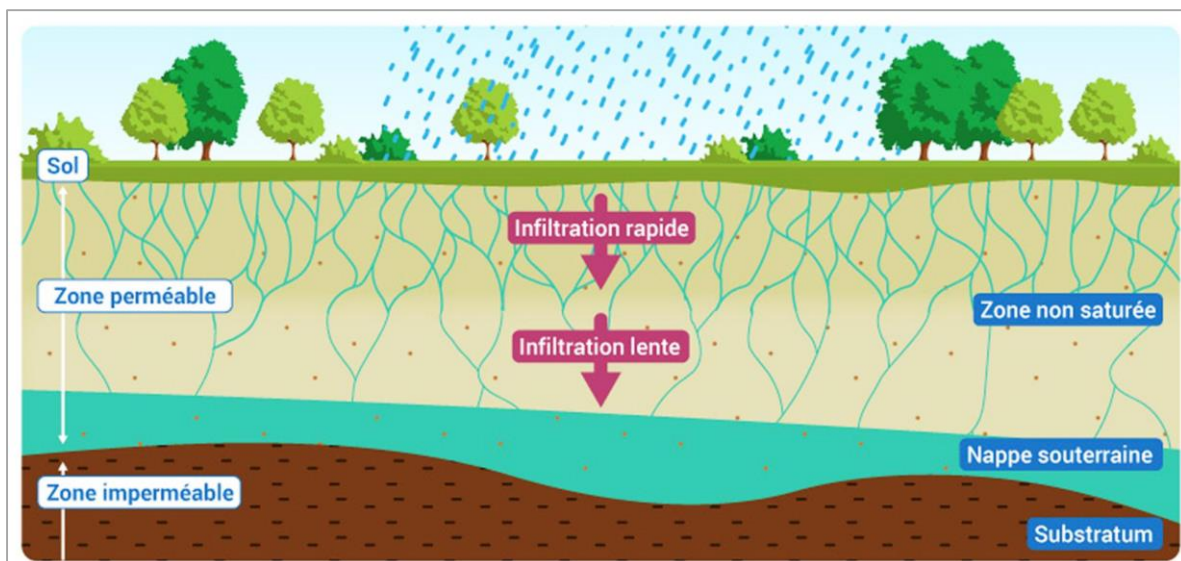


Figure 2 : Formation d'une nappe souterraine ; tirée de Service Eau france, 2019

3. Le socle

Selon le Dico des mots de la géologie (2017), le socle fait référence en géologie au substratum rocheux d'une région. Il est composé de roches sédimentaires anciennes et de roches magmatiques et métamorphiques formées au cours d'un ou plusieurs cycles orogéniques, par la

suite rabotées par l'érosion. On parle aussi de socle lorsqu'on est en présence de roches cristallines et plutoniques caractérisées par une faible perméabilité, inférieure à 10^{-8} m/s (Lachassagne et al., 2015).

Bogdanoff (2022) dans l'encyclopédie Universalis, affirme que le socle peut être considéré comme un large ensemble de roches qui ont subi une ou plusieurs phases de déformation intense, une ou plusieurs phases de métamorphisme régional, une ou plusieurs granitisations, des intrusions de type varié acides ou basiques, le tout accompagné et suivi par une érosion et une pénéplanisation.

Dès que ce dépôt est formé, une succession de transgressions marines, lacustres, etc., étagées dans le temps, recouvrent complètement ou en partie le bâti érodé, permettant ainsi le dépôt de roches sédimentaires horizontales. L'ensemble formé par ces roches est appelé couverture du socle sous-jacent.

4. Situation de l'Eau d'irrigation en zone de socle du Bénin

Dans les régions situées en zone de socle cristallin, les populations sont confrontées à un véritable problème d'approvisionnement en eau d'irrigation pour couvrir les besoins en eau de leurs cultures. En effet, la configuration des sous-sols de ces zones fait que la construction des forages n'est possible qu'au niveau des discontinuités des roches qui les composent (Yetongnon, 2020). Cette approche a été adoptée à la suite de différentes études comme celles de Lasm (2000) qui ont conclu qu'il faut une meilleure connaissance des aquifères fracturés est indispensable pour la localisation, l'exploitation et la gestion durable des ressources en eau.

En dépit de l'application de cette méthodologie, il est remarqué que le pourcentage des forages de débit inférieur à 1 m^3 approche les 85%. De plus, 40% des forages réalisés dans le socle sont négatifs, ils produisent des débits nuls ou inférieurs aux 700 l/h nécessaires pour que le forage soit utilisé comme il faut (Akokponhoué et al., 2019 ; Vouillamoz et al., 2015).

5. Irrigation

L'irrigation est la fourniture artificielle et la répartition systématique de l'eau pour l'agriculture, afin d'en augmenter la production et combler le déficit hydrique des plantes (Cantor, 1967). Elle a plusieurs effets positifs comme la régulation des eaux de ruissellement, le contrôle des inondations, la réutilisation de l'eau et la protection contre l'érosion du sol (Tollefson & Harrington, 2005). Irriguer revient à répondre au mieux aux questions relatives au moment, à la durée et à la dose d'irrigation, ainsi qu'à garantir un potentiel de production quantitatif et

qualitatif à moindre coût en évitant tout apport inutile (Agbossou, 1994), cité par (Houssou et al. 2013). Les systèmes d'irrigation se regroupent en deux catégories à savoir les systèmes gravitaires et les systèmes sous pression (Laere, 2003).

➤ *Système gravitaire*

L'irrigation de surface ou irrigation gravitaire consiste à amener l'eau au point le plus haut d'un terrain et à la laisser s'écouler par gravité (Brouwer, 1990a). L'eau est ensuite distribuée au champ, soit par submersion (irrigation par bassins), soit dans des sillons en terre (irrigation par sillons) ou bien par ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches). Historiquement, le gravitaire est la méthode d'irrigation la plus utilisée sur les terres agricoles avec une efficacité de 40 à 80 % (Clément et al., 1978a).

➤ *Système sous pression*

Clément et al. (1978) ont souligné que les systèmes d'irrigation sous pression engendrent une économie d'eau moyenne de 30 à 60 %, par rapport aux systèmes gravitaires. On distingue l'irrigation par aspersion et l'irrigation localisée. La technique d'irrigation par aspersion est conçue sur le modèle de la pluie naturelle (Brouwer, 1990b). C'est un arrosage sous forme de pluie fine permettant une bonne infiltration, il est homogène sur la surface arrosée. L'eau est en effet envoyée sous pression à travers des asperseurs et retombe en fines gouttes sur le sol (BRL, 2010). La Figure n° 3 illustre le système d'irrigation par aspersion du village maraîcher de Sèmè-Kpodji (VIMAS) au Bénin.



Figure 3 : Système d'irrigation par aspersion de VIMAS © MAGNON, 2017

L'irrigation localisée quant à elle, est une méthode d'arrosage qui fournit l'eau aux cultures en faible quantité et à une fréquence élevée (JICA, 2014). Pour (Sné, 2007), le goutte-à-goutte permet l'approvisionnement exact en eau et en engrais de la zone racinaire active avec un minimum de perte. Les figures 4 et 5 montrent des systèmes d'irrigation goutte à goutte.



Figure 4 : Système d'irrigation goutte à goutte



Figure 5 : Arrosage d'une plante par le système d'irrigation goutte à goutte

Source : <https://www.iStockphoto.com>

6. Irrigation et besoins en eau des plantes

L'eau est un facteur limitant que ce soit par excès ou par manque (BLE-CIVAM & Bouchy, 2011). Pour atteindre des objectifs de production satisfaisants, une culture doit être dans les conditions hydriques optimales (ARDEPI, 2012). Ces conditions sont assurées par une bonne connaissance des besoins en eau, qui dépendent du stade de développement de la culture, des conditions climatiques, des stocks d'eau dans le sol et des apports extérieurs (pluie, irrigation). Le besoin en eau d'une culture représente la quantité d'eau totale requise pour l'évapotranspiration et le développement de ses cellules, depuis la plantation jusqu'à la récolte (Frenken & Gillet, 2012).

Selon AIQ (2004), il est important en irrigation, de fournir aux plantes le volume d'eau qui manque dans le sol exploré par les racines, pour leur permettre de transpirer normalement et donc de réaliser une bonne photosynthèse. En effet, pour réaliser sa photosynthèse, la plante doit ouvrir une multitude de stomates lui permettant de capter le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air. Ces stomates ouverts laissent échapper inévitablement l'eau sous forme de vapeur (transpiration). Ainsi, pour assurer une gestion optimale des apports en eau, il est essentiel de mettre en place un système d'irrigation bien pensé qui permettra d'apporter aux cultures la

quantité d'eau suffisante au bon moment (Sud&Bio, 2016). Une irrigation bien maîtrisée permet des économies d'eau, un développement régulier et équilibré de la plante, une régularité de rendements et de production dans le temps (GAB/FRAB, 2016).

7. Linéament

Selon les travaux de Dubois, (1999) et Sawadogo *et al.*, (2012), les linéaments sont des éléments rectilignes ou curvilignes que l'on peut percevoir à la croute terrestre et qui traduisent la présence de phénomènes plus profonds, comme par exemple des failles, des fractures et des contacts géologiques. La cartographie des linéaments est notamment très importante dans les domaines d'exploitation minière et pétrolière, de l'hydrographie ainsi que de la sismologie. L'avènement des satellites d'observation a grandement facilité le travail de cartographies qui disposent maintenant d'une vue globale de la surface de la terre.

8. Fracture

Une fracture est une discontinuité d'origine mécanique et tectonique apparaissent dans les niveaux structuraux moyens et supérieurs de l'écorce terrestre (Sawadogo *et al.*, 2012). Il ajoute que la notion de fracture vue sous cet angle englobe les diaclases, les fentes ou fractures d'extension, les joints stylo-lithiques et les failles de différentes dimensions. Ces éléments (diaclasses, les fentes, etc.) sont fonctions de la taille de la fracture et selon qu'il existe un rejet ou non entre les deux (02) bords :

- Il y a faille quand les deux (02) compartiments séparés par la fracture montrent un déplacement l'un par rapport à l'autre ; et ce déplacement peut aller de l'ordre du mètre à quelques dizaines de kilométriques ;
- On parle de cassure lorsque ces déplacements sont faibles ;
- Et de diaclases ou joints lorsque le déplacement relatif est très petit ou nul.

9. Productivité de forage

La productivité d'un forage, est le volume d'eau qui peut être débité pendant une durée donnée, sans que le rabattement induit par le pompage ne dépasse le rabattement maximum admissible. Elle est exprimée en m²/h soit le rapport du débit sur le rabattement induit par pompage.

➤ Usages de l'eau

Bien que, dans certains pays, quelques réglementations existent visant à fixer les demandes en eau potable, la quantification rigoureuse de ces demandes repose généralement sur des statistiques.

➤ *Usages domestiques*

La consommation domestique moyenne est généralement rapportée au nombre d'habitants, elle est alors exprimée en litres par jour et par habitant (en l/jour/hab). Cette consommation varie en fonction de plusieurs facteurs : le niveau de vie, les habitudes, la disponibilité de l'eau, le climat, le prix de l'eau, la forme de la fourniture de l'eau (alimentation individuelle ou borne fontaine), etc. D'autre part, elle évolue d'une année à l'autre, en liaison avec l'évolution du niveau de vie. Les besoins domestiques d'une agglomération quelconque peuvent être estimés par : soit des statistiques, qui concernent la consommation moyenne et son évolution annuelle, ainsi que le nombre total d'habitants et le taux annuel d'accroissement de la population. Ceci n'est possible que pour une agglomération qui est déjà alimentée en eau potable. - soit en comparaison avec d'autres agglomérations qui sont jugées comparables, surtout en ce qui concerne le niveau de vie et le climat, et pour lesquelles des données statistiques sont disponibles. Une petite enquête permet alors de connaître le nombre d'habitants. Citons à ce propos, la norme de l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.) qui fixe la consommation domestique minimale à 55 l/jour/hab. Pour les Bornes Fontaines 11 l/jour/hab. Pour les Zones Rurales 50 l/jour/hab. Pour les Villes Moyennes 80 l/jour/hab. Pour les Grandes Villes 140 l/jour/hab. Quant aux valeurs des consommations domestiques spécifiques à prévoir pour l'alimentation de nouvelles zones ou de nouvelles villes, nous pouvons citer, à titre indicatif, quelques valeurs en relation avec le nombre d'habitants de l'agglomération : Pour une Grande Ville (plus de 100000 habitants) : de 120 à 200 l/jour/hab. - Pour une Ville de 20 000 à 100000 habitants : de 100 à 140 l/jour/hab.

➤ *Besoins publics*

Les besoins publics englobent la consommation des administrations, des établissements d'enseignement, des municipalités, des hôpitaux, etc... Nous citerons, ci-dessous, quelques exemples de besoins publics :

- Pour le nettoyage des rues et l'arrosage des jardins : de 3 à 5 l/jour/m².
- Hôpitaux : de 300 à 600 l/jour/lit. - Pour les administrations : de 100 à 200 l/jour/employé.
- Pour les Ecoles Primaires de 10 à 20 l/jour/élève.
- Pour les Lycées de 20 à 30 l/jour/élève.
- Pour les Facultés et Foyers Universitaires de 100 à 200 l/jour/étudiant

➤ *Besoins industriels*

On ne tient compte, en général, que des besoins des petites industries, qui consomment de l'eau potable et branchées sur le réseau de la ville. Actuellement, les grandes industries sont isolées de la ville (ou situées dans des zones industrielles) et alimentées par des réseaux indépendants. Celles qui consomment beaucoup d'eau doivent avoir leur propre source en eau : puits, forages, barrage, la mer, etc... Notons que la consommation industrielle dépend du produit fabriqué et surtout du procédé de fabrication utilisé.

➤ *Besoins d'irrigation*

Le prix de l'eau potable étant très élevé, son utilisation en irrigation se limite, éventuellement, à quelques cultures de fleurs et à quelques pépinières. L'agriculture occasionne environ 70 % de toute la consommation d'eau douce sur la planète. Cette consommation est essentiellement le fait de l'agriculture irriguée, qui occupe environ 17 % des terres cultivées mais assure 40 % de la production agricole mondiale (le reste étant assurée par l'agriculture dite pluviale). (Yalo et al 2017).

CHAPITRE II

CHAPITRE II : MILIEU D'ETUDE

II-1 Situation géographique du milieu d'étude

La Commune de Glazoué est un territoire à caractère rural situé au cœur du département des Collines à 234 km de Cotonou, la Capitale économique du Bénin. Elle est limitée au Nord par les communes de Ouèssè et Bassila, au Sud par la commune de Dassa, à l'Est par Ouèssè et Savè et à l'Ouest par Bantè et Savalou et est située entre 7°45' et 8°30' de latitude Nord puis 2°05' et 2°25' de longitude Est. Le territoire de la commune s'étend sur une superficie de 1.750 Km² avec une densité d'environ 51 habitants par Km². La commune de Savè est située dans la partie centrale du Bénin dans le département des Collines, entre les latitudes 7°10' et 8°30' Nord et les longitudes 2°22' et 2°45' Est. Elle s'étend sur 2228 km² et limitée au Nord par la commune de Ouèssè, au Sud par la commune de Kétou dans le département du Plateau, à l'Ouest par les communes de Glazoué et de Dassa-Zoumé, à l'Est par la République du Nigéria. La ville de Savè, chef-lieu de la commune, est située, à environ 255 km de Cotonou.

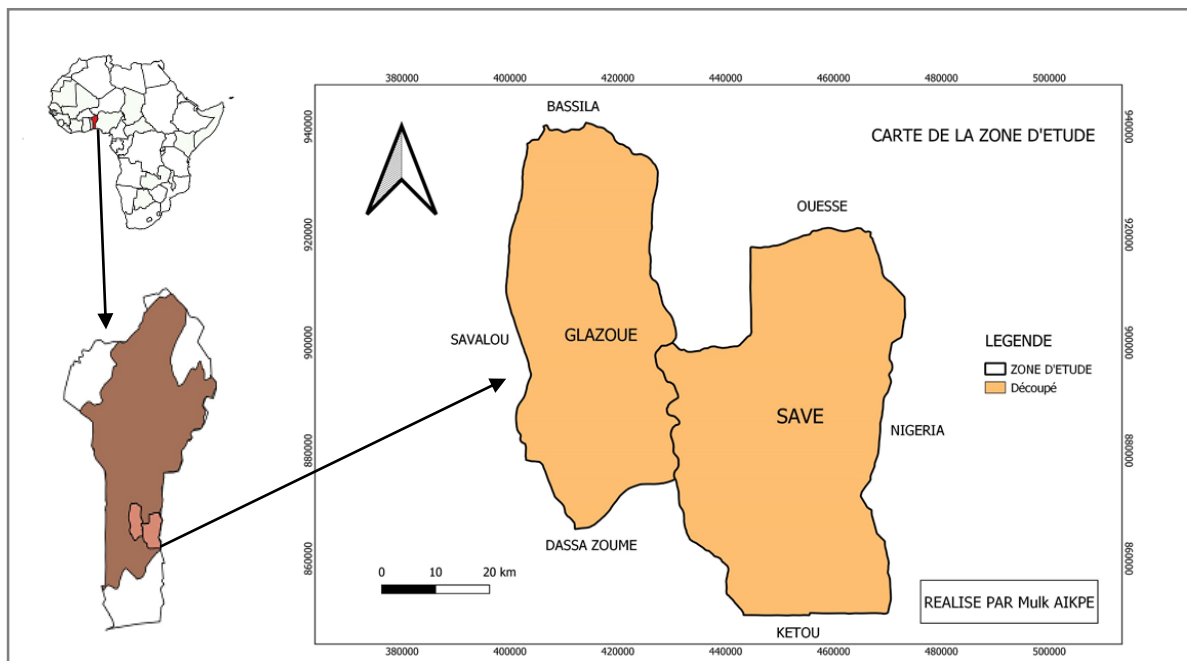


Figure 6: Carte administrative de la zone d'étude

II-2 Climat

La Commune de Glazoué appartient à une région soumise à la fois aux influences équatoriales et aux influences du régime alterné de type guinéen. C'est la zone où s'estompent les influences de la mousson du Sud-Ouest et de l'alizé continental appelé harmattan du Nord-Est. La pluviométrie annuelle moyenne pour la commune est de 959,56 à 1255,5 mm ; la température moyenne varie entre 24 et 29 °C. Depuis la région côtière jusqu'à Savè, la courbe des précipitations y présente un aspect bimodal (avril à juin et septembre à novembre). Mais depuis peu, ce climat a laissé place à un climat tropical de type soudanien marqué par une saison pluvieuse et une saison sèche. Les hauteurs moyennes des pluies sont de 1100 mm par an. Au total, les caractéristiques climatiques du secteur de Savè offrent de très bonnes conditions pour la pratique des activités agricoles. Mais l'instabilité pluviométrique entraîne la baisse des rendements agricoles diminuant ainsi les potentialités de sécurisation alimentaire de la commune. Les températures extrêmes montent parfois jusqu'à 38°.

II-3 Relief

Le relief de la commune de Glazoué est marqué par la présence de plateau (200 à 300m) dominés par des collines par endroit. La dénivelée est d'environ 334 m entre le point le plus haut et le point le plus bas (K. S Adam et M. Boko, 1993, p. 44). Le relief de la commune de Glazoué est dominé par des collines par endroits (Sokponta, Gomé, Camaté, Tankossi, Tchatchégou, Thio, Ouèdèmè, Assanté et Aklampa) ; ce qui constitue des atouts touristiques (PDC Glazoué, 2003). Quant à la commune de Savè, elle est une ville située sur un plateau cristallin, dominé par un alignement nord-sud de collines ; l'altitude la plus élevée culmine à 431 m au niveau de la ville. Son site est profondément délimité à l'Ouest par la vallée de l'Ouémé, au Sud et à l'Est par celle de l'Okpara.

II-4 Géologie

La région d'étude repose principalement sur cinq (5) types de roches :

- a) Les granites qui apparaissent dans le paysage sous forme de dômes ou de collines arrondies. Ils sont sans litage, ni orientation ;
- b) Les gneiss, qui sont à litage régulier et fin renferment essentiellement des biotites et du quartz parfois des amphiboles.
- c) Le gneiss migmatique, à composition sensiblement identique à celle des granites,

- d) La pegmatite qui a une composition granitique et contient parfois des minéraux rares comme le phosphate de fer.
- e) Les migmatites sont constituées, à l'échelle de l'affleurement, d'un mélange de roches au taux de fusion très variable.

La figure ci-dessous nous présente la carte géologique de la zone d'étude.

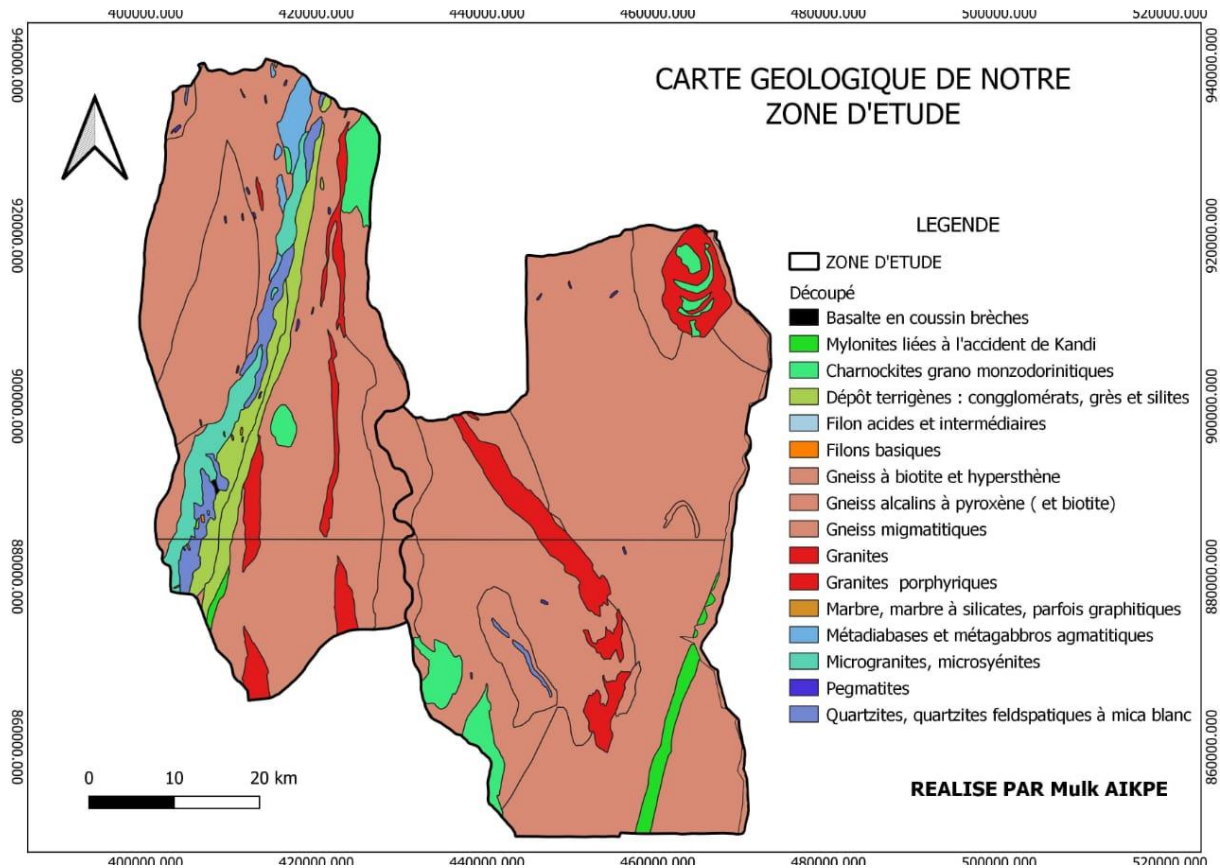


Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude

Source : Extrait du Modèle Numérique de Terrain

II-5 Pédologie

Les principaux types de sols rencontrés sont :

- les sols ferrugineux qui sont caractérisés par une dominance des oxydes de Fer en raison d'une altération incomplète des sols minéraux.

On observe aussi des sols :

- latéritiques et fertiles
- hydromorphes présentent dans les vallées des cours d'eau et les bas-fonds

II-6 Réseau Hydrographique

L'hydrographie est constituée d'une part, d'un important cours d'eau qu'est le fleuve Ouémé qui arrose la Commune au niveau des villages d'Aklampa, de Béthel, Lifo et une partie de l'arrondissement de Zaffé et d'autre part de petits cours d'eau locaux (Adoué, Kotobo, Trantran, Tehoui, Antadji Tchololoé...) qui favorisent le développement du maraîchage de contre saison et les activités de pêche artisanale (PDC Glazoué, 2003). De plus, on rencontre dans quelques villages de la Commune, un certain nombre de bas-fonds érodés souvent fertiles et propices à la culture du riz et à la culture maraîchère (PDC Glazoué, 2003). La Commune de Savè a un réseau hydrographique plus ou moins fourni, relativement dense composé de petits courants d'eau. Le régime hydrographique est régulier avec des étiages assez prononcés et des crues d'Août à Octobre. Outre l'Ouémé le plus grand fleuve du pays qui constitue la limite Est de la commune de Dassa, elle est drainée par des cours d'eau à régime saisonnier. Ils sont des affluents ou des sous affluents du fleuve Ouémé et du Zou. On a Okrou qui fait frontière avec Savalou, Kossi au nord-est, Loto et Etéwi qui arrosent l'intérieur de la commune. Ils sont alimentés par les eaux de pluie.

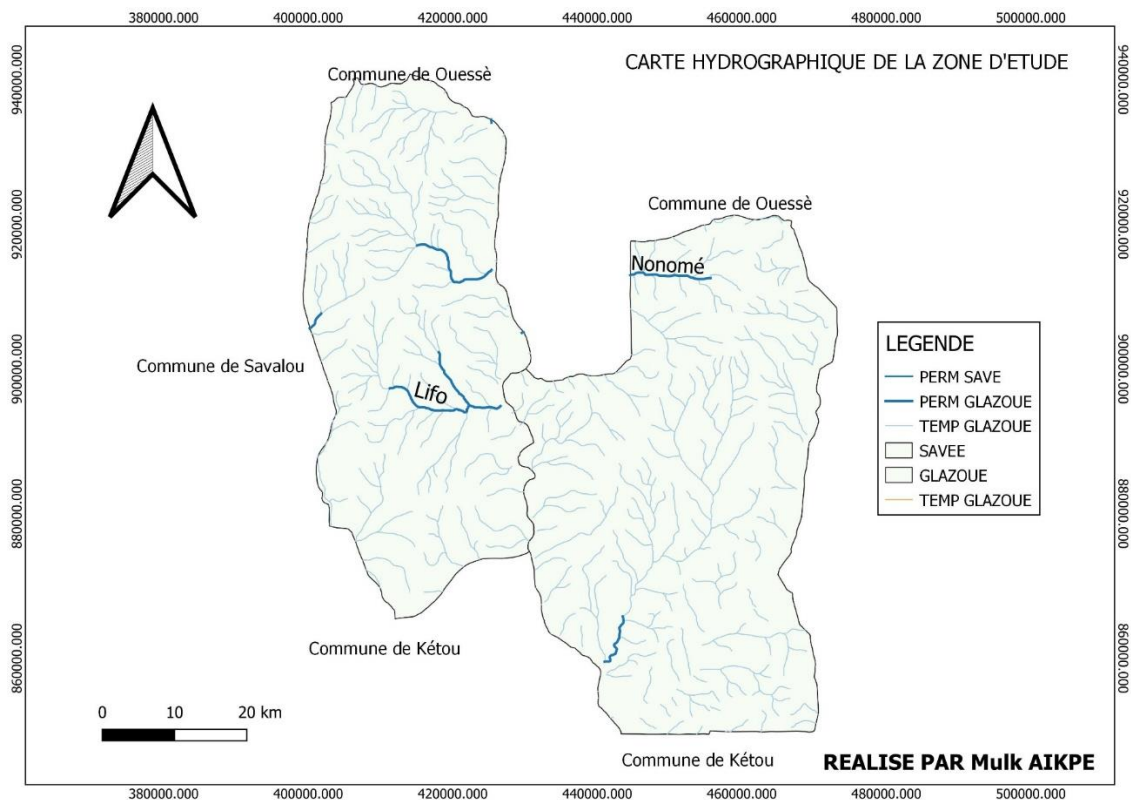


Figure 8 : Carte hydrographique de la commune de GLAZOUE

Source : Extrait du Modèle Numérique de Terrain

II-7 Milieu Humain

Lors du recensement de 2013 (RGPH-4), la commune de Glazoué comptait 124 431 habitants répartis en plusieurs groupes socioculturels dont les deux majoritaires sont les Idaatcha et les Mahi (qui font eux seuls plus de 70 % de l'effectif total). La commune de Savè compte une population totale de 87.379 habitants soit 12,19 % de la population du département des collines (INSAE, 2013). La densité de la population communale de Savè est de 30 habitants par km². Elle est essentiellement agricole, soit 53 % de la population active (INSAE, 2013).

II-8 Activités socio-économiques

L'agriculture constitue la principale source de revenu pour la majeure partie de la population. Ainsi, plus de 80 % de la population y tirent leurs revenus. Le mode d'exploitation de terres pour la majorité des exploitations reste encore traditionnel (culture itinérante sur brûlis) sans oublier la culture attelée qui encore est peu pratiquée et l'utilisation des machines agricoles qui en cours d'expérimentation. Au regard des caractéristiques biophysiques favorables plusieurs cultures sont produites (tubercules, céréales, légumineuses, etc.) parmi lesquelles le riz tient une place prépondérante, raison pour laquelle la commune de Glazoué est la première productrice de cette denrée dans le Département des Collines.



CHAPITRE III

CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce Chapitre décrit les données, matériels utilisés puis l'approche méthodologique suivie pendant l'étude pour arriver aux résultats.

III-1 Données utilisées

➤ Données collectées sur les sites web

Dans le but de mieux cerner les contours de notre thème, plusieurs données et informations ont été indispensables ; il s'agit de la recherche documentaire qui s'est beaucoup plus orientée vers les thèses, les mémoires, les rapports et les publications (articles) qui traitent d'une manière ou d'une autre de notre sujet d'étude. Ces documents sont trouvés sur internet, et chez des personnes ayant déjà travaillé sur des thèmes en rapport avec le thème d'étude.

Le choix de la documentation est guidé par les termes principaux de l'étude à savoir :

- Géohydrologie du Bénin ;
- Géologie du socle cristallin ;
- Le traitement numérique d'images satellitaire ;
- Productivité des forages en zone de socle ;
- Les Systèmes d'Information Géographique ;
- Les forages réalisés en zone de socle et leurs paramètres hydrodynamiques (débits).

Toutes ces documentations sont recueillies sur internet, à la Direction Générale de l'Eau, etc...

➤ Données cartographiques

Les données cartographiques comprennent la carte géologique des feuilles SAVE et GLAZOUE (1989). Cette carte a été obtenue auprès de l'Institut Géographique National (IGN).

➤ Données d'images satellitaires

Les données d'images sont constituées de modèle Numérique de Terrain (MNT). Les modèles Numériques de Terrain sont des images rasters. Les données matricielles sont des cellules (pixels) organisées en une grille de cellules de taille régulière qui représentent un certain type de phénomène du monde réel. Lorsqu'un raster est utilisé pour stocker des données d'élévation, la taille de la cellule est généralement déterminée par la résolution spatiale des capteurs satellites utilisés pour collecter les données.

III-2 Matériels

Plusieurs matériels ont été utilisés pour la réalisation de cette étude. Pour la réalisation de cette étude nous avons recouru au logiciel de traitement d'image QGIS.

➤ QGIS

QGIS est un logiciel SIG (système d'information géographique) libre multiplate-forme publié sous licence GPL. Le développement a débuté en mai 2002 et est sorti en tant que projet sur SourceForge en juin 2002. Il était également appelé *Quantum GIS* jusqu'en septembre 2013.

Via la bibliothèque GDAL, il gère les formats d'image matricielles (raster) et vectorielles, ainsi que les bases de données. QGIS fait partie des projets de la Fondation Open Source Géospatial.

Le logiciel est intégré à la liste des logiciels libres préconisés par l'État français dans le cadre de la modernisation globale de ses systèmes d'informations (S.I.).

➤ Autres matériels

Les matériels utilisés dans le cadre des travaux sont les suivants :

- Un ordinateur pour le traitement des données et pour la rédaction du rapport ;
- Images satellitaires ;
- Une feuille géologique de la zone d'étude.

III-3 Démarche méthodologique

III-3-1 Méthode relative au traitement du modèle numérique de terrain

Le traitement du modèle numérique de terrain passe par le téléchargement du modèle numérique de terrain de la zone d'étude qui a été fait sur le site un site de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/>). A ce modèle numérique de terrain, nous avons appliqué quelques traitements dans le logiciel de QGIS. Il s'agit notamment des traitements d'ombrages, d'éclairage. Les différents ombrages que nous avons utilisés sont celles disponible directement dans le menu raster en créant sans fermer trois ombrages : ombre_0_30.tif ; ombre_60_30.tif ; ombre_120_30.tif. Ces différents traitements ont permis d'observer les différentes discontinuités présentes à la surface de notre modèle numérique de terrain permettent de tracer manuellement les linéaments de la zone d'étude.

III-3-2 Méthode relative au tracé des linéaments de la zone d'étude

Le tracé des linéaments s'est effectué sur le modèle numérique de terrain que nous venons de traiter après fusion des trois types d'ombrages obtenus. Ce tracé a été fait manuellement en observant les différentes discontinuités présentes sur le modèle numérique de terrain.

Les linéaments représentent des objets géologiques linéaires ou des alignements d'objets géologiques suffisamment proches, des discontinuités topographiques ou des structures géomorphologiques héritées d'anciennes topographies (YAO et al., 2012). Les images SRTM sont des modèles numériques de terrain radar qui représentent explicitement les éléments physiques tels que le réseau hydrographique, les crêtes montagneuses, les ruptures de pentes, les accidents structuraux et leurs rejets apparents ou réels. Dans le cadre de ce travail, l'image est filtrée et rehaussée à l'aide de la fonction ombrage dans QGIS et en augmentant le contraste de notre image ainsi que la luminosité pour optimiser le nombre de linéaments visualisés. Cette technique permet de ressortir toutes les structures du sol qui correspondent aux linéaments.

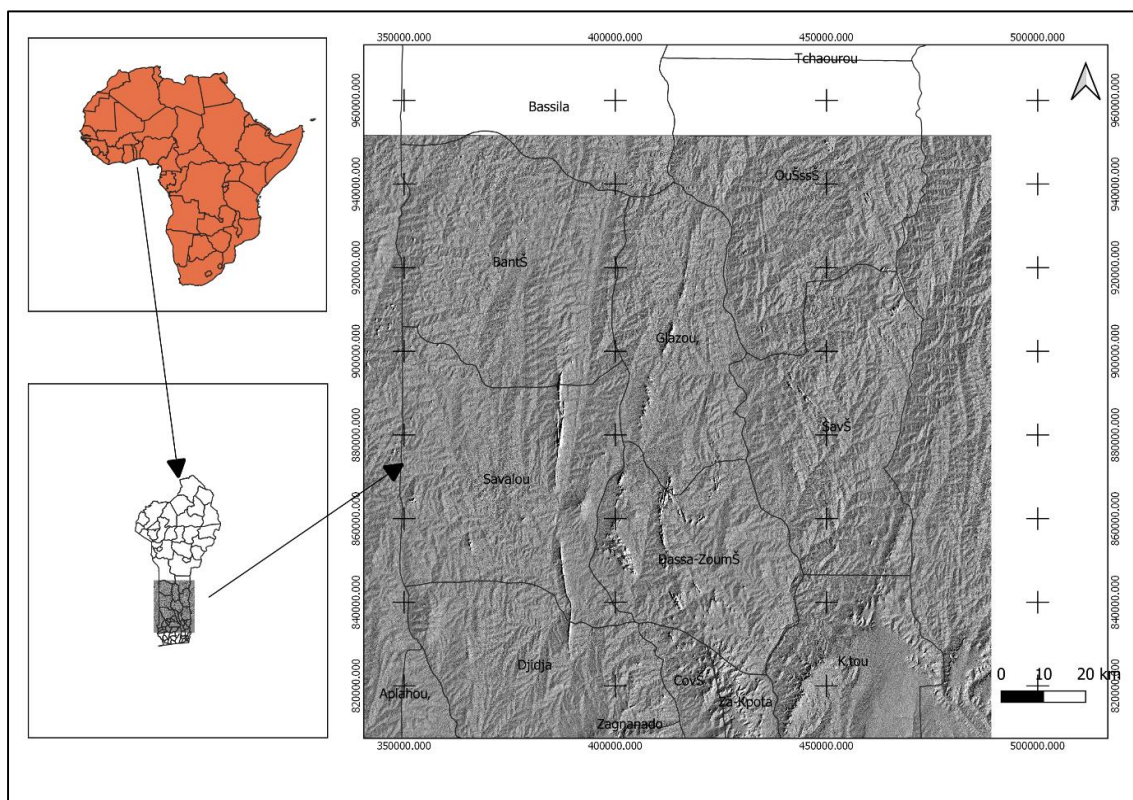


Figure 9 : Carte de la zone géographique couverte par le MNT téléchargé

III-3-3 Méthode relative à la validation des linéaments

Pour la validation des linéaments tracés dans la présente étude, la carte géologique de la zone d'étude a été utilisée. En effet, la validation des linéaments tracés à partir de la carte géologique sont indispensables pour préciser la structuration structurale (Razak, 1984). Ainsi,

les linéaments restants sont considérés comme des structures géologiques (principalement des fractures) (Abdou Babaye, 2012 ; Adiri et al.,2017).

III-3-4 Méthode relative au calcul de la distance entre forage et linéament

Dans un premier temps nous avons superposé les données de forages de la zone d'étude à la carte de linéaments tracés. Ensuite nous avons procédé au calcul de la distance entre forage et linéament. Le calcul de la distance entre forage et linéament a été réalisé grâce à la matrice des distances dans le logiciel de QGIS. Pour le faire, nous avons :

- ✓ Converti la couche de linéaments en points espacés (50m)
- ✓ Densifié la couche de linéaments par intervalle
- ✓ Calculé les distances minimales entre forages et linéaments modifiées en utilisant l'outil **matrice des distances**

Les distances (ligne droite la plus courte perpendiculaire au linéament) de chacun de ces forages (forages à fort débit et forages à faible débit) au linéament le plus proche ont été calculées afin d'apprécier l'évolution de la productivité des forages en fonction de la distance entre forage et linéament. Les résultats regroupés dans un tableau nous a permis de vérifier l'existence ou non d'une relation entre la productivité et la distance entre forage et linéament le plus proche.

III-3-5 Méthode relative au calcul du débit nécessaire à l'irrigation

Selon le rapport pédologique de notre zone d'étude, les sols rencontrés sur le site sont majoritairement les sols ferrugineux et hydromorphes. On retrouve dans le milieu d'étude les cultures comme le maïs, le sorgho, le mil, le riz, le niébé, l'arachide, l'igname, le coton, le soja, le sésame, les cultures maraichères et le petit mil. Les sols hydromorphes sont des sols utilisés pour cultiver le riz, le sorgho, le petit mil, le fonio, l'igname, le niébé, le coton et les cultures maraichères. Selon le rapport socio-économique, la principale spéculation est le riz en saison pluvieuse et quelques fois le sorgho, le maïs, le coton. En ce qui concerne les cultures maraichères, la tomate et les légumes sont les plus cultivés. Nous déterminons quelques paramètres d'irrigation de la culture de tomate dans notre milieu d'étude vu qu'elle est la culture la plus exigeante en matière d'eau. Le tableau ci-dessous nous présente le besoin en eau mensuelle de quelques cultures maraichères de notre milieu d'étude.

Tableau 1 : Besoin en eau de cultures maraichères

Cultures	Tomate	Piment	Riz	Chou
BMP	135	122	103	118

Ensuite, la détermination de quelques paramètres d'irrigation est nécessaire pour l'estimation du débit nécessaire à l'irrigation.

III-3-6 Méthode relative à la détermination de quelques paramètres d'irrigation

❖ Détermination de la réserve utile RU

La réserve utile est la quantité d'eau disponible dans le sol que la culture peut utiliser pour sa maturation. Elle est une fonction de l'humidité au point de flétrissement et de l'humidité à la capacité au champ. La RU est obtenu à partir des études du sol. Pour ce présent projet, elle sera choisie en fonction des études précédentes en tenant compte des types de sols rencontrés. Dans notre étude elle sera de 120mm (Savva et al. 2001).

❖ Calcul de la réserve facilement utilisable RFU ou dose pratique Dp

La RFU est la hauteur d'eau nécessaire pour compenser l'eau perdue par évapotranspiration en puisant dans le sol. Elle est déterminée par l'expression :

$$RFU = \frac{2}{3} RU * Z_r$$

avec Z_r la profondeur d'enracinement maximale de la plante

❖ Fréquence F d'arrosage

La fréquence F est le temps que met la plante pour épuiser l'humidité du sol. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$F(j) = \frac{RFU(mm)}{BMP(\frac{mm}{jr})}$$

avec BMP les besoins maximums de pointe

❖ Le tour d'eau T(j)

Le tour d'eau T(j) est la fréquence d'arrosage réellement adopté sur le périmètre. Il est une valeur toujours fixée inférieur ou égal à la fréquence telle que $T(j) \leq F(j)$

❖ La dose réelle (Dr)

La dose réelle est la quantité d'eau journalière que la culture a réellement besoin pour satisfaire son besoin en eau. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Dr(mm) = T(j) * BMP(mm/jr)$$

❖ La dose brute (Db)

C'est la dose apportée à la plante en fonction de l'efficacité d'application (Ea) et est déterminée de la façon suivante :

$$Db(mm) = Dr(mm) * Ea$$

Ea est l'efficacité d'application est le rapport entre l'eau disponible pour les cultures et l'eau reçue à l'entrée de la parcelle. Elle varie en fonction du climat.

❖ Le débit nécessaire à l'irrigation qe

C'est une grandeur commode pour comparer le système et évaluer les quantités d'eau requises par une certaine surface. Elle est un facteur de base pour le dimensionnement des équipements. Sa formule est la suivante :

$$qe = \frac{Db}{T(j)*Ts}$$

Avec Ts le nombre d'heures de travail par jour

❖ Débit total en tête du réseau

Elle est déterminée par la formule suivante :

$$Qtot = A(ha) * qe$$

III-3-6 Méthode relative à l'étude des relations entre d'autres paramètres de forages et la distance des forages au linéament le plus proche

L'objectif est de décrire les liens entre la distance, la productivité, profondeur, épaisseur d'altération et le débit des différents forages de la zone d'étude. Pour ce fait, nous avons réalisé un ACP avec le logiciel R utilisant le package FactoMineR de ces différentes données.



CHAPITRE IV

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Résultats obtenus

IV.1.1. Traitement du modèle numérique de terrain

Après téléchargement du modèle numérique de terrain, une observation des différentes discontinuités au niveau du relief de la zone d'étude a été faite. Cette observation nous a permis d'identifier quelques fractures présentes sur le modèle de terrain.

La figure suivante présente le MNT de notre zone d'étude :

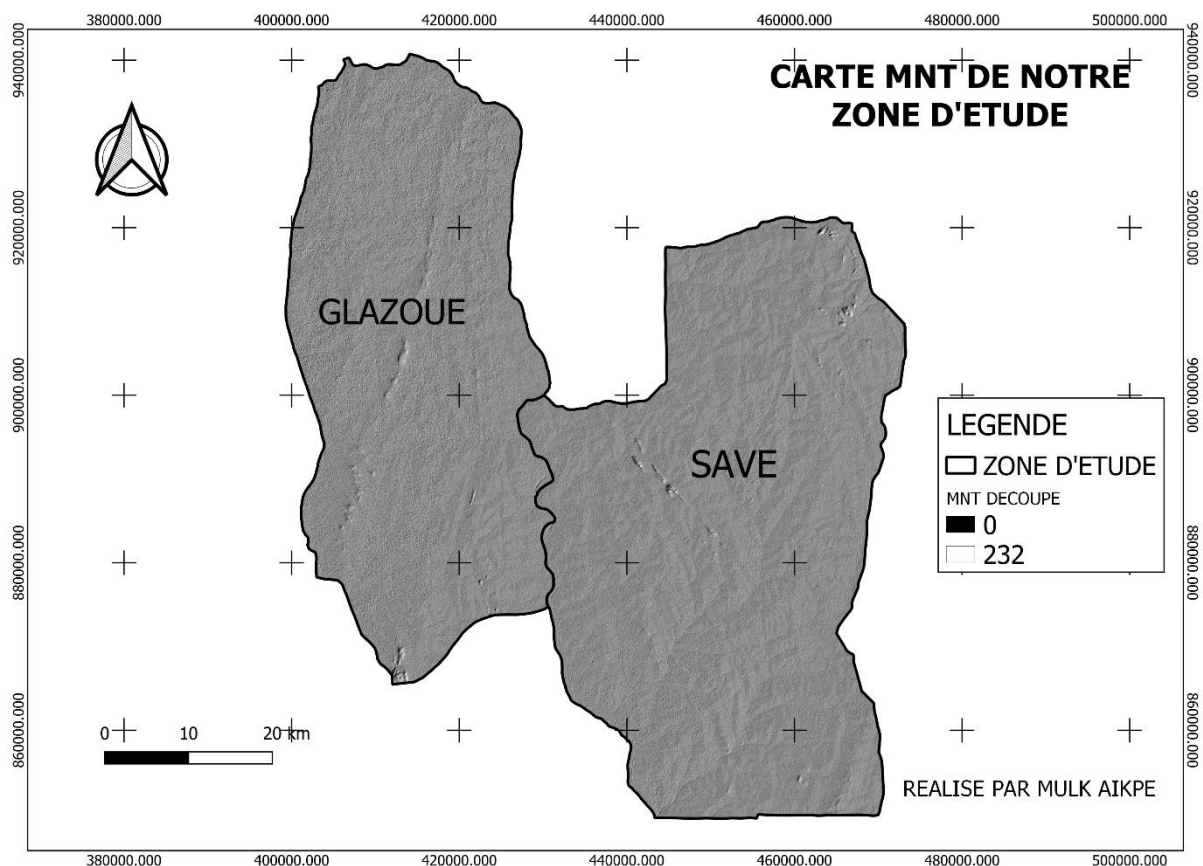
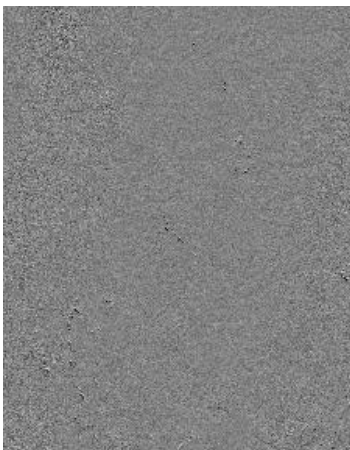


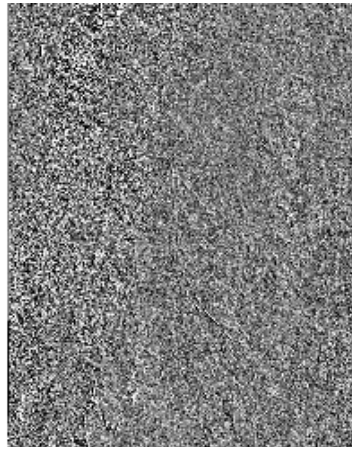
Figure 10 : Carte MNT de notre zone d'étude

IV.1.2. Traitement du modèle numérique de terrain

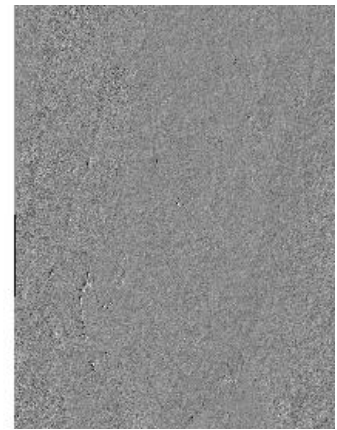
Quelques traitements ont été effectués sur la surface du modèle numérique de terrain de la zone d'étude. Ces différents traitements ont été effectués dans le logiciel de QGIS, il s'agit notamment de l'outil ombrage. Pour cela, nous avons utilisé les ombrages 0_30 ; 60_30 et 120_30. Ensuite une combinaison de ces trois ombrages a été faite pour obtenir un ombrage fusionné. Les figures ci-dessous illustrent ces différents ombrages obtenus.



Ombfrage 0_30



Ombfrage 60_30



Ombfrage 120_30

Figure 11 : Différentes couches d'ombrages du MNT

La figure ci-dessous présente la fusion des différents ombrages obtenus :



Figure 12 : Ombrage fusionné

IV.1.3. Tracé de la carte de linéaments de la zone d'étude

La carte de linéament a été réalisée en observant les discontinuités sur le MNT fusionné. Ainsi nous obtenons la carte de linéament de notre zone d'étude.

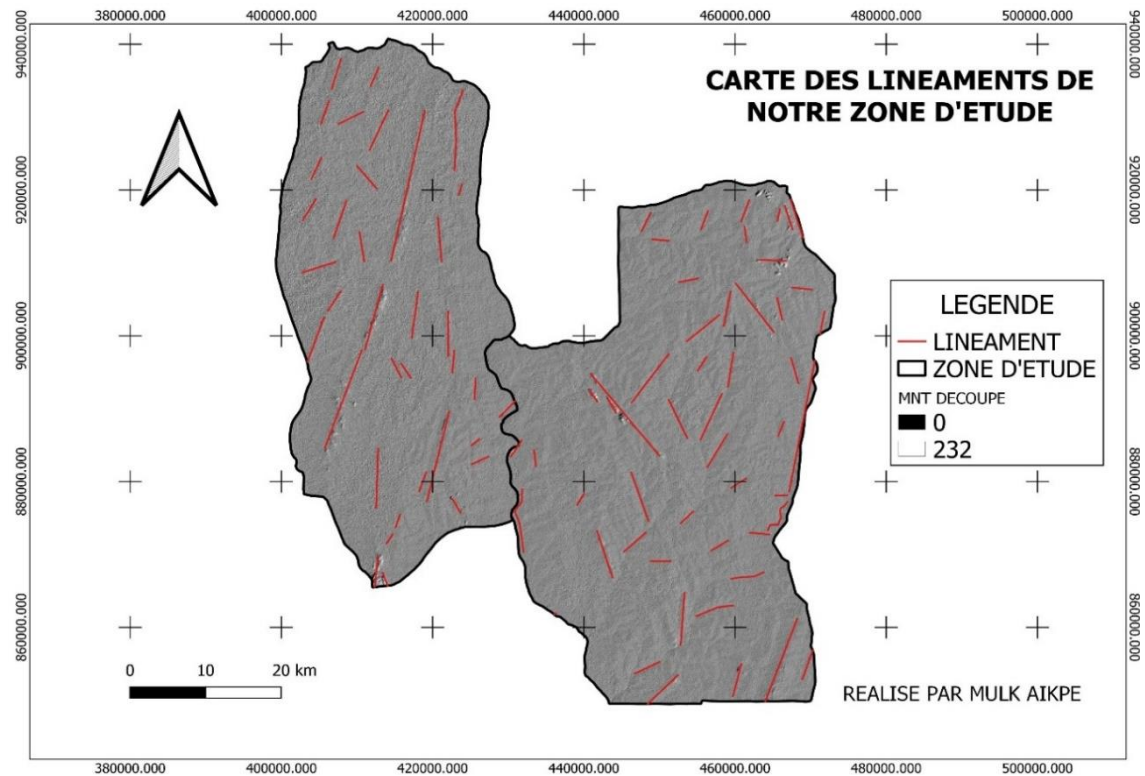


Figure 13: Carte de linéaments de la zone d'étude

IV.1.4. Superposition des forges aux linéaments

Après le tracé de la carte de linéaments de la zone d'étude, il urge de superposer les forages de la zone d'étude. Ces données de forages ont été collectées à la DGEau (Direction Générale de l'Eau). Cette superposition a pour objectif de calculer la distance entre forage et linéament le plus proche. La carte ci-dessous nous présente ladite superposition :

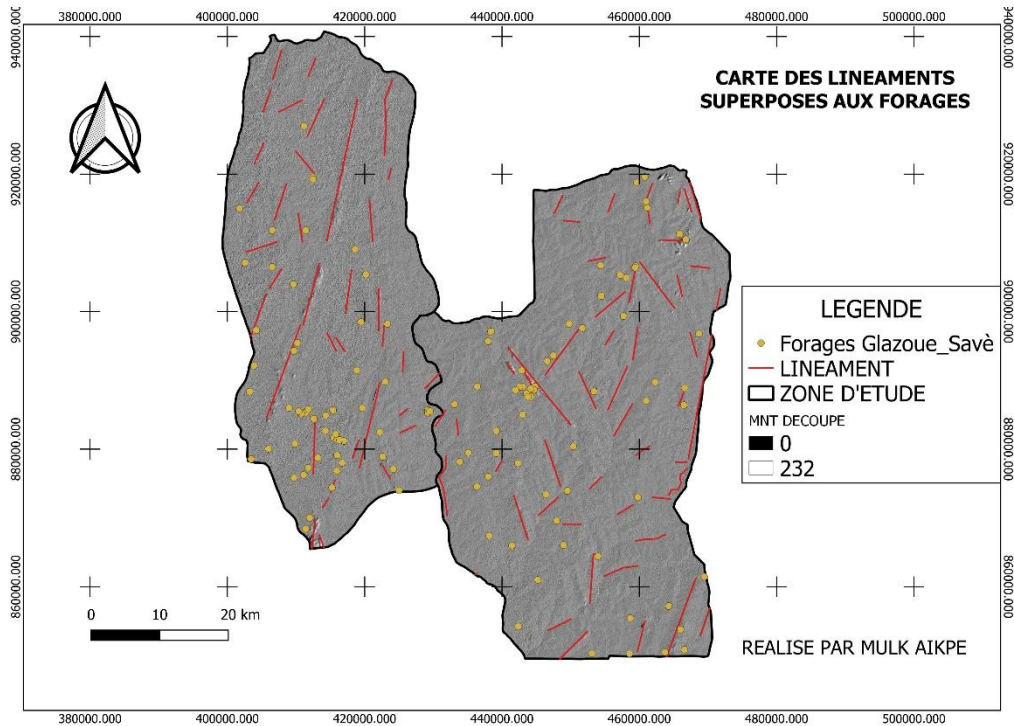


Figure 14: Carte de linéaments superposés aux forages

IV.1.5. Superposition des linéaments à la carte géologique

La superposition de la carte de linéaments à la carte géologique nous a permis d’observer la position des linéaments tracés aux fractures observées sur la feuille géologique. Cette observation révèle d’une part que quelques-uns des linéaments tracés dans notre zone d’étude sont plus ou moins proches de fractures et d’autre part que certains linéaments recourent des fractures. Dans le premier cas on peut dire que ces linéaments pourraient représenter des fractures et dans le second cas que les fractures recoupées doivent être intéressantes donc susceptibles d’être productrice. La carte de linéaments superposés à la feuille géologique de notre milieu d’étude est représentée sur la figure ci-dessous :

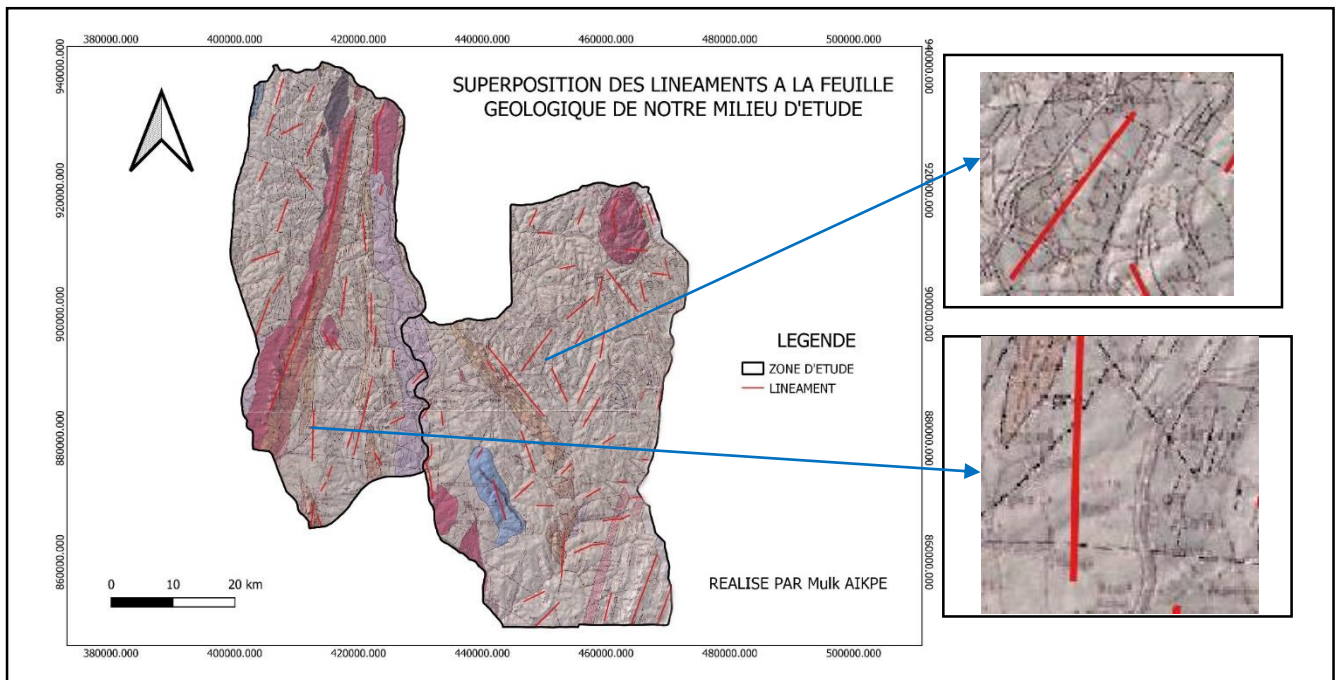


Figure 15 : Superposition de la carte de linéaments à la feuille géologique

IV.1.6. Résultats de calcul des paramètres d'irrigation

➤ La réserve utile (RU)

Le périmètre a un sol hydromorphe finement sableux comparable à un sol sablo-limoneux (Mairie, Octobre 2010). Plusieurs auteurs ont proposé des valeurs de la réserve utile (RU) en 1967 et en 1974. Vu les changements constants des caractéristiques des sols, la valeur récente de la RU proposée par Withers et Vipond en 1974 a été retenue (Savva et al. 2001). Ainsi pour un sol sablo-limoneux, la réserve utile est de 120mm/m.

➤ La réserve facilement utilisable (RFU)

Comme la tomate est la plante la plus contraignante, sa profondeur racinaire Z_r est considérée pour la détermination de la RFU (0,7 m). Ainsi, une RFU de 56mm a été obtenue.

➤ Le besoin maximum de pointe (BMP)

Il est la quantité d'eau journalière que la plante a besoin pendant la période de pointe. Pour le dimensionnement le BMP de la tomate est de 4,5mm/j.

➤ La fréquence d'arrosage

C'est l'intervalle entre deux arrosages sur la même parcelle. Pour la culture la plus

contraignante, la fréquence d'arrosage est de 3,2 jours.

➤ **Le tour d'eau (T)**

Le nombre de jour que chaque plante peut supporter sans apport d'eau est de trois (03) jours.

➤ **La dose réelle (Dr)**

Elle est le produit des besoins maximums de pointe et du tour d'eau. La dose réelle dans la période de pointe est de 13,5mm.

➤ **La dose brute (Db)**

Elle varie en fonction du climat. Pour un climat soudanien $E_a=80\%$, ce qui donne une dose brute de 10,8mm pendant la période de pointe.

➤ **Le débit nécessaire à l'irrigation**

En irrigation gravitaire, le temps de travail peut atteindre 10h/j. Ainsi pour notre étude, un débit d'équipement de 1 l/s/ha est nécessaire.

➤ **Le débit en tête du réseau**

En supposant qu'on veut irriguer une superficie de 1ha, le débit en tête du réseau est de 1 l/s soit 3,6m³/h.

IV.1.7. Calcul de la distance entre forage et linéament

Pour le calcul de la distance des forages aux linéaments nous avons utilisé l'outil matrice des distances dans QGIS. Nous l'avons exécuté pour tous les forages présents dans notre zone d'étude (138) et ensuite nous avons retenus les forages positifs ayant un débit spécifique supérieur à 3,6 m³/h. Afin de mieux caractériser l'évolution du début des forages en fonction de la distance aux linéaments, nous avons considéré tous les linéaments de notre zone d'étude ayant au moins deux forages à proximité. Une analyse détaillée de l'évolution de la productivité en fonction de la distance a donc été effectuée pour chaque linéament comprenant au moins deux forages dans son voisinage. Cette analyse détaillée ne concerne que les forages à fort débit situés à une distance inférieure à 7 km des linéaments. Cinq linéaments de taille et d'orientation variables ayant au moins deux forages à fort débit dans leur voisinage répondent à ce critère de distance. Aussi les forages à faible débit ne sont pas retenus pour cette analyse en raison d'une

absence de corrélation entre distance au linéament et débit. Les résultats de notre analyse est résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Données forage – linéament-débit-distance utilisées pour l’analyse productivité-distance

LINEAMENT	FORAGES	DISTANCE (KM)	Débit d’exploitation (m ³ /h)
A	F43	2,62	14,4
	F98	3,6	12
B	F42	3,05	8,23
	F66	3,18	9
	F65	3,75	12,5
C	F85	3,96	9,04
	F86	5,4	4,5
D	F60	2,8	10,28
	F76	5,28	4,24
E	F22	6,94	3,8
	F11	6,45	3,94

On peut mieux observer l’évolution des débits ($\geq 3,6\text{m}^3/\text{h}$) en fonction des distances de forages aux linéaments suivants l’histogramme ci-dessous :

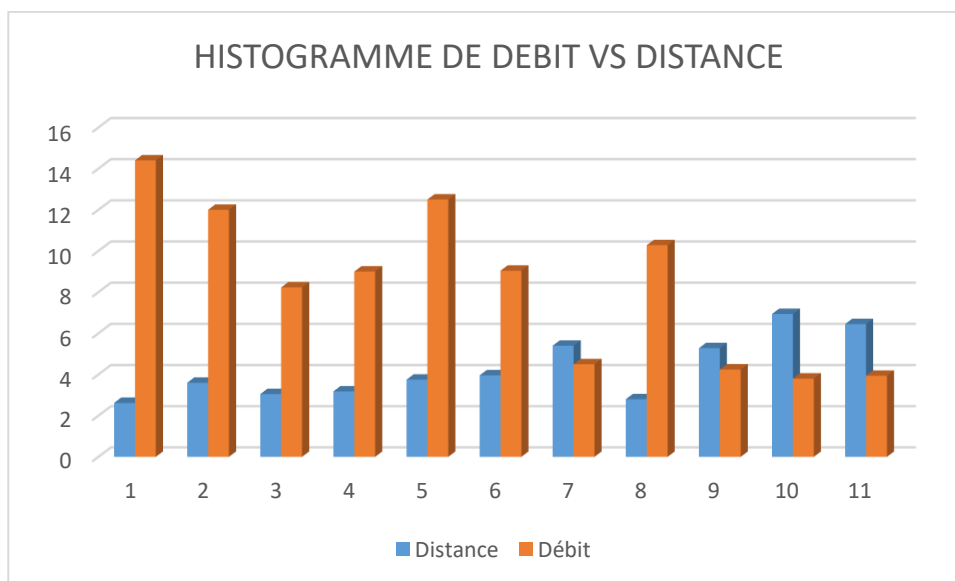


Figure 16: Histogramme des débits ($\geq 3,6\text{m}^3/\text{h}$) en fonction des distances de forages au linéament

L'analyse de l'histogramme ci-dessus nous montre que la distribution des débits des forages ayant est complètement aléatoire, ce qui implique une absence de corrélation entre le débit et la distance des forages au linéament le plus proche. La courbe ci-dessous nous traduit l'évolution du débit en fonction de la distance au linéament.

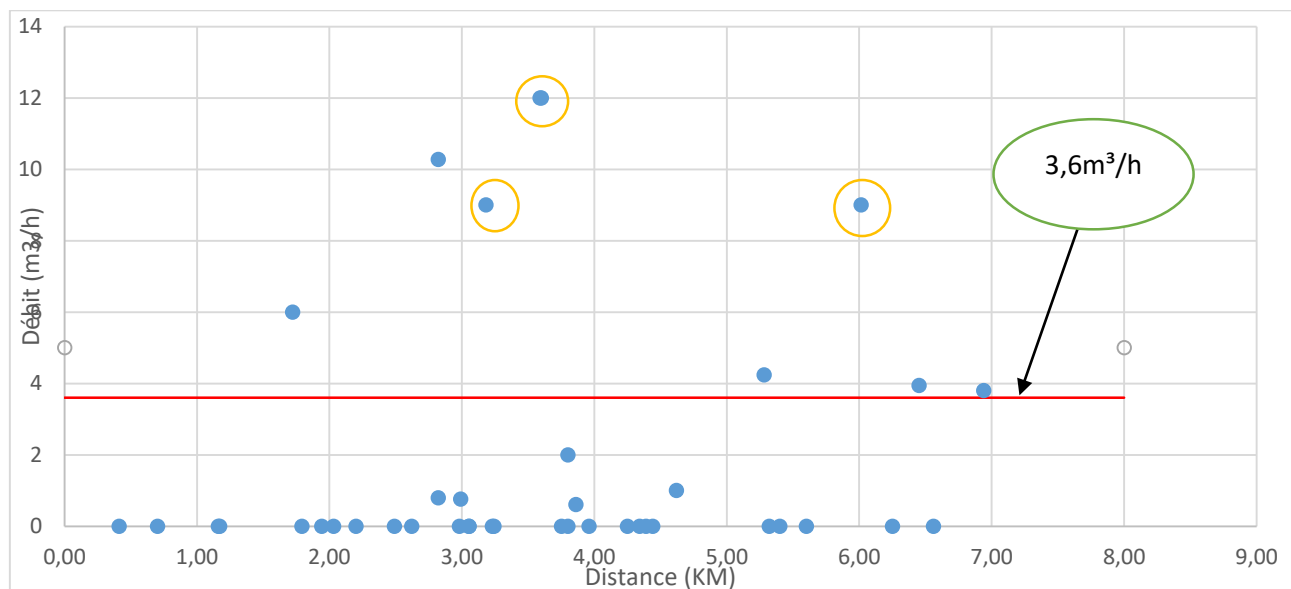


Figure 17: Courbe de débit vs distance de forages aux linéaments

NB. Les points encerclés représentent deux forages ayant le même débit

L'analyse de cette figure nous montre que plus de 80% des forages de notre zone d'étude ont des débits inférieurs à 3,6m³/h qui est le débit nécessaire à l'irrigation. Aussi les forages ayant un débit supérieur à 3,6m³/h ne sont pas répartis suivant une classe de distance fixe. Nous pouvons donc retenir que le débit des forages de notre zone d'étude n'est pas fonction de la distance les séparant au linéament plus proche.

IV.1.8. Analyse statistique des données de forages

La matrice de corrélation des forages à gros débits déterminée à partir du package FactoMineR dans le logiciel R a permis d'obtenir le tableau ci-après :

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre position et caractéristiques des forages

Variabes	Distance	Débit	Profondeur	EA
Distance (KM)	1,00			
Débit	0,02	1,00		
Profondeur	0,16	0,14	1,00	
EA	0,2	0,36	0,47	1,00

La corrélation entre débit et épaisseur d'altérites traduit le fait qu'une couche d'altération épaisse est généralement présente dans les localités où les forages à fort débit sont identifiés. L'épaisseur importante des altérites aura un effet favorable sur la fonction capacitive de l'aquifère d'altérites (et donc la pérennité du débit). La corrélation entre débit et profondeur des forages à gros débits est faible (0.14), ce qui semble montrer que la profondeur totale du forage influe peu sur la productivité. L'absence de corrélation significative entre débit et profondeur des forages pourrait être lié à la stratégie de foration et d'implantation.

La matrice de corrélation déterminée pour différentes caractéristiques de forages à gros débit révèle une corrélation non significative entre la distance et le débit des forages. Cette corrélation peut être dû au fait que les circulations souterraines et la productivité du socle fracturé ne sont pas généralisées et sont liées aux discontinuités majeures. La corrélation entre débit et épaisseur d'altération est élevé (0.36), ce qui traduit le fait que les forages à gros débits sont situés dans les zones où l'épaisseur d'altération est grande.

IV.2 Discussion

L'objectif de ce travail est de procéder à la comparaison de linéaments en zone de socle et relations avec la productivité des forages : implication pour l'identification des gros débits nécessaires à l'irrigation. Quatre étapes ont été mises en œuvre pour atteindre notre objectif : la création de modèles de MNT, le traitement du MNT à l'aide d'outils dans QGIS, le tracé des linéaments et un dimensionnement préliminaire pour la détermination du débit moyen pour l'irrigation.

L'application des techniques de prétraitement et de traitement décrits dans le rapport (Récap GIS, 2013) ont abouti au rehaussement des images DEMs téléchargés pour la zone de Savè et de Glazoué et au tracé des linéaments de ces zones.

Plusieurs travaux (Savané, 1997 ; Kouamé, 1999 ; Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008) ont montré l'apport majeur des images satellitaires pour la reconnaissance des réservoirs discontinus. Une analyse structurale de ces images, couplé à l'utilisation de la carte géologique de notre zone d'étude a permis de tracer quelques linéaments obtenus grâce aux deux images. Donc les linéaments tracés correspondent plus ou moins à des accidents géologiques qui ont affecté le socle cristallin de la zone d'étude. Ces linéaments ont été ensuite superposés aux forages de notre milieu d'étude.

L'absence de corrélation observée entre la productivité et la distance des forages à fort débit au linéament le plus proche, a montré que les linéaments détectés à l'aide de la méthodologie manuelle proposée ne sont pas forcément des expressions surfaciques des accidents majeurs de la région d'étude. Compte tenu de sa rapidité de mise en œuvre, cette méthode appliquée sans succès à la région, pourrait être améliorée et employée sur d'autres sites en zone de socle où des données sur les programmes d'hydraulique villageoise sont disponibles. Ainsi, 18% des forages de notre zone d'étude peuvent satisfaire les besoins en eau d'irrigation pour de petites superficies agricoles. Il urge donc d'approfondir les études dans la détermination de points d'eaux plus productifs et également penser à un réseautage de forages pour satisfaire le besoin en eau d'irrigation de plus grandes superficies agricoles.

CONCLUSION

La thématique de ce mémoire a pour objectif l'évaluation des relations entre linéaments et productivité des forages en zone de socle pour une agriculture irriguée. Les différentes techniques de traitement du modèle numérique de terrain (MNT) ont permis de tracer manuellement des linéaments. La comparaison des linéaments extraits manuellement aux linéaments géologiques a permis de valider quelques-uns des linéaments extraits.

Ensuite la mise en évidence des corrélations entre débit des forages et position de ces forages par rapport aux fractures a permis d'identifier le rôle de ces derniers dans le contrôle des écoulements souterrains. En effet, les forages de notre zone d'étude présentent une corrélation négative entre le débit et la distance qui les séparent des accidents majeurs.

Nous recommandons donc une amélioration de la méthodologie basée sur le tracé manuel de linéaments. Aussi on peut étudier la relation entre d'autres paramètres de forages tels que la transmissivité, la profondeur des forages, l'épaisseur d'altération et la distance des forages au linéament qui leur sont proche.

Enfin, à l'échelle de notre zone d'étude, 18% des forages ont des débits $\geq 3,6$ m³/h ce qui est très peu pour deux communes. Pour satisfaire le besoin en eau d'irrigation, l'on peut mettre en réseau deux ou plusieurs forages situés à proximité l'un de l'autre. Il urge néanmoins d'approfondir les recherches dans la détermination des forages avec de gros débits afin de satisfaire le besoin en eau d'irrigation de grandes superficies agricoles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adon Gnanou Christian et al. ; Extraction automatique des linéaments à l'aide d'images satellitaires optique et radar en milieu de socle précambrien (Haute Marahoué, Côte d'Ivoire) ; Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE)/ Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire) ; www.ijesi.org ||Volume 8 Issue 01 Ver. I || Jan 2019 || PP 24-32Alle ;
- Allé, C.; Descloitres, M.; Vouillamoz, J.M.; Yalo, N.; Lawson, M.; Adihou, C., (2015). Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique: pratique de l'implantation des forages et perspectives d'amélioration au Bénin. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.
- Akokponhoué et *al.*, 2018
- Assouma D. (1988). Etude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité, en région tropical (Alimentation en eau potable de la ville de Dapaong-Togo). Thèse 3e cycle
- Baali F. (2001). Eude hydrogéologique hydrochimique de la région karstique de Chéria N-E Algérien. Magister Univ Annaba Algerie, 100 p.
- Baka D. (2012). Géométrie, Hydrodynamisme et Modélisation des réservoirs fracturés du socle paléoprotozoïque de la région d'Oumé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse unique. Université de Cocody. Abidjan (Côte d'Ivoire). 247 p
- Baka D., Lasm T., Oga M.S., Youanta M., De Lasme O., Kouakou O.S. et Ettien B.F. (2011). Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Center of Côte d'Ivoire). American journal of scientific and industrial research, Vol. 2 (2), pp. 310-322.
- Banks D. (1992). Estimation of apparent transmissivity from capacity testing of boreholes in bedrock aquifers. Applied Hydrogeology, Vol. 4, pp. 5-19.
- Berger J., Camerlo J., Fahy J.C. et Haubert M. (1981). Etude des ressources en eau souterraines dans une région de socle cristallin : la « Boucle du Cacao » en Côte d'Ivoire. Bull. BRGM, série 2, section III, n°4, pp. 335-338.
- Biémi, J. (1992) Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus

de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 480 p ;

- Bilé, G. R. (2002) Étude des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de fissures dans la région de Korhogo. Mémoire de DEA Sciences de la Terre, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 69 p ;
- Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougairé, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., (2010). Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Ground Water* 48, 269–283.
- Darcel, C. (2002) Corrélations dans les réseaux de fractures : caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques. Thèse de doctorat, Université Rennes 1, Rennes, France, 223 p ;
- De Dreuzy, J-R. (2000) Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures. Thèse de l'Université de Rennes, 217 p ;
- Lachassagne, P., Wyns, R., Bérard, P., Bruel, T., Chéry, L., Coutand, T., Desprats, J.-F., Le Strat, P., (2001). Exploitation of High-Yields in Hard-Rock Aquifers: Downscaling Methodology Combining GIS and Multicriteria Analysis to Delineate Field Prospecting Zones. *Ground Water* 39, 568–581. doi:10.1111/j.1745-6584.2001.tb02345.x
- Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova* 23, 145–161. doi:10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x

ANNEXES

Annexe 1 : Données de forages et leurs caractéristiques

FORAGES	LINEAMENT le plus proche	Distance (KM)	PRODUCTIVITE	Unité géologique	Profondeur	EA	T
F11	E	6,45	0.156	Gneiss migmatitique	34.2	25	3.5e-05
F12	A	6,25	0.084	Gneiss	42.9	37	2.53e-05
F13	B	1,94	0.018	Gneiss	67.44	25	2.333e-05
F17	C	2,99	0.037	Gneiss	58.45	21	5,00E-06
F19	D	1,32	0.129	Gneiss	64	25	1.1e-05
F20	D	4,3	0.025	Gneiss	69.8	18.89	3.98e-06
F22	E	6,94	0.03	Gneiss	61.76	26	7.26e-06
F23	C	4,62	0.191	Gneiss migmatitique	61.56	24	2.6e-05
F24	D	5,60	0.013	Gneiss	64.7	24	3,00E-06
F31	F	3,80	0.199	Gneiss migmatitique	43.06	18	3.3e-05
F32	C	3,77	0.129	Gneiss migmatitique	38.03	14	1.45e-05
F33	G	2,82	0.036	Granite	49.15	18	2.5e-06
F35	F	3,86	0.036	Migmatites	55.83	12	1.5e-06
F38	F	3,80	0.059	Gneiss migmatitique	55	12	2,00E-05

F39	C	6,01	2.804	Granite	40	18	0.000253
F40	H	0,41	0.037	Gneiss	64.93	21	4.7e-06
F41	C	3,24	0.119	Gneiss	43.05	13	4,00E-05
F42	C	3,05	0.269	Granite	61.78	12	1.24e-05
F43	A	2,62	5.353	Gneiss	46.08	24	0.0003
F48	A	5,32	0.187	Gneiss	35.76	18	6.13e-05
F49	E	1,16	0.026	Gneiss	49.04	9	3,00E-06
F55	C	3,05	0.09	Gneiss	50	11	1.7e-05
F56	C	2,98	0.116	Granite	44.05	21	5.65e-05
F57	A	4,39	0.037	Granite	39.97	8	1.2e-05
F61	C	3,23	0.113	Granite	45.13	9.45	1.3e-05
F62	G	2,80	0.125	Gneiss	42.81	8	0,00005
F64	F	4,34	0.072	Granite	41.74	6	7.67e-06
F65	C	3,75	0.507	Gneiss	43.73	7	3.6e-05
F66	C	3,18	0.559	Granite	73.86	5	3.45e-05
F70	I	2,49	0.143	Gabbros	37.05	5	

F71	A	3,59	0.425	Gneiss	54.92	5	4.3e-05
F74	G	5,28	0.365	Gneiss	45	6	9,00E-05
F75	K	2,03	0.053	Granite	43.8	7	7.01e-06
F82	J	2,20	0.059	Gneiss	67.91	48	1.7e-05
F85	L	3,96	0.69	Gneiss	37.9	26	2.89e-05
F86	L	5,40	0.286	Gneiss	47.81	29	0.00016
F91	N	1,17	0.453	Gneiss	43.92	23	8.74e-05
F92	A	6,56	0.044	Gneiss migmatitique	43.07	30	1.2e-05
F96	C	2,58	0.049	Migmatites	49.06	20	5,00E-06
F97	C	4,44	0.092	Gneiss	37.99	24	9.36e-06
F98	A	3,60	0.419	Granite	55.45	24	3.2e-05
F103	C	1,72	0.592	Gneiss	50.5	22	1.4e-06
F104	K	1,79	0.062	Gneiss	43.78	22	1.17e-05
F107	O	0,70	0.381	Gneiss	43.93	20	7.23e-05
F108	K	0,39	0.086	Gneiss	62.02	17	2.17e-05
F138	H	2,24	0.202	Gneiss	55.35	13	4,00E-05

Annexe 2: Calcul de besoin en eau du riz

Riz				
	Décembre	Janvier	Février	Mars
ET0 (mm/j)	4,02	3,43	3,50	4,27
Kc	0,57	0,80	1,05	0,92
ETM (mm/j)	2,3	2,7	3,7	3,9
P (mm/j)	0,04	0,00	0,00	0,00
Pe (mm/j)	0,026	0,000	0,000	0,000
BE (mm/j)	2,25	2,73	3,68	3,91

Annexe 3: Calcul de besoin en eau du piment

Piment				
	Décembre	Janvier	Février	Mars
ETo (mm/j)	4,02	3,43	3,50	4,27
Kc	0,43	0,75	1,05	0,95
ETM(mm/j)	1,73	2,56	3,68	4,05
P (mm/j)	0,04	0,00	0,00	0,00
Pe (mm/j)	0,025	0,000	0,000	0,000
BE (mm/j)	1,71	2,56	3,68	4,05

Annexe 4 : Calcul de besoin en eau du riz

Chou				
	Décembre	Janvier	Février	Mars
ETo (mm/j)	4,02	3,43	3,50	4,27
Kc	0,58	1,01	1,05	0,93
ETM (mm/j)	2,31	3,47	3,68	3,95
P (mm/j)	0,04	0,00	0,00	0,00
Pe (mm/j)	0,03	0,00	0,00	0,00
BE (mm/j)	2,28	3,47	3,68	3,95

Annexe 5 : Calcul de besoin en eau de la tomate

Tomate					
	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril
ETo (mm/j)	4,02	3,43	3,50	4,27	5,00
Kc	0,46	0,75	1,04	1,03	0,8
ETM (mm/j)	1,85	2,58	3,63	4,41	4,00
P(mm/j)	0,04	0,00	0,00	0,00	1,08
Pe (mm/j)	0,026	0,000	0,000	0,000	0,646
BE (mm/j)	1,82	2,58	3,63	4,41	3,36