



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

INSTITUT NATIONAL DE L'EAU (INE)



DEPARTEMENT DE L'EAU POUR L'AGRICULTURE ET LA SOCIETE (DEAS)

OPTION GENIE RURAL ET MAITRISE DE L'EAU (GRME)

Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel en
GÉNIE RURAL ET MAITRISE DE L'EAU (GRME)

**Origine de l'artésianisme en zone de socle et intérêt pour
l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation au Bénin**



Rédigé par : MAGNON Chrismelle Lynda

Superviseur :

Dr. HOUNSOU B. Mathieu

Maître de Conférences du CAMES

Spécialiste en Hydraulique Agricole

Co-superviseur :

Dr Iboukoun Christian ALLE

Enseignant chercheur à l'Institut National

de l'Eau

Année académique : 2020-2021

CERTIFICATION

Nous soussignés **Dr HOUNSOU B. Mathieu**, Enseignant-chercheur à l'Institut National de l'Eau (INE-UAC) ; et **Dr Iboukoun Christian ALLE**, Enseignant chercheur à l'Institut National de l'Eau reconnaissons que ce travail a été intégralement réalisé sous notre supervision par **Chrismelle Lynda MAGNON**, étudiante en Génie Rural et Maîtrise de l'Eau (GRME), pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel.

Fait à Abomey-Calavi ce / / 2022

Le superviseur

Dr. HOUNSOU B. Mathieu
Maître de Conférences du CAMES
Spécialiste en Hydraulique Agricole

Le co-superviseur

Dr Iboukoun Christian ALLE
Docteur en Sciences de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
Option : Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau
Spécialité : Hydrogéophysique

DEDICACES

À mes parents MAGNON Achille Joseph et TOWOU G. Mireille J.

Pour tous les sacrifices consentis pour mon éducation.

REMERCIEMENTS

Le présent travail est le fruit d'un projet de recherche initié conjointement par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et le Laboratoire Mixte International (LMI-REZOC). Nous remercions ces organismes déjà pour l'opportunité de stage, et donc d'apprentissage. Ensuite, ils nous ont été d'une grande aide notamment en ce qui concerne la gratification, mais aussi le financement de la tournée de terrain en zone de socle pour la collecte des données.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à ceux-là sans qui cette œuvre n'aurait pas été achevée que leur apport ait été direct ou indirect. Il s'agit de Dr Jean-Michel VOUILLAMOZ, chargé de recherche à l'IRD qui nous a fourni une explication intégrale de notre sujet de recherche. On détenait ainsi une feuille de route pour mener à bien l'étude d'un sujet qui au prime abord nous paraissait complexe, mais s'est avéré être à la portée de tous.

Dr Christian ALLE notre cosuperviseur a aussi facilité notre compréhension du sujet. En dépit de ses multiples occupations, il s'est rendu disponible pour la réussite de ce travail. Il nous a montré son accompagnement jusqu'au bout, pendant la collecte de données et pour les divers obstacles rencontrés pendant la rédaction.

Nous ne pouvons pas nous empêcher d'être reconnaissants envers nos autres collègues qui ont participé à la mission de terrain avec nous, Samuel TOTIN et Jean-Baptiste GNONHOUE dont l'agilité surprenante a été d'une grande aide. Mr James LAWSON nous a montré les directives à suivre pour le traitement des données dans le logiciel QGIS afin d'aboutir aux résultats plébiscités.

Enfin, nous témoignons notre gratitude aux enseignants-chercheurs de l'Institut National de l'Eau (INE), notamment ceux du DEAS (Département de l'Eau pour l'Agriculture et la Société). Une pensée spéciale au Dr Mathieu B. HOUNSOU, Coordonnateur des études de Licence à l'INE qui s'est personnellement impliqué dans notre formation depuis le début.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AEP	Alimentation ou Approvisionnement en Eau Potable
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer/ Radiomètre spatial avancé à émission et réflexion thermiques
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEDEAO	Communauté Economique Des Etats membres de l’Afrique de l’Ouest
CESEAU	Conseil et Expertise au Service de l’EAU souterraine
CSEB	Conseil scientifique de l’environnement de Bretagne
DGEau	Direction Générale de l’Eau
FAO	Food and Agriculture Organisation/Organisation des Nations Unies pour l’alimentation et l’agriculture
INSAE	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IRD	Institut de Recherche et de Développement
LMI	Laboratoire Mixte International
LTHE	Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
MEEM	Ministère de l’Energie, de l’Eau et des Mines
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NASA	National Aeronautics and Space Administration/Administration nationale de l’aéronautique et de l’espace
ODD	Objectif de Développement Durable
ONU	Organisation des Nations Unies
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement/ United Nations Development Programme (UNDP)
QGIS	Quantum Géographique Information System/Système d’Information Géographique Quantique
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RNF	Réserves Naturelles de France
SCRP	Stratégie de Croissance pour la Réduction de la Pauvreté
SIG	Système d’Information Géographique
SIGES	Système d’Information pour la Gestion des Eaux Souterraines
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission/Mission de topographie radar de la navette
UNICEF	United Nations of International Children's Emergency Fund/Fonds des Nations Unies pour l’Enfance
USGS	United States Geological Survey/Service géologique des États-Unis

TABLE DES MATIERES

Certification.....	ii
Dedicaces	iii
Remerciements	iv
Liste des sigles et acronymes	v
Table des matieres	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	ix
Resume	x
Abstract	xi
Introduction générale.....	1
1. Objectifs de l'étude	2
2. Hypotheses	3
3. Structuration du document	3
Chapitre 1 : Revue de littérature	4
1.1 Le cycle de l'eau (souterraine)	4
1.2 Aquifères et nappes d'eau	5
1.2.1 Nappe libre et nappe captive (aquifère libre ou aquifère captif).....	6
1.2.2 Aquifère karstique	8
1.3 Le socle	9
1.4 Approvisionnement en eau potable	9
1.5 Situation de l'AEP en zone de socle du Bénin	10
1.6 Irrigation.....	10
1.6.1 Système gravitaire.....	10
1.6.2 Système sous pression.....	11
1.7 Irrigation et besoins en eau des plantes	12
Chapitre 2 : Présentation du milieu d'étude (Zone De Socle Du Benin)	13

2.1	Cadre géographique et hydrographique	13
2.2	Climat du milieu d'étude.....	15
2.3	Contexte géologique du milieu d'étude.....	15
2.4	Aquifères de socle du Bénin.....	16
2.4.1	Mise en place.....	16
2.4.2	Modèle conceptuel des aquifères de socle	17
Chapitre 3 : Matériels et méthodes.....		19
3.1	Matériel	19
3.2	Méthodes	19
3.2.1	Inventaire des forages artésiens en zone de socle	19
3.2.2	Mesure du potentiel h et du débit Q.....	21
3.2.3	Détermination de la charge hydraulique et de l'altitude pour chaque forage	22
3.2.4	Détermination de la distance minimale séparant le forage de son aire d'alimentation 22	
3.2.5	Analyse des interdépendances dans R.....	23
Chapitre 4 : Résultats et discussions		25
4.1	Résultats	25
4.1.1	Présentation des sites avec leurs aires d'alimentation.....	25
4.1.1.1	AMAOUIGNON-OUEST	25
4.1.1.2	BOUANRI 2	26
4.1.1.3	BOUANRI 3	27
4.1.1.4	BEMBEREKE-OUEST	29
4.1.1.5	MASSARI.....	30
4.1.1.6	MAKA	31
4.1.1.7	BOUKOSSOROU.....	32
4.1.2	Analyses avec le logiciel R	33
4.2	Discussions.....	37
Conclusion.....		38
References bibliographiques		39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le cycle de l'eau terrestre © BRGM – Michel Villey.....	5
Figure 2 : Formation d'une nappe souterraine ; tirée de Service Eaufrance, 2019.....	6
Figure 3 : Nappe libre, captive et phénomène de l'artésianisme	7
Figure 4 : Schéma d'un aquifère karstique (N. Goldscheider).....	8
Figure 5 : Système d'irrigation par aspersion	11
Figure 6 : Système d'irrigation goutte à goutte	12
Figure 7 : Arrosage d'une plante par le système d'irrigation goutte à goutte.....	12
Figure 8 : Carte de présentation de la zone d'étude. a) Localisation de la zone de socles et les bassins sédimentaires ; b) Situation du socle cristallin par rapport aux départements administratifs ; c) Les 3 départements où sont concentrés les forages.....	14
Figure 9 : Géologie de la zone d'étude	16
Figure 10 : Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel et al., 2011 ; Lachassagne et al., 2017, 2014, 2011).....	18
Figure 11 : Localisation des ouvrages explorés	20
Figure 12 : Mesure du potentiel h à BOUKOSSOROU (KOUANDE)	21
Figure 13 : Mesure du potentiel h à MAKA (KOUANDE).....	21
Figure 14 : Mesure du débit à BOUKOSSOROU.....	22
Figure 15 : Mesure du débit à BOUANRI (BEMBEREKE).....	22
Figure 16 : Matérialisation de la distance "d" recherchée	23
Figure 17 : Forage d'AMAOUIGNON-OUEST	25
Figure 18 : Écoulement de l'eau du forage d'AMAOUIGNON-OUEST	25
Figure 19 : Détermination de d pour le site d'Amaouignon-Ouest	26
Figure 20 : Forage BOUANRI 2	27
Figure 21 : Détermination de d pour le site de Bouanri2	27
Figure 22 : Forage Bouanri3	28
Figure 23 : Détermination de d pour le site de Bouanri3	28
Figure 24 : Site de Bembèrèkè-Ouest	29
Figure 25 : Détermination de la distance d à Bembèrèkè-Ouest.....	29
Figure 26 et 27 : Forage Massari.....	30

Figure 28 : Distance d pour le forage Massari	30
Figure 29 : Forage jaillissant de Maka	31
Figure 30 : Distance d séparant Maka de son aire d'alimentation	31
Figure 31 : Forage Boukossorou	32
Figure 32 : Distance d du site de Boukossorou	32
Figure 33 : Graphes des corrélations par paire.....	34
Figure 34 : Modèle 1 : d fonction de la charge et la latitude.....	35
Figure 35 : Modèle 2 : d fonction de la hauteur, l'altitude et la latitude.....	35
Figure 36 : Modèle 3 : d fonction de la charge	36
Figure 37 : Erreur lors des tests de modélisation	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Cadre administratif de la zone d'étude	13
Tableau 2 : Tendances centrales des variables étudiées.....	33
Tableau 3 : Résultats du test de corrélation de Pearson avec la significativité.....	33
Tableau 4 : p-value de la corrélation de Pearson.....	33
Tableau 5 : Tableau analytique des différences entre la distance « d » et les distances modélisées	36
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des données liées aux forages de l'étude	44
Tableau 7 : Quelques photos de sources présentes dans la base de données	44
Tableau 8 : Quelques photos de la collecte de données	45

RESUME

Le problème de l'accès à l'eau menace également la sécurité alimentaire, car la croissance démographique implique une augmentation des besoins en nourriture et donc en eau. L'accès à l'eau en zone de socle se heurte à des problèmes liés à la géologie des aquifères. Cependant, grâce à l'artésianisme, des eaux souterraines profondes parviennent à la surface naturellement et peuvent donc être utilisées. La présente étude a pour but de déterminer l'origine de l'artésianisme en zone de socle, et de découvrir ses avantages pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation au Bénin. Pour y parvenir, nous avons adopté une méthodologie basée sur la recherche documentaire pour commencer. Il s'en est suivi une collecte de données pendant sept jours sur les différents forages artésiens en zone de socle. Ceci a permis de vérifier les coordonnées desdits forages pour observer ceux qui sont toujours en service ou non, de mesurer le débit, la hauteur de jaillissement de l'eau. Avec l'aide des usagers se trouvant sur place, nous avons recueilli des informations relatives aux périodes de service des forages. Les analyses et traitements des données dans Qgis ont abouti à la détermination des distances minimales qui séparent les forages de leurs aires d'alimentation respectives. Elles sont représentées par la valeur « d ». Cette dernière nous a aidé à déterminer l'origine de l'artésianisme, car plus elle est importante, plus ça voudrait dire que l'eau est issue des fractures souterraines dans les roches. Des tests statistiques ont été ensuite menés pour attester de la corrélation entre les différentes variables de l'étude. Le but est de proposer une équation de détermination de la distance « d ». Ainsi, l'hydrogéologue se trouvant dans un milieu avec des caractéristiques similaires pourrait s'en servir pour mener ses études en adaptant les données de sa zone d'étude. Les analyses et traitements dans Qgis ont abouti à la détermination des distances qui séparent les forages de leurs aires d'alimentation respectives. Celles-ci varient de 0,42 mètre à 174 m. Les distances n'étant pas dans l'ordre du kilomètre, on pourrait affirmer que l'eau des forages artésiens jaillissants circule surtout dans la zone altérée en milieu de socle cristallin. L'artésianisme en zone de socle du Bénin résulte donc de l'altération. Les forages Bouanri2 ; Bouanri3 ; Maka ; et Boukossorou sont capables de fournir mensuellement et respectivement des débits de 11.28 m^3 ; 23.28 m^3 ; 74.304 m^3 ; et 127.44 m^3 .

Mots clés : aquifère de socle, artésianisme, irrigation, approvisionnement en eau potable

ABSTRACT

The problem of access to water also threatens food security because population growth implies an increase in food and therefore water needs. Access to water in the basement zone comes up against problems related to the geology of the aquifers. However, thanks to artesianism, deep groundwater comes to the surface naturally and can therefore be used. The purpose of this study is to determine the origin of artesianism in the basement zone, and to discover its advantages for the supply of drinking water and irrigation in Benin. To achieve this, we adopted a methodology based on desk research to begin with. This was followed by data collection for seven days on the various artesian boreholes in the basement zone. This made it possible to recheck the coordinates of the said boreholes to observe those which are still in service or not, to measure the flow rate, the height of the water gushing. With the help of users on site, we collected information on the service periods of the boreholes. The analyzes and processing of the data in Qgis led to the determination of the minimum distances which separate the boreholes from their respective supply areas. They are represented by the value “d”. The latter helped us to determine the origin of artesianism, because the more important it is, the more it would mean that the water comes from underground fractures in the rocks. Statistical tests were then carried out to certify the correlation between the different variables of the study. The goal is to propose an equation for determining the distance “d”. Thus, the hydrogeologist finding himself in an environment with similar characteristics could use it to conduct his studies by adapting the data of his study area. The analyzes and processing in Qgis led to the determination of the distances that separate the boreholes from their respective supply areas. These vary from 0.42 meters to 174 m. Since the distances are not in the order of a kilometer, it could be said that the water from the gushing artesian boreholes circulates mainly in the altered zone in the middle of the crystalline basement. Artesianism in the basement zone of Benin therefore results from weathering. Bouanri2 boreholes; Bouanri3; Maka; and Boukossorou can provide flow rates of 11.28 m³ monthly and respectively; 23.28 m³; 74.304 m³; and 127.44m³.

Keywords: bedrock aquifer, artesianism, irrigation, drinking water supply

Introduction générale

La sécurité alimentaire passe par une alimentation répondant aux besoins nutritionnels en termes de quantité, de qualité et selon la préférence des populations (FAO, 2008). La faim touche de plus en plus de personnes avec en 2016, 815 millions de personnes sous-alimentées (FAO *et al.*, 2017). Avec une projection de 9,6 milliards de personnes en 2050 à l'échelle mondiale (ONU, 2013) et en vue d'atteindre le deuxième Objectif de Développement Durable, "Faim « Zéro »", il urge de garantir une alimentation susceptible de couvrir, de manière durable, tous les besoins nutritifs (FAO, 2015).

L'eau est inhérente à la garantie de cette sécurité alimentaire, car la croissance démographique implique une augmentation des besoins en nourriture et donc en eau. Adam et Baptiste (2003) ont affirmé que « L'Eau de boisson saine est le plus beau cadeau que l'être humain peut offrir à son semblable ». Le gouvernement du Bénin l'a compris en mettant l'amélioration de l'accès à l'eau potable parmi les défis les plus importants dans le cadre de la Stratégie de Croissance pour la Réduction de la Pauvreté (FMI, 2011). Le taux de desserte sur l'ensemble du territoire béninois est alors passé de 57% en 1990 à 78% en 2015 sur le plan national, avec une progression de 23% en milieu rural (de 49% à 72%) et 12% en milieu urbain (UNICEF Bénin, 2017). Il reste toutefois encore à faire pour garantir une effective sécurité hydrique à la population, conformément à l'ODD 6 : garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement.

Les eaux souterraines constituent le deuxième réservoir mondial d'eau douce après celui des glaciers et des calottes polaires (N'go *et al.*, 2004 in (Koumassi, 2017a). L'alimentation en eau d'environ 75% des africains provient des eaux souterraines exploitées par des milliers de puits et forages (LTHE-Grenoble, 2015). Au Bénin, les eaux souterraines représentent la principale source d'alimentation en eau potable 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).

Certains de ces forages deviennent jaillissants dû au phénomène de l'artésianisme engendré par la géologie des milieux où ils sont implantés. Outre l'AEP, ils peuvent être utilisés à des fins d'irrigation agricole pour remédier au caractère fluvial 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 supplémentaires 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).

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 a mentionné 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.

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 utiliser l'artésianisme pour une auto-suffisance hydrique. 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 contribuer à une meilleure connaissance du phénomène de l'artésianisme en zone de socle, et son utilité pour une mise en valeur de l'alimentation en eau potable et l'irrigation au Bénin. Les étapes permettant d'atteindre celui-ci sont déclinées en objectifs spécifiques suivants :

- Dresser un inventaire renseigné des forages artésiens existants en zone de socle
- Définir pour chaque forage la charge hydraulique et l'altitude par un croisement avec un MNT de 30 m de résolution

- Déterminer la possible aire d'alimentation du forage (distance séparant le forage de l'altitude la plus proche et supérieure à sa charge hydraulique) et en déduire l'origine probable de l'artésianisme.

2. Hypotheses

- L'artésianisme en zone de socle peut être engendré par une circulation de l'eau dans les altérites ou dans des fractures
- L'artésianisme peut être une source d'eau pour l'irrigation
- L'artésianisme peut être utilisé pour l'approvisionnement en eau potable

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 revue de littérature, 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 1 : Revue de littérature

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

1.1 Le cycle de l'eau

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.

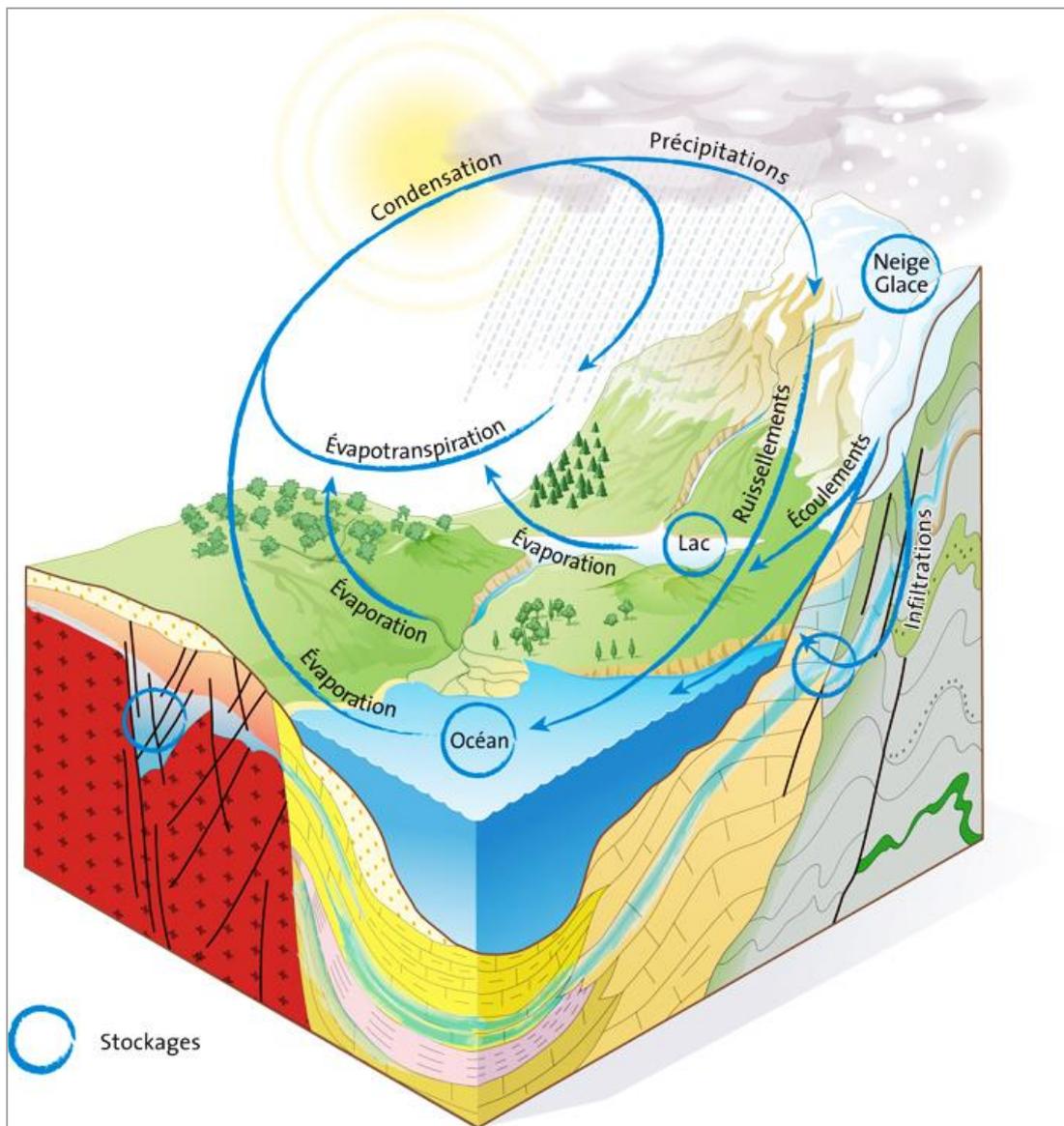


Figure 1 : Le cycle de l'eau terrestre © BRGM – Michel Villey
<https://sigesbre.brgm.fr/Nouveau-Article-sur-le-cycle-de-l-eau.html>

1.2 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. Elle se situe sous la vadose. 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.

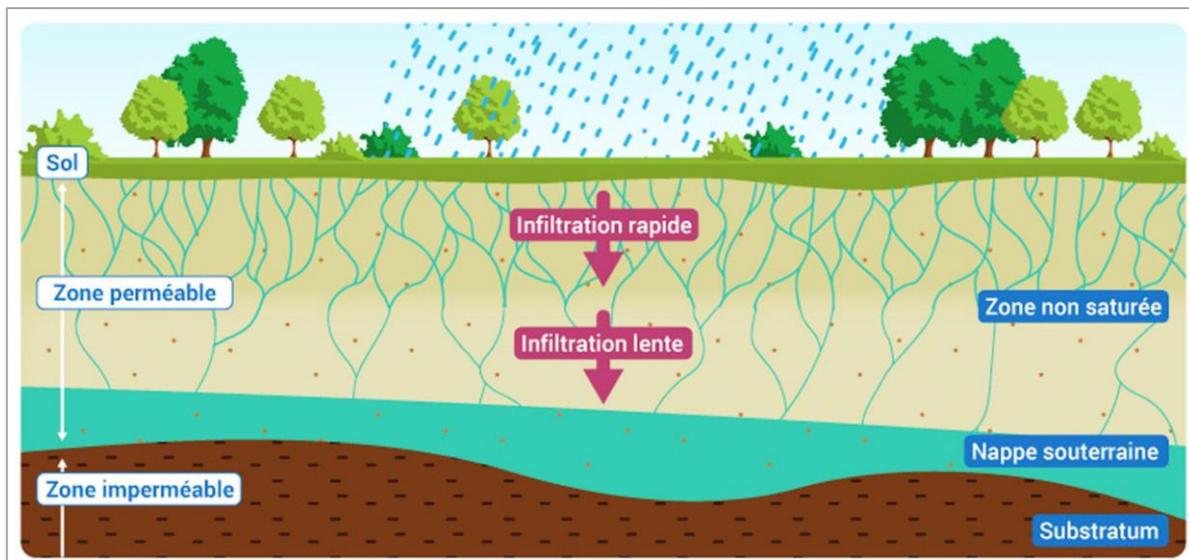


Figure 2 : Formation d'une nappe souterraine ; tirée de Service Eaufrance, 2019

1.2.1 Nappe libre et nappe captive (aquifère libre ou aquifère captif)

Quand on parle de nappe libre, on fait référence à une nappe d'eau souterraine qui n'est recouverte par aucun terrain imperméable (Renard, 2014a). La surface de la nappe phréatique est de ce fait directement en contact avec l'atmosphère par l'intermédiaire de la zone non saturée. Les nappes libres s'assimilent aux nappes phréatiques, car situées dans les premières

couches du sous-sol, et il est possible d'y creuser un puits quand elles sont moins profondes. Elles représentent les principales sources d'approvisionnement en eau potable et en usages agricoles (RNF, 2016). La figure 2 ci-dessus en est un exemple.

On qualifie une nappe de captive lorsqu'elle est prisonnière de deux horizons imperméables fixes : le substratum à la base et le toit au sommet (Renard, 2014b). L'eau souterraine contenue dans l'aquifère est dès lors confinée entre des couches d'argile ou de roche faiblement perméable limitant son écoulement d'une formation à l'autre. Une nappe captive n'est donc pas en contact direct avec l'air extérieur.

Vu qu'on est en présence d'un aquifère profond, le toit imperméable est placé à une cote inférieure à celle de la surface piézométrique, et la pression sur les eaux contenues dans les pores relève de la pression exercée par le poids des différentes couches y superposées. La surface piézométrique correspond à la pression hydrostatique de la colonne de l'eau. Le fait de découvrir ce type d'aquifère lors de la réalisation d'un forage va libérer l'eau sous pression qui cherchera par la suite à atteindre son niveau piézométrique. Quand ce niveau est au-dessus du niveau du sol, on assiste à l'émergence de l'eau du puits et qui déborde : **c'est le phénomène de l'artésianisme, fond de notre étude**. Le puits est dit artésien jaillissant dans ce cas. La figure 3 illustre différentes nappes et l'artésianisme.

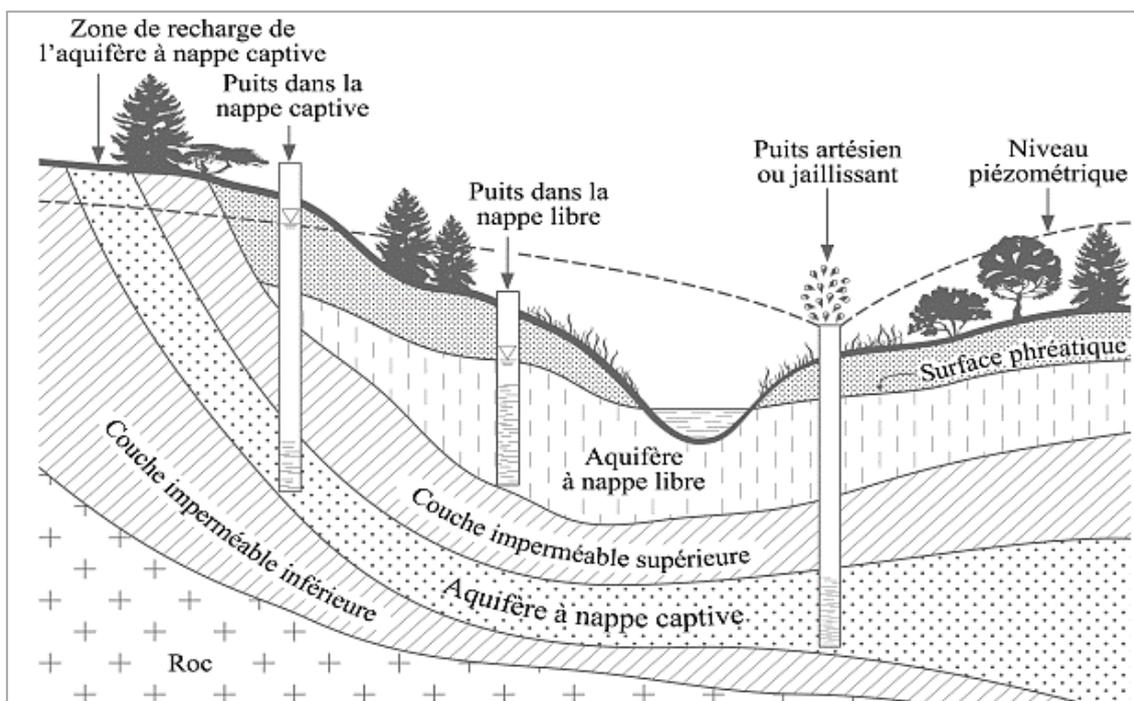


Figure 3 : Nappe libre, captive et phénomène de l'artésianisme
Tiré de Ancil, Rousselle et Lauzon, 2005

1.2.2 Aquifère karstique

Les karsts sont des couches géologiques calcaires dont l'eau a dissout certaines zones pour créer de véritables galeries souterraines. On peut parler, dans ce cas bien précis de « rivière » souterraine, bien que ces réseaux soient très irréguliers et n'engendrent pas d'écoulement continu (Ceseau, 2021).

Un karst représente une structure morphologique constituée d'un ensemble de fissures et de cavités souterraines plus ou moins développées et connectées. Sa formation résulte d'une dissolution des massifs de calcaires. L'eau chargée de dioxyde de carbone pénètre dans les fissures de la roche, la dissout progressivement et fait ainsi naître tout un réseau souterrain (endokarst) constitué de grottes, galeries et lacs souterrains. Quand cette érosion survient à l'extérieur en surface, on parle d'exokarst (RNF, 2016). Ces conduits aboutissent à des sources souvent spectaculaires utilisées dès la plus haute antiquité pour l'alimentation en eau.

Le karst et les processus de sa genèse et de son évolution constituent des aquifères offrant des ressources et des réserves intéressantes à exploiter. L'eau prélevée des aquifères karstiques contribue à environ 25 % à l'alimentation en eau domestique de la population mondiale. Il est aussi sollicité pour l'irrigation et l'industrie (Bakalowicz, 2017). La figure 4 suivante présente une coupe transversale d'un aquifère karstique.

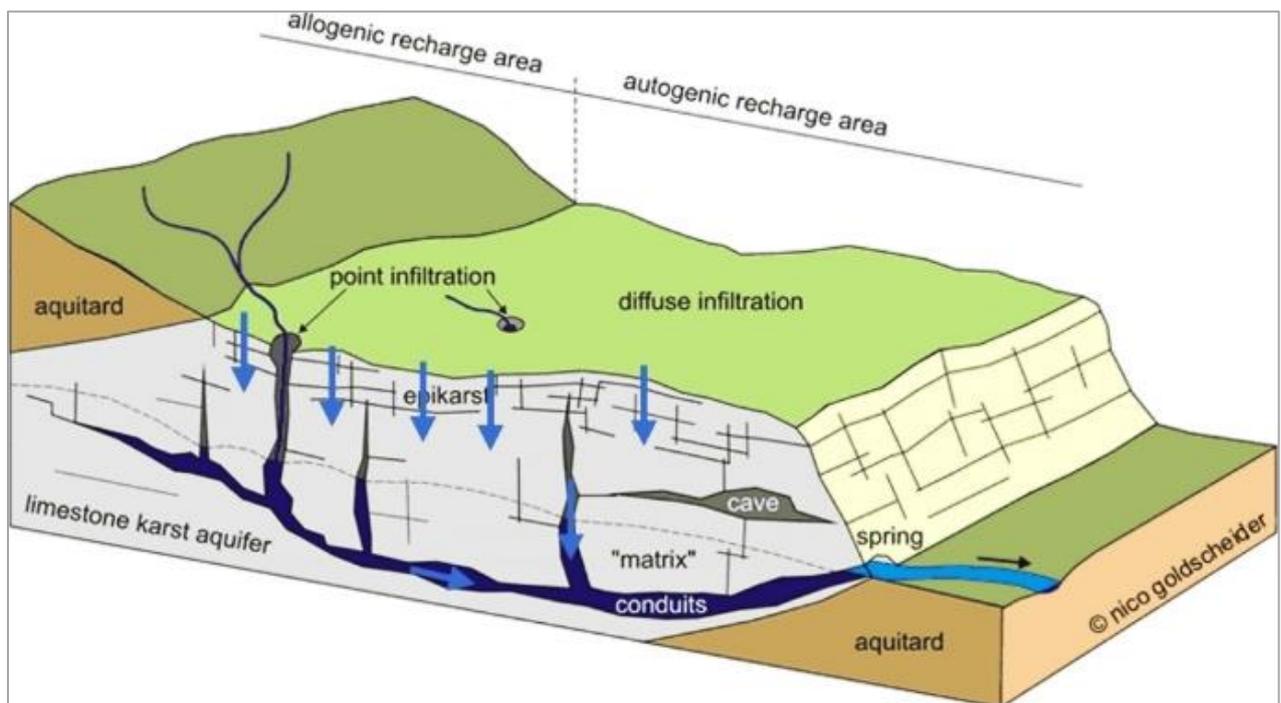


Figure 4 : Schéma d'un aquifère karstique (N. Goldscheider)

1.3 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.

1.4 Approvisionnement en eau potable

Les informations de cette rubrique ont été tirées du cours d'approvisionnement en eau potable de Zoungrana, 2003. On parle d'un système d'approvisionnement en eau potable (AEP) lorsqu'il s'agit d'un agencement d'ouvrages et d'équipements capables de fournir une eau potable tant du point de vue bactériologique que physico-chimique.

L'Approvisionnement en eau potable part de la mobilisation de la ressource en eau et de sa distribution qui est le dernier maillon de la chaîne du système classique d'approvisionnement en eau potable. Son rôle est de transporter l'eau du stockage jusque chez les usagers et d'en assurer la livraison.

L'AEP vise généralement deux buts.

- **Amélioration de la santé**

Il s'agit ici d'apporter à la population une eau de qualité, saine, et en quantité suffisante. Ceci limite les risques de maladies hydriques. L'AEP ambitionne de fournir de l'eau dans des conditions d'acceptabilité raisonnables à toutes les couches sociales de la population.

- **L'eau pour les activités socioéconomiques**

Cette partie concerne les usages de l'eau à des fins artisanales ou industrielles. L'eau est un bien économique et doit faire l'objet d'une gestion durable.

1.5 Situation de l'AEP 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 potable pour couvrir les besoins quotidiens. 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 1m³ 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).

1.6 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).

1.6.1 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).

1.6.2 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° 5 illustre le système d'irrigation par aspersion du village maraîcher de Sèmè-Kpodji (VIMAS) au Bénin.



**Figure 5 : 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 6 et 7 montrent des systèmes d'irrigation goutte à goutte.



Figure 6 : Système d'irrigation goutte à goutte



Figure 7 : Arrosage d'une plante par le système d'irrigation goutte à goutte

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

1.7 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 (CO₂) 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).

Chapitre 2 : Présentation du milieu d'étude (Zone de Socle du Bénin)

2.1 Cadre géographique et hydrographique

Le Bénin est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer (entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude nord et les méridiens 1° et 30°40' de longitude est). Il couvre une superficie de 114 763 km² et s'étend sur 700 km, du fleuve Niger au nord à la côte atlantique au sud. Le pays dispose de quatre unités géologiques à savoir : le bassin sédimentaire côtier ; le bassin de la Volta ; le bassin de Kandi et le socle cristallin. La dernière occupe 80% du territoire. Communément appelée zone de socle, elle représente notre milieu d'étude.

La zone du socle cristallin est située à une latitude comprise entre environ 7 °N et 12,4 °N et à une longitude comprise entre environ 1 °E et 4 °E. Elle a un relief accidenté qui part de la commune de Djidja au sud du pays (dans le département du Zou) dont l'altitude moyenne est de 300 m, et monte jusqu'au niveau du Mont Atacora qui culmine à 658 m au Nord-Ouest du pays dans la commune de Natitingou (département de l'Atacora). La zone de socle englutit six départements (et une petite partie de l'atlantique) parmi les 12 que contient le Bénin. Toutefois, les ouvrages retenus pour notre étude sont concentrés dans les départements de la Donga, du Borgou et de l'Atacora ; notamment dans les communes de Parakou, Bassila, Kouandé et Bembèrèkè. Le tableau 1 présente le cadre administratif de la zone d'étude.

Tableau 1 : Cadre administratif de la zone d'étude

Départements	Superficie (km ²)	Population	Densité hab./km ²)	Communes (de l'étude)
Atacora	20 499 km ²	772 262	38	Kouandé
Borgou	25 856 km ²	1 214 249	47	Parakou ; Bembèrèkè
Donga	11 126 km ²	543 130	49	Bassila

Source : INSAE, RGPH4-2013

En ce qui concerne l'hydrographie, la zone de socle du Bénin est irriguée par plusieurs cours et plans d'eau. Il s'agit des fleuves Mono, Couffo, Ouémé, Sota, Zou, Okpara, Beffa, Terou, Alibori, Mékrou, Pendjari. Ces différents cours d'eau sont alimentés par un réseau de cours d'eau temporaire. La figure 8 ci-dessous présente la localisation de notre milieu d'étude.

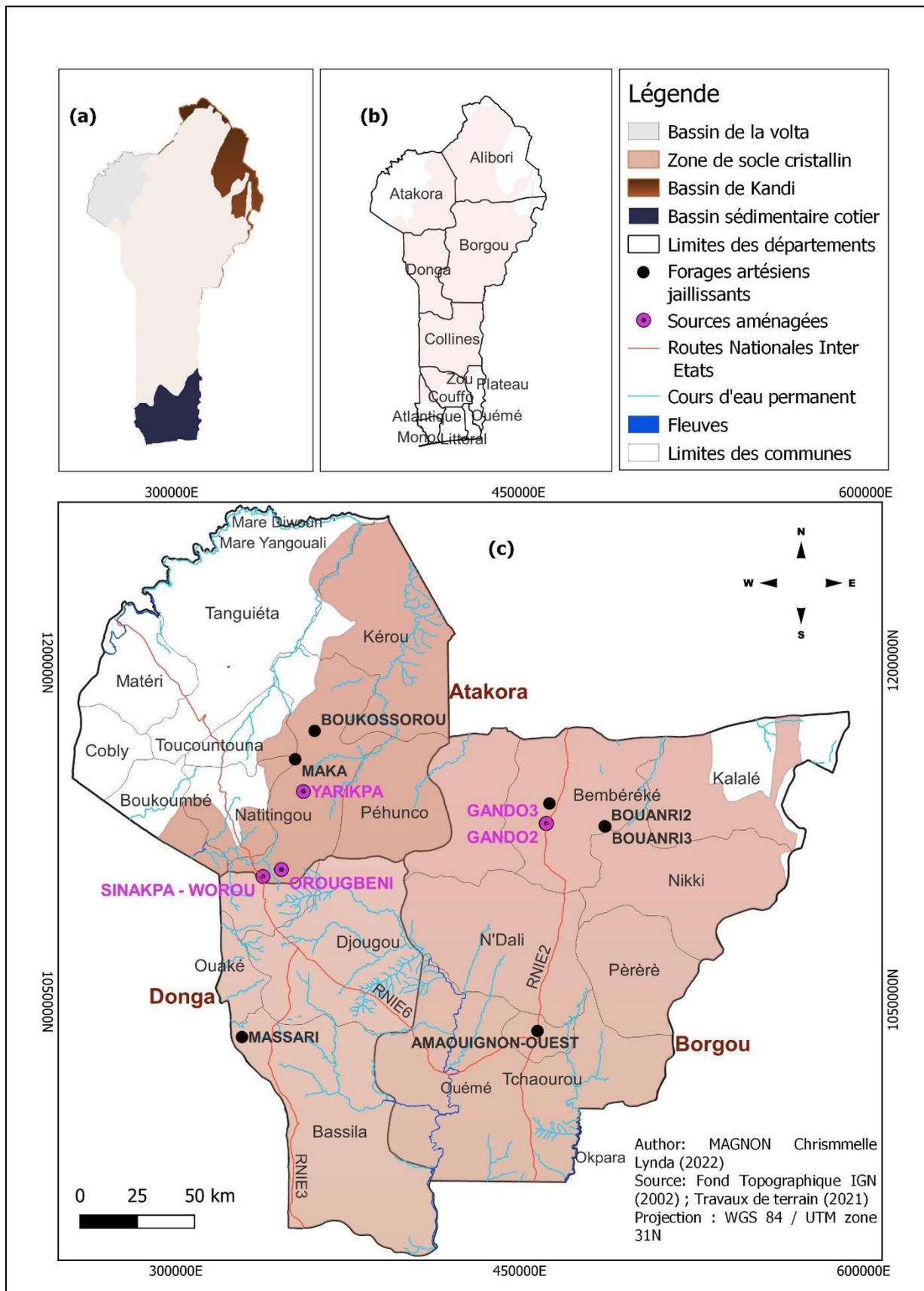


Figure 8 : Carte de présentation de la zone d'étude. a) Localisation de la zone de socles et les bassins sédimentaires ; b) Situation du socle cristallin par rapport aux départements administratifs ; c) Les 3 départements où sont concentrés les forages

2.2 Climat du milieu d'étude

Le climat dans la zone de socle (septentrionale) est soudanien avec une moyenne de pluie annuelle de 1.190 mm (Le Lay and Galle, 2005 in Kotchoni, 2019). Le déclenchement des saisons des pluies et les rythmes pluviométriques sont principalement liés à la phase d'installation du système de mousson (Louvet et al., 2003 in Kotchoni, 2019) qui résulte d'un différentiel énergétique inter hémisphérique entre l'océan et le continent. L'Évapotranspiration Actuelle (ETA) représente environ 68 à 86 % de la pluie annuelle (Séguis et al., 2011 in Alle, 2019). L'humidité relative est très élevée durant la saison pluvieuse (80% en moyenne entre juillet et septembre). Ce taux chute pendant la saison sèche (surtout entre février et mars) pour se situer à environ 35%. Les températures annuelles moyennes sont comprises entre 26,5 et 37°C et varient en fonction de la latitude (Boukari, 2007 ; in Kotchoni, 2019).

2.3 Contexte géologique du milieu d'étude

Les roches de socle du Bénin sont constituées de roches métamorphiques et magmatiques. Elles font partie de la ceinture des Dahoméides du Néoprotérozoïque panAfricain qui résulte de la collision entre le craton Ouest-Africain, le craton du Congo et celui du block du Sahara de l'Est il y a environ 600 Ma pendant l'assemblage de l'Ouest du Gondwana (Affaton et al., 1991 ; Castaing *et al.*, 1993 ; in (I. C. Alle, 2019). En dehors de ces formations on observe localement des intrusions magmatiques acides ou basiques syn-tectoniques, tardi-tectoniques comme post-tectoniques, et quelques complexes d'origine volcano-sédimentaires d'extension spatiale très réduite (BRGM, 1978, in Boukari 2007).

Les roches du complexe du socle sont essentiellement composées de Gneiss cristallin et granulite avec intrusion de granite et de syénite.(Boukari et al., 2018) Les formations métamorphiques sont les plus étendues et comprennent principalement des complexes migmatiques indifférenciés (migmatites, migmatites granitiques), des gneiss divers (gneiss à biotite, gneiss à biotite et amphibole avec de rares intercalations d'amphibolites), mais aussi des complexes granulitiques (granulite à deux pyroxènes) et quelques amphibolites, micaschistes, pyroxénites, serpentinites, quartzites et marbres (Affaton, 1975 ; BRGM,1978 ; in (Boukari & Alassane, 2007) ARI 2007). La figure 9 suivante montre un aperçu de la géologie du milieu d'étude.

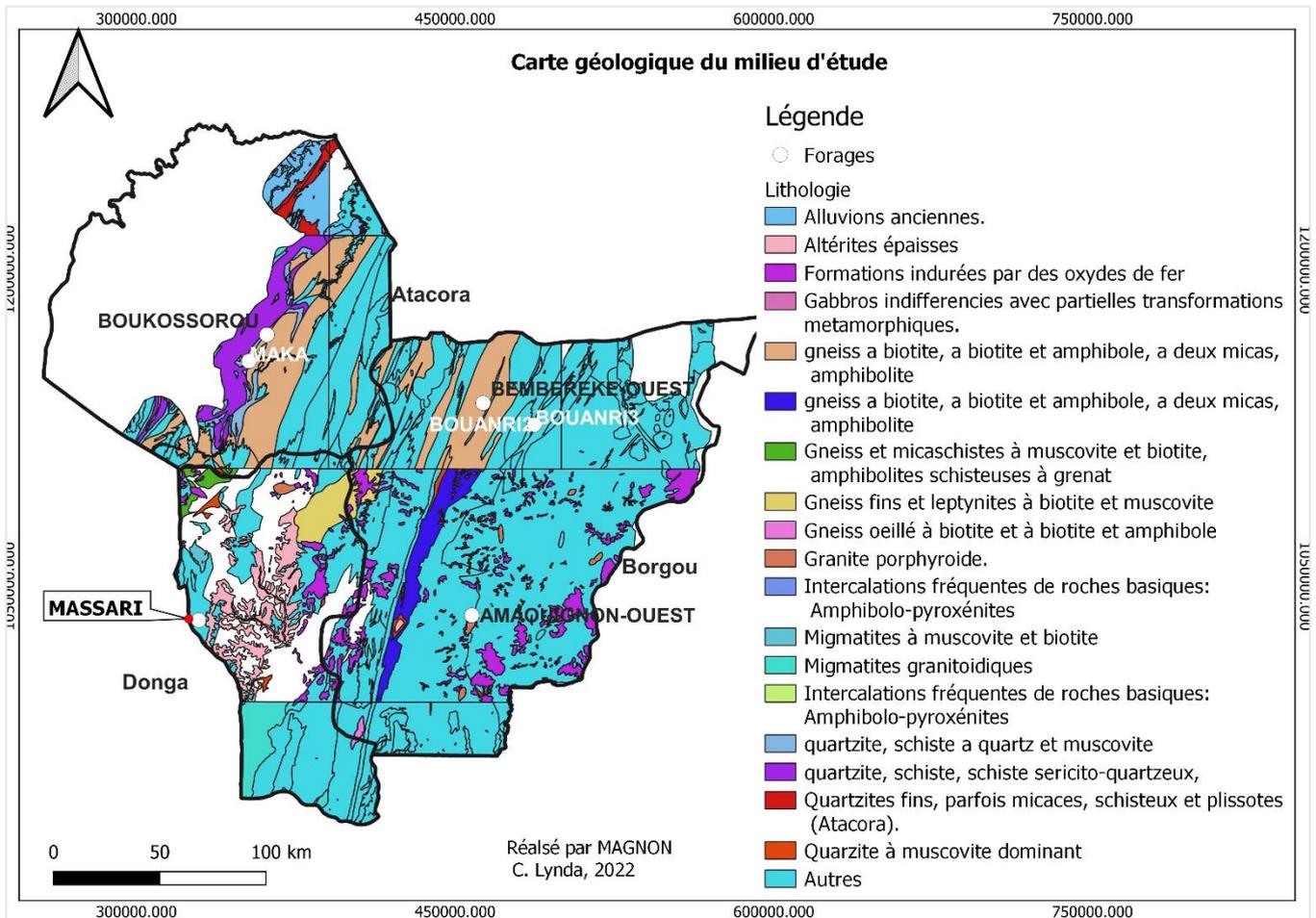


Figure 9 : Géologie de la zone d'étude

2.4 Aquifères de socle du Bénin

2.4.1 Mise en place

Il a été démontré qu'au lieu d'être attribuée à une fracturation tectonique ou à des processus de décompression, la potentialité aquifère (la perméabilité) des roches du socle résulte d'un processus d'altération qui sont à l'origine de la potentialité aquifère (Lachassagne *et al.*, 2011).

En effet, l'altération est un ensemble de processus physico-chimiques affectant les minéraux et provoquant leur transformation, leur perte de cohésion et qui, de ce fait, favorise la désagrégation et l'érosion des roches qu'ils constituent. Une roche altérée peut être qualifiée d'altérite. Le principal agent d'altération est l'eau dont les effets peuvent être accentués par la présence de substances dissoutes, en particulier acides. Le climat est aussi un facteur important, l'altération des roches étant plus rapide en climat chaud et humide, ou sous l'action de venues hydrothermales, dans les zones volcaniques, par exemple. L'altération dégrade en particulier les silicates, principaux constituants des roches magmatiques et métamorphiques. (RNF, 2016).

Au cours de ce processus d'altération, le gonflement des minéraux entraîne une fissuration des roches du socle (Dewandel *et al.*, 2006 ; in Assemian *et al.*, 2014). Cet horizon fissuré/fracturé stratiforme abrite les zones perméables (Lachassagne *et al.*, 2015).

Les aquifères d'altération jouent une fonction majeure dans le stockage de l'eau dans les régions de socle. Les réserves d'eau souterraine sont emmagasinées dans la partie supérieure altérée, mais sont drainées par les fissures et les fractures sous-jacentes, ouvertes parfois sur de grandes profondeurs.

2.4.2 Modèle conceptuel des aquifères de socle

Les aquifères de socle sont représentés par trois types de réservoirs : le réservoir d'altérites qui correspond aux arènes sablo-argileuses, le réservoir de fissures situé au-dessus de la roche saine qui traduit une zone partiellement altérée comportant de nombreuses fissures et diaclases généralement remplies de produits d'altération, et le réseau de fractures majeures qui affectent la roche mère (Ouedraogo, 2019 in Yetongnon, 2020).

Ainsi, du haut vers la profondeur, un aquifère de socle comprend les zones décrites plus bas inspirées de (Dewandel *et al.*, 2011 in Assemian *et al.*, 2014)) et (Lachassagne *et al.*, 2017, 2014, 2011 in Alle, 2019) :

- **Un premier compartiment nommé Zone Altérée (ZA)**

Cette zone est composée des altérites meubles (saproлите) caractérisées par une faible perméabilité, mais avec une capacité significative de stockage des eaux souterraines. La ZA est constituée de roches altérées non consolidées avec une épaisseur moyenne de 5 à 40 m, voire plus (argile et sable avec de la cuirasse latéritique par endroits en surface). En zone de socle, c'est la ZA qui est ciblée pour la construction de puits peu profonds grâce à sa capacité de stockage de l'eau. A la base de cette zone se trouve une couche fissurée/fracturée constituée de roches altérées consolidées.

- **La zone fissurée altérée ZFA**

D'une épaisseur moyenne de 10 à 60 m, elle est subdivisée en deux compartiments distincts : la Zone Fracturée Stratiforme ZFS et la Zone Fracturée sub-Verticale ZFV. La ZFA possède des coefficients de perméabilité généralement plus élevés que ceux de la ZA, mais ses propriétés d'emmagasinement sont plus faibles.

- **La roche saine ou le socle sain SS**

Imperméable, la roche saine peut se retrouver localement recoupée de couloirs d'altération plus profonde liés à des filons, des contacts lithologiques ou des anciennes fractures tectoniques qui peuvent aussi montrer une certaine perméabilité. La figure 10 suivante représente le modèle conceptuel d'un aquifère de socle.

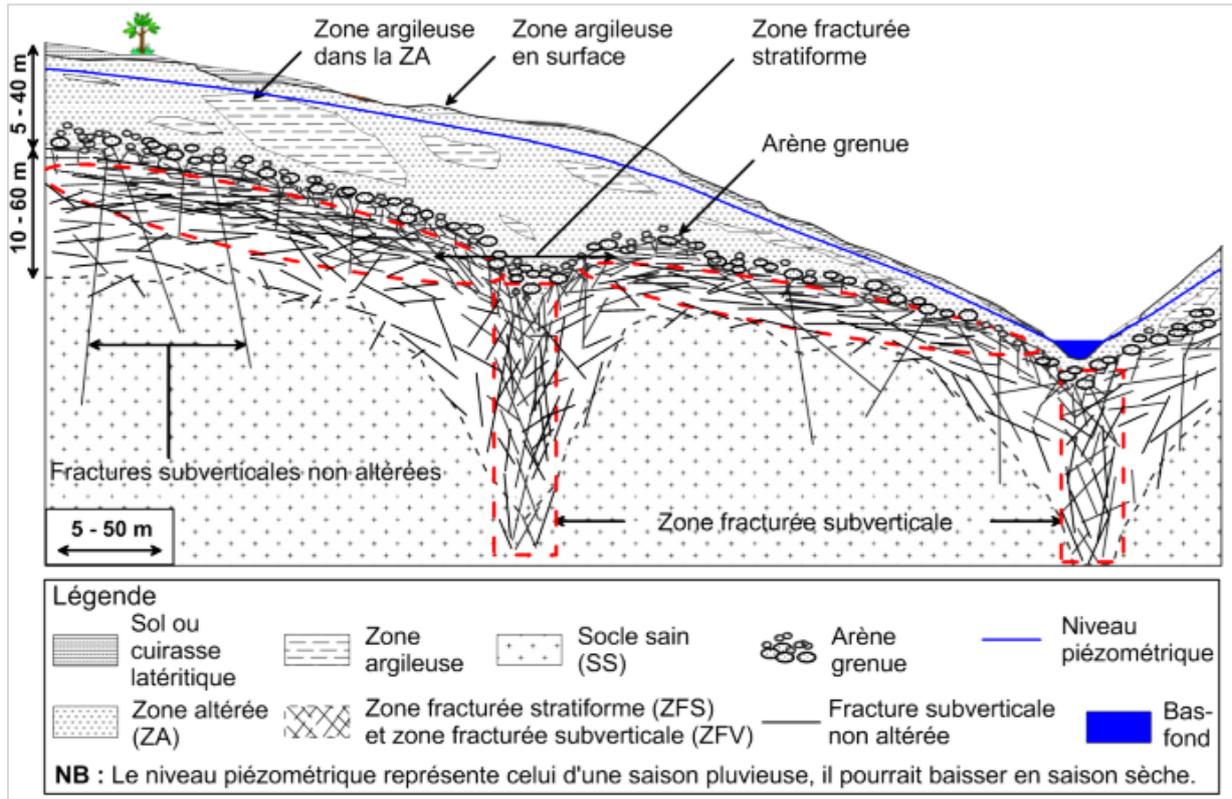


Figure 10 : Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel et al., 2011 ; Lachassagne et al., 2017, 2014, 2011).

Chapitre 3 : Matériels et méthodes

3.1 Matériel

Nous sommes partis en quête des forages artésiens en zone de socle en nous aidant d'une base de données reçue préalablement à la DGEau. Celle-ci répertorie les forages artésiens des différents départements du Bénin que ce soit en zone de socle comme dans les bassins sédimentaires.

Ces données, notamment celles en relation avec notre milieu d'étude, entrées dans un GPS Garmin nous ont permis d'avoir un itinéraire précis de notre tournée qui s'est étendue sur un peu plus de 872 km. Ensuite, à destination au niveau de chaque forage, un mesureur à ruban a été utile pour mesurer la hauteur de jaillissement de l'eau par rapport au sol que nous appellerons ici, **potentiel au-dessus** du sol. En vue d'une confirmation des coordonnées reçues, le GPS a aussi été pratique pour prendre de nouvelles coordonnées, mais aussi les altitudes de chaque ouvrage. Les débits respectifs ont été mesurés à l'aide d'un tuyau transparent et d'un seau de 20 Litres de contenance.

Les différentes données ont été transcrites dans Excel pour en faire un fichier vecteur utilisable dans le logiciel QGIS. Cet outil des SIG nous a aidés à faire le point des forages réellement en services, car toutes les coordonnées n'étaient pas valides. D'autres fichiers de type vecteur relatifs au Bénin sont également intervenus dans notre traitement QGIS. Enfin, le traitement des données a requis l'utilisation du logiciel de programmation **R**, ainsi que des fichiers SRTM de 30m de résolution que nous avons téléchargés sur Earth data, un site de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/>)

3.2 Méthodes

3.2.1 Inventaire des forages artésiens en zone de socle

La méthodologie de la présente étude a débuté par un inventaire des forages artésiens qui se trouvent en zone de socle. Ces derniers étaient beaucoup plus concentrés dans les départements du Borgou, de l'Atakora et de la Donga. Au total, quinze (15) sites ont été visités constitués de forages, de puits et de sources. Outre les coordonnées, des hauteurs (que nous avons appelées plus haut potentiel au-dessus du sol) représentant la distance entre la surface du sol et le point maximal de jaillissement de l'eau ont été mesurées. Elles aideront par la suite à déterminer la charge hydraulique. En général, l'attention a été beaucoup plus portée sur sept (7) forages qui étaient réellement jaillissants au moment de la visite.

La carte suivante résume les forages de la base de données et ceux visités.

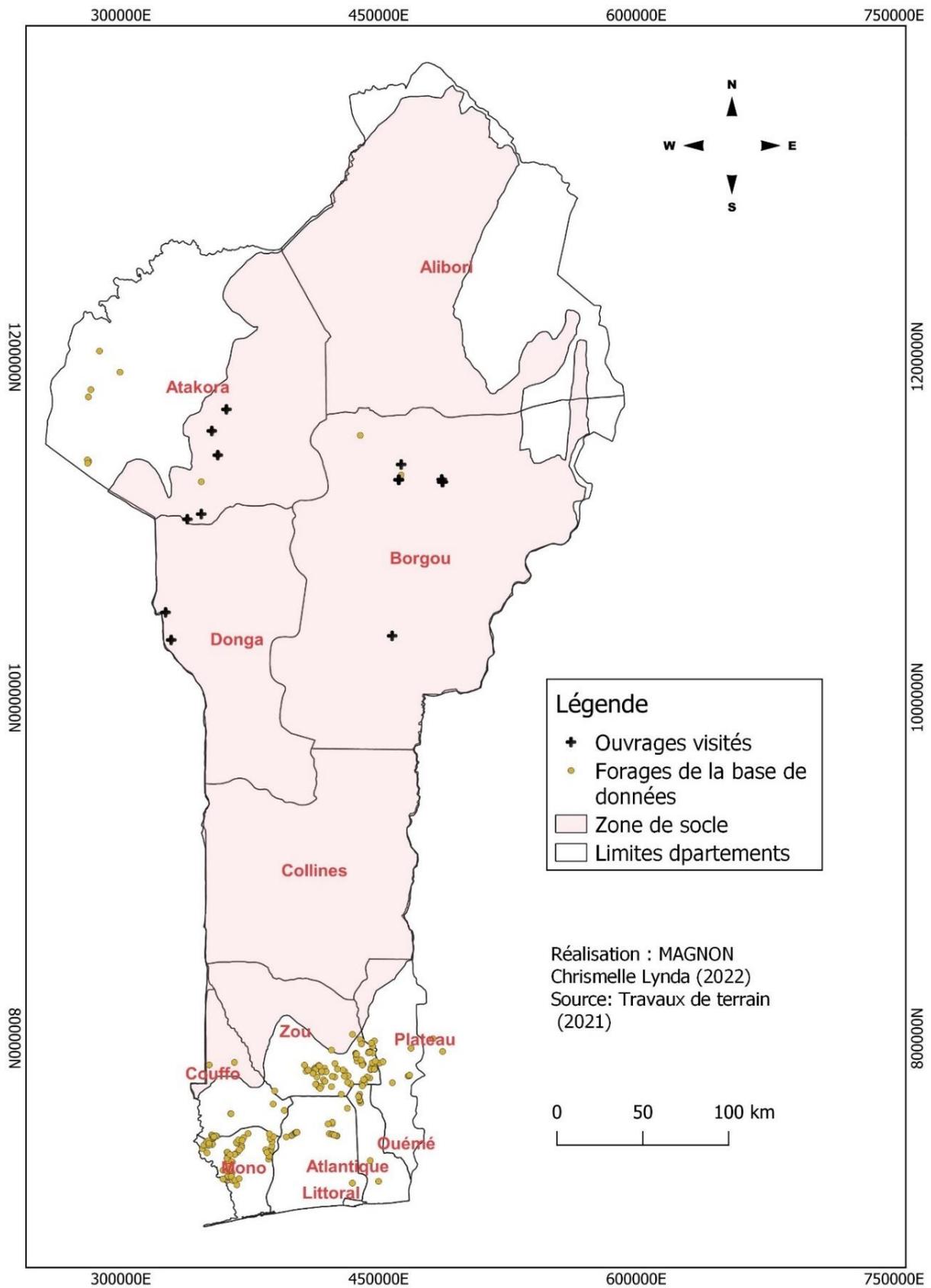


Figure 11 : Localisation des ouvrages explorés

3.2.2 Mesure du potentiel h et du débit Q

Pour connaître la hauteur à laquelle l'eau jaillit du sol, des tuyaux transparents ont été utilisés. Cette technique n'a pas pu être utilisée sur tous les sites du fait de l'aménagement complexe, vétuste et fragile des ouvrages. Le tuyau a été placé à la sortie artificielle de l'eau et dirigé vers le haut de façon à laisser l'eau gicler naturellement. À certains endroits où le diamètre des canalisations était supérieur à celui du tuyau transparent, nous avons utilisé de la chaleur pour en élargir les bords. Les images suivantes montrent l'exemple des mesures sur deux sites.



Figure 12 : Mesure du potentiel h à BOUKOSSOROU (KOUANDE)



Figure 13 : Mesure du potentiel h à MAKKA (KOUANDE)

Quant au débit, il a été mesuré en remplissant le seau (de 20 L) de l'eau du forage, tout en chronométrant le temps mis pour remplir ce volume. Il est estimé ici en L/s et m³/h. Les images qui suivent montrent un aperçu des mesures du débit Q sur deux sites.

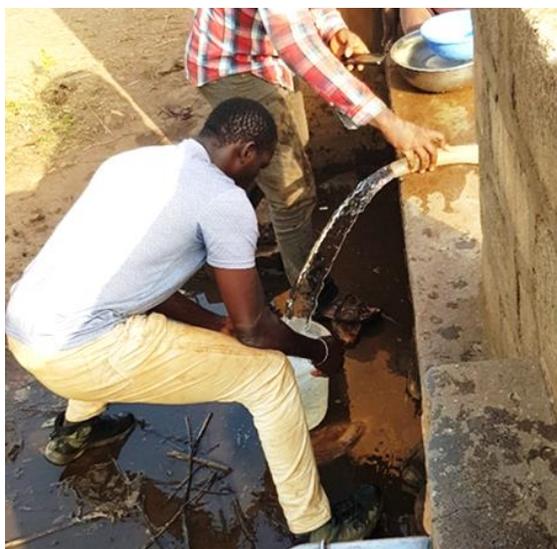


Figure 14 : Mesure du débit à BOUKOSSOROU



Figure 15 : Mesure du débit à BOUANRI (BEMBEREKE)

3.2.3 Détermination de la charge hydraulique et de l'altitude pour chaque forage

Pour déterminer la charge hydraulique, il faut ajouter les potentiels respectifs h à l'altitude de chaque forage (qui représente l'altitude du pixel où se situe le forage). Au préalable, les données des forages recueillies sur le terrain ont été mises sous format shapefile afin de les importer dans QGIS sous forme de point. Ensuite, des images de types SRTM ont été téléchargées avec une résolution de 30 mètres pour plus de précision. Les altitudes y ont été extraites pour chaque point avec l'outil "Point sampling tool" du logiciel.

Nous avons procédé à un recoupement des SRTM avec la carte de la zone d'étude pour attribuer à chaque forage son altitude et sa charge hydraulique, ce qui tient lieu d'étude topographique.

3.2.4 Détermination de la distance minimale séparant le forage de son aire d'alimentation

Cette distance est considérée comme celle qui sépare le forage de l'altitude la plus proche et supérieure à la charge hydraulique trouvée. Il faut donc déterminer une distance d qui sépare le forage de cette altitude. Cette estimation nécessite une catégorisation du MNT avec des couleurs attribuées aux différents intervalles d'altitudes. La catégorisation ainsi faite, nous

avons ensuite extrait les courbes de niveau (lignes imaginaires qui relient tous les points de même altitude) à partir de l'image raster de la zone d'étude. Ceci a permis de tracer le sens d'écoulement de l'eau, jusqu'à l'altitude correspondant à la charge hydraulique de la nappe. En effet, les courbes de niveau sont également des courbes sopiézométriques, car elles correspondent à des points de même charge hydraulique, d'où la ligne représentant l'écoulement de l'eau dans la nappe est perpendiculaire aux courbes sur les figures. La longueur de ces différentes lignes représente la distance « **d** » recherchée.

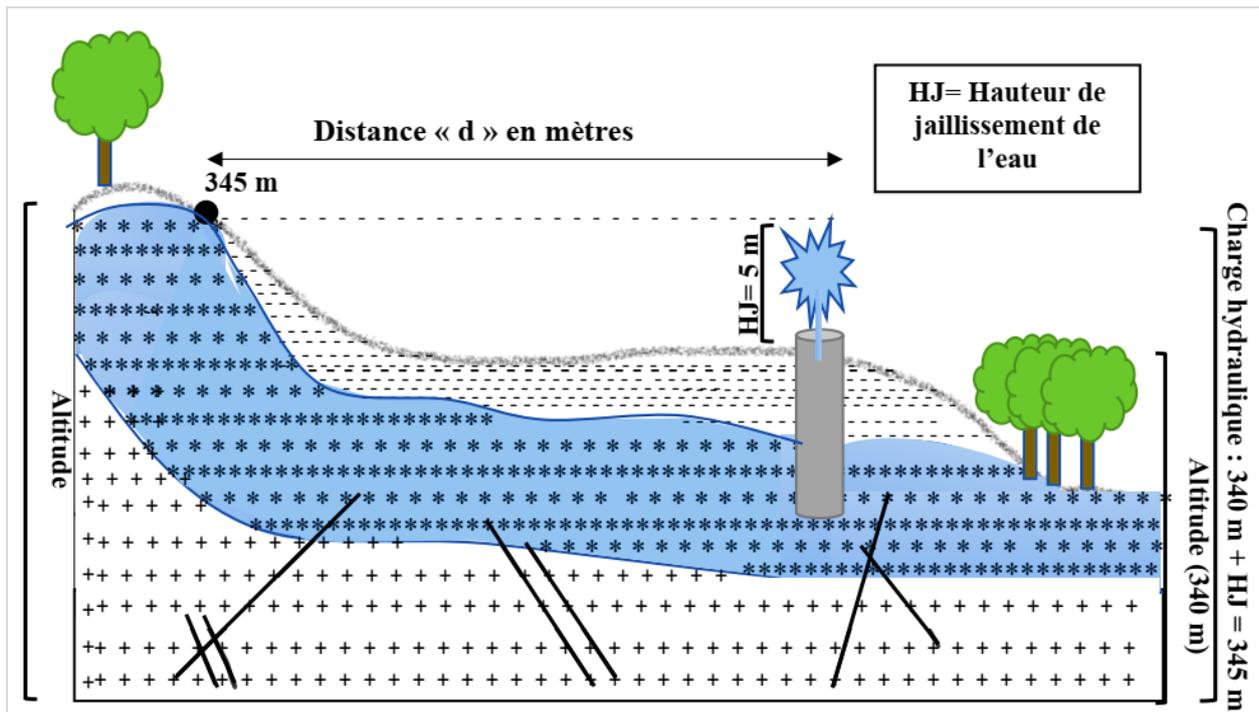


Figure 16 : Matérialisation de la distance "d" recherchée

Légende :

- | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
|  | Forage |  | Végétation |
|  | Aquifère captif |  | Artésianisme |
|  | Couche imperméable |  | Fracture dans la roche |
|  | Couche imperméable |  | Surface du sol |

3.2.5 Analyse des interdépendances dans R

Nous avons choisi d'étudier l'effet des paramètres clés, les uns par rapport aux autres afin de déterminer les interdépendances et leur significativité. Ainsi, par des procédés statistiques dans

le logiciel R, nous avons premièrement déterminé les moyennes et les erreurs standards ainsi que les bornes supérieures et inférieures de chaque variable. Nous avons admis un intervalle de confiance de 95%. Ainsi les symboles * représentent une p-value comprise entre 0,05 et 0,01 ; ** une p-value entre 0,01 et 0,001 ; *** une p-value inférieure à 0,001.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

4.1 Résultats

4.1.1 Présentation des sites avec leurs aires d'alimentation

4.1.1.1 AMAOIGNON-OUEST

Le site n° 1 est dans le département du Borgou, commune de Parakou et plus précisément dans la localité AMAOIGNON-OUEST. Il a été implanté le 20/04/2018, financé par le partenariat ORLEANS-PARAKOU. Ce forage est situé à une longitude de 2,61541 et d'une latitude de 9,37349 avec 383 m d'altitude. Le potentiel au-dessus du sol (h) est de 102 cm. L'ouvrage est aménagé par une pompe à motricité humaine. Selon les témoins, le forage n'est jaillissant qu'en saison pluvieuse, mais ne coule pas toujours de façon continue. Néanmoins à la date du 01/12/21, l'eau coulait à un faible débit. Le forage était sec à la date du 18/01/22. Les figures 17 et 18 mettent en exergue ce forage de la commune de Parakou.



Figure 17 : Forage d'AMAOUIGNON-OUEST



Figure 18 : Écoulement de l'eau du forage d'AMAOUIGNON-OUEST

La figure 19 suivante montre le croisement du MNT avec le forage. Nous avons pu ainsi déterminer la distance qui sépare le forage de son aire d'alimentation en suivant le sens d'écoulement de l'eau. La distance d pour le forage d'Amaouignon-Ouest dans la commune de Parakou est de 7,815 m.

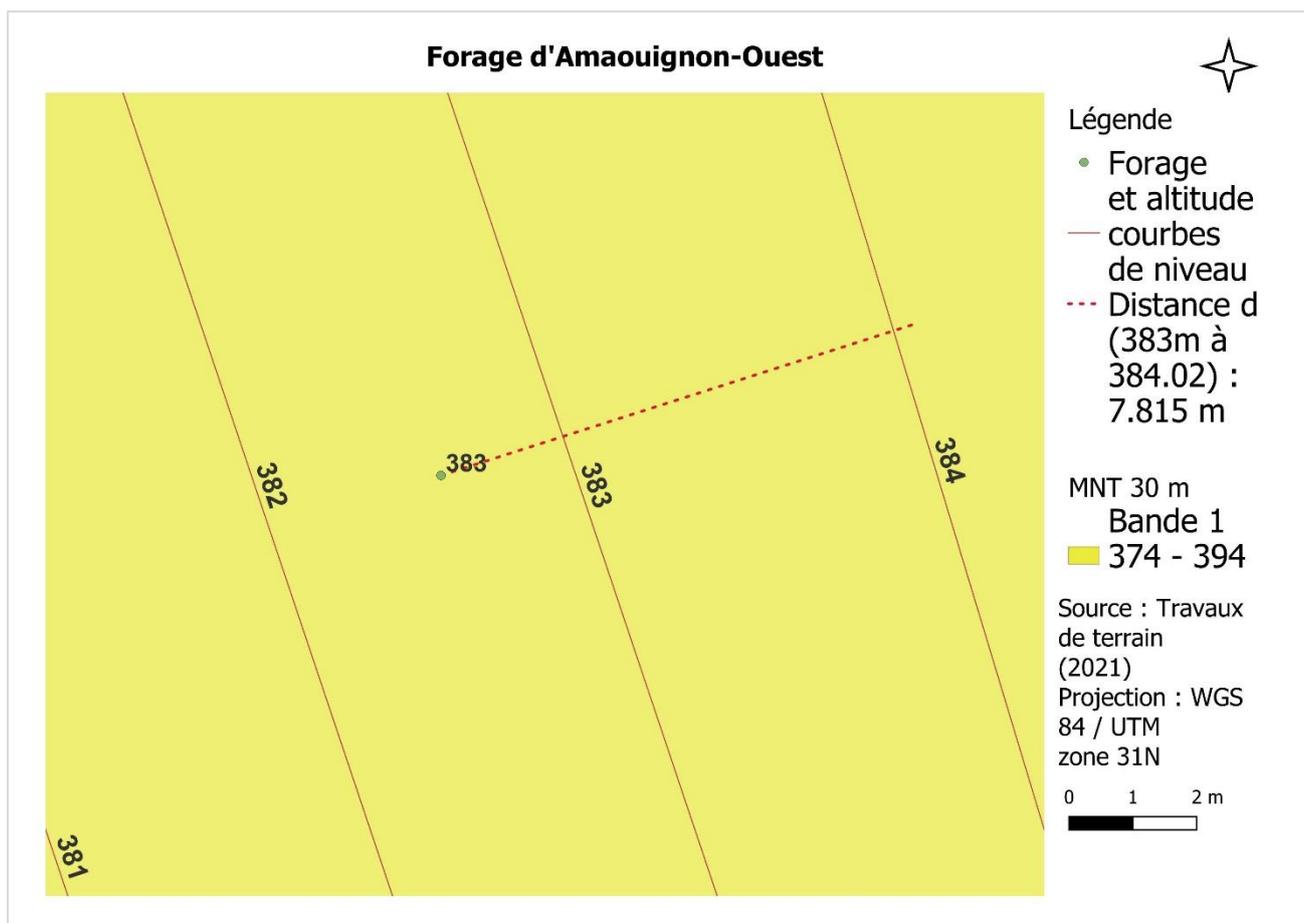


Figure 19 : Détermination de d pour le site d'Amaouignon-Ouest

4.1.1.2 BOUANRI 2

Toujours dans le Borgou, il se trouve dans la commune de Bembereke spécifiquement dans l'arrondissement de Bouanri. Ce fut le deuxième forage visité de la zone, d'où son nom. À la base, il s'agit d'un forage aménagé par une pompe électrique pour l'adduction d'eau villageoise. L'aménagement est à une altitude de 346 m. Le constat est que l'eau coule de façon continue quelque soit la saison d'après l'artisan chargé de sa gestion. À cause de cet écoulement, la localité a décidé de ne plus faire recours au pompage. L'eau jaillissait au moins à 154 cm du sol pour un débit de 0,132 L/s soit 0,47 m³/h. Les coordonnées sont : 2.88253 E et 10.19211 N.

Pour ce qui est du croisement du MNT avec ledit forage, nous avons obtenu une distance de 30,612 m. Le forage artésien Bouanri2 est donc situé à près de 31 m de son aire d'alimentation. La figure 20 montre le forage et la figure 21 la détermination de **d**.



Figure 20 : Forage BOUANRI 2

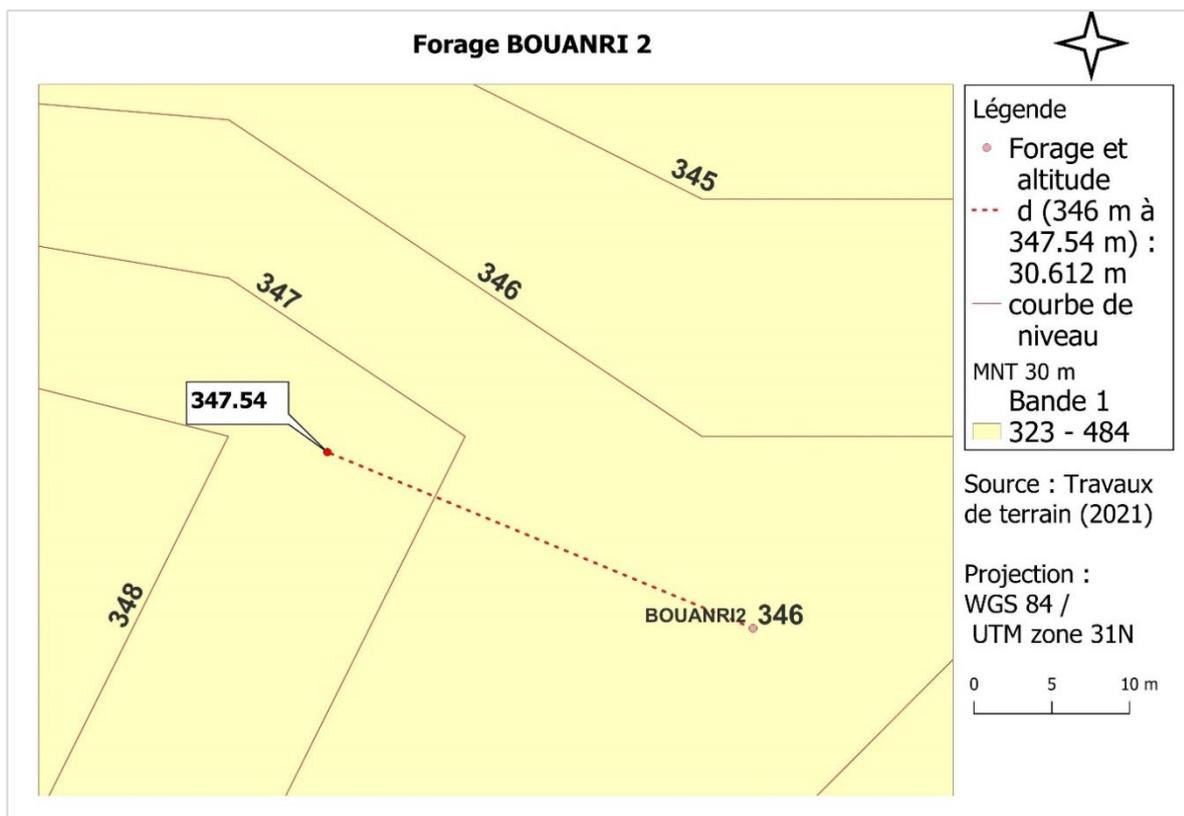


Figure 21 : Détermination de d pour le site de Bouanri2

4.1.1.3 BOUANRI 3

Érigé en 2017, dans le cadre du PROGRAMME D'URGENCE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (310 forages), il est à une altitude de 340 m et est équipé d'une pompe à motricité humaine. En raison de la portée du jaillissement de l'eau, cet ouvrage était installé à une hauteur élevée par

rapport au sol. La hauteur h est d'au moins 2.21 m (l'ouvrage mis en place empêche de voir la hauteur réelle de jaillissement de l'eau) pour un débit de 0,27 L/s soit 0,97 m³/h. Les coordonnées de l'ouvrage représenté sur la figure 22 SUIVANTE sont : 2,88508 E et 10,19071 N.



Figure 22 : Forage Bouanri3

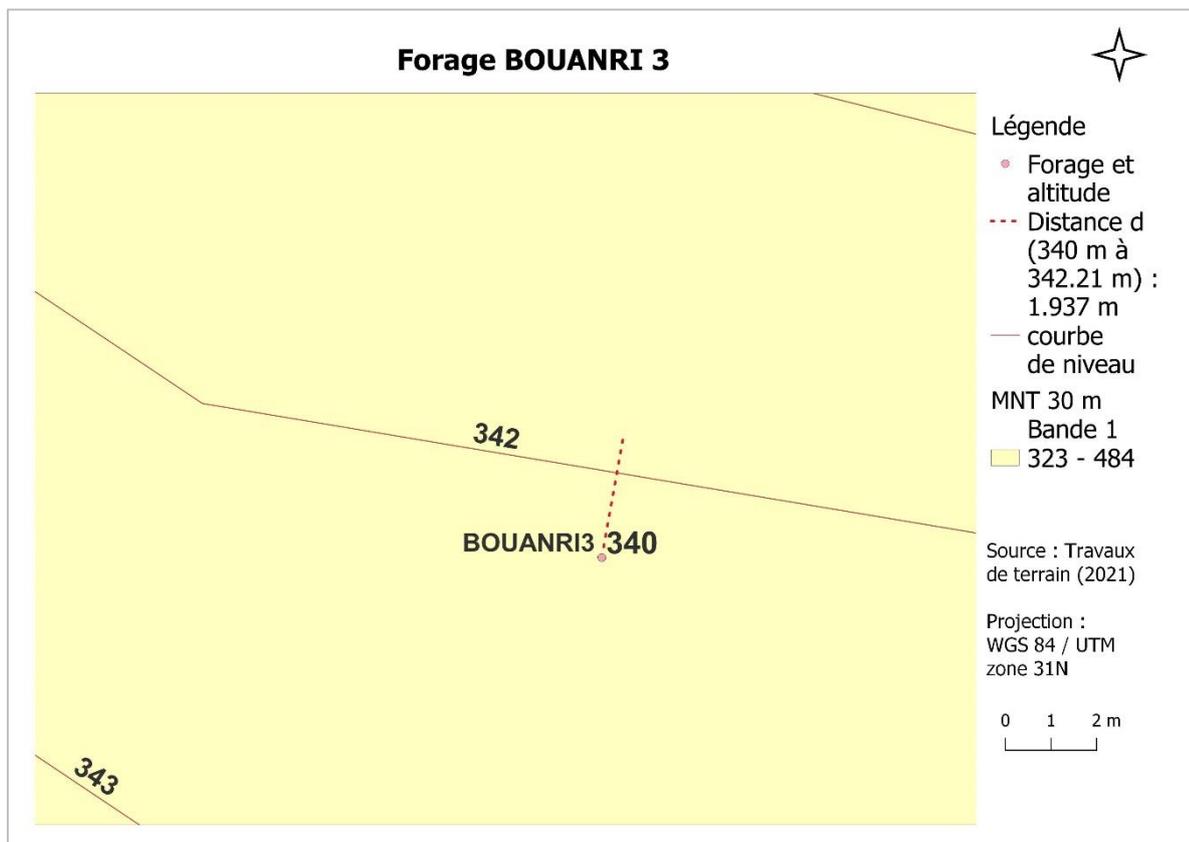


Figure 23 : Détermination de d pour le site de Bouanri3

Comme le montre la figure 23 ci-dessus, le forage Bouanri3 est situé à 1, 937 m de son aire d'alimentation, soit près de 2 m.

4.1.1.4 BEMBEREKE-OUEST

Ce site (figure 24) est situé à une longitude de 2,66360 et d'une latitude de 10,2830. Il a une altitude de 368431m en considérant la partie inférieure du relief. La charge hydraulique de la nappe est de -150 cm par rapport au niveau le plus élevé du sol tandis qu'elle est de 1,80 m par rapport au niveau le plus bas du sol.

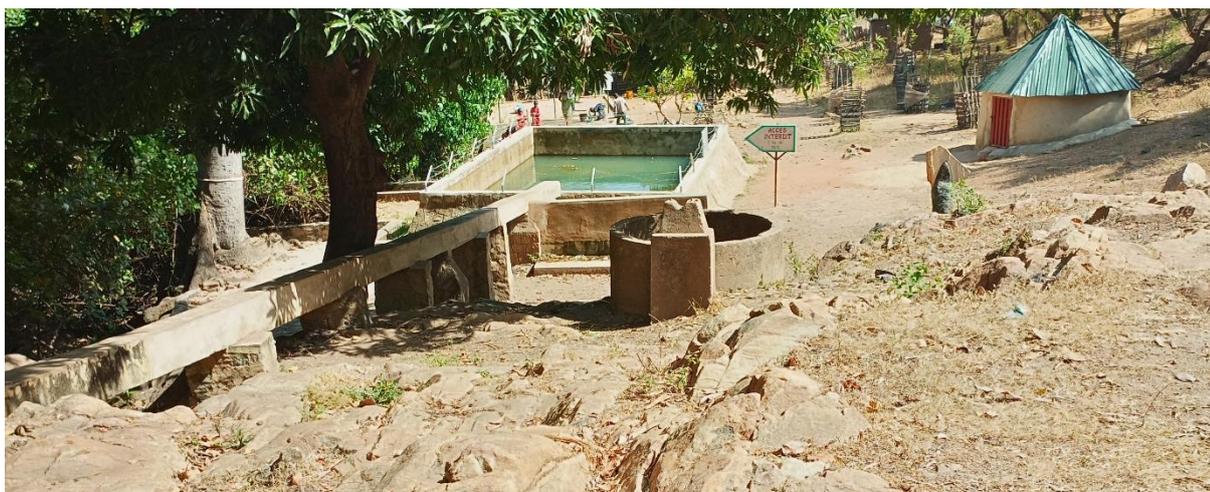


Figure 24 : Site de Bembèrèkè-Ouest

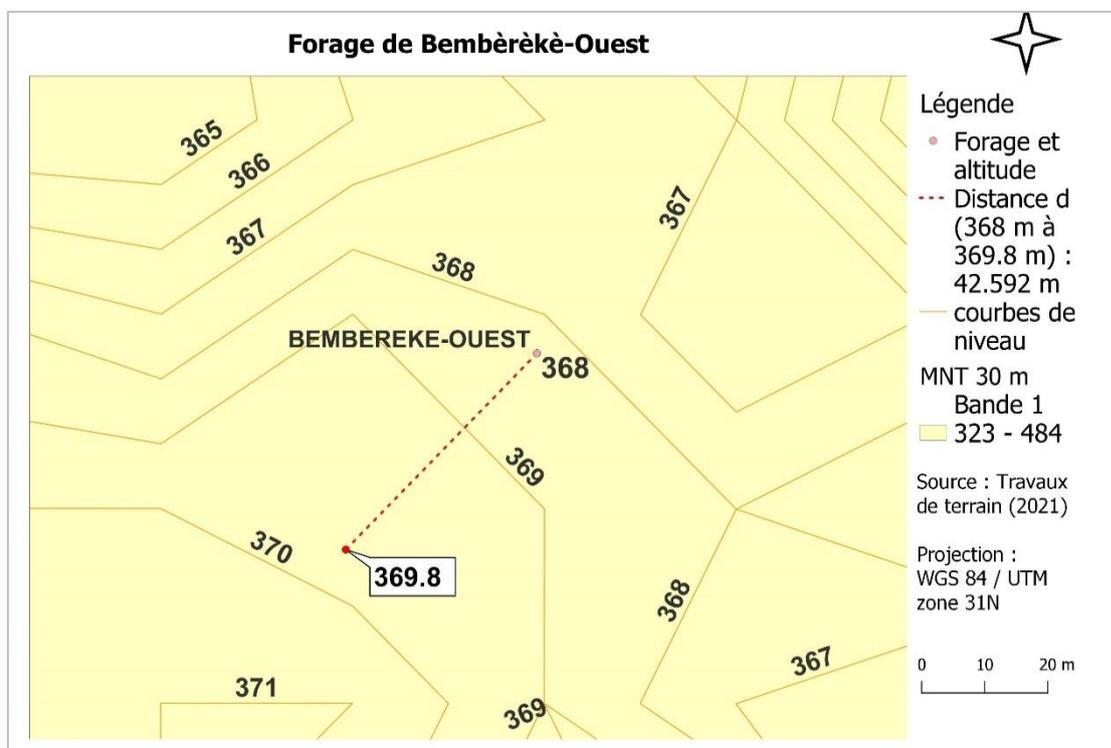


Figure 25 : Détermination de la distance d à Bembèrèkè-Ouest

De la figure 25, nous déduisons que le site de Bemrèkè Ouest est situé à 42, 592 m de son aire d'alimentation.

4.1.1.5 MASSARI

Ce dernier dont le nom local est Massari (figure 26 et 27), se trouve dans la commune de Bassila, arrondissement Aledjo et plus précisément dans la localité d'Akpakpa. À une altitude de 420 m, sa longitude et latitude sont respectivement de 1,44563 et 9,34940. La charge hydraulique est de 90cm et l'écoulement est discontinu ce qui amène la population à faire recours au pompage quelques fois.



Figure 26 et 27 : Forage Massari

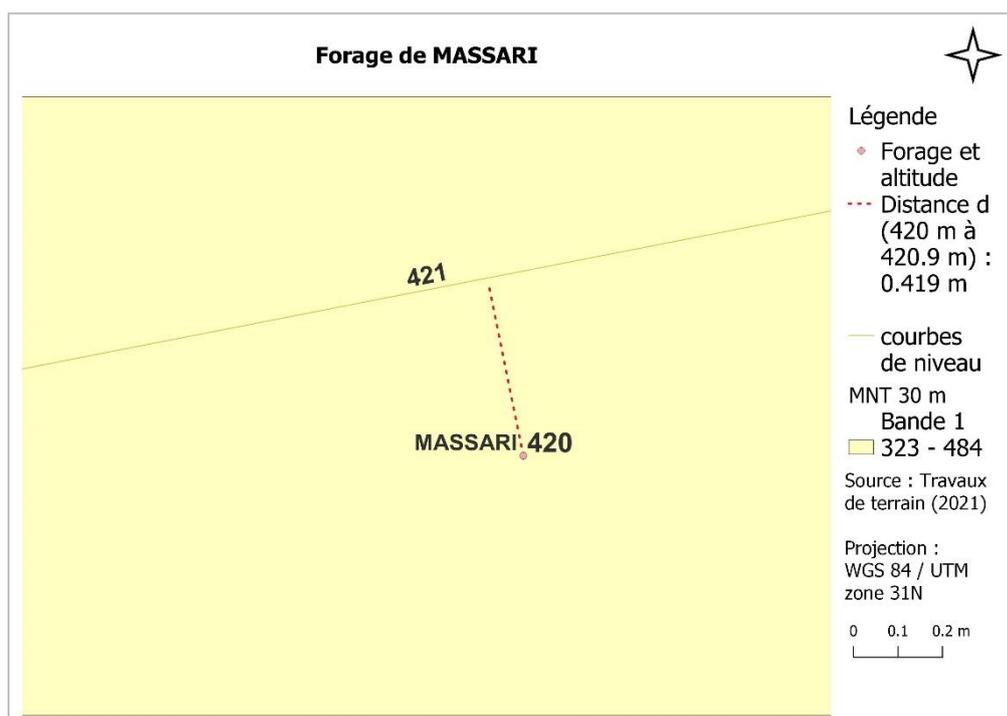


Figure 28 : Distance d pour le forage Massari

Massari est situé à 0,419 m de son aire d'alimentation.

4.1.1.6 MAKA

Le forage correspondant aux coordonnées dans cette zone est non jaillissant et n'est plus fonctionnel. À une altitude de 429 m, il a les coordonnées suivantes : 10.45914 N et 1,65778 E. Un des habitants nous a conduits vers un autre ouvrage (figure 29) qui jaillit sans interruption depuis bientôt 36 ans. Sa charge hydraulique est de 2,65m. Avec une altitude de 436m, il a une longitude de 1,65637 et une latitude de 10,45985. Le débit mesuré est de 0,86 L/s soit 3,096 m³/h.



Figure 29 : Forage jaillissant de Maka

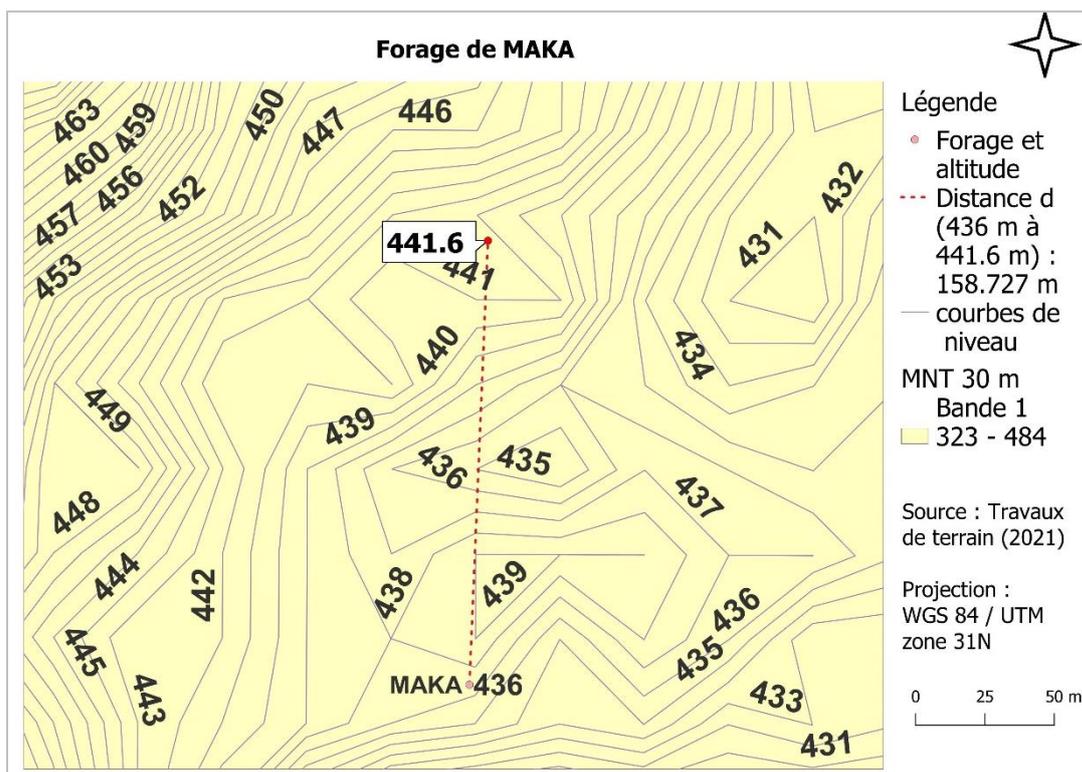


Figure 30 : Distance d séparant Maka de son aire d'alimentation

De la figure 30, il ressort que 158, 727 m représentent la distance qui sépare Maka de son aire d'alimentation.

4.1.1.7 BOUKOSSOROU

Ses coordonnées sont : 10,57344 N et 1,73336 E avec une altitude de 451 m. La charge hydraulique libre est de 70cm et de 128cm une fois que l'eau est dans la conduite. On observe des ratées au niveau de la sortie de l'eau, ce qui prouve que l'eau est à la limite de sa charge. D'autres canalisations nous renseignent sur la charge probable de l'eau en saison de pluie qui est de 2,07m. Le débit mesuré est de 1,47 L/s soit 5,31 m³/h. La figure 31 illustre le forage et la figure 32 montre la distance d=174,210 m.



Figure 31 : Forage Boukossorou

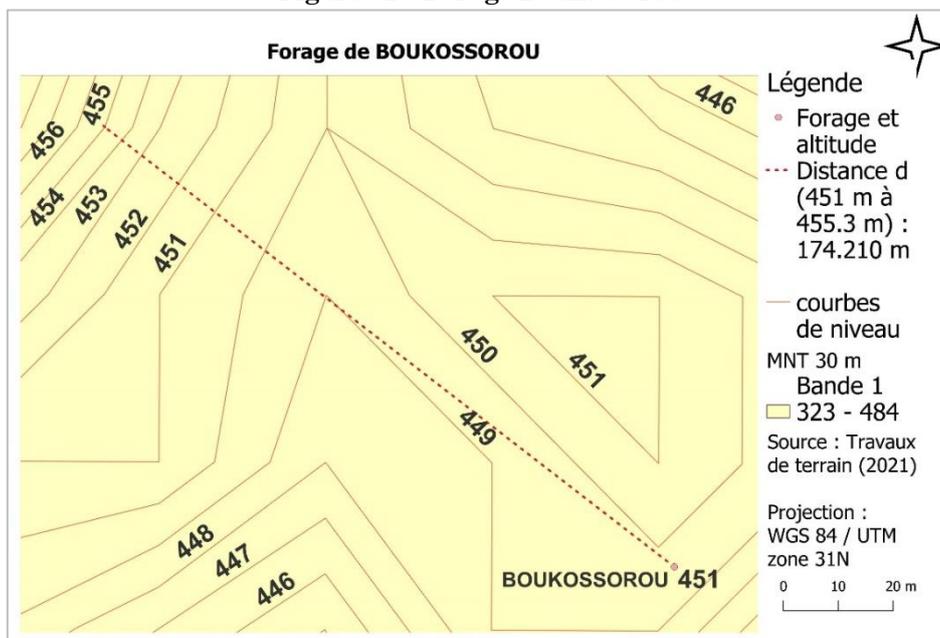


Figure 32 : Distance d du site de Boukossorou

Des images précédentes représentant la valeur minimale de « d », il ressort que l'artésianisme en zone de socle au Bénin est provoquée par une circulation de l'eau dans la zone altérée. En effet, les distances déterminées sont

relativement faibles. L'eau des forages artésiens de ce milieu n'est donc pas issue des fractures profondes de la roche.

4.1.2 Analyses avec le logiciel R

Le tableau 2 ci-dessous présente les résultats des analyses descriptives des variables étudiées. Ils révèlent des valeurs moyennes de $419893,90 \pm 26051,22$; $1112223,93 \pm 20781,76$ et $392,71 \pm 16,63$ respectivement pour la latitude, la longitude et l'altitude. Ces résultats permettent d'appliquer les conclusions obtenues à des zones de socles avec des caractéristiques similaires.

Les résultats montrent que dans notre zone d'étude, le niveau de jaillissement de l'eau varie de 0,9m à 5,6m avec une moyenne de $2,48m \pm 0,67$; pour une charge moyenne de $395,20m \pm 17,04$. Le "d" représentant la distance qui sépare l'ouvrage de la possible origine de l'eau qui l'alimente, est d'une valeur moyenne de $65,72m \pm 27,05$ dans la zone d'étude.

Tableau 2 : Tendance centrale des variables étudiées

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur (m)	Charge (m)	d
Moyenne	419893.90	1112223.93	392.71	2.48	395.20	65.72
min	329300.12	1033857.46	340.00	0.90	342.21	0.42
max	487412.69	1169096.26	451.00	5.60	455.30	174.21
Erreur standard	26051.22	20781.76	16.63	0.67	17.04	27.05

Le tableau 3 présente les coefficients de corrélation entre les variables d'étude et les résultats des tests de significativité associés sont présentés par le tableau 4.

Tableau 3 : Résultats du test de corrélation de Pearson avec la significativité

	Longitude	Altitude	Hauteur (m)	Charge (m)	d (m)
Latitude	0.04	-0.92**	-0.46	-0.92**	-0.50
Longitude		0.10	0.75 ·	0.13	0.61
Altitude			0.59	0.99***	0.75 ·
Hauteur (m)				0.62	0.88**
Charge (m)					0.77*

Tableau 4 : p-value de la corrélation de Pearson

	Longitude	Altitude	Hauteur (m)	Charge (m)	d (m)
Latitude	0.93	0.003	0.30	0.004	0.251
Longitude		0.834	0.051	0.789	0.142
Altitude			0.159	<0.001	0.051
Hauteur (m)				0.138	0.008
Charge (m)					0.043

L'analyse des résultats réalisée à titre expérimental au regard du nombre statiquement insuffisant des données, révèle que les hautes altitudes abritant les forages sont caractérisées par d'assez faibles latitudes. Ils montrent qu'il existe une corrélation significativement positive entre la hauteur de jaillissement de l'eau et la longitude du forage. Ainsi, dans la zone d'étude, lorsque la longitude d'un forage est plus élevée qu'un autre, la hauteur de jaillissement l'est aussi. La hauteur de jaillissement de l'eau du forage est alors proportionnelle à la grandeur de la longitude.

Des résultats, on retient également une corrélation significativement positive entre la charge hydraulique et l'altitude. Autrement dit, la valeur de la charge hydraulique des forages dépend fortement de l'altitude à laquelle ces forages ont été implantés. Aussi convient-il de relever que la charge hydraulique est plus importante au niveau des forages réalisés sur de basses latitudes. Autrement dit, la charge est négativement corrélée à la latitude : elles évoluent en sens inverse. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les altitudes les plus fortes sont à des latitudes plus fortes.

De ces résultats, on déduit aussi que la distance d est significativement proportionnelle à la charge hydraulique du forage. Il en résulte que le potentiel d'irrigation est plus élevé du fait de la distance d avec les forages artésiens réalisés sur de hautes altitudes en raison des résultats précédents.

La significativité de la forte corrélation entre la hauteur de jaillissement et la distance d, stipule que plus l'aire d'alimentation est éloignée, plus le potentiel h (hauteur de jaillissement) est important. La corrélation par paire est illustrée par la figure ci-après.

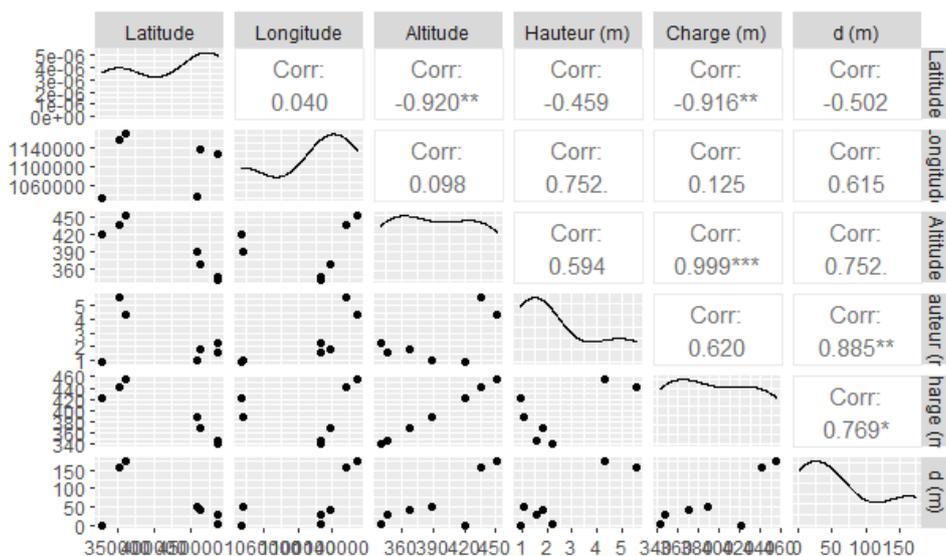


Figure 33 : Graphes des corrélations par paire

L'analyse plus approfondie des graphes nous permet d'émettre trois hypothèses. Ainsi nous admettons :

H1 : La distance « d » serait une fonction linéaire de la charge et de la latitude (la charge étant significativement et inversement corrélée à la latitude) ;

H2 : Les modèles de prédiction intégrant la charge et la latitude ou la hauteur, l'altitude et la latitude permettent d'obtenir des résultats identiques ;

H3 : La distance « d » est uniquement fonction de la charge hydraulique.

Soit donc les trois modèles suivants :

```
Call:
lm(formula = dt$d (m) ~ dt$Charge (m) + dt$Latitude)

Residuals:
    1     2     3     4     5     6     7
38.900  1.768 22.428  9.582 -2.116 -44.705 -25.857

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.679e+03  5.110e+02  -3.287  0.0303 *
dt$Charge (m)  3.038e+00  7.788e-01   3.900  0.0175 *
dt$Latitude   1.297e-03  5.093e-04   2.547  0.0635 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 34.58 on 4 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8443,    Adjusted R-squared:  0.7665
F-statistic: 10.85 on 2 and 4 DF,  p-value: 0.02424
```

Figure 34 : Modèle 1 : d fonction de la charge et la latitude

```
Call:
lm(formula = dt$d (m) ~ dt$Hauteur (m) + dt$Altitude + dt$Latitude)

Residuals:
    1     2     3     4     5     6     7
-1.6031  3.8128 18.0357 -13.4163  1.7540 -8.1249 -0.4582

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.195e+03  2.327e+02  -5.134  0.0143 *
dt$Hauteur (m)  2.216e+01  4.160e+00   5.327  0.0129 *
dt$Altitude    2.056e+00  3.814e-01   5.391  0.0125 *
dt$Latitude    9.481e-04  2.203e-04   4.304  0.0231 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14.04 on 3 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9807,    Adjusted R-squared:  0.9615
F-statistic: 50.92 on 3 and 3 DF,  p-value: 0.004511
```

Figure 35 : Modèle 2 : d fonction de la hauteur, l'altitude et la latitude

```

Call:
lm(formula = dt$d (m) ~ dt$Charge (m))

Residuals:
    1     2     3     4     5     6     7
36.3335 35.0844 23.0962  0.9308  7.8895 -6.6413 -96.6931

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -416.9427   180.2747  -2.313  0.0687 .
dt$Charge (m)    1.2213    0.4536   2.692  0.0432 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 50.08 on 5 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5918,    Adjusted R-squared:  0.5101
F-statistic: 7.248 on 1 and 5 DF,  p-value: 0.04318

```

Figure 36 : Modèle 3 : d fonction de la charge

- **Modèle 1**

La distance « d » peut être simulée à partir de la charge et de la latitude. L'équation résultante est la suivante :

$$d_{M1} (m) = 3,038 * Charge (m) + 1,297 * 10^{-3} * Latitude (UTM) - 1679$$

- **Modèle 2**

La distance « d » peut être simulée à partir de la hauteur ; de l'altitude et de la latitude. L'équation résultante est la suivante :

$$d_{M2} (m) = 22,16 * Hauteur (m) + 2,056 * Altitude(UTM) + 9,481 * 10^{-4} * Latitude (UTM) - 1195$$

- **Modèle 3**

La distance « d » peut être simulée uniquement à partir de la charge. L'équation résultante est la suivante :

$$d_{M3} (m) = -416,9427 + 1,2213 * Charge(m)$$

Les tests invalident chacun des trois modèles avec des différences par rapport à la distance « d » réelle (tableau ci-dessous).

Tableau 5 : Tableau analytique des différences entre la distance « d » et les distances modélisées

d (m)	d M1	Dif M1	d M2	Dif M2	d M3	Dif M3
158,73	120,35	38,38	160,14	-1,41	122,38	36,34
174,21	172,97	1,24	170,21	4	139,12	35,09
30,61	8,64	21,97	12,35	18,26	7,51	23,1

1,94	-7,19	9,13	15,13	-13,19	1	0,94
42,59	45,18	-2,58	40,62	1,97	34,69	7,9
51,54	96,72	-45,18	59,45	-7,91	58,17	-6,63
0,42	26,8	-26,38	0,67	-0,25	97,1	-96,68

L'effectif presque insuffisant des forages artésiens dans le cas de cette étude, ne nous permet pas d'appliquer des tests de modélisation exponentielle, de quoi ajuster la valeur de « d » aux paramètres disponibles. (Voir figure ci-dessous).

```
Error in nls(`d (m)` ~ 1/(1 + exp((xmid - log(`charge (m)`))/scal)), data = dt, :
le pas 0.000488281 est devenu inférieur à 'minFactor' de 0.000976562
```

Figure 37 : Erreur lors des tests de modélisation

Les valeurs trop élevées du R^2 ajusté ($> 75\%$) cachent des problèmes d'endogénéité d'où la forte probabilité des résultats erronés au niveau des deux premiers modèles. Les hypothèses H1 et H2 sont donc rejetées.

La vérification de l'hypothèse H3 nous fait remarquer un R^2 ajusté ($< 75\%$), les résultats des simulations du Modèle 3 pourraient être moins erronés que les précédents. Il convient de retenir que seule la charge ne permet pas de déterminer **d**. La distance « d » serait aussi fonction de bien de paramètres non pris en compte par cette étude.

4.2 Discussions

Au regard des distances **d** relativement faibles, on peut se permettre d'imaginer que la circulation de l'eau souterraine en zone de socle se ferait préférentiellement dans l'altération et non dans les fractures profondes. Une circulation dans les fractures devrait révéler des distances **d** plurikilométriques, ce qui n'est pas le cas des sites étudiés. Cette remarque est importante pour l'hydrogéologue confirmant ainsi que l'eau souterraine en zone de socle, circulerait préférentiellement dans les altérations plutôt que dans les fractures.

Ces forages pourraient donc être utilisés à des fins d'approvisionnement en eau potable des populations habitant les régions où ils sont implantés. Vu que les aires d'alimentation des différents forages se situent pratiquement à proximité de ceux-ci, l'eau qui jaillit n'a donc pas parcouru d'énormes distances. On pourrait s'en servir pour des activités d'irrigation à petite échelle, surtout les ouvrages de MAKKA et BOUKOSSOROU qui connaissent des débits d'écoulement importants et sans interruption.

CONCLUSION

La demande alimentaire ne cesse de croître au fil des années. Avec l'essor démographique et le changement climatique, il est nécessaire de prendre des mesures pour assurer les quatre dimensions de la sécurité alimentaire que sont : la disponibilité, l'accès, la stabilité et l'utilisation. Ceci passe nécessairement par la disponibilité des ressources en eau pour la boisson, mais aussi pour l'irrigation.

En zone de socle, l'approvisionnement en eau potable demeure tributaire de la géologie du milieu. Pourtant, cette source d'eau est plébiscitée en raison de la protection dont elle jouit, car elle se situe dans les profondeurs et donc filtrée par les différentes couches qui lui servent de toit. Pour utiliser de manière profitable et durable les eaux souterraines en région de socle, plusieurs études doivent être menées.

Cette étude a pour but de déterminer si l'artésianisme en zone de socle est dû à la circulation de l'eau dans les altérites meubles ou dans les fractures de la roche. Les résultats de la présente étude sur 7 forages en zone de socle montrent que l'altération est principalement responsable de l'artésianisme en zone de socle du Bénin. Aussi, a-t-on découvert qu'il y a un potentiel pour assurer un approvisionnement en eau potable pour les populations autochtones. Toutefois, le faible effectif des ouvrages étudiés ne nous permet pas d'approfondir les recherches pour déterminer d'autres paramètres pouvant entrer en compte dans cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agbossou, K. E., Sintondji, L.O. Ahamidé, B., et Zokpodo, B. (2010) *Manuel des techniques endogènes d'irrigation au Bénin*. 41 pages.
- Adam, P. P., & Baptiste, P. (2003). *HYDROGEOLOGIE & FORAGE D'EAU*.
- AIQ. (2004). *Cahier d'examen*. 1–103.
- Akokponhoué, Y. N., Yalo, N., Akokponhoué, H. B., Youan Ta, M., & Agbahoungba, G. (2019). Apport De La Télédétection Et De La Géophysique Dans La Cartographie Des Fractures Hydrauliquement Actives En Zone De Socle Au Centre-Ouest Du Bénin. *European Scientific Journal ESJ*, 15(27). <https://doi.org/10.19044/ESJ.2019.V15N27P426>
- Alle, I. C. (2019). *Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique* [Thèse de Doctorat]. Université d'Abomey-Calavi (UAC).
- ARDEPI. (2012). Besoins en en eau. *Comment Évaluer Les Besoins En Irrigation d'une Culture Maraîchère*, 1–4.
- Assemian, E. A., Kouame, F. K., Saley, M. B., Affian, K., Youan Ta, M., Jourda, J. P. R., & Biemi, J. (2014). Study of hard rock aquifer productivity and a statistical approach for the determination of potential productive depths: Case of the Bongouanou region, eastern Ivory Coast. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 27(1), 81–97. <https://doi.org/10.7202/1021984ar>
- Bakalowicz, M. (2017). Le karst, ressource en eau renouvelable dans les roches calcaires. *Encyclopédie de l'Environnement*.
- BLE-CIVAM, & Bouchy, J.-F. (2011). *La conduite de l'irrigation en maraîchage bio*. 1–20.
- Bogdanoff, S. (n.d.). SOCLE, géologie structurale. In *Encyclopædia Universalis [en ligne]*, consulté le 21 Juin 2022. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/socle-geologie-structurale/2/5>
- Boukari, M., & Alassane, A. (2007). Hydrogéologie de la république du Bénin (Afrique de l'ouest) *Africa Geoscience Review*. Vol N3P303-328.

- Boukari, M., Totin, H., Upton, K., Dochartaigh Ó, B., & Bellwood-Howard, I. (2018). *Atlas de l'eau souterraine en Afrique: Hydrogéologie du Bénin*. http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogéologie_du_Bénin
- BRL. (2010). Irrigation des espaces verts. *MÉMENTO TECHNIQUE*.
- Brouwer, C. (1990). Méthodes d'irrigation. *GESTION DES EAUX EN IRRIGATION, Manuel de Formation*, 5, 74.
- CEDEAO. (2015). *L'agriculture et l'alimentation en Afrique de l'Ouest. Mutations, performances et politiques agricoles*.
- Ceseau. (2021). *Eau souterraine et géologie*. <https://www.ceseau.org/dossiers-thematiques/eau-souterraine-et-geologie/>
- Clément, R., Galand, A., & Meylan, J. (1978). Systèmes d'irrigation. *Systèmes d'irrigation*, 1–48.
- Conseil scientifique de l'environnement de Bretagne (CSEB). (2005). Processus hydrologiques dans les bassins versants. *Recueils de Fiches Techniques et Scientifiques Pour La Compréhension Des Bassins Versants et Le Suivi de La Qualité de l'eau*.
- FAO. (2008). *Sécurité alimentaire : L'information pour l'action*. 1–4.
- FAO. (2011). *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde*.
- FAO. (2015). *Des perspectives plus favorables que jamais*. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2013.12.119>
- FAO - AQUASTAT. (2005). *Profil de Pays – Benin*. <https://www.fao.org/3/I9863FR/i9863fr.pdf>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2017). Building Resilience for Peace and Food Security. In *The State of Food Security and Nutrition in the World*. <https://doi.org/10.1080/15226514.2012.751351>
- FMI. (2011). *Bénin : Document de stratégie pour la réduction de la pauvreté. Rapport du FMI n° 11/307, Septembre 2011*. <https://bit.ly/3e4kmI7>
- Frenken, K., & Gillet, V. (2012). *Besoins et prélèvements d'eau pour l'irrigation par pays. partie 3*, 34–36.
- GAB/FRAB. (2016). L'irrigation en maraîchage diversifié. *Fruits et Légumes*, 1–4.

- Giordano, M., de Fraiture, C., Weight, E. et, & van der Bliet, J. (2012). *L ' eau , source de richesse et de sécurité alimentaire. Soutenir les investissements axés sur les petits agriculteurs dans la gestion de l'eau agricole. Rapport de synthèse du projet AgWater Solutions.* (2012th ed.).
- Guillemain, L., & Winckel, A. (2013). Le cycle de l'eau. *SIGES Bretagne*. <https://sigesbre.brgm.fr/Le-cycle-de-l-eau.html>
- Houssou, A. A., Ahamidé, B., Agbossou, k. euloge, & Sintondji, L. O. (2013). Impact de l'irrigation goutte à goutte sur les données phénologiques et le rendement du bananier plantain (*Musa paradisiaca*) planté sur un sol ferrallitique au Sud-Bénin. *Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin (BRAB) - Numéro 74 – Décembre 2013*, 229, 27–35.
- JICA. (2014). Étude du schéma-directeur pour l'irrigation et l'agriculture durable dans la zone sud du Djibouti. *MANUEL TECHNIQUE POUR LA CREATION DE FERMES IRRIGUEES*.
- Koumassi, D. H. (2017). *Facteurs Explicatifs Du Tarissement Des Points D'eau En Milieu De Socle Cristallin Dans Le Departement Des Collines Au Bénin*. 13(20), 206–218. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n20p206>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2015). Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques The conceptual model of hard rock aquifers and its practical applications. *Vingtièmes Journées Techniques Du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale Des Hydrogéologues*. « *Aquifères de Socle : Le Point Sur Les Concepts et Les Applications Opérationnelles* » La Roche-Sur-Yon, Juin 2015.
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x>
- Laere, P. Van. (2003). *Mémento de l ' irrigation*.
- Lasm, T. (2000). *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques ; application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)*.
- LTHE-Grenoble. (2015). *Les eaux souterraines au Bénin : quelle réserve et quelle capacité à amortir les changements ?* LTHE - Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement - Grenoble. <https://bit.ly/35L45nS>
- Margat, J. (1972). *TERMINOLOGIE HYDROGÉOLOGIQUE. Propositions pour un dictionnaire*.

- MUDRY, J. (2021). *HYDROGÉOLOGIE, L'eau et les roches*. Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrogeologie/2-1-eau-et-les-roches/>
- N'GO, Y., Droh Lanciné, G., Issiaka, S., & MM, G. (2004). *Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique*.
- ONU. (2013). *ONU : la population mondiale en 2050*. 1–7.
- PNUD. (2015). *Rapport national sur le développement humain 2015. AGRICULTURE, SECURITE ALIMENTAIRE et développement humain au Bénin*.
- Renard, F. (2014). *Cours d'hydrogéologie*.
- Réserves Naturelles de France. (2016). *Dico des mots de la géologie-RNF 2*.
- SIGES Occitanie. (2021). *L'eau souterraine : de l'eau contenue dans les roches*. 1–4. <https://sigesocc.brgm.fr/spip.php?article367>
- Sné, M. (2007). *L'IRRIGATION AU GOUTTE-A-GOUTTE*.
- Sud&Bio. (2016). *Maîtriser son irrigation en maraîchage biologique*. 1–12.
- The USGS Water Science School. (2019). *Le cycle de l'eau - The water cycle, French. Science Topics*. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/le-cycle-de-leau-water-cycle-french?>
- Tollefson, L., & Harrington, J. (2005). Efficacité de l'utilisation de l'eau : irrigation. In A. Lefebvre, W. Eilers, & B. Chunn (Eds.), *L'agriculture écologiquement durable au Canada. Série sur les indicateurs agroenvironnementaux. Rapport n°2. Agriculture et agroalimentaire au Canada, Ottawa (Ontario)*. (pp. 87–88).
- UNICEF Bénin. (2017). *Analyse de la Situation des Enfants au Bénin*.
- Vouillamoz, J. M., Tossa, A. Y. A., Chatenoux, B., & Kpegli, K. A. R. (2015). Propriétés des aquifères de socle du Bénin : analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle. « *Aquifères de Socle : Le Point Sur Les Concepts et Les Applications Opérationnelles* » *La Roche-Sur-Yon, Juin 2015*, 8(2013), 2–7.
- Yetongnon, J. E. G. (2020). Contraintes d'approvisionnement en eau potable dans le département des Collines au Bénin. *International Journal Water Sciences and Environment Technologies V, 2(2)*, 68–77. www.jjiste.org

Zoungana, D. (2003). *Cours d'approvisionnement en eau potable*.

ANNEXE

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des données liées aux forages de l'étude

	1	2	3	4	5	6	7
Depart_	ATACORA	ATACORA	BORGOU			BORGOU	DONGA
Commune	KOUANDE	KOUANDE	BEMBEREKE			Parakou	BASSILA
Arrondis_	FO-TANCE	GUILMARO	BEMBEREKE			Parakou 3	ALEDJO
Localité	ZONGO	SINAKPA GOUROU	BEMBEREKE-OUEST			AMAQUI GNON	Akpakpa
Nom Local	MAKA	BOUKOS- SOROU	BOUANRI2	BOUANRI3	BEMBEREKE- OUEST	AMAQUI GNON- EST	MASSARI
X_UTM	352943.265	361421.643	487133.44	487412.69	463164.22	457881.93	329300.12
Y_UTM	1156568.92	1169096.26	1126655.3	1126500.4	1136721.5	1036167.6	1033857.5
Alti_UTM	436	451	346	340	368	388	420
Niveau (m)	5.6	4.3	1.54	2.21	1.8	1.02	0.9
Charge (m)	441.6	455.3	347.54	342.21	369.8	389.02	420.9

Les désignations de la première colonne de gauche sont respectivement de haut en bas : Département, Commune, Arrondissement, Localité, Nom Local, Coordonnées X et Y en UTM, altitude en UTM, Niveau en et Charge en mètre.

Tableau 7 : Quelques photos de sources présentes dans la base de données



Tableau 8 : Quelques photos de la collecte de données

