



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE :

0371/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 04 15 00 12 54

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**Elaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique
des aquifères de fissure du département de
Yamoussoukro
(Centre de la Côte-d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

N'GORAN Yao Patrick Eloi

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. MANGOUA Oi Mangoua, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. ADJIRI Oi Adjiri, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le : 02 Mars 2021



**UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE**

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE :

0371/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 04 15 00 12 54

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME:

**Elaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique
des aquifères de fissure du département de
Yamoussoukro
(Centre de la Côte-d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

N'GORAN Yao Patrick Eloi

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Encadreur : M. MANGOUA Oi Mangoua, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. ADJIRI Oi Adjiri, Maître de Conférences,

Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement

le : 02 Mars 2021

DEDICACE

À mon père **N'GORAN Kouassi**. L'homme de la famille suis reconnaissant d'avoir porté ton nom et d'avoir bénéficié de ta bénédiction et de ta prière, reçois père toute ma gratitude que Dieu te garde en vie longtemps.

À ma mère **N'GUESSAN N'guessan Eugénie et sa sœur jumelle N'GUESSAN Adjoua Florentine !** Sachez que vos efforts et souffrances pour moi n'ont pas été vains ! Que Dieu, lui-même, se souvienne de tout cela et vous maintienne le plus longtemps en vie afin que vous bénéficiés du fruit de vos efforts. Votre sens élevé de l'amour, du respect, de l'honneur, de la dignité et surtout du travail bien fait à fait de moi un homme respectable et respectueux.

REMERCIEMENTS

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

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

Nous exprimons notre gratitude au Professeur Titulaire **Prof. KOUASSI Kouakou Lazare** directeur de l'UFR environnement à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa. Merci professeur pour la confiance ! Nous vous réitérons nos sincères remerciements pour nous avoir inculqué l'amour du travail et surtout du travail bien fait.

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

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

Nous remercions aussi **professeur KOUADIO Zilé Alex** (Maître de Conférences) pour son aide et son encouragement.

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

REMERCIEMENTS

Kouassi Jean Michel ; M. OUEDE Gla Blaise ; M. Konan Yao Emile Desmond qui ont contribué à la réalisation de ce document. Leurs disponibilités et encouragements ont apporté une contribution active à la réalisation de cette étude. Soyez-en infiniment remerciés.

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

A **Monsieur ADJORO Serge Arnaud ; KANGA Kouassi Constantin Gauthier** et **LEKPAI Doudou Eddy**, trois de mes meilleurs amis qui, depuis ce parcours universitaire ont toujours répondu présents même dans les moments les plus difficiles. Merci pour tout le service rendu ! Que DIEU vous bénisse en vous donnant une meilleure porte de sortie.

Nous ne saurions terminer sans toutefois dire un très grand merci à ceux qui de façon discrète nous ont aidés pour la réalisation de ce mémoire.

TABLES DES MATIERES

Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE :	4
GENERALITES	4
1.1. Localisation géographique de la zone d'étude	6
1.2. Caractérisation physique du département de Yamoussoukro	7
1.2.1. Régime Climatique.....	7
1.2.2. Relief.....	7
1.2.3. Végétation	7
1.2.4. Réseau hydrographique.....	8
1.2.5. Type de sol	8
1.2.6. Contexte géologique	9
1.2.7. Contexte hydrogéologique.....	10
1.3. Aspect socio-économique	11
1.3.1. Population	11
1.3.2. Activités économiques.....	11
1.4. Besoin, ressource et approvisionnement, fourniture en eau potable dans le département de Yamoussoukro	11
1.4.1. Besoins en eau.....	12
1.4.2. Ressource et approvisionnement en eau	12
1.4.3. Fourniture en eau.....	13
1.5. Modèle conceptuel hydrogéologique	13
1.5.1. Profils d'altération	13
1.5.2. Coupe géologique de la zone d'étude et répartition végétale	15
1.5.3. Types d'aquifère.....	16
1.4.2. Agriculture.....	17
DEUXIEME PARTIE :	18
MATERIEL ET METHODES.....	18
2.1. Matériel.....	19
2.1.1. Données	19
2.1.1.1. Les données hydrogéologiques.....	19
2.1.1.2. Les données cartographiques.....	19

TABLES DES MATIERES

2.1.2. Matériel de terrain	19
2.1.2. Outils	19
2.2. METHODES	20
2.2.1. Elaboration le modèle de profil d'altération du système aquifère	20
2.2.2. Caractérisation le système aquifère du département de Yamoussoukro.	20
2-2-2-1 Détermination des propriétés hydrodynamiques.....	20
2-2-2-1-1 Transmissivité	20
2.2.2.1.2. Perméabilité des aquifères.....	21
2.2.2.2. Etudier la productivité du système aquifère	21
2.2.2.2.1. Analyse statistique des paramètres de forages	21
2.2.2.3. Modèle conceptuel hydrogéologique du département de Yamoussoukro	25
2.2.2.3.1. Méthodologie de réalisation d'un modèle hydrogéologique.....	25
2.2.3.3. Géométrie du modèle	26
TROISIEME PARTIE :	27
RESULTATS ET DISCUSSIONS	27
3.1. RESULTATS	28
3.1.1. Modèle de profil d'altération du système aquifère du département de Yamoussoukro.....	28
3.1.1.1. Epaisseurs des couches d'altérite	28
3.1.1.2. Epaisseurs des couches fissurées.....	28
3.1.1.3. Profil d'altération.....	29
3.1.1.4. Analyse des couches de l'aquifères du département de Yamoussoukro	31
3.1.2. Caractériser le système aquifère du département de Yamoussoukro	31
3.1.2.1. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du département de Yamoussoukro.....	31
3.1.2.2. Analyse statistique	32
3.1.2.4. Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques avec SOM.....	38
3.1.2.5. Modèle conceptuel hydrogéologique	41
3.1.2.5.1. Modèle conceptuel de l'aquifère	41
3.2. DISCUSSION.....	43
CONCLUSION.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44

Liste des sigles et abréviations

AEP	:	Adduction en Eau Potable
ETR	:	Evapotranspiration Réelle
GPS	:	Global Positioning System
HVA	:	Hydraulique Villageoise Améliorée
INPHB	:	Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny
LSTE	:	Laboratoire Sciences et Technologies de l'Environnement
NRMS	:	Normalised <i>Root Mean Square</i>
ONEP	:	Office National de l'Eau Potable
RMS	:	<i>Root Mean Square</i>
SIG	:	Système d'Information Géographique
SODECI	:	Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire
SODEXAM	:	Société de Développement d'Exploitation et d'Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
UFR	:	Unité de Formation de Recherche
UJLoG	:	Université Jean Lorougnon Guédé
C.I.E.H	:	Comité Inter-africain d'étude Hydraulique
SOM	:	Self – Organizing Maps

Liste des tableaux

Tableau I :Tableau des variations des couches d'altérites des forages :	28
Tableau II : Tableau des épaisseurs de la couche fissurée des localités :	28
Tableau III : Tableau des valeurs de transmissivités du département de Yamoussoukro :	32
Tableau IV : Tableau des valeurs de perméabilités des localités du département de Yamoussoukro :.....	32
Tableau VI : Erreurs de quantification(QE) et de topographie(ET) des différentes tailles de la carte de Kohonen (la matrice retenue en gras).	38

Liste des figures

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.....	6
Figure 2 : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1974-2019)	7
Figure 3 : Réseau hydrographique du département de Yamoussoukro	8
Figure 4 : Carte géologique du département de Yamoussoukro	10
Figure 5 : Schéma simplifié des aquifères sur socle cristallin (Lachassagne et al., 2011).....	11
Figure 6 : Profil d'altération sur schiste et granite (Soro, 2009).	15
Figure 7 : Représentation schématique de la répartition des diverses formations géologiques et végétales en milieu de socle (Leblond, 1984).	16
Figure 8 : Quelques cultures pratiquées dans le département de Yamoussoukro a- champ de banane, b- champ de cacao et c- champ de riz.	17
Figure 9 : Matériels de terrains (a) GPS de poche, (b) infiltromètre double anneaux, (c) appareil photo	19
Figure 10 : Schéma simplifié de la carte auto-organisatrice de Kohonen (Aguilar, 2004)	22
Figure 11 : Hiérarchisation d'une classification non supervisée (Rousseau et al., 2007)	24
Figure 12 : Organigramme des étapes de réalisation de l'analyse multivariée des paramètres hydrodynamiques.	24
Figure 13 : Organigramme des étapes de réalisation du modèle conceptuel hydrogéologique	25
Figure 14 : Distribution des forages dans la direction Nord-Sud dans le département de Yamoussoukro.....	29
Figure 15 : le modèle de profil d'altération de 4 forages du département de Yamoussoukro, a- Amonkro, b- Bézro, c- Dougba, d – Kpèbo	30
Figure 16 : Lithologie de l'aquifère de socle : Bloc diagramme du département de Yamoussoukro.....	31
Figure 17 : Distribution des profondeurs totales des forages en fonction des épaisseurs des altérites	33
Figure 18 : Histogramme des fréquences d'observation de la première venue d'eau.....	34
Figure 19 : Distribution des arrivées d'eau (AE) en fonction des profondeurs : a-Fréquence des AE (%), b- Densité des AE (x10 ⁻²).	35
Figure 20 : Evolution des débits en fonction des profondeurs totales des forages.	36
Figure 21 : Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altérites.	37
Figure 22 : relation entre transmissivité et débit d'exploitation	37

Figure 23: Carte de Kohonen issue de la matrice 6 x 3(18 cellules).....	38
Figure 24: Dendrogramme de classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen sur la base des paramètres hydrodynamiques	39
Figure 25 : Distribution des forages sur la carte de Kohonen à partir des paramètres hydrodynamiques.	39
Figure 26 : Gradient de valeur de chaque paramètre hydrodynamique sur la carte de Kohonen (d= échelle indiquant les valeurs transformées des paramètres par le logarithme; couleur foncée= valeurs fortes pour le paramètre considéré ; couleur pâle= valeur faible).	40
Figure 27: vision en 3D du modèle conceptuel de couches du département de Yamoussoukro	42

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau est un élément naturel indispensable à l'apparition de la vie sur Terre et à son maintien. Dans le monde, un milliard de personnes n'a pas accès à l'eau potable et deux milliards et demi n'ont aucun moyen d'assainir leurs eaux usées (Rodhain J, 2008). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2004) estimait à 42%, le pourcentage de la population en Afrique subsaharienne n'ayant pas accès à une eau de bonne qualité. La consommation d'une eau de mauvaise qualité est à l'origine de nombreuses maladies. La faiblesse du taux d'accès à l'eau potable par les populations peut donc se présenter comme un problème de santé publique. Cette situation inquiétante va emmener les populations à se tourner vers les eaux souterraines qui sont moins influencées par les activités anthropiques. Ces eaux souterraines constituent le deuxième réservoir mondial d'eau douce après celui des glaciers et des calottes polaires. C'est pourquoi, l'Etat ivoirien a instauré depuis les années 70 un programme d'AEP à partir des réservoirs fissurés souterrains qui sont moins influencés par les fluctuations saisonnières et les activités anthropiques (Niamké *et al.*, 2008 et N'go *et al.*, 2010) et dont les caractéristiques sont proches des normes de l'OMS. Malheureusement, l'accès à cette ressource n'a pas été encore maîtrisé dans certaines parties des formations géologiques où les aquifères présentent une certaine complexité. En effet, les aquifères du socle qui sont constitués de roches cristalline et cristallophyllienne sont généralement des réserves isolées. Selon Biémi (1992), Lasm (2000), Jourda (2005) et Youan (2008), ces aquifères peuvent constituer des réserves d'eau souterraine qui présentent souvent l'avantage d'être à l'abri des fluctuations saisonnières et des éventuelles pollutions accidentelles. De plus, N'Go *et al.* (2005) ; Mangoua *et al.* (2010) ; Sombo *et al.* (2017) ont montré que ces aquifères peuvent produire de bons débits à des fins d'approvisionnement en eau potable. Malgré ces efforts, plusieurs localités rencontrent des problèmes de disponibilité de l'eau en milieu du socle Dans la région du Bélier. Le département de Yamoussoukro situé en milieu de socle n'est pas à l'abri de ce problème. Sous la pression de la croissance démographique, la production agroalimentaire et l'amélioration des conditions de vie, les eaux exploitables pour l'AEP tarissent parfois. En outre 65 % des forages réalisés à Yamoussoukro a été déclaré négatif (Soro *et al.*, 2010). En effet, les pompes hydrauliques sont délaissées au profit des châteaux d'eau nouvellement installé par la SODECI, cette mauvaise gérance va entraine le bouchement de plusieurs ouvrages et le tarissement des forages. Pourtant ces châteaux n'arrivent pas à couvrir les besoins de la population par manque d'eau parfois allant jusqu'à une semaine. Le retour des populations au peut de forage en fonction est souvent source de conflit entre ceux-ci et cela est dû au débit insuffisant de ces rares forages, au manque d'entretien et parfois l'accès difficiles de ces forages constituent un problème majeur d'accessibilité en eau. Delors l'implantation de nouveau forage

INTRODUCTION

s'avère nécessaire pour le département de Yamoussoukro. C'est pourquoi une meilleure connaissance de l'aquifère de fissure pourrait aider à l'implantation de nouveau forage et à la réhabilitation des forages abandonnés afin de garantir une quantité d'eau suffisante à la population. C'est dans cette optique notre étude a été initié. Il convient donc d'avoir une meilleure connaissance de l'aquifère de fissure en milieu de socle.

Dès lors, caractériser les formations géologiques du système aquifère du département de Yamoussoukro s'avère donc primordiale dans cette région qui aspire exploiter les ressources en eaux souterraines pour l'amélioration de l'approvisionnement en eau potable de la population du département de Yamoussoukro. C'est dans ce contexte que cette étude est menée en vue d'améliorer les connaissances du système aquifère du département. Ainsi, deux objectifs spécifiques ont été définis ; il s'agit de :

- Elaborer un modèle de profil d'altération du système du département de Yamoussoukro ;
- Caractériser le système aquifère du département de Yamoussoukro.

Ce mémoire s'articule autour de trois parties :

- La première partie est consacré aux généralités portant sur la zone d'étude ;
- La seconde partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de l'étude;
- La troisième partie présente les résultats obtenus et la discussion qui en découle ;

Une conclusion et des perspectives terminent ce mémoire.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

GENERALITES

1.1. Localisation géographique de la zone d'étude

Le département de Yamoussoukro est situé au Centre de la Côte d'Ivoire, à environ 245 Km d'Abidjan, entre les longitudes 6°55' et 5°03' ouest et les latitudes 5°32' et 7°4' nord (Figure 1), et couvre une superficie de 1268 Km². Le département de Yamoussoukro compte deux sous-préfectures dont la sous-préfecture de Yamoussoukro et celle de Kossou (INS, 2014). Il est limité au Nord par le département de Tiébissou, au Sud par les départements d'Oumé et de Toumodi, à l'Est par le département de d'Attiegouakro, et à l'Ouest par les départements de Sinfra et de Bouaflé. La commune de Yamoussoukro, chef-lieu de département et siège du District de Yamoussoukro est la capitale politique et administrative de la République de Côte d'Ivoire.

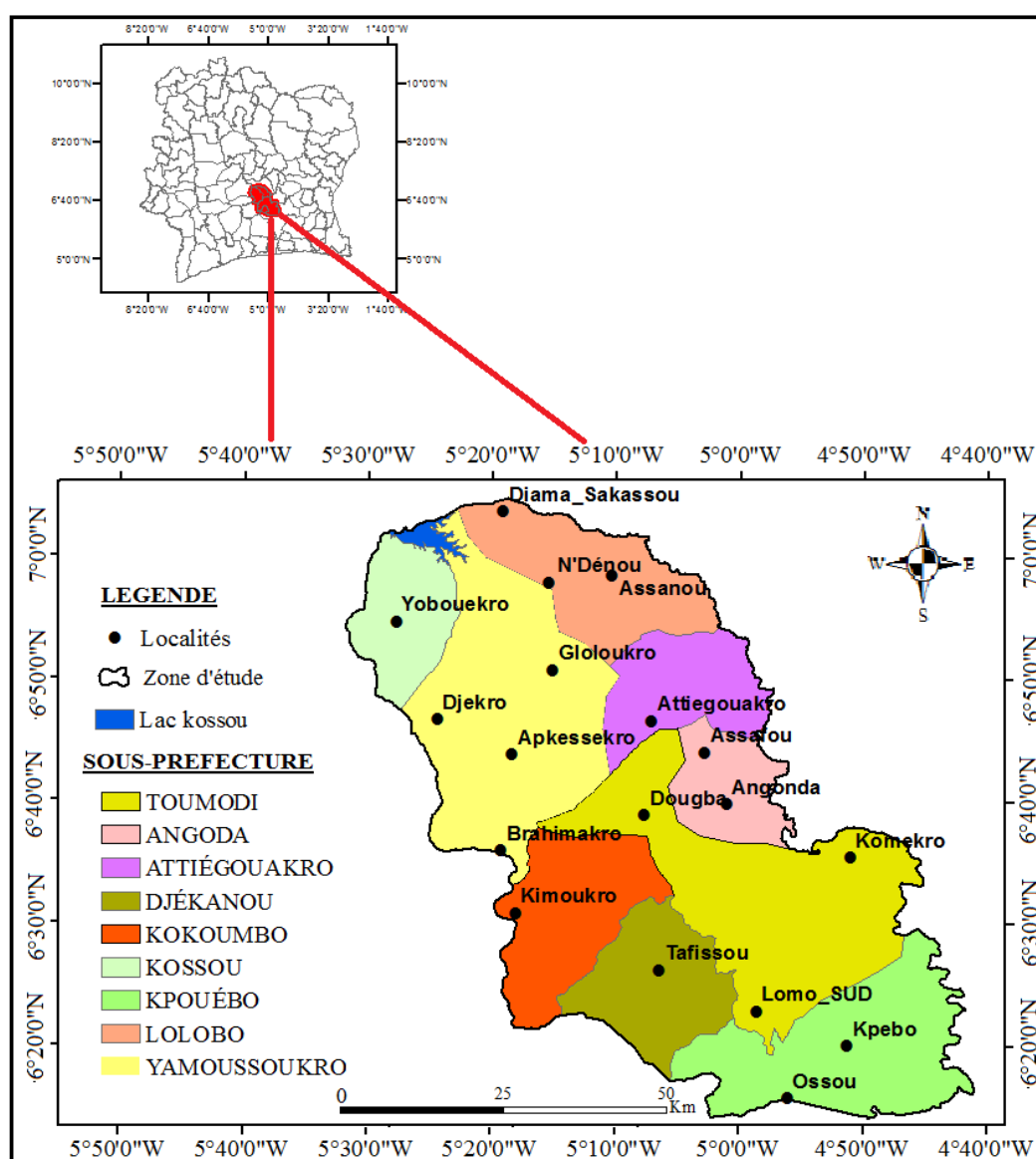


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude.

GENERALITES

1.2. Caractérisation physique du département de Yamoussoukro

1.2.1. Régime Climatique

Le département de Yamoussoukro est sous l'influence du climat équatorial de transition atténué ou climat Baouléen caractérisé par de deux saisons :

- une saison pluvieuse qui débute au mois de mars et prend fin au mois d'octobre ;
- une saison sèche qui s'étend du mois de novembre à février. La température moyenne de la région est d'environ 26 °C, et celle la plus élevée avoisine 28°C et s'observent aux mois de février et mars (Figure 2). La saison sèche est caractérisée par la présence en décembre et janvier de l'harmattan, un vent sec et puissant venu du Sahara qui abaisse considérablement l'humidité. Les précipitations annuelles varient entre 900 mm à 1600 mm de pluie par an, avec une répartition spatiale très variable dans l'année. (PRICI, 2016).

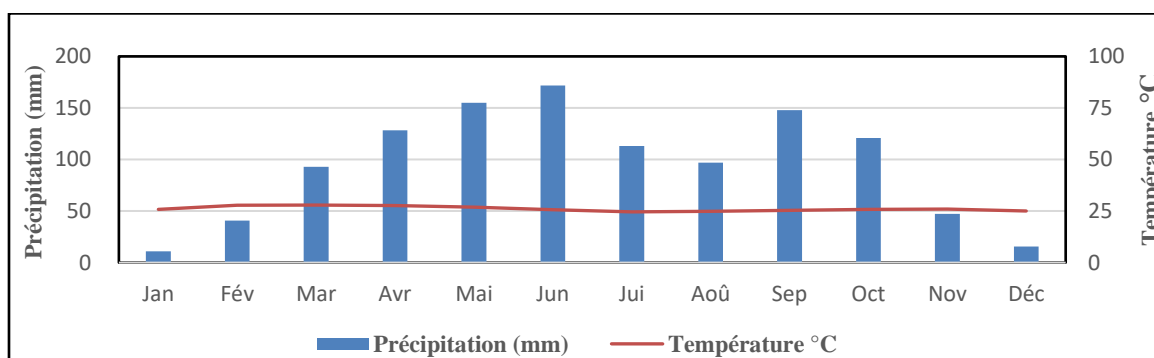


Figure 2 : Diagramme ombrothermique du département de Yamoussoukro (1974-2019)

1.2.2. Relief

Le relief du département de Yamoussoukro est dans l'ensemble, un type de relief de plaines et de plateaux. On peut distinguer plusieurs niveaux de plateaux étagés, entre 200 et 500 mètres, séparés les uns des autres par un talus de faible hauteur (10 à 30 mètres) (PRICI, 2016). Quelques collines et chaînes de montagnes de 300 à 500 m d'altitude y sont également rencontrées (Leblond, 1984).

1.2.3. Végétation

Deux grands types de paysages végétaux se partagent le territoire ivoirien ; un paysage forestier (situé dans la partie Sud de la Côte d'Ivoire) et un paysage de savane (situé dans la partie Nord de la Côte d'Ivoire). La végétation du département de Yamoussoukro appartient au domaine Guinéen et est dominée par la savane pré-forestière (zone de transition entre la forêt du Sud et la savane du Nord) parsemée plus ou moins densément des petits arbres et entrecoupées de bosquets et îlots forestiers. Des galeries forestières occupent les bas-fonds le long des cours

GENERALITES

d'eaux. Sur les sols sableux drainés, apparaissent des peuplements de rôniers et de palmier dans des prairies de hautes herbes (PRICI, 2016 ; Stary, 1985)

1.2.4. Réseau hydrographique

Le département de Yamoussoukro bénéficie d'un réseau hydrographique essentiellement composé de la Marahoué et du Kan. La Marahoué constitue le principal affluent de la rive droite du Bandama, alors que le Kan est un affluent du N'zi, qui représente l'affluent de rive gauche le plus important du Bandama. Le Bandama est le seul fleuve à prendre sa source en Côte d'Ivoire. Le département de Yamoussoukro compte une trentaine de Lacs artificiels et naturels dont le Lac Kossou, sur lequel a été construit le barrage hydroélectrique de Kossou. Sur les affluents du Kan et de la Marahoué, on trouve de nombreux barrages hydro-agricoles et quelques cours d'eau permanents (PRICI, 2016).

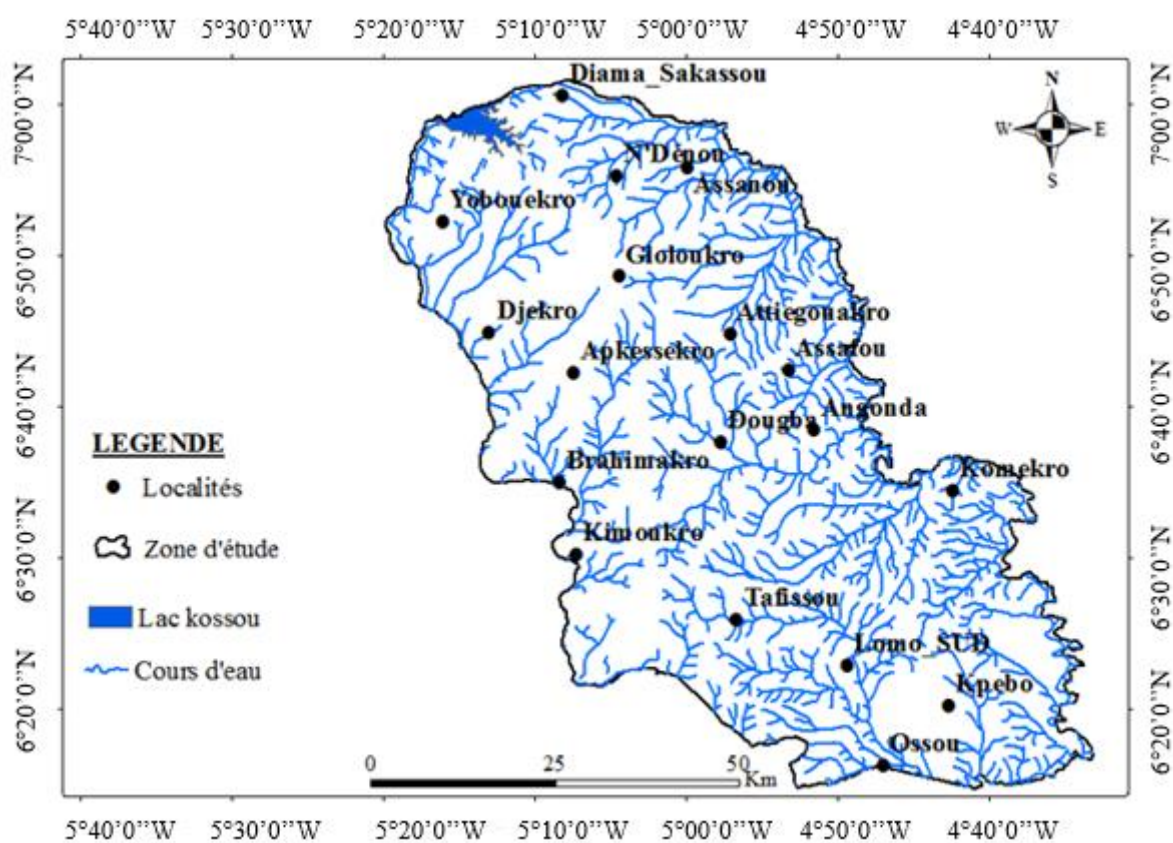


Figure 3 : Réseau hydrographique du département de Yamoussoukro

1.2.5. Type de sol

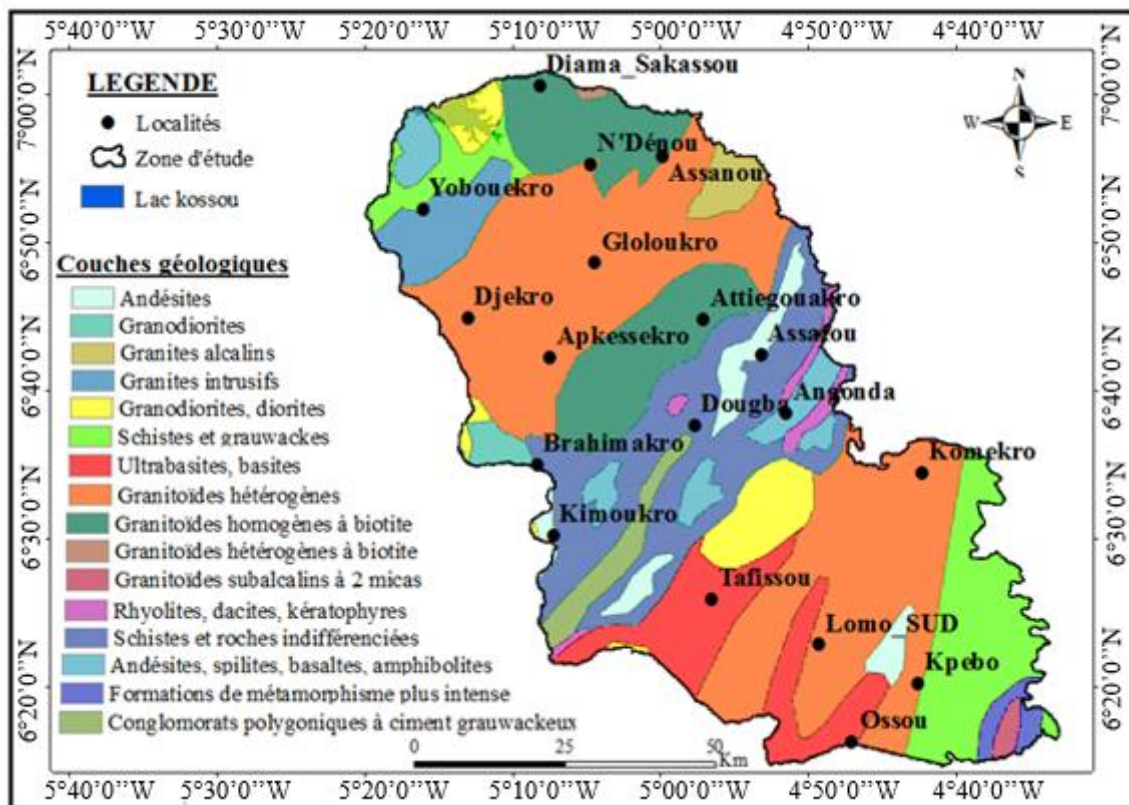
Les sols du département de Yamoussoukro appartiennent aux grandes classes des sols ferrallitiques et des sols brunifiés (ferrisols) au niveau des plateaux et reliefs, et aux classes des sols peu évolués des sols hydromorphes dans les plaines et les bas-fonds (CPCS, 1967 ; Leblond, 1984 ; PRICI, 2016). Ces sols sont très sensibles à l'érosion, mais présentent de

GENERALITES

bonnes caractéristiques chimiques et sont propices aux cultures vivrières (igname, maïs, riz, etc.), aux cultures arbustives et aux cultures industrielles (PCR, 2019).

1.2.6. Contexte géologique

La Côte d'Ivoire est située au cœur de la dorsale de Man et est constituée de deux grands ensembles géologiques : le socle précambrien (97,5% du territoire) et le domaine sédimentaire (2,5% du territoire). Le département de Yamoussoukro appartient à la pénéplaine granito gneissique du socle précambrien. Les principales formations géologiques sont constituées de roches magmatiques et des roches métamorphiques (figure 3). Les roches magmatiques occupent 88,7% du département. Ces roches appartiennent au complexe éburnéen et comprennent les granitoïdes éburnéens. Ce sont des granites à biotite, des granites à deux micas, des migmatites, des granodiorites concordants, des pegmatites, des diorites, des gneiss. Avec près de 11,3%, les formations métamorphiques présentes sur le département sont représentées par les schistes (vert et ardoisier), les grès, les conglomérats, les amphibolites, les basaltes, les tufs (formés par l'accumulation de petits fragments de calcaire), les brèches (roches détritiques appartenant à la famille des Conglomérats) et les roches vertes du birimien (Figure 3). Ces deux principales formations géologiques conduisent à la formation d'un contexte hydrogéologique caractérisé par deux types d'aquifères sur le département de Yamoussoukro ; un aquifère d'altérites et un aquifère fissuré ou fracturé.

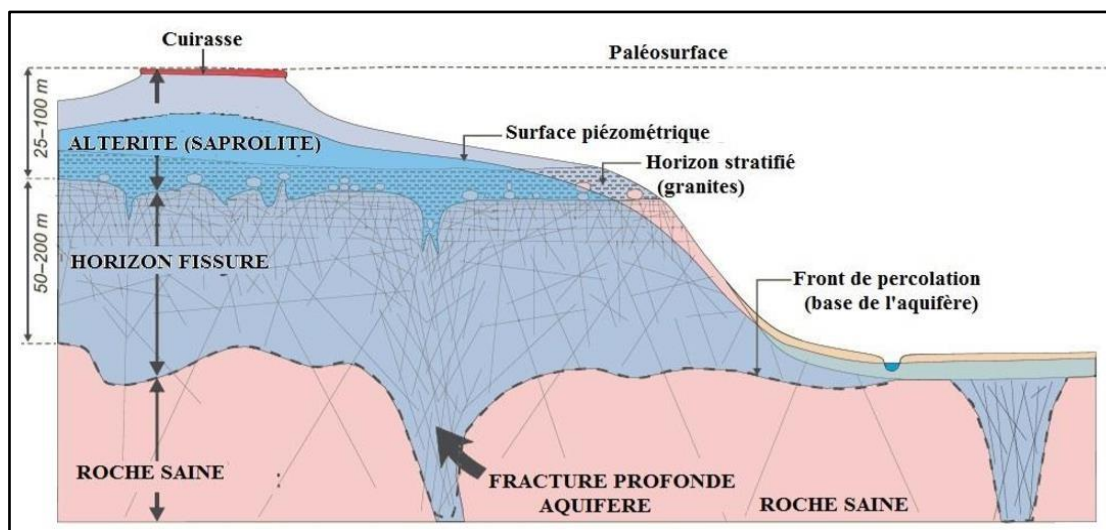


GENERALITES

Figure 4 : Carte géologique du département de Yamoussoukro

1.2.7. Contexte hydrogéologique

Le département de Yamoussoukro comporte un aquifère composite, qui est constitué d'altérite et d'une partie fissurée ou fracturé. Les altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Ce sont des formations de surface résultant des processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie et est généralement capté par les paysans à l'aide d'ouvrages appelés puits paysans ou puisards. Son niveau piézométrique baisse significativement en saison sèche et remonte en saison des pluies (Biémi, 1992). Les réserves d'eau dans ces réservoirs sont tributaires de la perméabilité et de l'épaisseur de ces altérites. Les aquifères de fissures qui sont sous-jacents aux aquifères d'altérites constituent des réservoirs beaucoup plus importants. Ces aquifères naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre (Sawadogo, 1984). Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2003) dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. La productivité de ces aquifères de fissures est influencée par le faciès lithologique, la présence ou non d'altérites, la conductivité hydraulique des fractures recoupées par les ouvrages (M'bonu, 1991). Par rapport aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution. Pour ces raisons, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités à partir des forages pour l'alimentation en eau des populations. L'hydrogéologie des milieux fissurés a connu ces dernières années un grand essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériels de prospection. Le modèle conceptuel d'aquifère de socle généralement admis est présenté à la figure ci-dessous (Figure 4).



GENERALITES

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

1.3. Aspect socio-économique

1.3.1. Population

Cosmopolite, le département de Yamoussoukro compte une population de 310 056 habitants en 2014 (INS, 2014), soit une densité de 244,5 habitants au kilomètre carré. Aux populations autochtones Akouè et Nanafouè, il faut adjoindre une population allogène, et étrangère estimée à plus de 17% de la population du district de Yamoussoukro. Ces populations étrangères sont constituées en majorité de la communauté Burkinabé, Malienne, Béninoise, Nigérienne, Guinéenne, Sénégalaise, Nigériane, Ghanéenne, Togolaise et Mauritanienne. Le département de Yamoussoukro dispose d'une population jeune, avec plus 56,46% de jeune de moins de vingt ans (PRICI, 2016). A l'image de la Côte d'Ivoire, la commune de Yamoussoukro connaît un fort taux de croissance démographique annuel de 2,26% de 1998 à 2014, et un taux d'urbanisation actuel de l'ordre de 66,9% (INS, 2014).

1.3.2. Activités économiques

L'activité économique du département de Yamoussoukro est basée sur les secteurs primaires, secondaires et tertiaires. Le secteur primaire regroupe les activités de l'agriculture (Café, Cacao, palmier à huile, riz, ignames, manioc, maïs, soja, arachide, banane plantain, chou, tomate, salade), de l'élevage (porcin, caprin, bovin, ovin, poulet, pisciculture), et des forêts (la production de charbon de bois, la récolte de bois de chauffe). L'agriculture est la principale activité économique du département. L'exploitation minière dans la région est essentiellement artisanale. Au niveau du secteur secondaire, il existe des unités industrielles au nombre desquelles on peut citer l'usine d'engrenage de coton à Zatta, l'entreprise industrielle de bois et le centre de stockage de produits pétroliers. Yamoussoukro, à l'instar des villes ivoiriennes, a une grande partie de son économie locale qui se situe dans l'économie informelle avec de nombreux petits métiers. Sur le plan touristique, le département de Yamoussoukro dispose de nombreux attrait touristique, il s'agit notamment du lac aux caïmans, du barrage de Kossou, de la Basilique Notre Dame de la Paix, de l'Institut Nationale Félix Houphouët Boigny, de la Fondation Félix Houphouët Boigny pour la recherche de la paix. (PRICI, 2019).

1.4. Besoin, ressource et approvisionnement, fourniture en eau potable dans le département de Yamoussoukro

GENERALITES

1.4.1. Besoins en eau

Le taux de satisfaction des besoins en hydraulique villageoise du département de Yamoussoukro était moins de 50 % au dernier inventaire de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH) en 1999 (Anonyme a, 2001, Anonyme b, 2001).

Au niveau local, les besoins en eau sont énormes dans cette région malgré les nombreux ouvrages hydrauliques présents. Les besoins en eau en milieu rural sont chiffrés à 20 L/habitant/jour par la DHH. Toutefois, les besoins les plus importants en eau restent entièrement domestiques et varient en fonction des saisons (saisons sèches et saisons pluvieuses) et du milieu naturel. Selon un rapport interne de la Direction Territoriale de l'hydraulique (DTH) de Yamoussoukro en 2002, il faut 83 nouveaux points d'eau pour le département de Tiébissou dont le taux de couverture des besoins en eau est estimé à environ 66 %. Au moins 203 nouveaux forages sont nécessaires pour le département de Yamoussoukro dont le taux de couverture des besoins est estimé à 56%.

Cet état de fait est en partie la conséquence directe de la mauvaise implantation des ouvrages. En effet, la majorité des forages tombés en désuétude ont été réalisés par le service « Forages de la Présidence » basé à Kossou. Ce service qui a réalisé la quasi-totalité des ouvrages de Yamoussoukro et de Tiébissou n'a fait aucune étude préalable et ne donne aucune fiche technique des ouvrages. La conséquence directe est le tarissement des ouvrages en saison sèche et aussi la mauvaise qualité de l'eau provoquant ainsi l'abandon des points d'eau par les populations. Il convient d'ajouter à tous ces problèmes les pannes techniques des pompes.

1.4.2. Ressource et approvisionnement en eau

L'approvisionnement en eau potable des populations du département de Yamoussoukro est assuré à la fois par les eaux de surface et souterraines.

La capacité de production de l'usine de traitement d'eau potable Valéry Giscard d'Estaing 2 (VGE2) de Yamoussoukro passe de 20 000 à 40 000 m³ par jour, a annoncé, vendredi, à Yamoussoukro, le ministre ivoirien des infrastructures économiques, (PRICI, 2016). Les zones rurales sont desservies par les eaux souterraines. Ces eaux souterraines sont captées à partir de puits modernes ou de forages munis d'une pompe à motricité humaine ou par des puits traditionnels faits par les puisatiers où les moyens d'exhaure sont des puisettes portées souvent sur simples poulies. Ces différents ouvrages sont creusés soit dans les altérites pour ce qui est des puits ou forés dans la roche fissurée pour les forages. Ces aquifères captés fournissent des débits dont la moyenne ne dépassant pas les 3,2 m³.h⁻¹ (Leblond, 1984). Ces débits ne servent donc qu'à la consommation quotidienne des populations rurales dans le cadre des systèmes

GENERALITES

d'hydraulique villageoise (HV) ou de celui de l'hydraulique villageoise améliorée (HVA) destiné aux localités ayant une population comprise entre 1000 et 4000 habitants.

1.4.3. Fourniture en eau

Dans le cadre du Projet de renaissance des infrastructures de Côte d'Ivoire (Prici), les infrastructures de production en eau potable à Yamoussoukro ont été réhabilitées et renforcées. Cela, à travers le renouvellement des installations existant depuis 1972, et l'extension du réseau de production et distribution. Ainsi, la capacité de production de la station Valéry Giscard D'Estaing passe désormais de 20 000 m³/jour à 40 000 m³/jour, pour un besoin estimé à 27 500 m³/jour. Ces travaux, a indiqué le ministre des Infrastructures économiques, Patrick Achi, profiteront à plus de 3000 ménages de la ville et permettront de desservir de manière sécurisée, les localités situées sur les axes Yamoussoukro-Sinfra et Yamoussoukro-Tiébissou. D'un coût total de 9,2 milliards de Fcfa co-financé par la Banque mondiale, les travaux qui ont démarré en 2014, ont duré 20 mois. C'est donc à juste titre que le Premier ministre Daniel Kablan Duncan s'est félicité, alors qu'il procédait à l'inauguration de ces installations, le 11 mars dernier. « Chose promise, chose due. 20 mois après, les travaux sont achevés pour le grand bonheur des populations du district de Yamoussoukro. Nous avons affaire à une station vétuste construite en 1972. En moins de deux ans, la capacité de traitement de cette station a été quasiment quintuplée. Au regard de ces importants résultats et de leur impact certain sur le développement économique et social du district de Yamoussoukro et de la région du Bélier, je ne peux que me féliciter de l'excellence des relations qui lient la Côte d'Ivoire au groupe de la Banque mondiale », a déclaré le Premier ministre. C'est le lieu de rappeler que dans le cadre de ce même projet, 3,9 milliards de Fcfa ont été consacrés à l'extension du réseau électrique et à l'amélioration de l'éclairage public dans 11 quartiers de la capitale politique et administrative.

1.5. Modèle conceptuel hydrogéologique

1.5.1. Profils d'altération

Les formations issues de ce processus en région granitique et schisteuse sont constituées essentiellement de sables, d'argiles et d'arènes dont les superpositions, sont décrites selon les coupes interprétatives établies par la Direction Territoriale de l'Hydraulique de Yamoussoukro (figure 6) (Kouassi, 2004). Le profil d'altération sur les formations granitiques sous climat tropical humide se présente de façon classique comme suit de haut en bas :

GENERALITES

- sol actuel : couche peu épaisse, humifère sous couvert forestier, plus lessivé et latéritique en zone de savane arbustive ;
- carapace ou cuirasse latéritique de couleur brune, riche en oxyde de fer et d'aluminium pouvant évoluer vers une bauxite ou s'enrichir en oxyde de manganèse ;
- argile latéritique épaisse de quelques mètres renfermant des grains de quartz résiduels. C'est une zone de forte activité biologique ;
- arène granitique : fortement kaolinisée au sommet. Elle devient grenue lorsqu'on se rapproche de la roche saine. Les minéraux sont de mieux en mieux conservés (quartz, feldspaths, micas) mais présentent un aspect de surface altéré ;
- roche-mère : l'altération commence à atteindre les minéraux les plus sensibles qui présentent un aspect terne mais conservent une cohésion importante.

Le profil d'altération sur schiste présente également une terre arable et des niveaux argileux, mais les sables et les arènes grenues y sont absentes. Les schistes sont des roches métamorphiques de faible intensité. Le profil-type présente comme suit :

- sable argileux (terre arable) ;
- argile latéritique ;
- argile ocre ;
- argile violacée ;
- argile brune ;
- argile verte ;
- argile jaune ;
- schiste altéré (front d'altération actif) ;
- schiste sain, redressé à la verticale.

L'épaisseur des profils d'altération liés aux granitoïdes est relativement faible : environ 20 m en Afrique de l'Ouest et 50-60 m dans certaines régions de la Côte d'Ivoire. Le maximum d'épaisseur du profil d'altération est enregistré sur les schistes avec une moyenne de 50 m pour l'Afrique de l'Ouest et 80 m pour la Côte d'Ivoire où elle atteint 100 m dans la boucle de cacao (Biémi, 1992). A l'heure actuelle, les profils d'altération constituent de grands réservoirs d'eau souterraine: ce sont les nappes des altérites exploitées par les nombreux puits à gros diamètres. Au-dessous de celles-ci, existent les nappes de fractures ou de fissures dans les granites et qui sont captées par les forages profonds de petit diamètre. Dans la région de Yamoussoukro, l'épaisseur moyenne des altérites est de l'ordre de 25 m, avec les valeurs extrêmes de 0 m et 60 m (Leblond, 1984). Pour cette étude, seule le profil lié au granitoïde sera utilisé car les fiches techniques nous donne les informations sur celui-ci.

GENERALITES

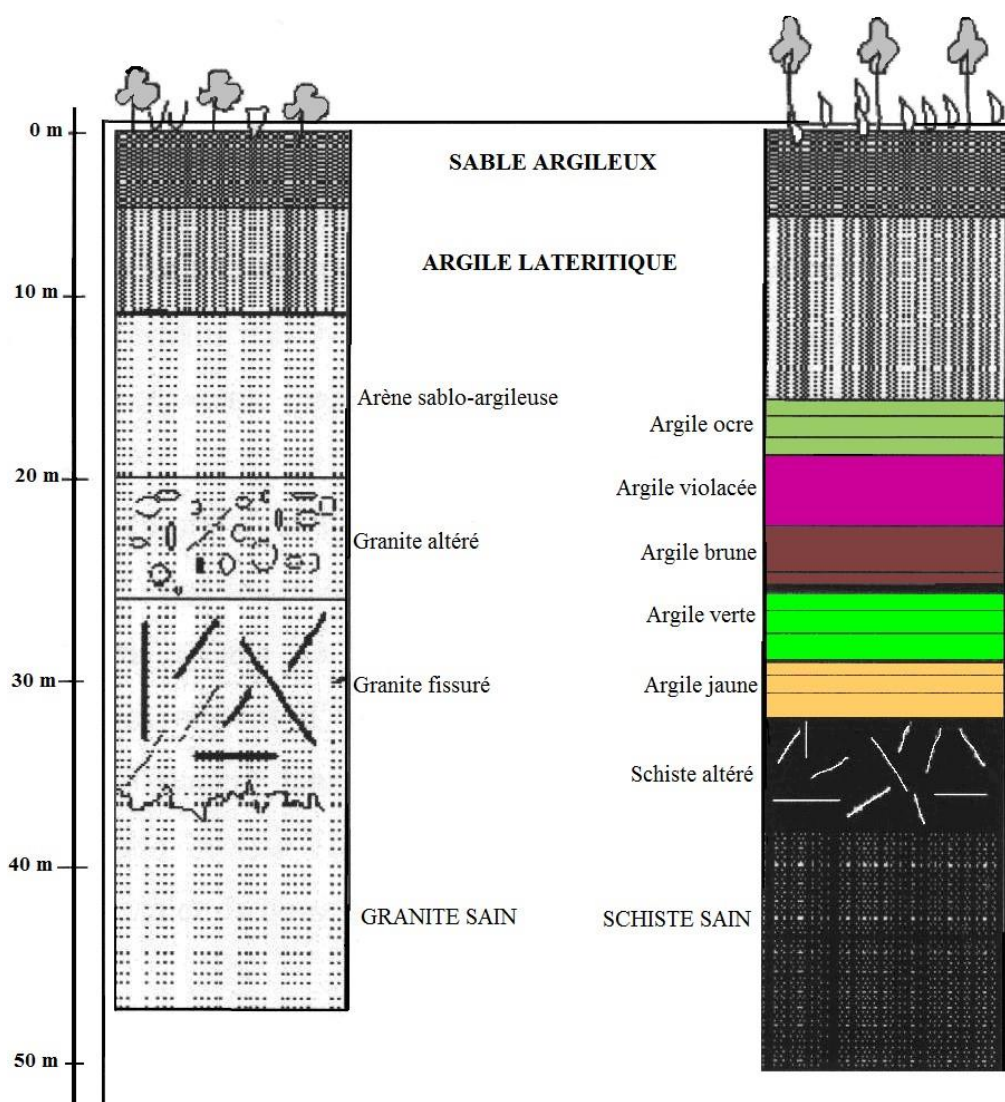


Figure 6 : Profil d'altération sur schiste et granite (Soro, 2009).

1.5.2. Coupe géologique de la zone d'étude et répartition végétale

Les sondages réalisés dans la zone d'étude ont permis de réaliser une coupe géologique dans le secteur d'étude (figure 6) (Leblond, 1984). Sur cette coupe géologique, on constate que :

- le profil complet d'altération existe essentiellement sur les zones topographiquement élevées. Le sol est alors propice à l'implantation d'un couvert forestier ;
- dans les zones de forêt dégradée ou de savane, le sol est enlevé et laisse apparaître la cuirasse ou des éléments de dimension moyenne (graviers latéritiques) ;
- les arènes grenues ou le socle légèrement altéré peuvent être mis à jour en n'importe quel point, du fait de l'existence de zones plus résistantes dans les granitoïdes. Le sol formé est de type sableux propice au développement de savane herbacée, colonisé par les palmiers et rôniers ;

GENERALITES

- dans les bas-fonds, le socle cristallin est très peu profond. Les sols sont de type hydromorphes et propices à l'implantation de forêts-galerie ou d'une savane herbeuse.

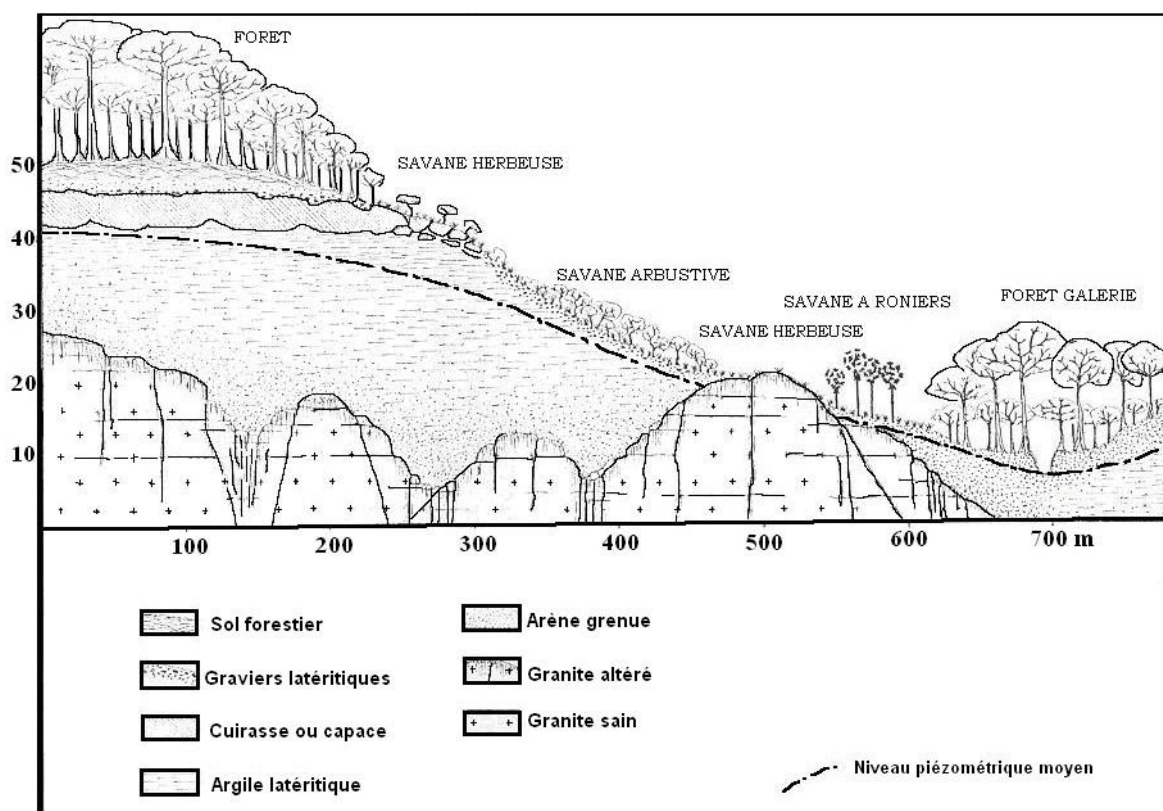


Figure 7 : Représentation schématique de la répartition des diverses formations géologiques et végétales en milieu de socle (Leblond, 1984).

1.5.3. Types d'aquifère

- Aquifères d'altérites

Doté d'un pouvoir capacitatif important mais, à faible perméabilité alimenté par la surface et surmontant un aquifère de fissures ou de fractures (Detay et *al.*, 1989). Il a une épaisseur moyenne de 10 à 20m dans les granito-gneiss et de 15 à 40m dans les schistes. La tranche de cet aquifère varie en fonction des saisons, des zones climatiques, de la lithologie et de la topographie. Ces réservoirs sont généralement captés par les puits paysans appelés encore puisards. Généralement, ces puisards ne résistent pas en saison sèche parce que le niveau piézométrique est sous l'influence saisonnière (Biémi, 1992). Selon Engalenc (1978), la plupart des études réalisées en Afrique de l'Ouest, il y a quelques années portaient essentiellement sur l'hydrogéologie des altérites. Le problème de l'hydrogéologie des altérites se ramène à un positionnement des ouvrages (puits et forages) dans les zones ayant une hauteur d'eau pouvant assurer un débit pérenne à cause de la faiblesse des débits obtenus ;

GENERALITES

- Aquifère de fissure et de fracture captive

Drainant la couverture, à fonction essentiellement conductrice (Engalenc, 1978). Son épaisseur est mal connue mais il est estimé à 40 voire 50m dans les formations cristallines et cristallophylliennes. L'hydrogéologie des milieux fissurés a connu durant ces dernières années un grand essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériels de foration notamment le marteau fond de trou. La productivité des ouvrages hydrauliques varie de manière aléatoire. Il apparaît toutefois qu'elle est influencée par le faciès lithologique, la présence ou non d'altérites, la connectivité hydraulique des fractures recoupées par les ouvrages (De Marsily *in* M'bonu, 1991). La variation du volume sollicité en fonction des paramètres hydrauliques de l'aquifère est due à l'existence d'un effet d'échelle à cause de l'hétérogénéité du milieu. Le volume auquel ces paramètres deviennent stables est appelé le Volume Élémentaire Représentatif (V.E.R.) (CEFIGRE, 1990). Le VER peut varier en fonction de la durée de sollicitation de l'aquifère.

1.4.2. Agriculture

L'agriculture est la principale source de revenus pour près de la moitié des habitants. Elle est l'activité économique la plus importante. L'exploitation vivrière reste diversifiée dans ses productions avec des rendements relativement faibles : igname (22,4 t/ha), manioc (16,6 t/ha), maïs (3 t/ha), riz pluvial (1,7 t/ha), le riz irrigué (5,1 t/ha). Le système avec plantations de caféiers et cacaoyers est encore présent au sud-ouest de Yamoussoukro avec des plantations âgées et de petites tailles, localisées à proximité des bas-fonds sur terres colluviales. Le système périurbain de maraichage et de culture de bas-fonds développés aux environs de la ville de Yamoussoukro montre les bonnes performances susceptibles d'être atteintes dans ce type d'agriculture. La riziculture irriguée est ancienne et pratiquée.



Figure 8: Quelques cultures pratiquées dans le département de Yamoussoukro a- champ de banane, b- champ de cacao et c- champ de riz.

DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

2.1.1. Données

2.1.1.1. Les données hydrogéologiques

Les données utilisées concernent principalement les données techniques des forages réalisés dans le département de Yamoussoukro. Au total 60 fiches techniques ont été retenues pour cette étude. Ces données de forage concernent les paramètres suivants : le débit de forage, l'épaisseur d'altération, la profondeur totale et la nature des formations géologiques sous-jacentes. Des essais de courte durée (1 à 4h) des 60 forages ont été utilisés. L'ensemble de ces données proviennent de la Direction territorial de l'Hydraulique Humaine de Yamoussoukro.

2.1.1.2. Les données cartographiques

La carte topographique et la carte géologique nous ont permis de connaître les différentes formations géologiques et les types de roches du département de Yamoussoukro.

2.1.2. Matériel de terrain

Le matériel de terrain est composé d'un GPS de poche (a) pour relever les coordonnées géographiques des différents forages, d'une sonde électrique (b) pour mesurer les niveaux piézométriques et d'un appareil photo numérique (c) pour les prises de vues.

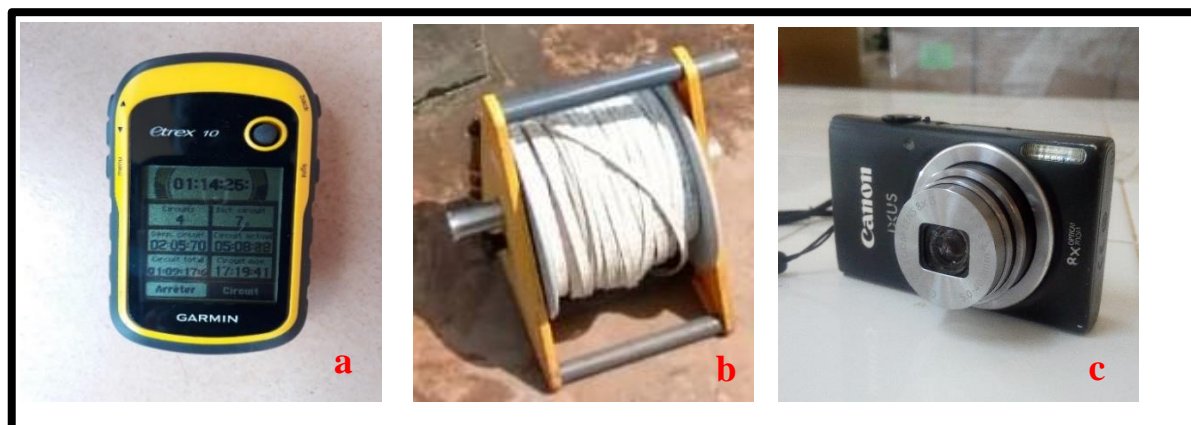


Figure 9: Matériels de terrains (a) GPS de poche, (b) infiltromètre double anneaux, (c) appareil photo

2.1.2. Outils

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

- Le tableur Excel 2016 a été utilisé pour le traitement des données ;

MATERIEL ET METHODES

- Logiciel Arc-GIS 10.4 a servi à la réalisation des différentes cartes ;
- Le logiciel AQUIFER WIN 32 pour la détermination de la transmissivité ;
- Le logiciel MATLAB pour les analyses statistiques ;
- Le logiciel SURFER pour la réalisation du modèle conceptuel ;
- Le logiciel GESFOR pour la réalisation des profils d'altération.

2.2. METHODES

2.2.1. Elaboration le modèle de profil d'altération du système aquifère

Le profil d'altération du système aquifère se fera à l'échelle du forage à partir des logs de forages réalisés (différentes formation géologiques traversées par le forage) avec le logiciel GESFOR :

- La valeur des épaisseurs des couches végétales, de l'altérité, de la couche fissurée, toit du socle sain et la profondeur totale du forage obtenu à l'aide des fiches techniques de forages seront représenté avec le logiciel.
- Réaliser les profils et montrer l'hétérogénéité des différentes couches.

2.2.2. Caractérisation le système aquifère du département de Yamoussoukro.

2-2-2-1 Détermination des propriétés hydrodynamiques

2-2-2-1-1 Transmissivité

La transmissivité a été déterminée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob en remontée. Elle repose sur le principe de superposition. L'application de cette méthode suppose qu'un certain nombre de conditions soit satisfait à savoir : L'aquifère a une extension latérale infinie ; le diamètre du puits est négligeable ; le puits est parfait ; l'aquifère est captif ; l'aquifère est homogène, isotrope, d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage et l'écoulement vers le puits est transitoire (Koita, 2005). Dans bien des cas, les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions. Selon Lasm (2000), cette situation n'empêche cependant pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages, qui donnent des résultats significatifs et représentatifs des aquifères quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques. En effet, à l'arrêt du pompage, l'eau souterraine continue de s'écouler en direction de l'ouvrage de captage. Le niveau de l'eau dans le forage remonte et simultanément le niveau piézométrique de la surface de dépression s'élève. Dans ces conditions, le rabattement résiduel S_r obtenu s'écrit selon l'équation 3 :

$$S_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{4Tt}{(r)^2 S'} - \ln \frac{4Tt'}{(r)^2 S'} \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

MATERIEL ET METHODES

S_r : rabattement résiduel (m) ; r : distance entre le piézomètre d'observation et l'ouvrage (m) ;

S' : coefficient d'emménagement de la remontée (sans unité) ;

S : coefficient d'emménagement de la descente (sans unité) ;

t : temps depuis le début du pompage (s ou min ou h) ;

t' : temps à la fin du pompage (s ou min ou h) ;

Q : débit de la remontée (moyenne des débits du pompage) en m^3/h .

En supposant que $S=S'$, on obtient selon les équations 4 et 5 les expressions de S_r et T .

$$S_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Eq. 2})$$

On obtient :
$$T = \frac{0,183Q}{\alpha} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec : α , la pente de la droite obtenue en représentant s_r en fonction de $\log t/t'$ ($S_r = f(\log(t/t'))$) sur du papier semi-logarithmique (t/t' est porté en échelle logarithmique). Cette méthode permet de calculer uniquement la transmissivité avec l'équation 5.

2.2.2.1.2. Perméabilité des aquifères

La propriété de conduite d'un aquifère est contrôlée par sa perméabilité ou conductivité hydraulique. Celle-ci est la capacité du milieu à laisser circuler l'eau généralement exprimée par le coefficient de perméabilité K de Darcy. Elle dépend des caractéristiques du milieu et du fluide. Elle a la dimension d'une vitesse. Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité et la perméabilité, mais pour être perméable la roche doit être obligatoirement poreuse (Castany, 1982). Les possibilités de circulation d'eau dans un aquifère dépendent de K et de son épaisseur mouillée (e) en m. Cela induit la notion de transmissivité T s'exprimant en m^2/s (équation 9) :

$$T = K \times e \quad \text{d'où} \quad K = \frac{T}{e} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec :

K = Perméabilités (m/s) ; T = Transmissivités (m^2/s) ; e = épaisseurs mouillées (m)

2.2.2.2. Etudier la productivité du système aquifère

2.2.2.2.1. Analyse statistique des paramètres de forages

- **Analyse statistique des paramètres de forages par l'application des S.O.M (Self-Organising Maps)**

L'algorithme des cartes auto-organisatrices ou S.O.M (Self Organizing Maps) (Kohonen,1982) a été utilisé pour évaluer la productivité des forages à partir des

MATERIEL ET METHODES

paramètres de forage. Contrairement aux méthodes classiques, les S.O.M traitent avec beaucoup d'aisance les données extrêmes (grande abondance ou extrême rareté), très souvent contenues dans les bases de données appliquées par plusieurs auteurs en écologie (Laë et *al.*, 1999) et en hydrogéologie (Hong et Rosen, 2001), ont montré l'efficacité des réseaux de neurones, qui est caractérisée pour la plupart du temps par des processus non linéaires. Cette méthode permet de mettre en évidence les liens éventuels que présenteraient deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution. Les paramètres utilisés sont : le débit (Q), l'épaisseur d'altération (EA), la profondeur totale (Pt), la transmissivité (T) et le niveau statique (NS).

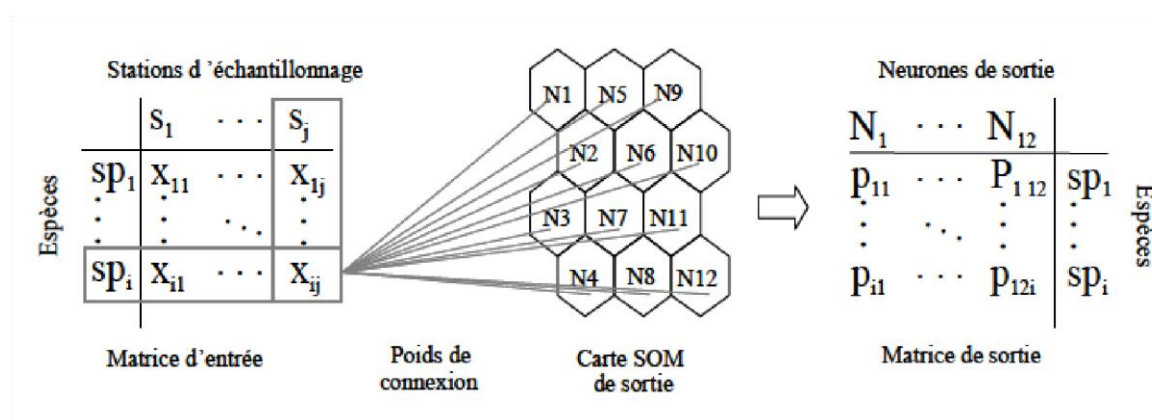


Figure 10: Schéma simplifié de la carte auto-organisatrice de Kohonen (Aguilar, 2004)

Le choix de la taille de la carte est un paramètre déterminant pour détecter au mieux l'écart entre les données. Par exemple, si la carte est trop grande, c'est-à-dire si le nombre d'unités de la carte est largement supérieur au nombre d'échantillons, les données seront trop dispersées par le modèle. L'apprentissage se fait donc avec différentes tailles de carte et la taille optimale est choisie en minimisant les erreurs dites de quantification (QE) et de topographie (TE).

Classification Ascendante Hiérarchique (C.A.H.)

- **Objectif**

Les neurones obtenus à partir de la carte de Kohonen sont regroupés à l'aide d'une procédure de classification hiérarchique ascendante dont le critère de regroupement est le critère de Ward (Park *et al.*, 2003). La méthode de classification hiérarchique appliquée à la carte consiste à regrouper au mieux les échantillons ayant un comportement similaire sur un ensemble de variables de manière à donner une vision plus globale de la carte.

MATERIEL ET METHODES

- *Principe*

La classification ascendante hiérarchique selon Dreyfus et *al.* (2002) est une méthode de classification automatique qui permet d'effectuer la phase nécessaire à l'élaboration du classifieur en regroupant « au mieux » les neurones (Figure 10). Il s'agit d'une méthode qui calcule une hiérarchie de partitions et chaque partition permet de regrouper d'une manière différente les neurones de la carte. Les différentes partitions de la hiérarchie sont déterminées d'une manière itérative, en commençant par la partition la plus fine qui est composée de l'ensemble des singletons (les neurones). La classification hiérarchique utilise la partition initiale et procède à des regroupements successifs en fusionnant à chaque itération deux sous-ensembles de neurones. Le choix des deux sous-ensembles qui vont fusionner à une étape donnée est effectué à l'aide d'une mesure de similitude, définie entre deux sous-ensembles.

On choisit, parmi tous les couples de sous-ensembles qui constituent la partition à cette étape, les deux sous-ensembles de neurones les plus semblables, au sens de la mesure choisie. L'algorithme de classification hiérarchique se résume de la manière suivante :

- 1- Initialisation. Considérer la partition formée par les singletons ; chaque neurone est alors affecté à un sous-ensemble distinct. Choisir le nombre K de groupement que l'on souhaite former.
- 2- Pour une partition donnée, trouver les deux sous-ensembles les plus proches au sens du critère de similitude choisi, et les fusionner de manière à former un seul sous-ensemble.
- 3- Si le nombre de groupement de la partition courante est inférieur à K , revenir à l'étape (2), sinon l'algorithme se termine.

Le résultat est une suite de classifications emboîtées en regroupant les neurones les plus proches, puis les groupes les plus proches au sens d'une distance convenable, et le résultat est un dendrogramme (Figure 10).

Le nombre de groupes provenant de cette classification est laissé au choix de l'utilisateur : il doit donc être déterminé selon les objectifs de l'application et l'appréciation de l'analyste (Rousseau *et al.*, 2007). Cette approche a été utilisée par Mangoua (2012) dans le bassin de la Baya pour catégoriser les forages.

MATERIEL ET METHODES

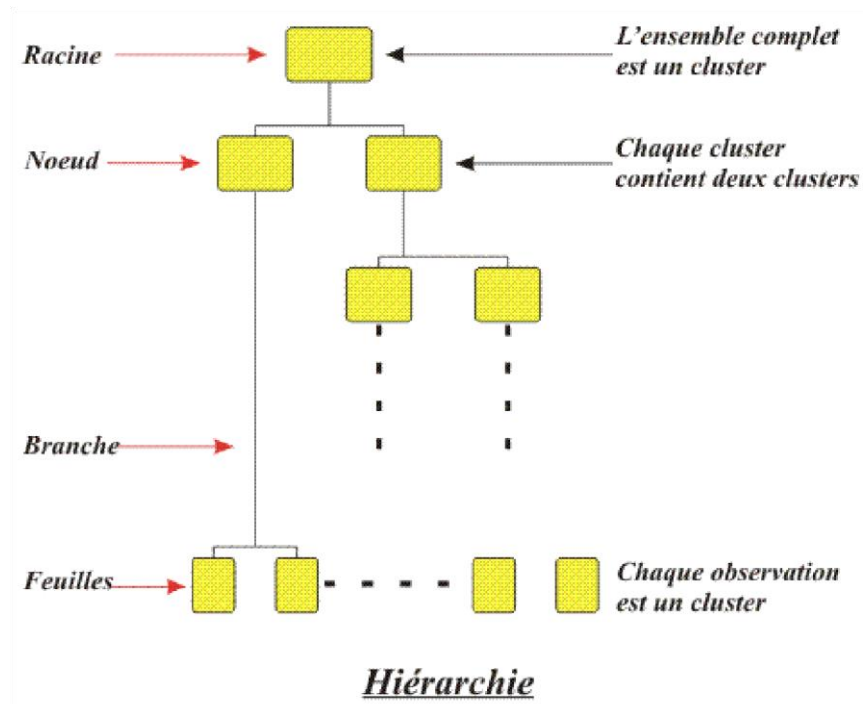


Figure 11 : Hiérarchisation d'une classification non supervisée (Rousseau et al., 2007)

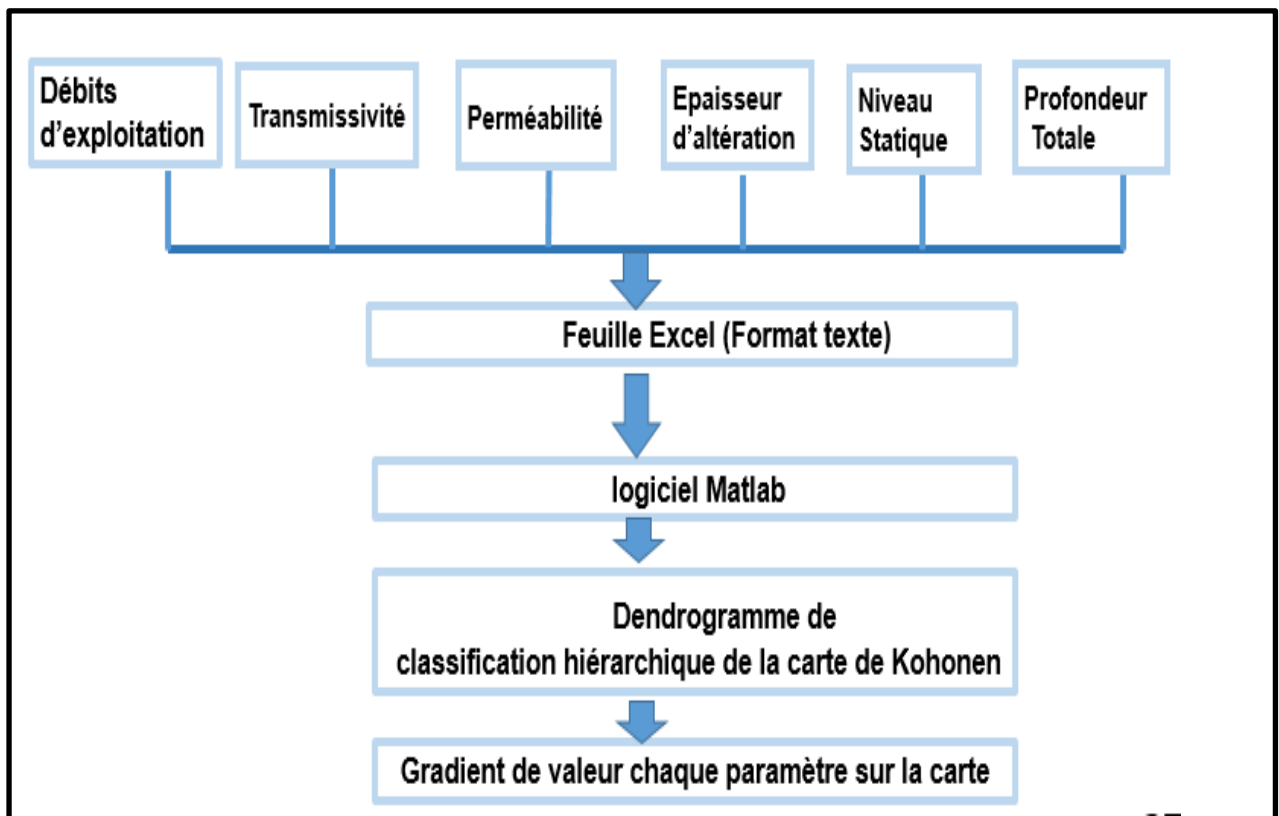


Figure 12 : Organigramme des étapes de réalisation de l'analyse multivariée des paramètres hydrodynamiques.

MATERIEL ET METHODES

2.2.2.3. Modèle conceptuel hydrogéologique du département de Yamoussoukro

2.2.2.3.1. Méthodologie de réalisation d'un modèle hydrogéologique

La modélisation commence par l'acquisition des données : les fiches techniques de forages nous ont donné la cote des forages, le toit et mur des différentes couches. Les données acquises permettent de mettre en place un modèle conceptuel qui est introduit dans un logiciel pour concevoir le modèle numérique.

La réalisation d'un modèle conceptuel suit les étapes suivantes (Anderson & Woessner, 1992) :

- Détermination des objectifs à atteindre ;
- Choix du logiciel utilisé ;
- Développement des modèles conceptuel.

2.2.3.2. Elaboration du modèle conceptuel

La modélisation des systèmes hydrogéologiques est une tâche complexe basée sur des hypothèses. Afin d'obtenir des résultats s'approchant des conditions réelles observées sur le terrain, l'approche conceptuelle proposée est celui du milieu continu discrétisé. La création du modèle nécessite dans un premier temps de définir la nature des unités stratigraphiques, leur confinement éventuel, la hauteur du toit et du mur de chaque couche, la charge hydraulique initiale.

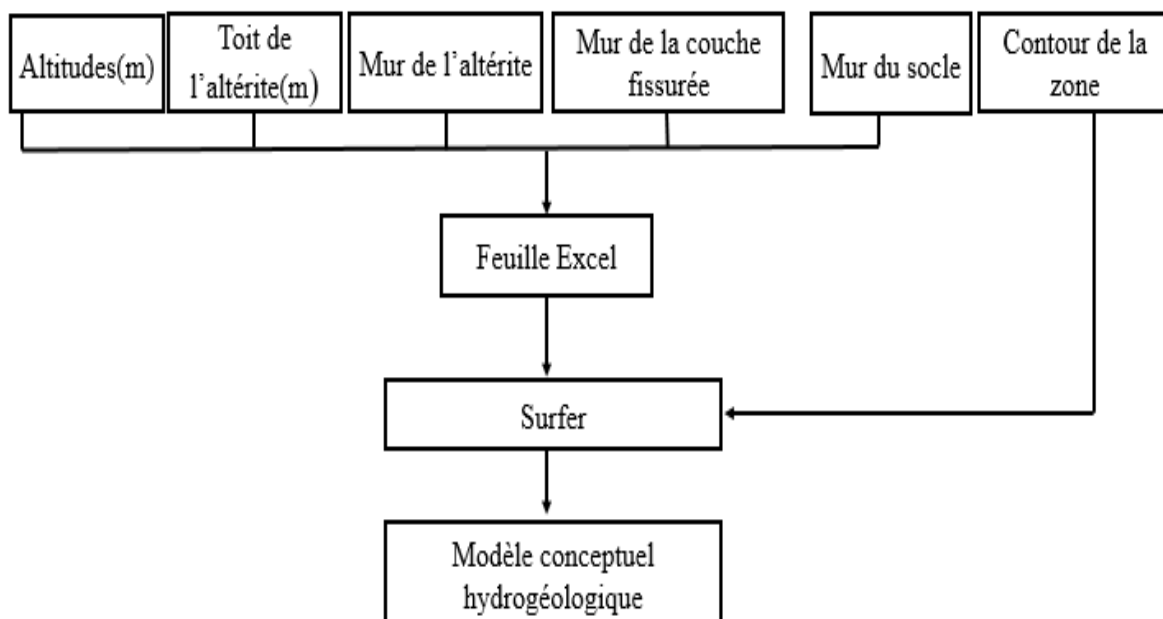


Figure 13 : Organigramme des étapes de réalisation du modèle conceptuel hydrogéologique

MATERIEL ET METHODES

2.2.3.3. Géométrie du modèle

Dans notre cas, le domaine hydrogéologique sera modélisé à trois couches.

- Une couche d'argile sableuse.
- Une couche granitique fissurée ou d'arène granitique.
- Un socle sain a été exclu dans cette étude puisqu'elle ne présente pas d'intérêt hydrodynamique particulier, la roche saine étant considérée comme imperméable.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSIONS

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Modèle de profil d'altération du système aquifère du département de Yamoussoukro

3.1.1.1. Epaisseurs des couches d'altérite

Tableau I: Tableau des épaisseurs de la couche fissurée du département de Yamoussoukro

	Epaisseur de l'altérite (m)
Min	1,85
Max	54,89
Moy	21,19
Ecartype	15,32
CV (%)	72,28

Dans le département de Yamoussoukro, les épaisseurs des couches d'altérites varient entre 1,85 m et 54,89 m, avec une moyenne de 21,19 m, un écartype de 15,32 et un coefficient de variation de 72,28. L'épaisseur la plus grande est observée à N'guesssan-bakro avec 54,89 m et la plus faible est observée à N'gbéssou avec 1,85 m (tableau I).

3.1.1.2. Epaisseurs des couches fissurées

Tableau II: Tableau des épaisseurs de la couche fissurée du département de Yamoussoukro

	Epaisseur de la couche fissurée (m)
Min	20,6
Max	99,57
Moy	53,67
Ecartype	17,67
CV (%)	32,92

Les épaisseurs des couches fissurées du département de Yamoussoukro varient entre 20,60 m et 99,57 m, avec une moyenne de 53,67 m, un écartype de 17,67 et un coefficient de variation de 32,92. L'épaisseur la plus grande est observée à Bakoukro avec 99,57 m et la plus faible est observée à Krékrenou avec 20,60 m (tableau II).

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.1.3. Profil d'altération

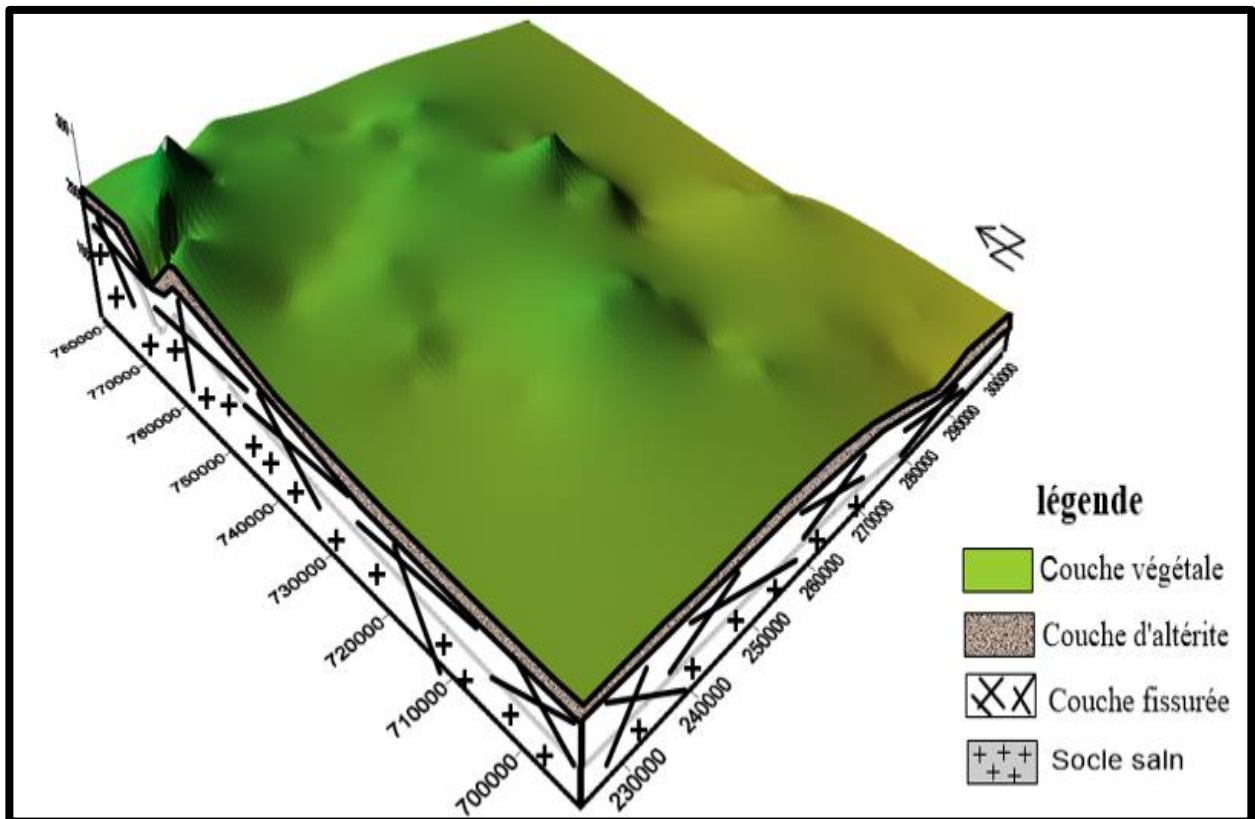


Figure 14 : Distribution des forages dans la direction Nord-Sud dans le département de Yamoussoukro

L'analyse du bloc diagramme présente trois grandes horizons dans le département de Yamoussoukro. Ainsi selon une structure verticale du haut vers le bas on distingue :

- La couche d'altérite surmontée par la couverture végétale
- La couche fissurée intermédiaire de l'altérite et du socle sain
- Le socle sain sur lequel repose ces différentes couches sur citées.

RESULTATS ET DISCUSSION

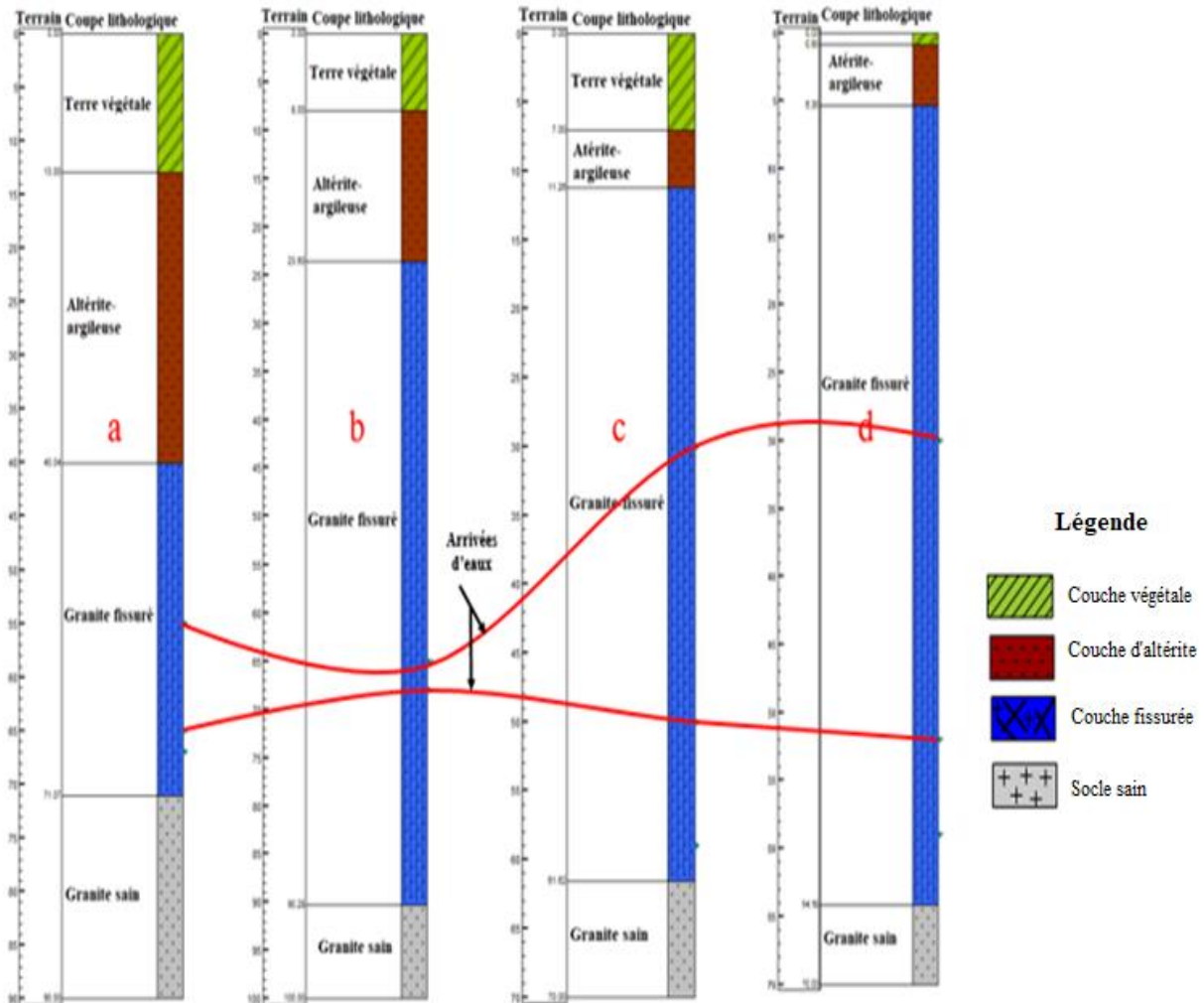


Figure 15 : le modèle de profil d'altération de 4 forages du département de Yamoussoukro, a- Amonkro, b- Bézro, c- Dougba, d – Kpèbo

L'analyse du modèle de profil d'altération des forages montre une hétérogénéité des couches entre les différents profils. Cependant, trois horizons distincts se dégagent de ces profils (figure 15). Ainsi, du sommet à la base, la structure lithologique du département de Yamoussoukro se compose comme suit (figure 15) :

- Une couche altérite ou altérite argileuse recouverte d'une couverture végétale dont l'épaisseur maximale varie entre 4,25 m à Dougba et 27,04 m à Amonkro et une épaisseur moyenne de 12,64 m.
- Une couche granitique fissurée qui est l'intermédiaire entre la couche d'altérite et le socle sain d'épaisseur maximale comprise entre 31,03 m à Amonkro et 66,68 m à Bézro une moyenne de 51,87 m.
- Un socle sain qui se trouve à la base du profil d'altération constitue le substratum.

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.1.4. Analyse des couches de l'aquifères du département de Yamoussoukro

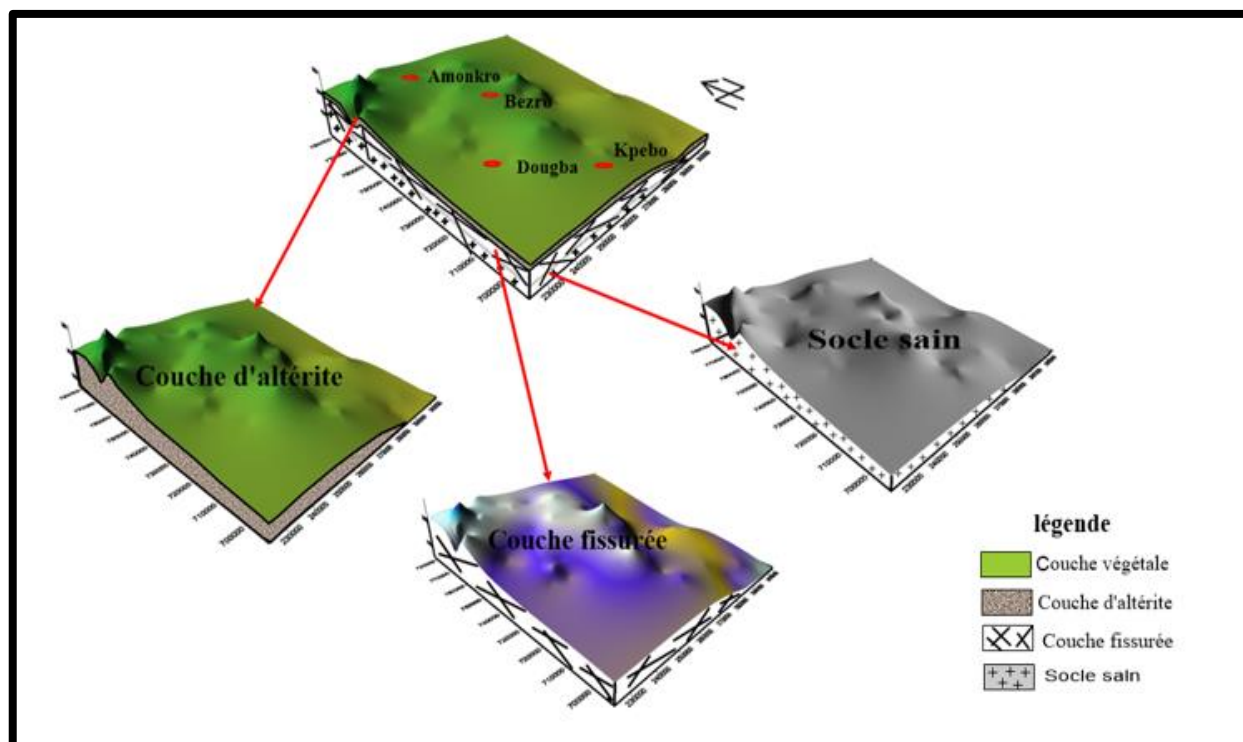


Figure 16 : Lithologie de l'aquifère de socle : Bloc diagramme du département de Yamoussoukro

L'analyse des 60 lithologs dont certains sont représentés sur la figure a permis d'élaborer les blocs diagrammes de l'aquifère. Ces blocs diagrammes montrent que les profils d'altération obéissent à une structuration verticale composée de trois grands horizons. Partant de la surface du sol, on distingue : une couche altérite argileuse couverte par une terre végétale, une couche granitique fissurée et un socle sain qui est le substratum de ces couches.

3.1.2. Caractériser le système aquifère du département de Yamoussoukro

3.1.2.1. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du département de Yamoussoukro

- Transmissivités

Tableau III: Tableau des valeurs de transmissivités du département de Yamoussoukro

	Transmissivité (m ² /s)
Min	1,84.10 ⁻⁶
Max	2,1.10 ⁻³
Moy	1,02. 10 ⁻⁴
Ecartype	2,91. 10 ⁻⁴
CV (%)	284,58

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette étude, 60 forages repartis sur l'ensemble du département de Yamoussoukro nous ont permis de déterminer les transmissivités. Les valeurs de transmissivités sont comprises entre $1,84.10^{-6}$ et $2,1.10^{-3}$ m²/s avec une moyenne géométrique de $1,02. 10^{-4}$ m²/s. L'écart type est de l'ordre $2,91.10^{-4}$ m²/s et le coefficient de variation 284,58 %, cette dernière montre l'état de dispersion des valeurs de transmissivités autour de la valeur moyenne. Notons la présence de valeur de transmissivité isolée par rapport à l'ensemble. Il s'agit principalement d'un forage d'ordre 10^{-3} celui de la localité de N'da-kouassikro. En dehors de ce forage, l'essentiel des forages (soit 98,33%) ont des transmissivité qui oscillent entre 10^{-6} m²/s et 10^{-4} m²/s ; de sorte que celle-ci s'échelonnent sur un ordre de grandeur. L'ordre de transmissivité le plus prépondérant est l'ordre 10^{-5} soit 50 % des transmissivités.

- Perméabilité de la couche fissurée

Tableau IV : Tableau des valeurs de perméabilités du département de Yamoussoukro

	Perméabilités (m/s)
Min	$2,93.10^{-8}$
Max	$2,67.10^{-5}$
Moy	$1,52.10^{-6}$
Ecartype	$3,79.10^{-6}$
CV (%)	249,12

Les valeurs de la perméabilité de la couche fissurée du département de Yamoussoukro montrent que nous avons une bonne perméabilité avec un minimum de $2,93. 10^{-8}$ m/s à Attiéguakro et un maximum de $2,67. 10^{-5}$ m/s à N'da-kouassikro puis une moyenne de $1,52.10^{-6}$ et un écartype de $3,79. 10^{-6}$ m/s et un coefficient de variation de 249,12 %. Ce coefficient étant supérieur à 100 % signifie que la perméabilité varie d'une localité à une autre, le milieu est donc hétérogène.

3.1.2.2. Analyse statistique

- Corrélation entre épaisseur d'altérite et profondeur totale

RESULTATS ET DISCUSSION

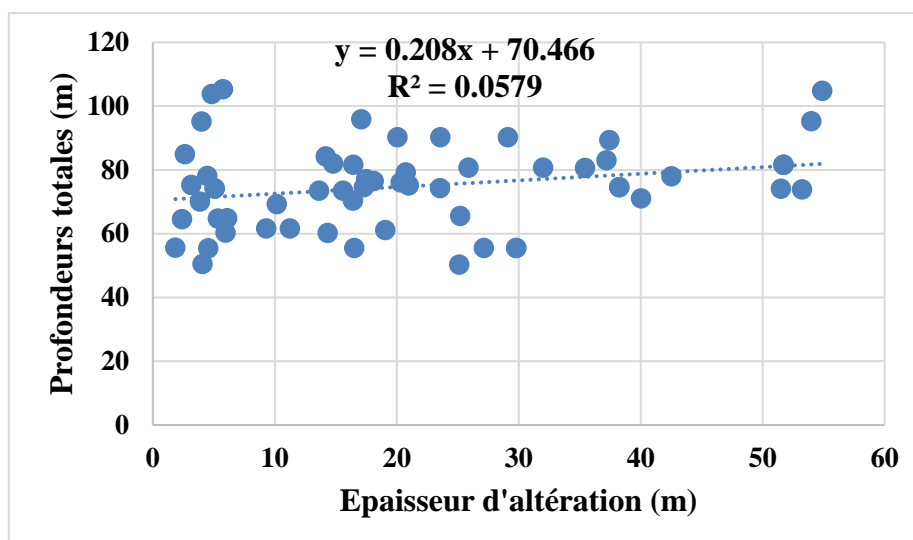


Figure 17 : Distribution des profondeurs totales des forages en fonction des épaisseurs des altérites

La moyenne de l'épaisseur des altérites est de 20,88 m, elle est comprise entre 3 m et 51,72 m (Figure 17). Les moyennes calculées seront très importantes pour les praticiens en hydraulique villageoise. En prenant en compte ces deux paramètres, ces derniers pourront se faire une idée du nombre de mètres linéaires à forer et aussi une idée du prix du forage. Le graphe de la figure montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la profondeur totale du forage et l'épaisseur des altérites.

- Niveau statique (NivSta)

Tableau VI: Tableau des fréquences des niveaux statiques en fonction des profondeurs

	Fréquence des NivSta (%)
0 – 10 m	21,66
10 – 20 m	55
20 - 40 m	18,33
40 – 50 m	3,33
50 – 100 m	1,66

Le tableau VI présente les niveaux statiques relevés à la fin de la foration. Ces niveaux correspondent en fait au niveau statique des forages. On constate que 76,66 % des forages ont leur niveau d'eau situé entre zéro et vingt premiers mètres à partir de la surface. En plus, on remarque que 59 ouvrages sur les 60 ont leur niveau statique localisé dans les formations d'altérites. Ce constat est vérifié même dans le cas où la première venue d'eau se rencontre dans

RESULTATS ET DISCUSSION

les fissures. Ce fait est très important, car il montre la mise en charge de l'eau de l'aquifère de fissures et confirme l'interconnexion des aquifères de fissures et d'altérites.

- Première venue d'eau

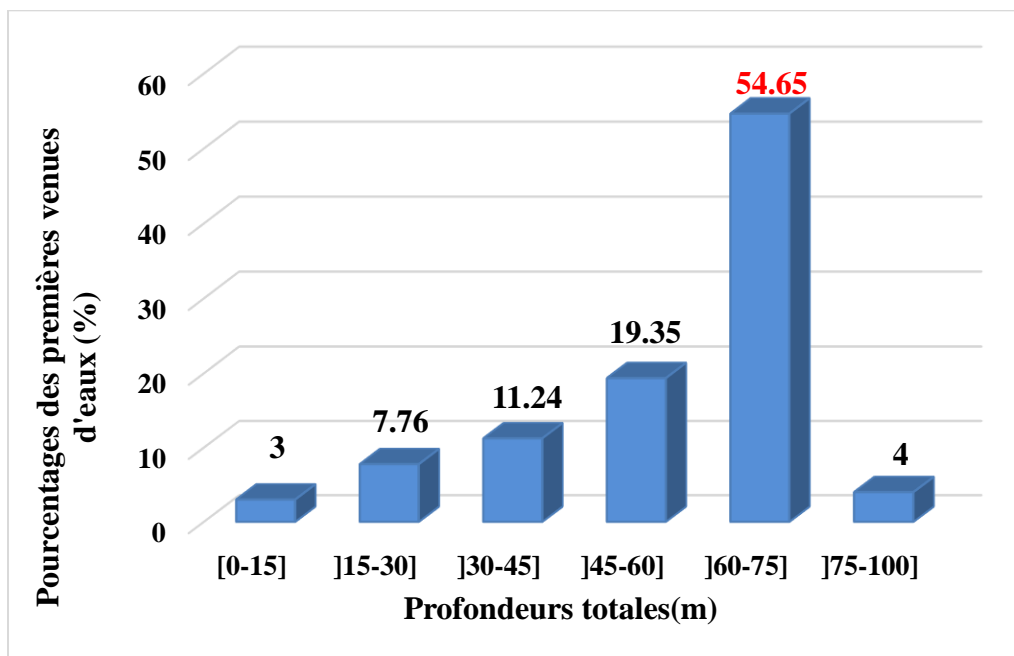


Figure 18 : Histogramme des fréquences d'observation de la première venue d'eau.

En hydrogéologie quantitative, la productivité d'un ouvrage dépend du nombre des arrivées d'eau et de leur débit. Dans la base de données de la DTH de Yamoussoukro, le nombre des AE est de deux. Sur les fiches techniques que nous avons exploitées, on a eu à relever au maximum quatre arrivées d'eau dans certains ouvrages. Cependant, ces différentes arrivées ne sont pas toutes équivalentes du point de vue productivité. Les premières venues d'eau observées sur les 60 ouvrages sélectionnés se situent entre 10 et 82 m avec une moyenne de 51,90 m. La figure présente l'histogramme de distribution des fréquences des profondeurs des premières venues dans le département de Yamoussoukro. Il montre que 93 % des premières venues d'eaux se situent entre 15 et 75 m.

- Arrivée d'eau et profondeur

RESULTATS ET DISCUSSION

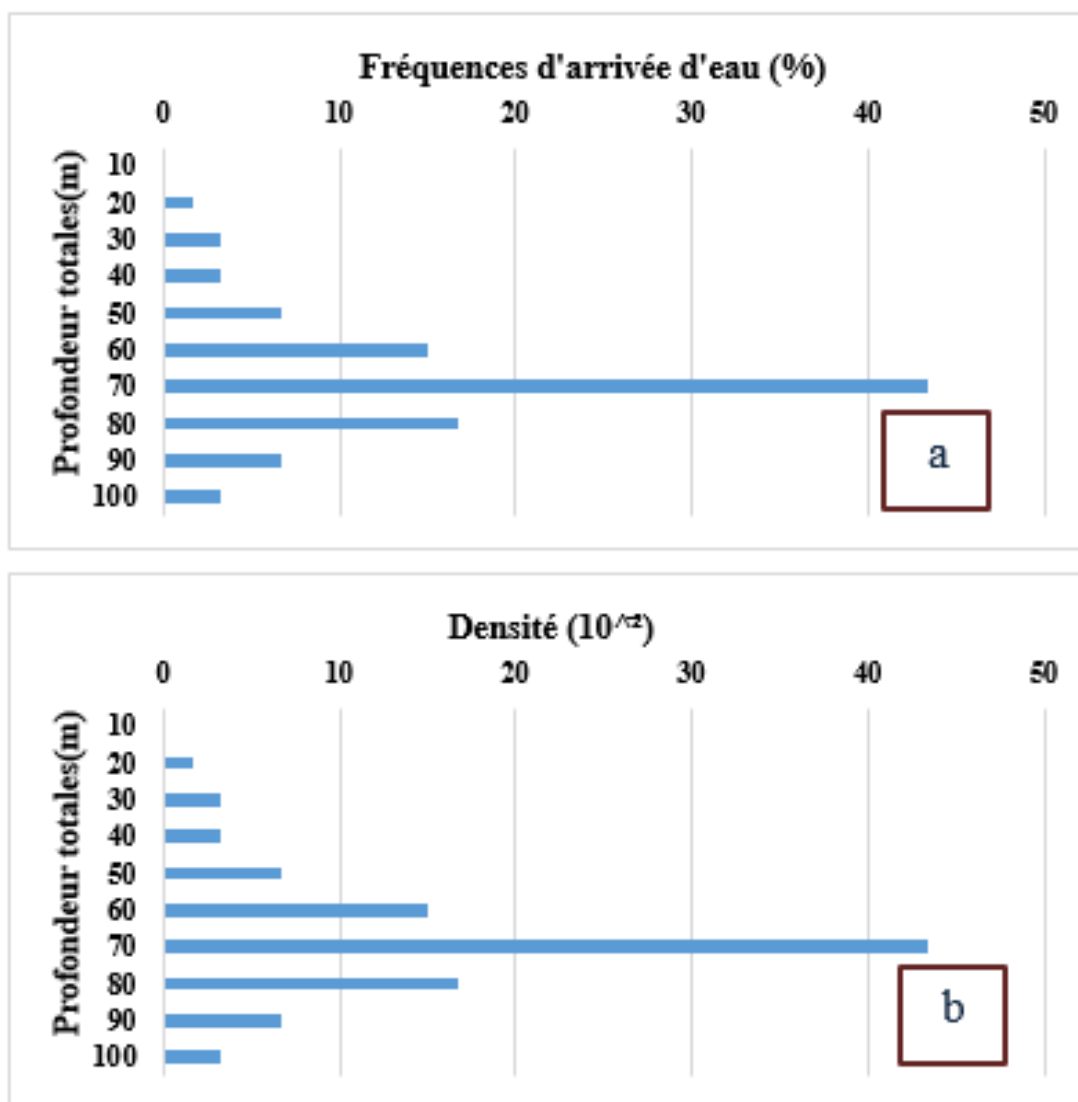


Figure 19 : Distribution des arrivées d'eau (AE) en fonction des profondeurs : a-Fréquence des AE (%), b- Densité des AE ($\times 10^{-2}$).

Les arrivées d'eau sont signalées à la fois dans la couche d'altérite et dans la couche fissurée qui totalisent respectivement 30 % et 70 % des arrivées d'eau (figure 18). Dans la figure a, la fréquence des arrivées d'eau nulle au niveau des 10 premiers mètres de profondeur, croit jusqu'à 70 m de profondeur, où elle atteint un maximum (31,03 %), puis diminue avec la profondeur jusqu'à 100 m environ. La figure b montre que la densité des arrivées d'eau nulle au niveau des 10 premiers mètres, augmente avec la profondeur jusqu'à 70 m où elle atteint une valeur maximale de $0,31 \times 10^{-2}$ puis diminue avec la profondeur.

- Statistique des débits

Tableau VI : Résultats statistiques des débits en fonction des classes du CIEH

RESULTATS ET DISCUSSION

Classes	Débit (m ³ /h)	Nombre de forages	Fréquences	Prof. Moyennes (m)	Ep. Moy. Altérites (m)
1e classe	≤ 1	5	8,33	85,38	23,13
2e classe	1-2,5	16	26,66	70,70	23,64
3e classe	2,5-5	16	26,66	82,79	19,79
4e classe	> 5	23	38,35	73,74	20,96

Les valeurs des débits rencontrés dans la zone sont comprises entre 0,51 et 36 m³/h avec une moyenne de 6,35 m³/h. Les débits des ouvrages dans le département ont été répartis selon les classes définies par le CIEH dans le tableau VII. On remarque que les classes 3 et 4 dont les débits sont supérieurs à 2,5 m³/h sont les plus représentées avec une fréquence de 65,01 % qui correspond à 39 ouvrages sur les 60. Cette dernière classe représente 38,35 % de l'effectif, c'est la classe des débits forts.

- Débit et profondeur

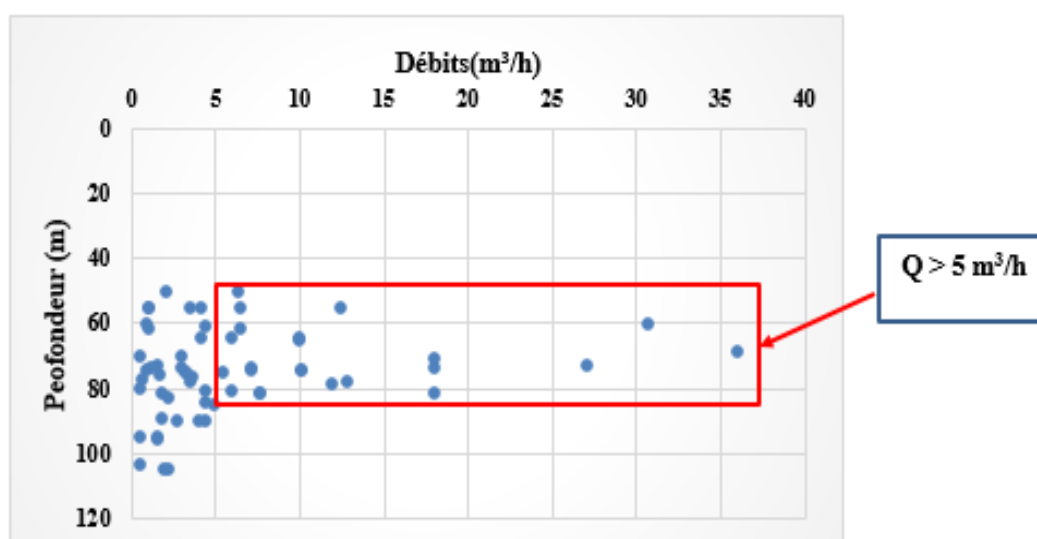


Figure 20 : Evolution des débits en fonction des profondeurs totales des forages.

Les profondeurs des forages réalisés dans le département de Yamoussoukro varient entre 50,27 m et 105,35 m avec une profondeur moyenne de 77,59 m et un coefficient de variation de 0,17. La répartition des débits de forage en fonction de la profondeur des ouvrages est présentée par la figure 14. L'analyse de ce graphe montre que de manière générale, les principaux débits (Q) supérieurs à 5 m³/h du bassin versant se rencontrent entre 60 et 85 m de profondeur.

- Débits et épaisseurs d'altération

RESULTATS ET DISCUSSION

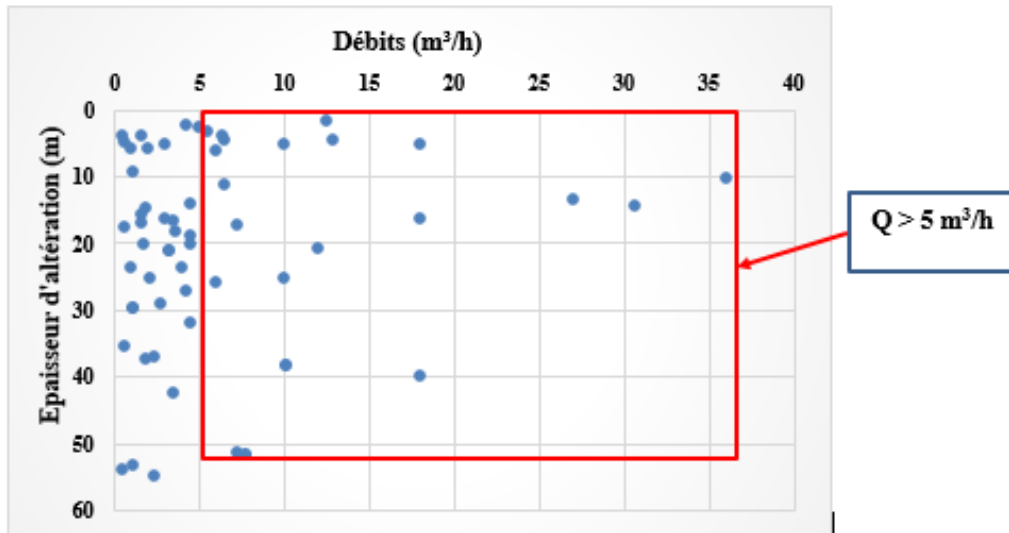


Figure 21 : Evolution des débits en fonction des épaisseurs d'altérites.

Les épaisseurs d'altérites observées au niveau du département sont variables (3 à 51,72 m), avec une moyenne géométrique de 20,88 m et un écart-type moyen de 14,63 m et un coefficient de variation de 0,70. Cette figure illustre l'évolution non linéaire des débits par rapport à l'épaisseur d'altération. En effet, des débits (Q) importants ont été observés avec tous types d'épaisseur d'altération. Cependant, les débits très élevés supérieurs à 5 m³/h appartiennent aux forages dont les épaisseurs d'altérations se situent entre 10 et 55 m.

- Débits d'exploitation et transmissivité

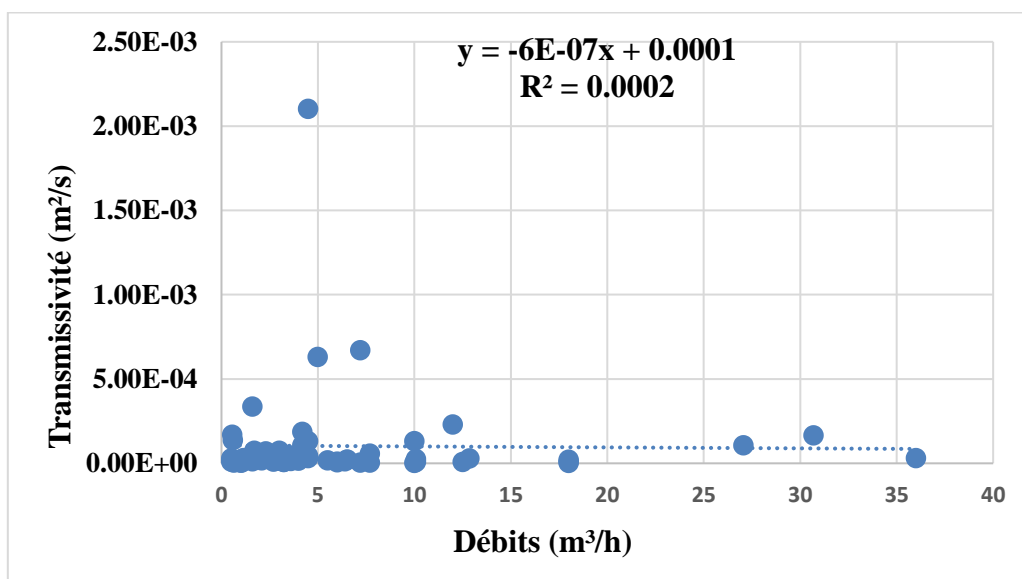


Figure 22 : relation entre transmissivité et débit d'exploitation .

RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude de la relation entre la transmissivité et le débit d'exploitation de forage de la figure a permis de déterminer l'équation de la courbe $Y = -6E-07x + 0.0001$. Elle montre également que le coefficient de corrélation entre la transmissivité et le débit est 0.0002

3.1.2.4. Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques avec SOM.

Les paramètres hydrodynamiques ont été traité à l'aide de la carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM). En se basant sur les erreurs de quantification (QE) et de topographie (TE) tout en les minimisant.

Une carte de Kohonen de 38 cellules a été choisie (5 lignes x 7 colonnes) pour projeter 60 forages.

Tableau VI : Erreurs de quantification(QE) et de topographie(ET) des différentes tailles de la carte de Kohonen (la matrice retenue en gras).

N	\sqrt{N}	Matrices possible	QE	TE
60	38	4x9	0,033	0,215
		5x7	0,000	0,216
		5x8	0,017	0,195
		6x7	0,033	0,199

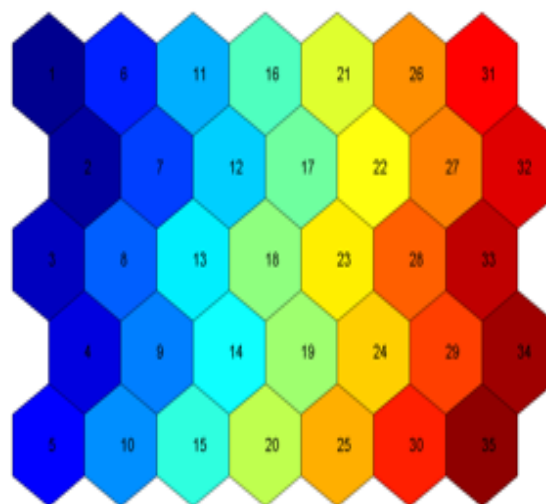


Figure 23: Carte de Kohonen issue de la matrice 6 x 3(18 cellules)

- Dendrogramme de classification hiérarchique

RESULTATS ET DISCUSSION

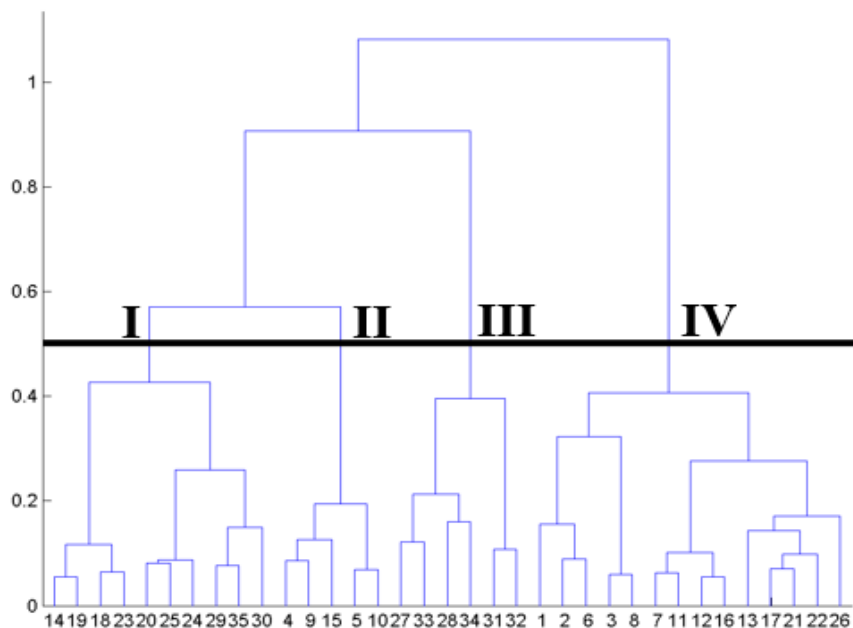


Figure 24: Dendrogramme de classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen sur la base des paramètres hydrodynamiques

Le dendrogramme obtenu nous donne 4 grands groupes de forages rangé selon leurs rapprochements au niveau des paramètres hydrodynamiques (figure 24).

- Distribution des forages

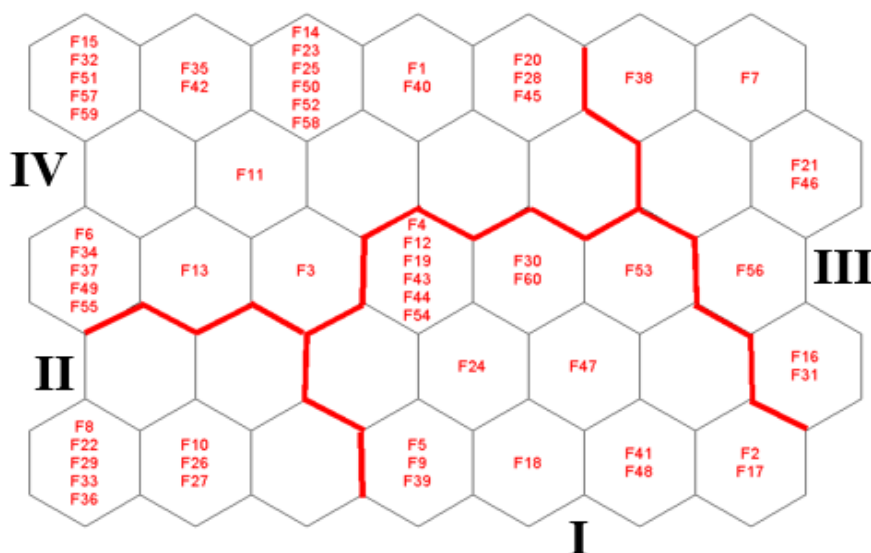


Figure 25 : Distribution des forages sur la carte de Kohonen à partir des paramètres hydrodynamiques.

RESULTATS ET DISCUSSION

La distribution des forages sur la carte de Kohonen selon leurs rapprochements au niveau des paramètres hydrodynamique nous a permis d'obtenir 4 groupes (figure 25).

Le groupe I est constitué de 19 forages, le groupe II est constitué de 8 forages, le groupe 3 est constitué de 7 forages et le groupe IV est constitué de 27 forages

- Gradient de valeur des paramètres hydrodynamiques

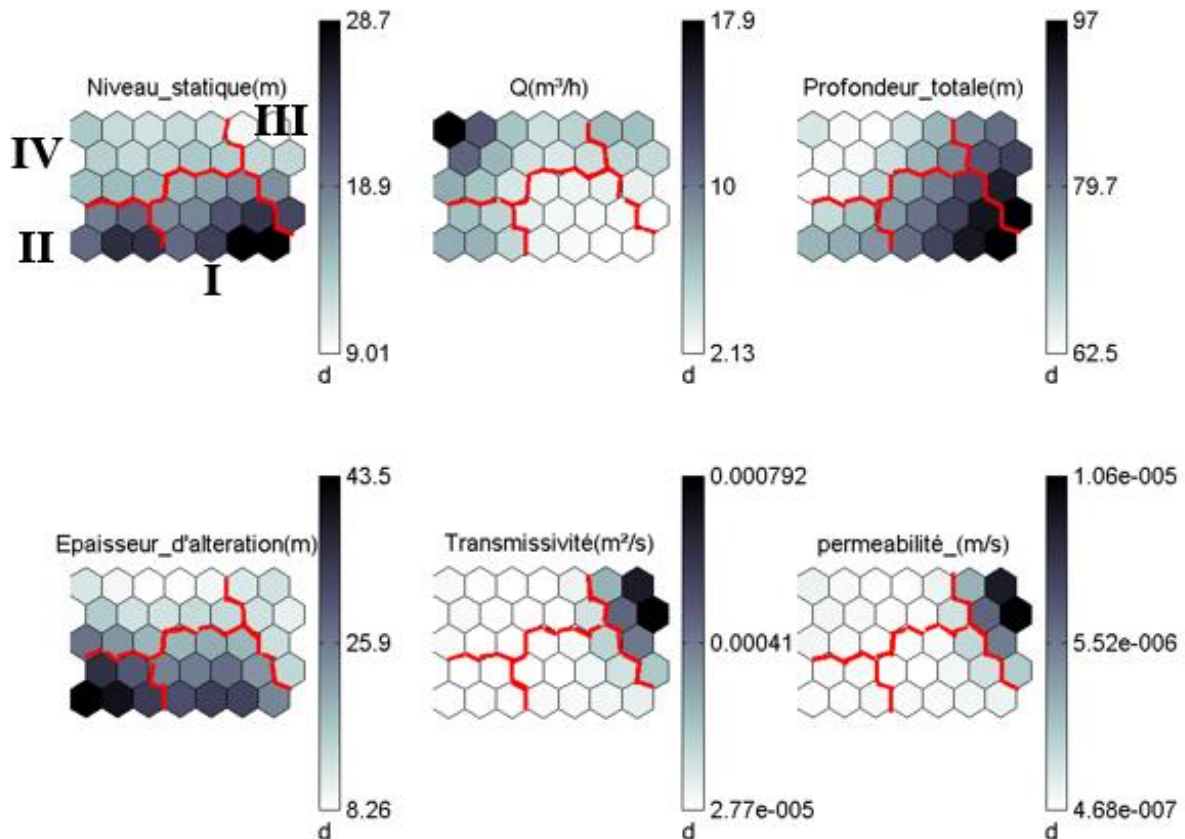


Figure 26 : Gradient de valeur de chaque paramètre hydrodynamique sur la carte de Kohonen (d= échelle indiquant les valeurs transformées des paramètres par le logarithme; couleur foncée= valeurs fortes pour le paramètre considéré ; couleur pâle= valeur faible).

Le groupe I rassemble 19 forages avec deux classes :

- La première classe est constituée des forages dont le niveau statique, la profondeur totale et l'altération sont élevés avec le débit d'exploitation, la transmissivité et la perméabilité moyennes.

RESULTATS ET DISCUSSION

- La deuxième classe est constituée des forages dont le niveau statique, la profondeur totale et l'altération sont très élevés avec le débit d'exploitation, la transmissivité et la perméabilité moyen.

Le groupe II rassemble 8 forages avec deux classes :

- La première classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont très faibles avec des épaisseurs d'altérations et les niveaux statiques très élevés et les débits puis des profondeurs totales élevés.
- La deuxième classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont très faibles avec des épaisseurs d'altérations et les niveaux statiques élevés et les débits puis des profondeurs totales élevés.

Le groupe III rassemble 7 forages avec deux classes :

- La première classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont très élevées avec des épaisseurs d'altérations et les niveaux statiques moyens et les débits puis des profondeurs totales élevés.
- La deuxième classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont élevées avec des épaisseurs d'altérations et les niveaux statiques élevés et les débits puis des profondeurs totales élevés.

Le groupe IV rassemble 27 forages avec deux classes.

- La première classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont élevées avec des épaisseurs d'altérations et les niveaux statiques élevés et les débits très élevés puis des profondeurs totales moyens.
- La deuxième classe est constituée des forages dont la transmissivité et la perméabilité sont moyennes avec des épaisseurs d'altérations et des profondeurs totales moyens puis les niveaux statiques élevés et les débits élevés.

Les forages productifs sont ceux qui ont une bonne transmissivité, une bonne perméabilité, une profondeur d'altération moyenne et une faible profondeur totale.

Les groupes de forages(F) les plus productives sont donc les groupes II, III et IV.

3.1.2.5. Modèle conceptuel hydrogéologique

3.1.2.5.1. Modèle conceptuel de l'aquifère

RESULTATS ET DISCUSSION

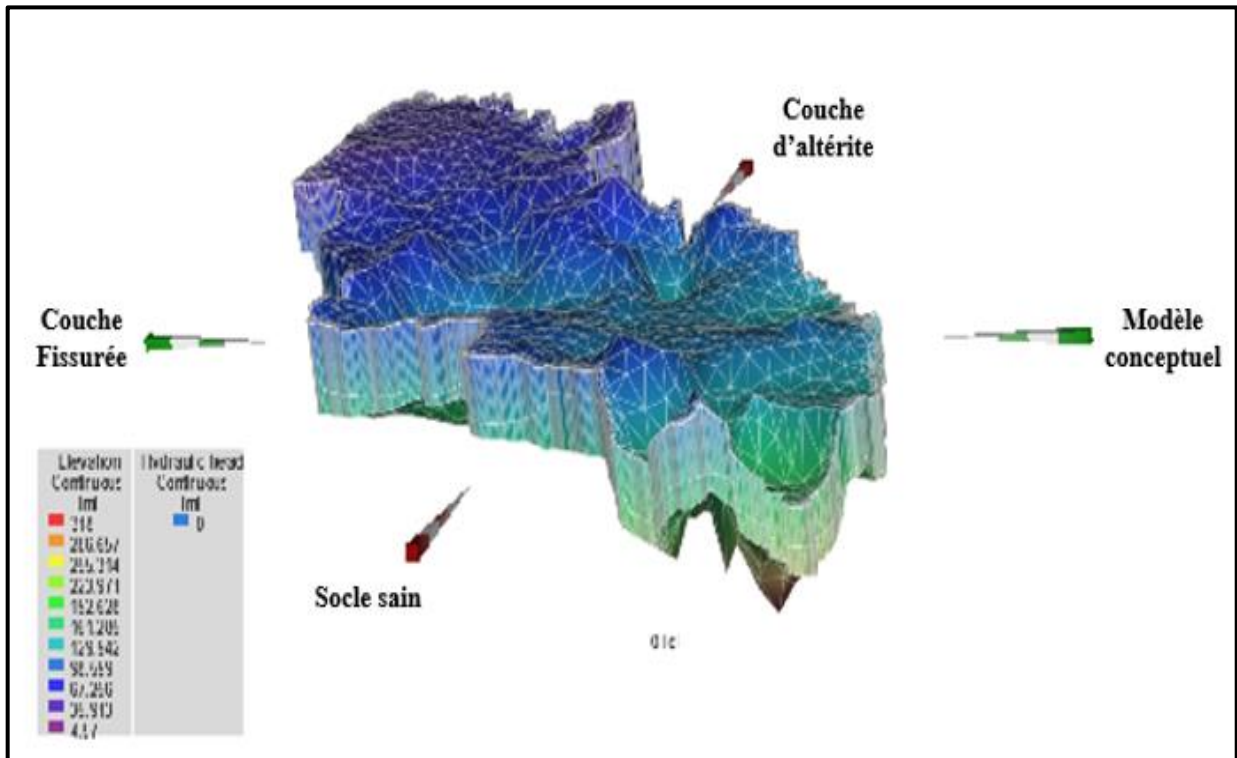


Figure 27: vision en 3D du modèle conceptuel de couches du département de Yamoussoukro

La figure 27 présente les différentes couches de l'aquifère qui se superposent, on distingue du haut vers le bas une couche d'altérite de faible épaisseur suivit de la couche fissurée au niveau de laquelle plusieurs fractures sont localisées et enfin le socle sain qui constitue le substratum de ces deux couches. Les couches sont séparées par des zone intermédiaire appelée toit ou mur. Cette variation des épaisseurs traduit l'hétérogénéité des différentes couches. La structure de l'aquifère est représenté de façon simplifier afin d'aider à l'implantation de nouveau forage.

RESULTATS ET DISCUSSION

3.2. DISCUSSION

L'analyse de 60 lithologs de forage a permis de proposer un modèle de profil d'altération. Celui-ci présente du sommet à la base une structuration verticale avec trois couches distinctes : La couche des altérites constituée essentiellement d'argile, la couche granitique fissurée et la roche saine. Ce profil est en accord avec ceux proposés ces dernières années en milieu de socle (Wyns *et al.*, 2004 ; Dewandel *et al.*, 2006 ; Courtois *et al.*, 2009; Lachassagne *et al.*, 2011) et qui soutiennent que la conductivité hydraulique des aquifères de socle est due au processus d'altération et non à la fracturation tectonique et à la décompression lithostatique. La roche saine du département de Yamoussoukro composée essentiellement de roche granitique est sensible à l'altération. En effet, les travaux de Koita (2010) dans la région de Dimbokro-Bongouanou ont montré que le démantèlement des produits d'altération des granites est favorisé par l'absence de croûtes ferrugineuses (cuirasses ferrugineuses) dans les profils, et donc de protection vis-à-vis des processus d'érosion. Dans cette zone, l'épaisseur totale d'altération varie entre 1,85 et 54,89 m, ce qui est supérieur à celle obtenue par Koita (2010) à Dimbokro (2 à 20 m) mais inférieur à celle proposée par Wyns *et al.* (1999) qui peut atteindre près de 100 m. Cette différence d'épaisseur pourrait être liée à la structure du granite. La variation des épaisseurs d'altération pourrait aussi dépendre de l'intensité de fracturation, du type de climat, du processus d'altération et des conditions de drainage (Lasm, 2000). Les valeurs de perméabilités issues de l'interprétation de l'essai de pompage sur chaque forage des aquifères du département sont comprises entre $2,93 \cdot 10^{-8}$ et $2,67 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une moyenne de $1,52 \cdot 10^{-6}$ m/s. Dans la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), Kouassi *et al.* (2013) ont obtenu des valeurs allant de $1,79 \cdot 10^{-8}$ et $3,80 \cdot 10^{-6}$ m/s pour une moyenne de $6,35 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les résultats de cette étude ne sont pas identiques à ceux obtenus par Kouassi *et al.* (2013). En effet, Cette étude a été menée à partir de la transmissivité par la méthode de Cooper-Jacop alors que Kouassi *et al.* (2013) se sont appuyés sur la méthode Hvorslev pour l'estimation de la conductivité hydraulique. Les AE diminuent avec la profondeur, et la zone la plus productrice se localise sous les couches d'altération là où les fractures sont les plus décomprimées et les mieux ouvertes. Au-delà de cette zone de 40 à 70 m les débits des AE chutent avec la fermeture progressive des fractures sous l'effet de la charge lithostatistique (Lasm, 2000 ; Biemi, 1992). Les résultats sont en accord avec les résultats des travaux menés en milieu de socle par Wyns *et al.* (2003) ; Koita (2010), Lachassagne *et al.* (2011) et Konan (2019). Ces auteurs ont montré qu'au niveau de l'horizon fissuré, la fréquence des fissures diminue avec la profondeur. Ils indiquent aussi que le développement de la fissuration est lié au processus d'altération,

RESULTATS ET DISCUSSION

principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotites en particulier) dont le gonflement provoque la fissuration (Yaichi B & Banali H, 2013). Dans le département de Yamoussoukro, on peut retenir que les profondeurs varient de 50.27 à 105.35 m avec une moyenne de 74.87 m. Les horizons les plus productives se localisent entre 40 et 80 m dans le sous-sol. La variation des débits en fonction de l'épaisseur montre que l'importance des débits des forages ne semble pas établir une relation particulière avec la puissance des altérites de façon générale. Cette hypothèse se justifie par le fait que l'on ne tient pas compte ni de la nature des altérites, ni de la roche mère dont elles sont issues (N'go *et al.*, 2005). En effet, certains auteurs (Biscaldi, 1967 et Dibi *et al.*, 2004) ont montré que la productivité des forages augmente avec l'épaisseur des altérites sur les roches cristallines et cristalloyphylites Ceci est conforme aux travaux effectués en Côte d'Ivoire par Jourda (2005), N'Go *et al.* (2005), Youan (2008), Kouassi (2018) et Konan (2019) fixant l'existence de fissures ouvertes entre 50 et 70 m de profondeur. Dans le même contexte de socle, N'Go *et al.* (2005) et Koita *et al.* (2010) suggèrent les profondeurs comprises entre 40 et 70 m comme profondeurs optimales. Les épaisseurs d'altérites peuvent alors fournir des débits intéressants. Les transmissivités calculées s'apparentent à celles rencontrées dans d'autres régions de socle de la Côte d'Ivoire (Lasm, 2000 ; Onetié *et al.*, 2011). De plus, ces transmissivités sont similaires à celles de Mangoua (2013) dans le bassin de la Baya qui a obtenu des valeurs qui s'échelonnent entre $1,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ et $3,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne géométrique de $1,19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; de Soro (2002) dans la région d'Aboisso et dans la région de Yaoundé par Ewodo *et al.* (2012) et aussi à celles calculées par Kouassi (2018) et Konan (2019) qui ont travaillé dans la région de Daloa. La corrélation entre transmissivité et débit d'exploitation est 0,0002. Cette corrélation n'est pas significative, cela montre que la productivité des forages n'est probablement pas influencée par la transmissivité aux droits des forages. Ce résultat est en accord avec les études menées par Mangoua (2013) à l'Est de la Côte d'Ivoire dans le bassin versant de la Baya. L'application des S.O.M montre qu'il existe une corrélation entre les différents paramètres hydrodynamiques utilisés. En effet, l'analyse des résultats des regroupements montre qu'il existe une corrélation entre les paramètres NS, EA et P_t et les autres (Q, P et T). Le débit, la transmissivité et la perméabilité qui évoluent dans le même sens indiquent que plus l'épaisseur de socle foré est grande, plus la productivité des ouvrages de captage diminue avec la diminution de fractures et moins d'arrivée d'eau productive. De plus, Cette corrélation signifie qu'une forte profondeur et une importante épaisseur d'altération en terrain schisteux entraînerait une augmentation du niveau d'eau dans les aquifères (Dibi *et al.*, (2004), Mangoua (2013). En effet, l'épaisseur importante des altérites à un effet favorable sur la fonction capacitive de l'aquifère d'altérites et donc la pérennité du

RESULTATS ET DISCUSSION

débit, ainsi que sur la fonction drainante de l'aquifère de fissures (Koïta, 2010). Le débit d'exploitation du forage est ainsi conditionné par la disponibilité de l'eau dans les aquifères. Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères nous montre qu'il existe deux types d'aquifères dont l'aquifère des altérites localisées au-dessus de la couche fissurée et l'aquifère de la couche fissurée principale nappe captée dans la recherche de l'implantation des forages. Dans le département de Yamoussoukro la deuxième nappe offre un débit plus important que la première. Cette différence observée au niveau de l'aquifère signifierait que La zone d'étude comprend deux grands ensembles géologiques que sont les formations cristallines et cristallophylliennes qui constituent les principaux aquifères (Soro, 2009).

CONCLUSION

CONCLUSION

Le but de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance des formations géologiques du système aquifère en milieu de socle dans le département de Yamoussoukro. En effet 4 forages issus des lithologs ont permis d'élaborer le modèle du profil d'altération de direction Nord-Sud. Ce modèle est composé du sommet à la base d'une couche d'altérite argileuse, d'une couche fissurée granitique, d'un socle sain et montre une hétérogénéité entre les différents profils. La profondeur des forages varie entre 51,84 m et 105,35 m avec une profondeur moyenne de 77,59 m, l'horizon la plus productive se situe entre 40 et 80 m de profondeur. L'épaisseur des altérites est comprise entre 1,85 et 54,89 m avec une moyenne de 21.19 m. les débits très élevés supérieurs à 5 m³/h appartiennent aux forages dont les épaisseurs d'altérations se situent entre 10 et 55 m. Les arrivées d'eau les plus productives se localisent dans les 70 premiers mètres de profondeur. Les transmissivités calculées à l'aide des remontées des essais de pompages oscillent entre 10⁻⁶ m²/s et 10⁻³ m²/s avec une moyenne de 1,02.10⁻⁴ m²/s avec un coefficient de variation de 284,58 %. L'interprétation des paramètres hydrodynamiques par la méthode des S.O.M montre que les forages productifs sont ceux qui ont une bonne transmissivité, une bonne perméabilité, une profondeur d'altération moyenne et une faible profondeur totale. Le modèle conceptuel met en évidence trois couches d'épaisseur différente mais superposée, deux aquifères ont été distingués et sont les aquifères caractéristiques du système cristallin ou cristallophyllien du socle.

Dans le souci de rechercher des zones favorables à l'implantation de forage pour réussir un projet d'alimentation en eau potable dans le département de Yamoussoukro, les études doivent être poursuivies afin d'appréhender d'avantage l'aquifère de socle et les écoulements qui s'y déroulent. De ce fait, il est aussi souhaitable d'avoir une bonne connaissance de l'environnement géologique. D'abord, les essais de pompages par palier doivent être suivis d'essai de pompage longue durée pour les débits plus significatifs afin de connaître les limites de l'aquifère. Ensuite, il est nécessaire qu'une étude géophysique approfondie soit menée en vue d'établir une carte de résistivité et enfin, modéliser les écoulements et le transport dans les aquifères fracturés de la zone.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCE

- Biemi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique, et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Marahoué (Cote d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 479 p.
- Biscaldi R. (1968). Problème hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical. Bulletin BRGM, 2è Série, Section III, 2 : 7-22.
- Courtois N., Lachassagne P., Wyns R., Blanchin R., Bougaire F., Some S. & Tapsoba A. (2009). Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Ground Water*, 4 : 269-283.
- CPCS (1967), Classification des sols, travaux de la commission de Pédologie et de cartographie des sols, laboratoire de Géologie-Pédologie de l'ENSA de GRIGNON, 87p.
- Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C. & Krishnamurthy. (2006). A generalized 3D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Hydrology Journal*, 330 : 260-284.
- Dibi B., Inza D., Goula B. T. A., Savane I. et Biémi J. (2004). Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-est de la côte d'ivoire). *Sud Sciences et Technologies*, 13 : 22 - 31.
- Ewodo M.G., Ombolo A., Fouépé T. A., Bon A. F. & Ekodeck G. E. (2012). Etude des Paramètres hydrauliques des aquifères de sub-surface du bassin versant de la Mingosso, région de Yaoundé, *Journal of the Cameroun Academy of Sciences*, 13 : 123-127
- Jourda J.R.P. (2005). Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelle. Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 430 p.
- Konan Y.E.D (2018). Caractérisation hydrogéologique du système aquifère du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la côte d'Ivoire), Mémoire de master, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, 59 p.
- Koita M. (2010). Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Hérault en France), 220 p.

REFERENCE

- Kouassi A. M., Okaingni J. C., Kouakou K. E & Biémi J. (2013). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien : Cas de la région de N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studie*. 2 : 61-71.
- Kouassi K.J.M. (2017). Modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère d'Altérite : cas de la ville de Daloa (Cote d'Ivoire), Mémoire de master, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa), 73 p.
- Lasm T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyse statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine Archéen). Thèse unique de Doctorat, Université de Poitiers (France), 274 p.
- Lachassagne P., Wyns R. and Dewandel B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23: 145-161.
- Leblond P. (1984). Contribution aux études hydrogéologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro (Station expérimentale de l'ENSTP). *Thèse de 3è cycle de l'Université de Bordeaux I* (Bordeaux en France), 150 p.
- Mangoua M. J., Touré S., Goula B. T. A., Yao K. B., Savané. I et Biémi J. (2010). Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 16 : 243-259.
- Niamké K. H., Saley M. B., N'dri B. E., Ouattara A. et BIÉMI J., (2008). Contribution à l'interprétation des linéaments par L'exploitation des Pseudo Images, de L'hydrographie en Région Tropicale Humide: Cas du N'zi-Comoe (Centre de la Cote D'ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 24 (1) : 74-93.
- N'go Y. A., Gone D. L., Savane I. et Goble M. M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydro-climatique et physique. *Afrique SCIENCE*, 01 (1) : 127-144.
- N'go Y. A., Lasm. T., Koita M. et Savane I., (2010). Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Revue Télédétection*, 9 (1) : 33-42.
- Onitié Z.O., Lasm T., Baka D., Fossou N.M., Kouakou A.O.S., Youan Ta M., De Lasm O.Z., Oga M.S. & Soro N. (2010). Influence des pertes de charges quadratiques sur la transmissivité et le débit spécifique déterminé sur des forages isolés : cas de la région de

REFERENCE

- Korhogo au Nord de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoire Science et Technologie*, 16 : 261-283.
- Projet Riz Centre (1998), Rapport technique de réhabilitation du périmètre irrigué de nanan centre de la Côte d'Ivoire (Yamoussoukro), 45 p.
- RGPH, (2014) : Résultats globaux, Recensement général de la population et de l'habitat 2014, secrétariat technique permanent du comité technique du RGPH (Yamoussoukro centre de la Côte d'Ivoire), 26 p.
- Sombo A.P., Kouakou K.E.G., Kouassi F.W., Koudou A. & Bie G.R. (2017). Profil d'altération et potentiel aquifère en zone de socle cristalline au Sud de la Côte d'Ivoire. *International journal of Innovation and Applied studies*, 19 : 919-928.
- Soro N. (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse d'Etat en Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 254 p.
- Sary B.(1985), *du village à la capitale : L'émergence de Yamoussoukro à travers la presse et le discours officiel ivoirien*, mémoire de maîtrise de géographie, paris, 288 p.
- Wyns R., Gourry J. C., Baltassat J.M. & Lebert F. (1999). Caractérisation multiparamètres des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré. 2ème Colloque GEOFCAN. I. BRGM, UPMC. (Orléans, France) : 105-110
- Wyns R., Baltassat J.-M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., Mathieu F., 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175, pp. 21–34. doi:10.2113/175.1.21
- Wyns R., Quesnel F., Simon-Coinçon R., Guillocheau F. & Lacquement F. (2003). Major weathering in France related to lithospheric deformation. *Géologie de France*, 1 : 79–87.
- Yaichi B. & Banali H. (2013). Les altérations des granites et des basaltes. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Sciences de la Terre de l'Université d'Oran Belgaïd, Algérie, 69 p.
- Youan T. M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 237 p.

RESUME

L'insuffisance de la quantité de l'eau dans les forages, le tarissement des pompes hydrauliques et les échecs observés lors de l'implantation des forages restent un problème majeur dans le département de Yamoussoukro mettant ainsi en mal la connaissance du système aquifère dans lequel les eaux souterraines sont captées. Delors la caractérisation hydrogéologique des aquifères de fissures dans le département de Yamoussoukro qui constitue l'objectif principal de cette étude, montre que les profondeurs les plus productives se rencontrent entre 65 et 85 m. Avec une tranche de 10 à 55 m d'altérite qui offre les meilleurs débits soit 58,83% des débits. Les essais de pompages et les fiches techniques des forages ont servi à déterminer les propriétés hydrodynamiques par la méthode de la remontée de Cooper-Jacob. Ainsi les valeurs des transmissivités variant entre $9,44.10^{-6}$ et $9,4.10^{-4}$ m²/s avec une moyenne géométrique de $2,29.10^{-4}$ m²/s ceux-ci illustrent que les aquifères de socle du département de Yamoussoukro ont une bonne fonction conductrice.

De plus, une étude statistique a porté sur la productivité des aquifères fissurés du département de Yamoussoukro par l'analyse comparative des débits et les paramètres physiques d'une part et l'analyse multi-paramètre avec la méthode des SOM (Carte Auto-organisatrice de Kohonen)

Mots-clés : Hydrogéologie, productivité, aquifères, transmissivité, Yamoussoukro.

ABSTRACT

Insufficient quantity of water in the boreholes, the settling of the hydraulic pumps and the failures observed during the installation of the boreholes remain a major problem in Yamoussoukro department, putting the underground bilges are captured. The hydrogeological characterization of aquifers of cracks in Yamoussoukro, which constitutes the main objective of study The depths productive pals meet between 65 and 85 m, the 10 to 55 m range of alterity offers the best flows 58,83 %. The value transmissions varying between $9,44.10^{-6}$ et $9,4.10^{-4}$ m²/s which a geometric mean $2,29.10^{-4}$ m²/s illustrated that the basement aquifers of the department have a good conductive function.

The pumping test and the technical sheets boreholes were used to determine the hydrodynamic properties by Cooper- Jacob upwelling method. In addition, a statistical study focused on the productivity of the fissured aquifers in Yamoussoukro department by the comparative analysis of the flow and the physical parameters on the one hand and the multi-parameter analysis the method of SOM (Self- Organizing Map of Kohonen)..

Keywords: Hydrogeology, productivity, aquifers, transmissivity, Yamoussoukro.