

## Conception de modèles statistiques à variables hydrogéologiques pour la prévision de la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieux de socle en Côte d'Ivoire

### [ Design of statistical models using hydrogeological variables for predicting the depth limit stop of water drilling in crystalline and crystallophyllian rocks in Ivory Coast ]

*Amani Michel Kouassi<sup>1</sup>, Koffi Eugène Kouakou<sup>1</sup>, Kouao Kabran Roland Kadio<sup>2</sup>, and Jean Biemi<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ;  
Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ;  
Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup>Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro ;  
Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG) ; Bp: 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody,  
Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM) ;  
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) ; 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2014 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The objective of this study is to develop statistical models to predict the depth limit stop of water drilling in crystalline and crystallophyllian rocks using physical parameters of drilling. The study was conducted using data from physical parameters (depth of drilling, depth of the first water supply significant, alteration thickness and thickness of base drilled) from geological units of Archean and Paleoproterozoical domains of Ivory Coast. The methodology consisted of first analyze the physical parameters from the simple statistical features and frequency class distribution of these parameters. Then, a normalized principal components analysis (NPCA) was applied for the identification of explanatory variables relevant and expressive of drilling depth limit. Finally, a calibration was performed with a sample of 1,605 wells representing two thirds of the total sample to determine the coefficients of the linear regressions and the associated standard errors. The analysis of the distribution of physical parameters of drilling shows that only the depth of drilling is homogeneous (24.50%) with an average of 68.17 m. The most relevant and expressive variables for predicting the depth limit stop of water drilling in crystalline and crystallophyllian rocks are the depth of the first significant water arrival and the thickness of alteration. The errors associated with the regression coefficients generally low (below 1%) reflect the close relationship between the dependent variables and the explanatory variables. Two models for predicting the depth limit stop of water drilling (PROLIFE models) in crystalline and crystallophyllian rocks were developed.

**KEYWORDS:** Statistical modeling; PROLIFE models; Productivity; Crystalline and crystallophyllian aquifers; NPCA; Calibration; Ivory Coast.

**RÉSUMÉ:** L'objectif de cette étude est de concevoir des modèles statistiques capables de prévoir la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieux de socle à partir de paramètres physiques de forage. L'étude a été menée à partir des données de paramètres physiques (profondeur de forage, profondeur de la première arrivée d'eau significative, épaisseur d'altération et épaisseur de socle foré) issues des ensembles géologiques des domaines archéen et paléoprotérozoïque de Côte d'Ivoire. La méthodologie a consisté d'abord à analyser les paramètres physiques utilisés à partir des caractéristiques statistiques simples et des fréquences de distribution des classes de ces paramètres. Ensuite, une analyse en composantes principales normées

(ACPN) a été appliquée pour l'identification des variables explicatives pertinentes et expressives de la profondeur limite de forage. Enfin, un calage a été effectué avec un échantillon de 1605 forages représentant les 2/3 de l'échantillon total afin de déterminer les coefficients des régressions linéaires et les erreurs-types associées. L'analyse de la distribution des données de forage montre que seule la profondeur des forages est homogène (24,50%) avec une moyenne de 68,17 m. Les variables les plus pertinentes et expressives pour la prévision de la profondeur limite de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération. Les erreurs-types associées aux coefficients de régression généralement faibles (inférieures à 1%) traduisent des relations étroites entre les variables expliquées et les variables explicatives. Deux modèles de prévision de la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau (modèles PROLIFE) en milieux de socle cristallin et cristallophyllien ont été développés.

**MOTS-CLEFS:** Modélisation statistique; Modèles PROLIFE; Productivité; Aquifères de socle; ACPN; Calage; Côte d'Ivoire.

## **1 INTRODUCTION**

En Côte d'Ivoire, 97,5% du territoire est recouverte de roches cristallines et cristallophylliennes. Or dans ce milieu, l'existence d'un horizon aquifère est conditionnée par la présence de fractures ou fissures. Pour capter l'eau de ces fractures, des campagnes d'implantations géophysiques de forage sont généralement entreprises. Une fois les forages implantés, l'on a constaté que lors de la foration de ces points d'eau, la décision d'arrêt de foration n'est pas rationalisée. Certains forages sont précocement arrêtés dès l'obtention du débit escompté. En revanche, d'autres sont prolongés jusqu'à des profondeurs au-delà des clauses techniques du projet. Ainsi, dans les bases de données des campagnes de forages, les profondeurs les plus grandes sont en général celles des forages négatifs [1]. Or, selon l'environnement géologique et hydrogéologique, il existe une profondeur au-delà de laquelle les chances de trouver un horizon aquifère s'amenuisent, notamment au sein des roches cristallines du socle, du fait de la diminution de la fréquence voire la disparition des fractures perméables. En continuant un forage dans de tels cas, on crée un surcreusement inutile. L'essentiel de la perméabilité des aquifères de socle provient de la partie inférieure du profil d'altération, l'horizon fissuré stratiforme qui est situé sous les altérites meubles [2]. L'épaisseur de l'horizon fissuré peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Si l'on cumule, pour chaque campagne de forage, les différents mètres considérés comme inutiles, on aboutit en moyenne à des dizaines de kilomètres qui reviennent économiquement très chers à l'Etat [1]. Il est donc nécessaire voire indispensable de rechercher une profondeur limite qui est la profondeur au-delà de laquelle il n'est plus possible d'obtenir une venue d'eau significative, puisque la base de l'horizon fissuré est atteinte.

La modélisation statistique peut apporter une contribution à une telle initiative. En effet, elle est souvent utilisée dans la résolution des problèmes de façon générale et en particulier dans le domaine de l'hydrogéologie. Les modèles les plus sollicités dans la résolution des problèmes en hydrogéologie sont les modèles linéaires de base qui englobent la régression linéaire simple et la régression linéaire multiple, les modèles linéaires généralisés qui englobent la régression logistique et la régression de Poisson, et enfin les modèles non linéaires qui englobent la régression non paramétrique, les GAM (Generalized Additive Models) et les réseaux de neurones artificiels. La régression linéaire multiple a été utilisée par plusieurs auteurs [1, 3, 4, 5], pour les simulations de paramètres hydrodynamiques en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. En effet, plusieurs travaux ont montré qu'il existe une relation linéaire entre d'une part, la profondeur des forages et l'épaisseur de socle foré, et d'autre part, les paramètres physiques de forage tels que l'épaisseur de l'horizon altéré, la profondeur de la première arrivée d'eau, le nombre d'arrivée d'eau, l'épaisseur de recouvrement alluvio-colluvial, etc. [1, 3, 4, 6, 7, 8, 9].

Tous ces travaux ont permis de montrer que les relations mathématiques qui lient la profondeur des forages et l'épaisseur de socle foré (paramètres expliqués) à ces paramètres (paramètres explicatifs) sont des régressions linéaires multiples. Ainsi, la profondeur limite d'arrêt des forages en milieux de socle cristallin et cristallophyllien et l'épaisseur de socle foré ont été modélisées à partir de la régression linéaire multiple [1, 3, 4]. Ces auteurs sont parvenus à établir des modèles capables de prédire la profondeur à laquelle l'on devrait arrêter les forages en milieux de socle et l'épaisseur de socle foré nécessaire à l'obtention d'un débit significatif (supérieur ou égal à  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ). L'épaisseur de socle forée reste aussi une variable à simuler en ce sens qu'elle est essentielle dans l'optimisation de la profondeur limite des forages [1]. En effet, l'épaisseur de socle foré est, en réalité, l'élément autour duquel le problème d'optimisation se pose. Elle est variable dans l'espace et fonction des formations géologiques. En optimisant ce paramètre, la profondeur totale de l'ouvrage peut être par la même occasion optimisée [10].

Cette étude vise la conception de modèles statistiques à partir de la régression linéaire multiple dont les variables explicatives sont capables de prévoir la profondeur limite d'arrêt des forages d'eau dans les formations cristallines et

cristallophylliennes. Il s'agit de concevoir des modèles avec un nombre limité de variables explicatives que ceux déjà existants, mais plus performants.

Pour atteindre cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis:

- i. l'analyse des données de l'étude ;
- ii. l'identification des variables explicatives pertinentes dans la détermination des profondeurs limites des forages et des épaisseurs de socle foré ;
- iii. le calage des modèles à travers la détermination des coefficients de régression et erreurs-types des différentes équations.

La méthodologie adoptée a essentiellement consisté d'abord à analyser les caractéristiques statistiques et les fréquences de distribution des paramètres physiques. Ensuite, une analyse en composantes principales normées (ACPN) a été appliquée à partir des différents paramètres pour identifier les variables explicatives pertinentes pour la modélisation de la profondeur limite et de l'épaisseur de socle foré. Enfin, un calage a été réalisé pour déterminer les coefficients de régression et erreurs-types des différentes équations de la régression linéaire multiple.

## 2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### 2.1 LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

La Côte d'Ivoire fait partie des pays du Golfe de Guinée. Elle s'étend sur une superficie de 322 462 Km<sup>2</sup>, environ 1% du continent africain. Ses frontières dessinent approximativement un carré s'inscrivant entre les coordonnées de 2°30'et 8°30'de longitude Ouest, 4°30' et 10°30' de latitude Nord avec, au Sud, une façade littorale de 550 Km. Elle est limitée au Nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'Est par le Ghana, à l'Ouest par la Guinée et le Libéria et au Sud par l'océan atlantique (Figure 1).



Figure 1: Localisation de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest (Brou, 2005).

## **2.2 CONTEXTE CLIMATIQUE ET COUVERT VEGETAL**

En Côte d'Ivoire, on distingue quatre grandes zones climatiques. Le climat subéquatorial dans le Sud (climat Attiéen) est caractérisé par des températures de faibles amplitudes (de 25 à 30 °C), un fort taux d'humidité (de 80 à 90%) et des précipitations abondantes, qui atteignent à Abidjan 1 766 mm et à Tabou 2 129 mm. Ce climat est constitué de deux saisons sèches et deux saisons humides. Le climat tropical humide (climat baouléen) couvre le Centre du pays. Les températures, à amplitudes plus importantes, y oscillent entre 14 et 33 °C, avec une hygrométrie de 60 à 70% et des précipitations annuelles moyennes de 1 200 mm. Cette région climatique connaît également quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses). Le climat tropical de transition (climat soudanais) concerne principalement la partie nord du pays. Les amplitudes thermiques quotidiennes et annuelles y sont relativement importantes, de l'ordre de 20 °C, le taux d'humidité, inférieur à celui du Sud du pays, varie de 40 à 50 %. La zone considérée est caractérisée par la présence intermittente entre les mois de décembre et février d'un vent frais et sec, l'harmattan. On y relève deux saisons: l'une sèche, de novembre à juin, ponctuée par quelques pluies au mois d'avril, et l'autre pluvieuse, couvrant la période de juillet à octobre. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées sont généralement inférieures à 1000 mm. Un climat de type montagneux règne au niveau de l'Ouest de la Côte d'Ivoire avec des hauteurs pluviométriques annuelles dépassant parfois les 2 000 mm. Ce régime se caractérise par deux saisons, une longue saison des pluies qui s'étend sur huit mois (de mars à octobre) et une petite saison sèche qui dure quatre mois (de novembre à février). Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux. Les températures annuelles varient globalement de 15 à 33°C avec une moyenne de 25°C. Une moyenne de 2 272 heures d'ensoleillement par an est enregistrée. L'humidité relative varie entre 61 et 99% avec une valeur moyenne de 98% à Man. Les vents de direction N-S (harmattan et alizé boréal) sont dominants en saison sèche tandis qu'en saison des pluies, c'est le vent de la mousson de direction NW- SE qui prédomine.

Deux grands types de paysages végétaux sont présents sur le territoire ivoirien : un paysage forestier et un paysage de savane. Le premier couvre la moitié sud du pays et appartient au domaine guinéen. Le second occupe la moitié nord de la Côte d'Ivoire et se rattache au domaine soudanais [11]. Le domaine guinéen a une végétation prépondérante de forêt dense humide. On y distingue 4 secteurs caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondants à des conditions écologiques différentes [11]. La zone soudanaise au Nord de la Côte d'Ivoire se subdivise en deux secteurs : le secteur sub-soudanais et le secteur soudanais [11]. Sur l'ensemble de ces deux secteurs, la végétation se présente comme une juxtaposition de formations forestières et de formations savaniques, la localisation de ces formations dépendant des facteurs climatiques, édaphiques et anthropiques [11].

## **2.3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE**

La Côte d'Ivoire se situe au Sud du craton ouest africain et son histoire géologique s'intègre à celle de la dorsale de Man. Les unités lithologiques ont été affectées par trois orogénèses : Léonienne (3,5–2,9 Ga), Libérienne (2,9–2,4 Ga) et Eburnéenne (2,4–1,6 Ga). La dorsale de Man se subdivise en deux grands domaines à savoir le domaine archéen à l'Ouest appelé «Kénéma-Man» et le domaine paléoprotérozoïque dit «Baoulé-Mossi» à l'Est, séparés par l'accident majeur de Sassandra (Figure 2). Le domaine archéen a été affecté par des déformations tectoniques très importantes attribuées à deux orogénèses, à savoir, l'orogénèse léonienne (3500-2900 Ma) et l'orogénèse libérienne (2900-2500 Ma). Il est caractérisé par les reliefs les plus accidentés de la Côte d'Ivoire. L'essentiel du domaine archéen (plus de 80%) est constitué par les formations libériennes qui se trouvent essentiellement dans la région de Man. Ces formations sont composées de granulites, de migmatites et d'amphibolo-pyroxénites qui sont des métas-sédiments catazonaux. Elles occupent essentiellement l'Ouest et le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire [12, 13]. A ces formations libériennes, sont associées de nombreuses reliques de formations léoniennes essentiellement représentées par un complexe de base cristallin constitué de migmatites et de gneiss granulitiques, connu aussi sous le nom de granito-gneiss et les ceintures supracrustales. A ces deux ensembles s'associent des granites et des charnockites sous forme d'intrusion dans le socle granito-gneissique, ou sous forme de mobilisation anatexique [13].

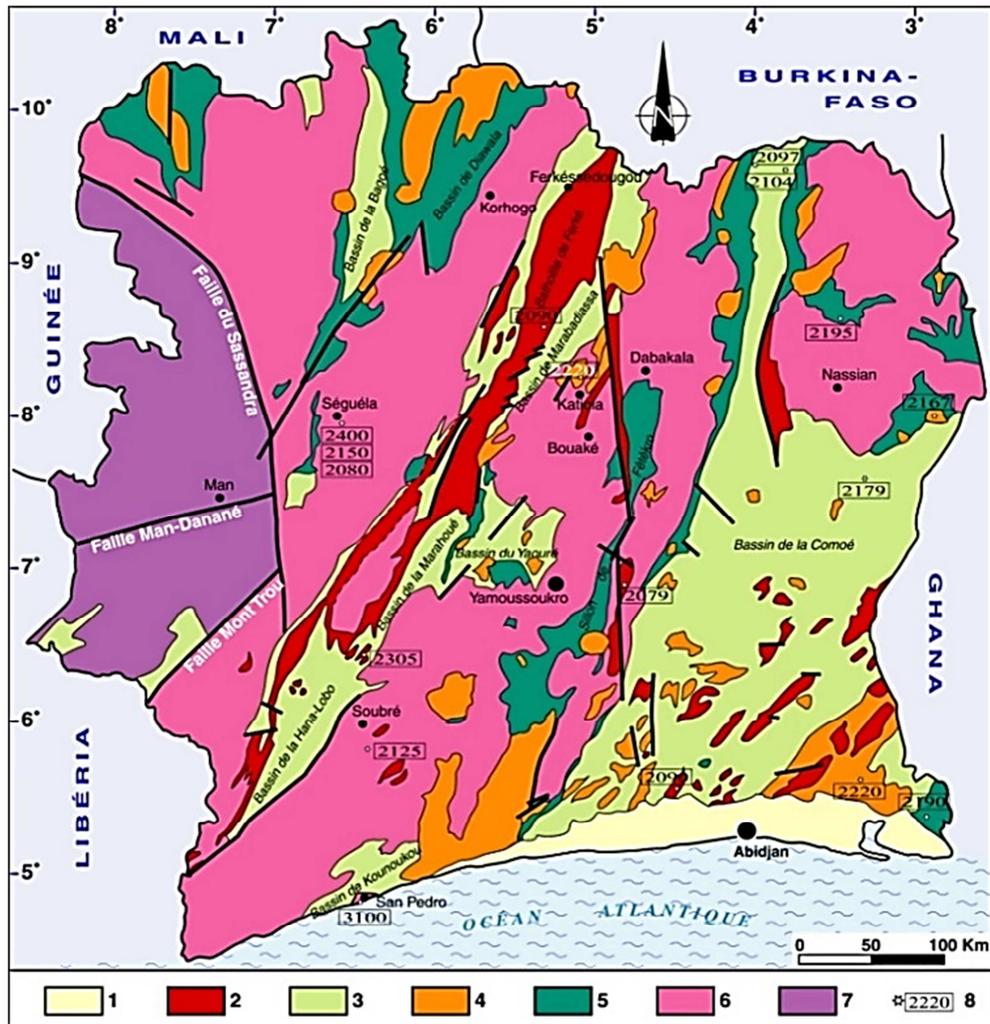


Figure 2: Carte géologique de la Côte d'Ivoire [14]

1. Formations post-birmiennes (bassins sédimentaire côtier). 2. Granitoïdes à deux micas associés ou non aux structures décrochant méridiennes. 3. Bassins sédimentaires et volcano-sédimentaires. 4. Granitoïdes calco-alcalins localisés dans les bassins sédimentaires. 5. Volcanisme et volcano-sédiments indifférenciés. 6. Granitoïdes et granites rubanés gneiss et migmatites indifférenciés (âges supérieurs à 2,4 Ma). 7. Domaine archéen. 8. Ages.

Le domaine paléoprotérozoïque subdivisé en deux grands sous-ensembles a été structuré au cours du mégacycle éburnéen. Ce domaine est constitué d'un socle granito-gneissique et de formations volcano-sédimentaires. Le socle granito-gneissique représente plus de la moitié des formations du domaine Baoulé-Mossi. C'est un ensemble de roches granitiques généralement foliées et migmatisées par endroits. Quant aux ceintures volcaniques, elles bordent généralement les sillons sédimentaires et sont orientées N-S à NE-SW. Les granitoïdes intrudant ces formations sont de composition tonalitique à granodioritique et sont discordants. Les formations volcano-sédimentaires sont essentiellement des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, métagabbro, amphibolite.

#### 2.4 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

En Côte d'Ivoire, les réservoirs d'eaux souterraines de socle se rencontrent dans les horizons d'altérites ainsi que dans les séries volcano-sédimentaires et granito-migmatitiques. Les réservoirs d'altérites varient selon la nature du socle. Ainsi, sur les granitoïdes, ils sont composés, de haut en bas, de cuirasse latéritique, sables argileux et arènes grenues dont l'épaisseur peut atteindre 50 m. Les arènes grenues constituent les niveaux les plus productifs et donc les plus recherchés. Les réservoirs d'altérites des séries volcano-sédimentaires sont en général les plus épais et peuvent atteindre 100 m. Les séries volcano-

sédimentaires sont des complexes schiste-gréseux très hétérogènes à nombreux plis isoclinaux, dont les flancs sont généralement redressés. Ces roches se caractérisent par d'importantes schistosités pouvant augmenter la porosité des réservoirs. Elles peuvent également acquérir des potentialités en eau énormes, quand elles sont affectées par des phénomènes de fracturation. Leur perméabilité est généralement faible et donc les ressources qu'elles renferment sont limitées. Cependant, dans les cas où la roche présente une intercalation détritique ou volcano-détritique jouant le rôle de drain, ces réservoirs peuvent acquérir une importante fonction capacitive en profondeur [15]. Les réservoirs des granito-migmatites sont caractérisés par un nombre élevé des arrivées d'eau dans les forages profonds réalisés directement dans le socle. Ce qui témoigne de la richesse en eau des formations cristallines, non nécessairement altérées [15]. L'eau circule dans les roches cristallines à travers les réseaux de fractures à fonction drainante, généralement bien alimentés et capables de fournir des débits assez importants quand ils sont bien captés par les forages. En effet, le socle cristallin et cristallophyllien des domaines archéen et paléoprotérozoïque, unités géologiques qui intéressent notre étude, constituent le domaine des aquifères fissurés qui se sont formés au cours des divers événements tectoniques qui les ont affecté en y laissant d'importants réseaux de fissures plus ou moins connectés qui sont à l'origine de la formation des nappes souterraines [16-22]. A l'heure actuelle, les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins influençables par les fluctuations saisonnières. Quant aux puits réalisés dans les altérites, ils sont placés sous l'influence directe du rythme des saisons.

### **3 MATERIEL ET METHODES**

#### **3.1 DONNÉES**

La collecte des données sur les paramètres physiques des forages a été faite par le biais de dossiers de forage de différents projets et programmes d'hydraulique villageoise réalisés au cours de la période 1970-2010. Ces données proviennent de plusieurs programmes:

- programmes d'hydraulique villageoise réalisés au cours de la période 1970-1996 ;
- programmes financés par la Banque Arabe pour le Développement Economique en Afrique (BADEA) au cours de la période 1999 à 2000 ;
- 4<sup>ème</sup> Programme d'Urgence et de Réhabilitation (PUR-4) réalisé dans la période 2009-2010 et financé par l'Union Européenne ;
- projet du Comité d'Examen et de Suivi des Projets et Programmes de la Filière Café Cacao (CESPPCC) réalisé au cours de l'année 2009;
- projet d'approvisionnement en eau potable en milieu rural (don Japonais) au cours de la période 1999-2000.

Plusieurs fiches techniques renseignant sur les paramètres physiques des forages ont été retenues. Il s'agit notamment de la profondeur totale du forage (m), l'épaisseur d'altération (m), l'épaisseur forée dans le niveau fissuré (m) et de la profondeur de la première arrivée d'eau significative (m).

#### **3.2 METHODOLOGIE RELATIVE A LA CONCEPTION DES MODELES**

##### **3.2.1 ANALYSE DES PARAMÈTRES ÉTUDIÉS**

Les caractéristiques statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation ( $CV = \text{écart-type} / \text{moyenne}$ ) ont été appliquées.

Les fréquences de variation des paramètres physiques utilisés ont été également analysées. En effet, il existe des règles à respecter pour réaliser une discrétisation correcte :

- i) aucune classe ne doit être vide ;
- ii) les limites de classe doivent couvrir l'ensemble de la distribution ;
- iii) les limites de classe ne doivent pas se chevaucher.

La discrétisation commence par le choix du nombre de classes. Suivant le nombre d'individus de la série statistique, la forme de la distribution et les contraintes visuelles, de façon générale, le nombre de classes ne devrait pas dépasser 7 à 8. En règle générale, on choisit des classes de même amplitude. Pour que la distribution en fréquence ait un sens, il faut que chaque classe comprenne un nombre suffisant de valeurs ( $N_i$ ). Deux formules empiriques ont permis de déterminer le nombre de classes (C) pour un échantillon de taille n (équations 1 et 2):

- règle de Sturge:  $C = 1 + 3,3 \log n$  ; (1)
- règle de Yule:  $C = 2,5 \cdot (n)^{1/4}$ . (2)

L'intervalle de classe (I) est calculé par (équation 3):

$$I = (X_{\max} - X_{\min}) / C \quad (3)$$

Dans l'équation 3,  $X_{\max}$  et  $X_{\min}$  sont respectivement les valeurs maximale et minimale observées sur l'ensemble des échantillons pour un paramètre donné, C le nombre de classes défini. On calcule ensuite à partir de « $X_{\min}$ », les classes successives par addition de l'intervalle de classe I, d'abord à la valeur minimale observée sur l'échantillon, puis à la borne supérieure de chacune des classes jusqu'à obtention de la dernière classe.

L'étude de la normalité des différents paramètres étudiés a été effectuée à partir du logiciel Kronostat 1.01.

### 3.2.2 IDENTIFICATION DES VARIABLES EXPLICATIVES DES MODELES

L'ACPN a été effectuée sur 2406 forages d'eau afin de mettre en évidence les phénomènes et partant les paramètres qui semblent influencer la profondeur de forage et l'épaisseur de socle foré. Cette méthode a déjà fait l'objet de plusieurs applications en Côte d'Ivoire [1, 18, 23, 24]. Les variables physiques des forages prises en compte dans cette étude sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1) et l'épaisseur d'altération. Pour l'analyse des résultats, les éléments statistiques retenus sont les valeurs propres, les vecteurs propres des facteurs, la matrice de corrélation et le cercle de communauté définis auquel sont liés les axes factoriels.

L'ACPN appliquée aux données d'une zone n'est valable que lorsque les plans factoriels donnent plus de 70% de l'information (variance totale exprimée). Une valeur propre est choisie lorsqu'elle est supérieure ou égale à 1 sachant que la somme des valeurs propres est égale au nombre de variables utilisées pour la réalisation de l'ACPN. Elle a été réalisée à partir du logiciel Statistica 8.0.

### 3.2.3 PROCESSUS DE MODÉLISATION

La régression linéaire multiple peut être utilisée pour prévoir les valeurs d'une variable dépendante à partir de variables explicatives ou indépendantes [25]. En effet, les régressions linéaires multiples sont utilisées pour trouver la relation linéaire la plus satisfaisante pour prévoir la valeur dépendante qui produit l'erreur-type la moins grande. Dans un tel modèle, chaque variable indépendante est pondérée afin que la valeur des coefficients de régressions maximise l'influence de chaque variable dans l'équation finale. Il est possible de manipuler plusieurs variables indépendantes à partir des régressions linéaires multiples, mais seulement une variable dépendante. Dans cette étude, les caractères expliqués (variables dépendantes) sont la profondeur limite de forage et l'épaisseur de socle foré.

En ce qui concerne les variables explicatives, il s'agit des paramètres des forages dont la relation avec la productivité serait prouvée par l'analyse statistique multivariée. Il s'agit des paramètres les plus pertinents et les plus influents mis en évidence par l'analyse statistique. Dans une régression linéaire multiple, l'équation est sous la forme suivante (équation 4) :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_N X_N + C_0 \quad (4)$$

- Y : variable expliquée ;
- $X_i$  : variables explicatives ;
- $C_i$  ( $0 \leq i \leq N$ ): coefficients de pondération des variables  $x_i$ .

En effet, Y est un vecteur de valeurs des variables expliquées,  $X_i$  est une matrice de variables indépendantes ou explicatives,  $C_i$  est un vecteur de paramètres ou coefficients de régression à estimer, et  $C_0$  est un vecteur des résidus ou des perturbations aléatoires. La régression linéaire estime le vecteur  $C_i$  comme la solution des moindres carrés [26-27]:

$$C_i = (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T Y \quad (5)$$

avec  $X^T$  la transposée de X.

L'estimation des paramètres d'un modèle constitue l'une des étapes les plus pertinentes de son développement [28]. Selon cet auteur, les méthodes d'estimation sont multiples ; ceci résulte du fait que la nature des paramètres est variée et qu'il n'y a aucune méthode d'estimation globalement satisfaisante. L'estimation implique de faire des choix pour établir une stratégie de calibration. Les stratégies sont bien entendu fonctions de l'objectif visé par le modèle en tenant compte de sa

pertinence et de sa performance. Le calage des modèles s'est appuyé sur le principe du « split-sample test » qui consiste à faire le calage sur les deux tiers (2/3) de l'échantillon des données disponibles [29, 30, 31].

Les paramètres d'un modèle statistique sont liés aux données de calage, les données ont donc été prélevées en tenant compte de la géologie du socle ivoirien. Ainsi, l'échantillon constitué a été déterminé à partir de trois échantillons de même taille (802 forages), soit 2406 forages. Trois zones tests appartenant à deux grands domaines géologiques ont été retenues eu égard aux informations obtenues sur ces différentes zones qui définissent trois ensembles géologiques. Ainsi, sur le domaine archéen, on a Biankouma, Guiglo, Duékoué, Man, Danané, Bangolo, Logoualé et Bloléquin. Au niveau des granitoïdes du domaine paléoprotérozoïque, on a Korhogo, Odienné, Yamoussoukro, Bouna, Bouaké, Lakota, Divo, Bondoukou et Séguéla. Pour les formations volcano-sédimentaires du domaine paléoprotérozoïque, on a Abengourou, Agboville, Dimbokro, Bocanda, Agnibilékrou, M'Bahiakro, Bongouanou, Daoukro et Tiassalé.

Les matrices des données de calage ont été constituées à partir des 2/3 des données des trois zones tests retenues (2 406 forages), soit 1 605 forages à raison de 535 forages par zone test.

L'estimation des coefficients de pondération des variables retenues a été réalisée par calage automatique effectué à l'aide du logiciel Excel 2013. Elle a consisté à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres des modèles pour reproduire au mieux la réponse observée. Dans la présentation des résultats du calage, il est important d'associer à chacun des coefficients de régression, l'erreur-type associée, qui est un indicateur qui peut être assimilé à l'écart-type. En fait, l'erreur-type est au coefficient de régression ce que l'écart-type est à la moyenne d'une variable. Elle constitue donc une mesure de la variation du coefficient de régression. Ainsi, si plusieurs régressions étaient effectuées sur autant de sous-échantillons tirés d'un même échantillon principal, la valeur des paramètres de régression ainsi obtenus différencierait d'une fois à l'autre. La « robustesse » d'un coefficient donné sera d'autant plus grande que sa variation autour de la valeur la plus probable, soit le coefficient lui-même, est faible. C'est précisément ce que mesure l'erreur-type du coefficient.

## **4 RESULTATS ET DISCUSSIONS**

### **4.1 CARACTERISTIQUES DES PARAMETRES PHYSIQUES DES FORAGES**

Les caractéristiques statistiques des données des paramètres physiques des forages sont consignées dans le tableau 1. L'analyse de ces données montre que les profondeurs de forage (Pt) varient de 20 à 119 m avec une moyenne de 68,17 m et un écart-type de 16,7 m. La profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1) varie de 0,8 à 106,18 m avec une moyenne de 48,89 m et un écart-type de 17,46 m. L'épaisseur de l'horizon altéré (Ep\_Alt) varie de 0,3 à 104 m avec une moyenne de 25,21 m et un écart-type de 18,59 m. L'épaisseur de socle foré (Ep\_Soc) varie de 1 à 109 m avec une moyenne de 44,02 m et un écart-type de 19,46 m. La valeur du coefficient de variation des différents paramètres oscille entre 24,50% (profondeur de forage) et 73,75% (épaisseur d'altération). Tous les coefficients de variation des différents paramètres sont supérieurs à 25% sauf celui relatif à la profondeur de forage. Ces résultats montrent que la profondeur des forages est homogène alors que tous les autres paramètres sont hétérogènes. Le paramètre le plus hétérogène est l'épaisseur d'altérites.

*Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des paramètres physiques des forages*

<b>Paramètres</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>Coefficient de variation (%)</b>
<b>Pt</b>	20,00	119,00	68,17	16,70	24,50
<b>Pae_1</b>	0,80	106,18	48,89	17,46	35,71
<b>Ep_Alt</b>	0,30	104,00	25,21	18,59	73,75
<b>Ep_Soc</b>	1,00	109,00	44,02	19,46	44,21

Les résultats d'application des règles de Sturge et de Yule, avec un effectif de 2 406 forages ont donné respectivement 12 et 17 classes. Cependant, compte tenu de la contrainte selon laquelle le nombre maximal de classes admis dans le cadre d'une étude est de 7 ou 8, il a été retenu pour cette étude, 7 classes pour chaque paramètre étudié. Pour chacun des paramètres, le calcul de l'intervalle de classe a donné une valeur proche de 15 m. Ainsi, pour mieux comparer les résultats de cette analyse, un découpage en classes d'amplitude de 15 m a été adopté pour chacun des paramètres physiques de forages.

La figure 3 présente la distribution des fréquences de la profondeur des forages observés sur le socle ivoirien. Les profondeurs de forage les plus fréquentes sont comprises entre 60 et 75 m, et représentent 29,20% des valeurs de

profondeur observées sur l'ensemble des forages. Cette classe est suivie de celle des forages de profondeur moyenne comprise entre 45 et 60 m, représentant 28%. A côté de ces classes, il y a les forages de profondeur totale comprise entre 75 et 90 m, représentant 20,20% des profondeurs et également celle des forages ayant une profondeur comprise entre 30 et 45 m avec un taux de 16%. Les profondeurs de forage les moins fréquentes sur le socle ivoirien sont comprises d'une part entre 15 et 30 m, et d'autre part entre 90 et 120 m. Les valeurs observées pour les profondeurs comprises dans ces intervalles représentent moins de 10% de l'ensemble des profondeurs observées. Les profondeurs de forage généralement rencontrées sont comprises entre 45 et 75 m avec une fréquence totale de 57,20%. Les fréquences des différentes classes de forages suivent un profil en cloche et présentent une forme symétrique centrées sur la valeur moyenne, qui peut être décrite par une loi normale.

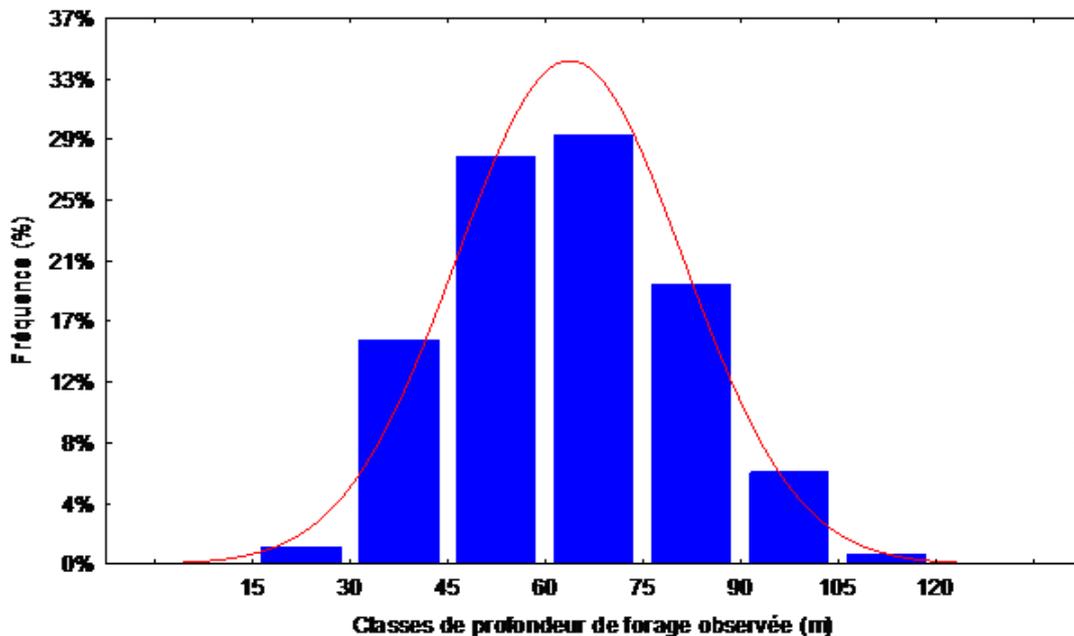


Figure 3: Fréquences des classes de profondeur de forage observée (m)

L'analyse de la figure 4 a permis de montrer que les valeurs les plus couramment rencontrées au niveau des épaisseurs forées dans le niveau fissuré représentent 78,93% des valeurs observées avec 33% pour la classe 30-45 m, 23,90% pour la classe 15-30 m et 22,03% pour la classe 45-60 m. Les forages ayant traversé le socle fissuré sur une profondeur inférieure à 15 m et supérieure à 60 m sont moins fréquents et représentent 21,07% des valeurs observées sur ce paramètre. Les fréquences des classes de profondeur forée dans le niveau fissuré augmentent jusqu'à atteindre une valeur maximale pour les forages ayant traversés le niveau fissurée sur une profondeur située entre 30 et 45 m, puis diminuent progressivement au fur et à mesure que les épaisseurs de socle foré augmentent. Ceci signifie que l'épaisseur de socle forée pourrait suivre la loi de Gauss.

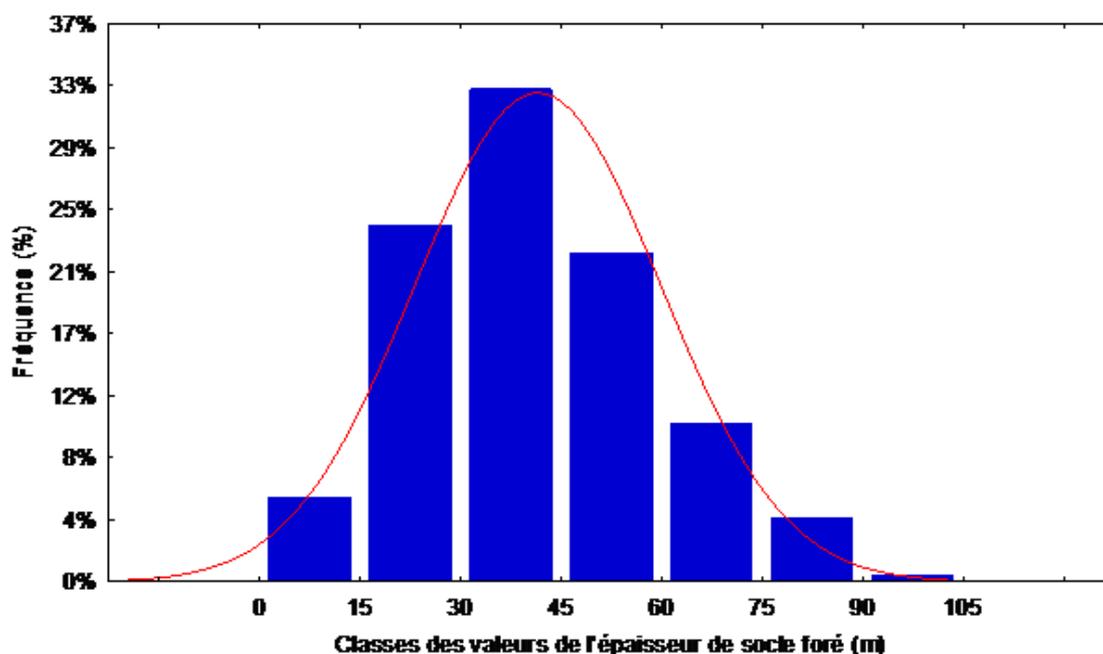


Figure 4: Fréquences des classes d'épaisseurs forées dans le socle fissuré (m)

La figure 5 présente les fréquences de classes de la profondeur de la première arrivée d'eau significative (avec un débit d'au moins 1 m<sup>3</sup>/heure). Les profondeurs auxquelles l'on rencontre le plus souvent la première fracture hydraulique active productive sont comprises entre 30 et 45 m, et représentent 30,55% des valeurs observées. Après cette classe, les profondeurs les plus fréquentes sont comprises entre 45 et 60 m, suivies des profondeurs comprises entre 15 et 30 m et représentent respectivement 24,31% et 22,29%. Les profondeurs des premières arrivées d'eau les plus fréquentes sur le socle ivoirien sont comprises entre 15 et 60 m et représentent 77,15% des valeurs observées. Les premières arrivées d'eau sont rarement obtenues à moins de 15 m et au-delà de 75 m et très rarement au-delà de 90 m.

Les fréquences des classes de profondeur totale, de la première arrivée d'eau significative et celles des épaisseurs de socle foré présentent des profils en cloche. Les résultats de l'application du logiciel Kronostat 1.01 aux différentes données a montré que celles-ci suivent la loi normale.

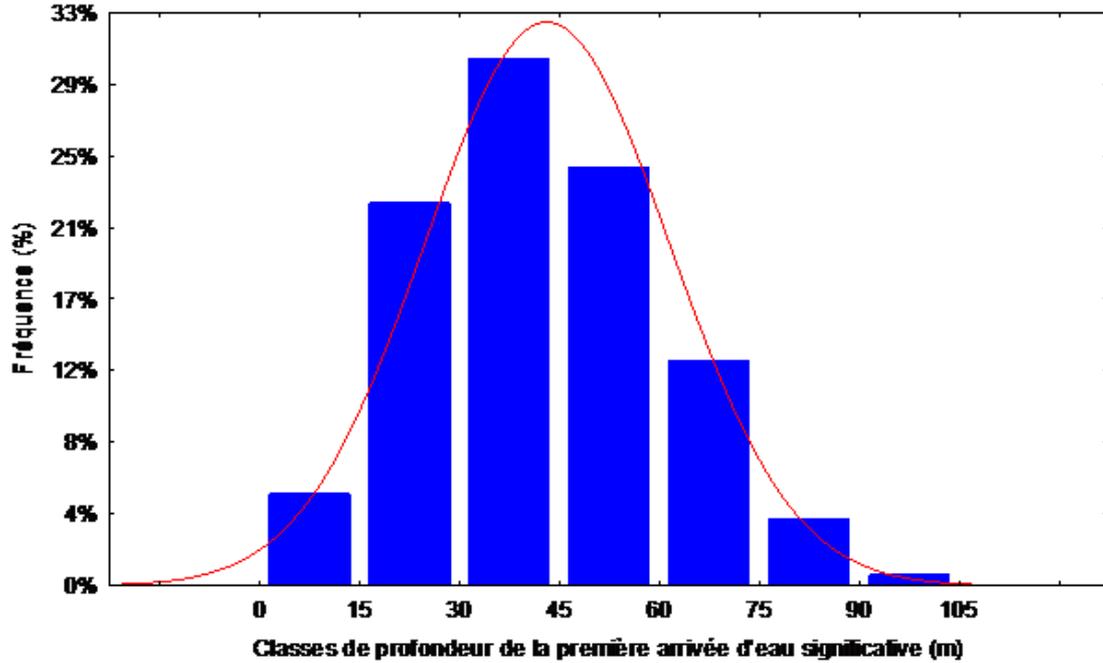


Figure 5: Fréquences des classes de profondeur de la première arrivée d'eau (m)

La figure 6, montre que les valeurs les plus fréquentes de l'épaisseur de l'horizon altéré sur le socle se situent entre 0 et 30 m et représentent 72,90% des valeurs observées. Les valeurs moins fréquemment obtenues sont comprises entre 30 et 60 m avec un taux de 27,63%. Les épaisseurs d'altération sont rarement voire très rarement obtenues entre 60 et 105 m (4,11% des valeurs observées). Les fréquences des puissances d'altération diminuent au fur et à mesure que les valeurs de classes d'épaisseur augmentent. Ceci signifie que l'épaisseur de l'horizon altéré pourrait suivre une loi exponentielle décroissante.

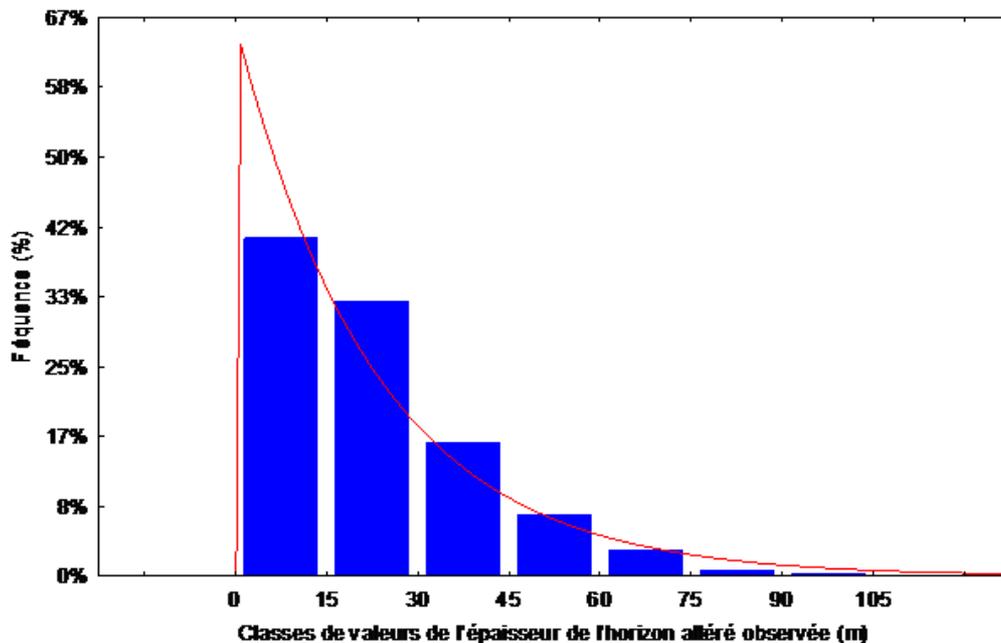


Figure 6: Fréquences des classes d'épaisseur de l'horizon altéré observée (m)

Les caractéristiques statistiques analysées ont permis de mettre en évidence l'homogénéité de la profondeur d'arrêt des forages (24,50%) suivie de la profondeur de la première arrivée d'eau (35,71%) ainsi que l'hétérogénéité de l'épaisseur d'altération (73,75%) et de l'épaisseur forée dans le socle (44,21%). Sur le socle ivoirien, les profondeurs de forages sont

homogènes et comprises entre 20 et 119 m. Ce constat confirme les résultats des travaux antérieurs [7, 15] ayant permis de montrer que la profondeur optimale des forages d'eau en milieu de socle se situe autour de 60 m, et qu'au-delà de la profondeur de 70 m, les possibilités d'obtenir de l'eau dans le socle s'amenuisaient du fait de la rareté des fractures suffisamment perméables pour donner le débit escompté. C'est la raison pour laquelle les profondeurs totales des forages observés dans le cadre de cette étude sont majoritairement comprises dans cet intervalle de valeurs et plus particulièrement entre 45 et 75 m. La relative homogénéité de l'épaisseur de la première arrivée d'eau significative (0,80-106,18 m) est due au fait qu'elle est déterminante dans la profondeur limite de forage [1, 3, 4]. En effet, au regard du débit obtenu, le forage peut être arrêté quelques mètres après ou être poursuivi afin de rechercher une seconde arrivée d'eau significative. L'obtention du débit escompté étant l'objectif à atteindre en termes de cahier de charge, les forages sont généralement arrêtés suite à l'obtention d'un débit satisfaisant cette condition. Le caractère hétérogène de l'épaisseur forée dans le socle (1-109 m) est dû au fait que les arrivées d'eau sont recherchées dans les niveaux fissurés avec des contraintes d'avoir des débits d'arrivée d'eau significatifs pouvant permettre d'aboutir à des débits de forage supérieurs ou égaux à 1m<sup>3</sup>/heure. L'épaisseur de l'horizon altéré est très hétérogène et varie de 0 à 104 m sur l'ensemble du socle ivoirien. En fait, l'épaisseur de l'horizon altéré est l'une des conséquences immédiates de l'altération des roches, due à leur lessivage par les eaux d'infiltration. Dans le Sud de la Côte d'Ivoire, il a été mis en évidence que l'épaisseur du niveau altéré pouvait atteindre 40 m de profondeur, alors qu'il se limitait à 11 m environ dans le Nord du pays. Cette différence étant due à l'hétérogénéité des précipitations sur l'ensemble du territoire. Or, la plus grande partie du pays (Nord et Centre) est soumise à un climat tropical. Ceci a pour conséquence la faiblesse des précipitations ainsi qu'une évaporation intense des eaux. Les faibles quantités d'eau qui réussissent à s'infiltrer ne sont pas suffisantes pour provoquer l'altération intensive des roches. C'est ce phénomène qui explique la grande fréquence des forages ayant traversé une épaisseur d'altération située entre 0 et 15 m sur le socle.

#### 4.2 VARIABLES EXPLICATIVES PERTINENTES

La matrice de corrélation issue de l'analyse en composantes principales est représentée à partir du tableau 2. L'analyse de cette matrice met en évidence une forte corrélation entre les variables Pt et Pae\_1 (0,65), et des corrélations d'intensité moyenne entre les couples Pt-Ep\_Alt (0,40), Pt-Ep\_Soc (0,42) et Ep\_Alt-Pae\_1(0,48). Ces résultats montrent que la profondeur des forages est bien corrélée avec la profondeur de la première arrivée d'eau significative, et assez bien corrélée avec l'épaisseur d'altérites et l'épaisseur de socle forée. La forte corrélation négative entre Ep\_Soc et Ep\_Alt (-0,62) traduit la variation inverse de l'épaisseur d'altération en fonction de celle du socle foré. En effet, lorsque l'épaisseur des altérites augmente celle du socle foré baisse. L'épaisseur de socle foré n'est pas corrélée à la profondeur de la première arrivée d'eau significative (0,04).

**Tableau 2: Matrice de corrélation des paramètres physiques des forages**

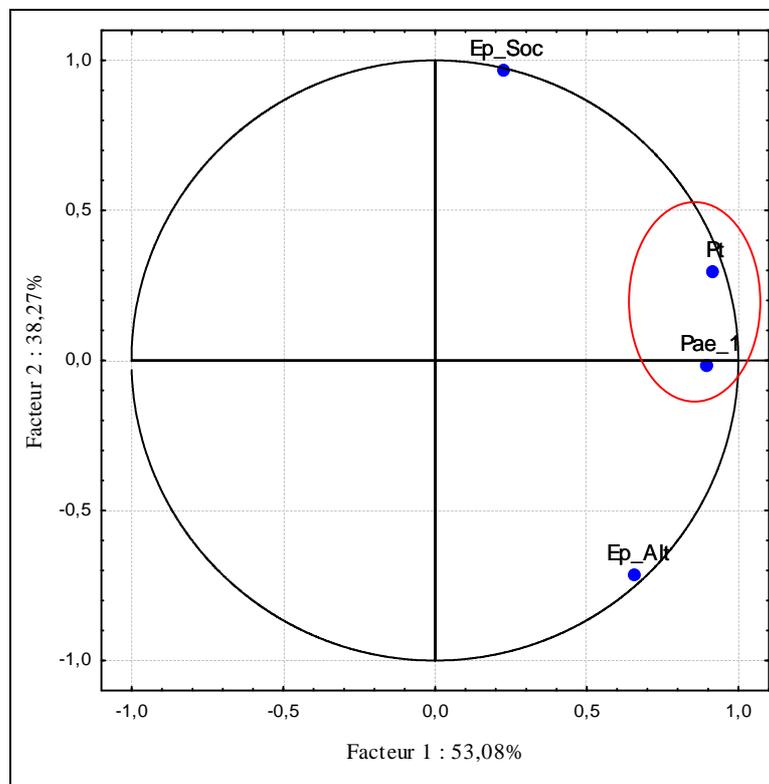
	Pt	Pae_1	Ep_Alt	Ep_Soc
Pt	1,00			
Pae_1	0,65	1,00		
Ep_Alt	0,40	0,48	1,00	
Ep_Soc	0,42	0,04	-0,62	1,00

Dans la recherche des composantes principales, quatre valeurs propres ont été obtenues (Tableau 3). Selon le principe de la méthode, les valeurs propres retenues sont celles qui sont supérieures ou égales à 1. Ainsi, deux composantes (facteurs 1 et 2) ont été retenues avec respectivement des pourcentages de 53,078% et 38,267%, soit un cumul de 91,345% (Tableau 3). Ce résultat signifie que ces deux axes factoriels détiennent l'essentiel des informations, et peuvent donc être retenus pour l'interprétation des résultats. Les facteurs 3 et 4 représentant moins de 10% de la variance totale, ne viendraient que pour confirmer les résultats obtenus au moyen des deux premiers facteurs.

**Tableau 3: Valeurs propres des paramètres physiques des forages**

Facteurs	Valeur propre	% Variance	Cumul valeur propre (%)	Cumul variance (%)
Facteur 1	2,123	53,078	2,123	53,078
Facteur 2	1,531	38,267	3,653	91,345
Facteur 3	0,314	7,864	3,968	99,209
Facteur 4	0,032	0,791	4,000	100,00

La représentation graphique dans l'espace des variables des différents paramètres (Figure 7) met en évidence l'organisation des différentes variables. Le facteur 1 est déterminé en plus de la profondeur de forage (Pt), par la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1). Ces différentes variables se situent dans la partie positive du facteur. Les variables qui traduisent la présence d'eau souterraine (Pae\_1 et Pt) sont préférentiellement corrélées avec l'axe 1, confirmant que la productivité est liée aux caractéristiques du socle fracturé et non altéré. Les paramètres représentatifs des épaisseurs de socle foré (Ep\_Soc) et d'épaisseurs d'altération (Ep\_Alt) s'opposent sur le facteur 2. En effet, l'épaisseur forée dans le socle (Ep\_Soc) se situe au niveau de la partie positive alors que l'épaisseur d'altération (Ep\_Alt) se trouve dans la partie négative. Du fait de sa position dans la partie positive de l'axe factoriel 2, l'épaisseur de socle foré favorise la productivité des forages en milieux de socle. Ces différents résultats confirment les différentes corrélations définies entre les variables. Le facteur F1 exprime donc la profondeur limite des forages pouvant fournir un débit significatif. Quant au facteur F2, il exprime les épaisseurs des différents aquifères à traverser afin d'obtenir un débit de forage significatif. En effet, l'aquifère est constitué d'un niveau altéré et d'un niveau fissuré. Mais, l'eau est recherchée dans le niveau fissuré d'où la traversée entière des altérites afin d'atteindre le socle fissuré. En effet, les altérites pourraient jouer un rôle prépondérant dans la productivité des forages. Cependant, elles peuvent devenir un facteur défavorable lorsqu'elles sont trop importantes (au-delà de 30 m). Le facteur F2 définit l'épaisseur de socle devant être foré après avoir traversé les altérites (Ep\_Alt), afin d'obtenir des arrivées d'eau significatives voire un débit de forage satisfaisant (supérieur ou égal à 1 m<sup>3</sup>/heure).



**Figure 7: Espace des variables dans le plan factoriel F1-F2**

Les résultats relatifs à l'identification des variables pertinentes pour la modélisation de la profondeur totale de forage et l'épaisseur de socle foré montre que les paramètres physiques étudiés ont chacun une influence plus ou moins significative sur la profondeur des forages d'eau et l'épaisseur de socle foré. Cela se confirme avec l'analyse de la matrice de corrélation qui donne un coefficient de corrélation qui varie de 0,40 à 0,65 en ce qui concerne la relation entre la profondeur des forages et les autres paramètres physiques. En effet, l'analyse de cette matrice permet d'affirmer que le paramètre le plus déterminant dans la simulation de la profondeur d'arrêt du forage est la profondeur de la première arrivée d'eau significative avec un coefficient de corrélation de 0,65.

Le coefficient de corrélation (pris en valeur absolue) entre l'épaisseur de socle foré et les autres paramètres physiques varie entre 0,04 et 0,62. Le caractère négatif de la corrélation entre l'épaisseur de socle foré et l'épaisseur d'altération traduit

le caractère limitant de l'épaisseur d'altération dans la productivité des forages en milieu de socle. L'épaisseur de socle foré n'est pas liée à la profondeur de la première arrivée d'eau. Cependant, elle a un lien assez satisfaisant avec la profondeur limite des forages. En effet, la profondeur d'un forage en milieux de socle est la somme de l'épaisseur de l'horizon altéré et de l'épaisseur de socle foré, d'où la corrélation assez forte entre les deux variables. Les deux variables expliquées sont liées entre elles, cependant, elles sont différemment liées aux variables explicatives. En définitive les variables explicatives retenues comme étant les plus pertinentes dans la définition de la profondeur limite des forages d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien et l'épaisseur de socle foré ayant servi à la conception des modèles de régressions linéaires multiples sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1) et l'épaisseur d'altération (Ep\_Alt).

#### 4.3 RESULTATS DE CALAGE DES MODELES

Les résultats du calage des modèles, réalisé sur une population de 1605 forages, ont permis d'établir des modèles de simulation de la profondeur des forages et de l'épaisseur de socle foré. Les coefficients de régression produits, ainsi que les erreurs-types de chacun de ces coefficients sont consignés dans les tableaux 4 et 5. D'après le tableau 4, il y a une relation étroite entre la profondeur d'arrêt des forages en milieu de socle et les variables dépendantes que sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur de l'horizon altéré puisque le test de Student a donné des valeurs de probabilités très faibles (inférieures à 1%). Les rapports erreurs-types/coefficients de régression des différentes variables montrent que la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1) est plus homogène (3,449%) que l'épaisseur d'altération (Ep\_Alt) (19,588%). La constante est plus homogène que les variables explicatives avec une valeur de 2,490%. Chaque variable a donc une contribution significative sur la profondeur d'arrêt des forages mais la profondeur de la première arrivée d'eau significative a une contribution plus qualitative que l'épaisseur d'altération dans la modélisation de la profondeur limite de forage d'eau en milieux de socle.

**Tableau 4: Coefficients du modèle et erreurs-types associées à la profondeur limite de forage**

Variable	Coefficient de régression	Erreur-type	Erreur-type/coefficient de régression (%)
Pae_1	0,572	0,020	3,497
Ep_Alt	0,097	0,019	19,588
Constante	37,757	0,940	2,490

On déduit du tableau 4, l'équation du premier modèle de profondeur limite de forage d'eau (modèle PROLIFE 1) en milieux de socle qui se présente comme suit (équation 6) :

$$\text{modèle PROLIFE 1: } Pt(1) = 0,572 * Pae\_1 + 0,097 * Ep\_Alt + 37,757 \quad (6)$$

Le calage du modèle de simulation des épaisseurs de socle foré sur une population de 1605 forages a produit des coefficients et leurs erreurs-types associées qui sont consignés dans le tableau 5. D'après ce tableau, il y a une relation étroite entre l'épaisseur de socle foré et les variables dépendantes que sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur de l'horizon altéré puisque le test de Student a donné des valeurs de probabilités très faibles (inférieures à 1%). Les rapports erreurs-types/coefficients de régression des différentes variables montrent que les deux variables explicatives choisies sont homogènes. La profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae\_1) (4,481%) a une contribution positive alors que l'épaisseur d'altération (-2,296%) a une contribution antagoniste sur l'épaisseur d'altération. La constante est aussi homogène avec une valeur de 2,350%. Ces résultats montrent que chaque variable a une contribution essentielle dans la modélisation de l'épaisseur de socle foré.

**Tableau 5: Coefficients du modèle et erreurs-types associées à l'épaisseur de socle foré**

Variable	Coefficient de régression	Erreur-type	Erreur-type/coefficient de régression (%)
Pae_1	0,491	0,022	4,481
Ep_Alt	-0,871	0,020	-2,296
Constante	41,965	0,986	2,350

On peut définir l'équation de l'épaisseur de socle foré comme suit (équation 7):

$$Ep\_Soc = 0,491 * Pae\_1 - 0,871 * Ep\_Alt + 41,965 \quad (7)$$

Les résultats de calage des différents modèles a permis de montrer que la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération sont des variables explicatives pertinentes pour exprimer la profondeur limite de forage et l'épaisseur de socle foré. A partir de l'équation 7, un deuxième modèle de prévision de la profondeur limite de forage d'eau (modèle PROLIFE 2) en milieux de socle a été développé. Ce modèle est basé sur l'approche définitionnelle de la profondeur de forage en milieu de socle. En effet, la profondeur de forage en milieu de socle est la somme de l'épaisseur d'altération traversée ( $Ep\_Alt$ ) et de l'épaisseur de socle forée ( $Ep\_Soc$ ). Soit (équation 8):

$$\text{modèle PROLIFE 2: } P_t(2) = Ep\_Alt + Ep\_Soc \quad (8)$$

A partir des équations 7 et 8, l'expression du deuxième modèle de prévision de la profondeur limite de forage d'eau (modèle PROLIFE 2) en milieux de socle est (équation 9):

$$\text{modèle PROLIFE 2 : } P_t(2) = 0,491 * Pae\_1 + 0,129 * Ep\_Alt + 41,965 \quad (9)$$

Des études antérieures réalisées par d'autres auteurs ont été menées avec d'autres paramètres [1, 4]. Dans la région du Denguélé en Côte d'Ivoire, Kouadio et al. [4] ont défini une profondeur limite et une épaisseur de socle foré dont les variables explicatives sont au nombre de quatre et sont composées de l'épaisseur d'altération, le nombre d'arrivée d'eau significative, la vitesse d'avancement dans le socle ainsi que la profondeur de la première arrivée d'eau significative. L'auteur [4] a également simulé la profondeur limite à partir de l'épaisseur de recouvrement alluvio-colluvial, l'épaisseur d'altération, la profondeur de la première venue d'eau, le nombre de venue d'eau et la vitesse d'avancement dans le socle au niveau du socle Tchadien. Les deux paramètres utilisés dans le cadre de cette étude se retrouvent dans l'équation déterminée par l'auteur [1]. Cependant, au niveau de l'auteur [4], seule l'épaisseur d'altération recoupe les différentes équations. L'ensemble de ces différents résultats traduit l'importance de la profondeur de la première arrivée d'eau significative et de l'épaisseur de l'horizon altéré dans la modélisation statistique de la profondeur limite d'arrêt des forages. Les erreurs-types obtenues au niveau des différentes variables explicatives ont été satisfaisantes. Ces résultats montrent le rôle joué par chaque variable dans la définition des variables expliquées. Les erreurs-types sont relativement plus faibles au niveau de la profondeur limite d'arrêt de forage. Les variables explicatives ont en général des erreurs-types plus faibles que celles de la constante quel que soit le modèle. L'épaisseur d'altération a une erreur-type relativement plus faible que celle de la profondeur de la première arrivée d'eau significative.

## 5 CONCLUSION

Cette étude a porté sur la conception de modèles statistiques capables de prédire la profondeur limite d'arrêt de forage en milieux de socle à partir de paramètres physiques de forage. Elle a été menée à partir des données issues des ensembles géologiques des domaines archéen et paléoprotérozoïque de Côte d'Ivoire. L'analyse de la distribution des paramètres physiques de forage à travers les valeurs de coefficient de variation de ces paramètres, a permis de mettre en évidence l'homogénéité de la profondeur limite d'arrêt de forage (24,50%) suivie de la profondeur de la première arrivée d'eau significative (35,71%). Il a été également mis en évidence l'hétérogénéité de l'épaisseur d'altération (73,75%) et de l'épaisseur forée dans le socle (44,21%). Les valeurs moyennes des différents paramètres sont respectivement 68,17 m pour la profondeur limite d'arrêt de forage, 17,46 m pour la profondeur de la première arrivée d'eau significative, 18,59 m pour l'épaisseur d'altération et 19,46 m pour l'épaisseur de socle foré. La profondeur limite d'arrêt de forage, l'épaisseur de socle forée et la profondeur de la première arrivée d'eau significative suivent une loi normale. Les fréquences des puissances d'altération suivent une loi exponentielle décroissante. L'application de l'analyse en composantes principales normées (ACPN) aux paramètres physiques des forages d'eau a permis d'identifier les variables explicatives les plus pertinentes et expressives pour la conception de modèles de profondeur limite de forage. Ces variables sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération. Cette étude a permis de concevoir une équation de simulation de la profondeur limite de forage et une équation de simulation de l'épaisseur de socle foré à partir des variables explicatives. Les deux équations ont été déterminées par calage automatique à partir des deux variables explicatives précédentes. Les erreurs-types de régressions généralement faibles (inférieures à 1%) traduisent des relations étroites entre les variables expliquées (profondeur de forage, épaisseur de socle foré) et les variables explicatives (profondeur de la première arrivée d'eau significative et épaisseur d'altération). Ainsi, deux modèles de prévision de profondeur limite d'arrêt de forage d'eau (modèles PROLIFE) en milieux de socle cristallin et cristallophyllien ont été développés. L'avantage des modèles présentés dans cette étude réside au niveau de la faiblesse du nombre de variables explicatives (2) comparativement aux modèles existants.

## REFERENCES

- [1] K.E. Kouadio, N. Soro et I. Savané, « Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : Application à la région du Denguelé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire ». *Revue des sciences de l'eau*, Vol.23, N°1, pp.1-15, 2010.
- [2] B. Dewandel, P. Lachassagne, R. Wyns, J.C. Marechal and M. Krishna, «A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering". *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.330, pp.260-284, 2006.
- [3] P. Gombert, «Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale ». *IAHS Publ.*, Vol.241, pp.113-122, 1997.
- [4] P. Gombert, « Stratégie de prospection hydrogéologique du socle de la bordure orientale tchadienne par optimisation du nombre et de la profondeur des sondages de reconnaissance ». *Journal of Water Science*, Vol.12, N°3, pp.597-608, 1999.
- [5] A. Fofana et S. Doumbia, «Simulation de la productivité des forages d'eau en milieu de socle : cas de l'ex- région du N'Zi-Comoé ». Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Ecole Supérieure des Mines et de Géologie / Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny-Yamoussoukro, 51 p., 2013.
- [6] B. Dibi, D. Inza, B.T.A. Goula, I. Savané, et J. Biémi, «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 & Technologies*, Vol.13, pp.22-31, 2004.
- [7] Y.A. N'go, D.L. Goné, I. Savané et M.M. Goblé, « Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique ». *Afrique Science*, Vol.1, pp.127-144, 2005.
- [8] A.M. Kouassi., K.E. Ahoussi, K.A. Yao, W. Ourega, K.B. Yao et J. Biemi, «Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) ». *Larhyss journal*, Vol.10, pp.57-74, 2012.
- [9] R. Koutouan et C. Loba, «Analyse des potentialités hydrauliques des aquifères fissurés de la région de Guiglo-Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire) ». Mémoire Projet de Fin d'Etudes, Ecole Supérieure des Mines et de Géologie / Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny-Yamoussoukro, 61 p., 2013.
- [10] K.E. Kouadio, «Stratégie de prospection des nappes de fissures par analyse spatiale du potentiel de productivité et optimisation de la profondeur des forages. Cas du Denguelé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) ». Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 181p., 2005
- [11] T.Y. Brou, « Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités ». Université de Cocody, Abidjan, 226 p., 2005.
- [12] J. Camil, « Pétrographie, chronologie des ensembles archéens et formations associées de la région de Man (Côte-d'Ivoire): implications pour l'histoire géologique du craton ouest-africain ». Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, 306 p., 1984
- [13] A.N. Kouamelan, «Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire - Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque ». Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université Rennes I, Mémoires, Géosciences Rennes, 73, 289 p., 1996.
- [14] B. Tagini, « Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université, Lausanne, SODEMI, Abidjan, Côte d'Ivoire, Vol.5, 302 p., 1971
- [15] J. Biemi, « Contribution de l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) ». Thèse de Doctorat d'Etat Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 424 p., 1992.
- [16] T. Lasm, K.F. Kouamé, N. Soro, J.P.R. Jourda et J. Biemi, «Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol.5, pp.135-154, 2004.
- [17] J.P.R. Jourda, M.B. Saley, E.V. Djagoua, K.J. Kouamé, J. Biemi et M. Razack, « Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation ». *Télédétection*, Vol.5, N°4, pp.339-357, 2006.
- [18] T. Lasm, M. Youan-ta, J.P.R. Jourda, et K.F. Kouamé, « Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire)". *European Journal of Scientific Research*, Vol.21, N°1, pp.196-208, 2008.

- [19] M. Youanta, T. Lasm, J.P. Jourda, K.F. Kouamé, et M. Razack, "Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) ». *Téledétection*, Vol.8, N°2, pp.119-135, 2008.
- [20] M. Koita, H. Jourde, D. Ruelland, K. Koffi, S. Pistre et I. Savané, « Cartographie des accidents régionaux et identification de leur rôle dans l'hydrodynamique souterraine en zone de socle. Cas de la région de Dimbokro-Bongouanou (Côte d'Ivoire) ». *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.5, N°5, pp.805-820, 2010.
- [21] Y.A. N'go, T. Lasm, M. Koita et I. Savané, «Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures du socle précambrien de la région de Dimbokro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) ». *Téledétection*, Vol.9, N°1, pp.33-42, 2010.
- [22] V.M. Sorokoby, M.B. Saley, K.F. Kouamé, M.E.V. Djagoua, M. Bernier, K. Affian et J. Biemi, « Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): contribution à la gestion des ressources en eau souterraine ». *Téledétection*, Vol.9, N°3-4, pp.209-223, 2010.
- [23] K.E. Ahoussi, « Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville ». Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p., 2008.
- [27] T. Lasm, N.R.M. Fossou, O.Z. Onetie, D. Baka, M. Youanta, M.S. Oga et N. Soro, « Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du Département de Ferké (Nord de la Côte d'Ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol.19, pp.114-135, 2012.
- [25] M. Belanger, N. EL-jabi, D. Caissie, F. Ashkar et J.M. Ribic, « Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple ». *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.18, N°3, pp.403-421, 2005.
- [26] L. Benyahya, D. Caissie, L.A.K. Mertes, S.J. O'Daniel, W.W. Woessner and S.A. Thomas, «A review of statistical water temperature models". *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol.32, N°3, pp.179-193, 2007.
- [27] A. Daigle, A. St-hilaire, D. Peters and D. Baird, "Multivariate modeling of water temperature in the Okanagan watershed". *Canadian Water Resources Journal-Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol.35, N°3, pp.237-258, 2010.
- [28] B. Hingray, C. Picouet et A. Musy, «Hydrologie: une science pour l'ingénieur ». Edition Presse Polytechniques et Universitaires, Romandes 2<sup>ème</sup> édition, 600 p., 2012
- [29] A.M. Kouassi, K.E. Kouamé, Y.B. Koffi, K.A. Kouamé, S. Oularé et J. Biemi, « Modélisation des débits mensuels par un modèle conceptuel : application à la caractérisation de la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire) ». *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologie*, Vol.11, pp.1377-1391, 2011.
- [30] A.M. Kouassi, B.T.M. N'guessan, K.F. Kouamé, K.A. Kouamé, J.C. Okaingni et J. Biemi, « Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans les relations pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire) ». *Comptes rendus géoscience*, Vol.344, pp.288-296, 2012.
- [31] A.M. Kouassi, K.E. Kouakou, Y.B. KOFFI et J. Biémi, « Développement de modèles statistiques pour la prévision du débit de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien en Côte d'Ivoire». *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 10, N°1, pp.154-170, 2014.