

Développement de modèles statistiques pour la prévision du débit de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien en Côte d'Ivoire

[Development of statistical models for the prediction of the drilling water flow in the crystalline and cristallophyllian bedrock of Ivory Coast]

Amani Michel KOUASSI¹, Koffi Eugène KOUAKOU¹, Yao Blaise KOFFI², and Jean BIEMI²

¹Institut 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

²Université 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 drilling flow on rock aquifers. The study area is the former region of N'zi-Comoé (Central-East of Ivory Coast) that is located between longitude 3° 40' and 4°55' West and latitude 6° 20' and 8°10' North. The geological formations are composed of igneous rocks and metamorphic rocks. The methodology has been first applied to the approach of principal component analysis normalized, for identifying relevant and expressive variables of the drilling flow. Then, a calibration was performed with a sample of 100 drillings representing two thirds of the total sample to determine the coefficients of linear regressions and associated standard errors. Finally, an evaluation of the developed models was performed using the criteria of performance and robustness. The most relevant and expressive variables for modeling the drilling flow are the transmissivity, the thickness of healthy base drilled, the depth of the first significant water inlet and the total number of water inlet. Thus, two models were developed. Models assessment shows that they are performing with correlation coefficients ranging around 0.7, biases varying between 10^{-7} and 10^{-2} and quadratic errors in the order of 2.5 to 2.9. These models have also demonstrated their robustness with rates fluctuating between 3.2 and 5.3%. However, the model 2 is more efficient and more robust than model 1.

KEYWORDS: Productivity of drillings, Rock aquifers, Statistical modeling, Ivory Coast.

RESUME: L'objectif de cette étude est de développer et d'évaluer des modèles statistiques capables de prévoir le débit des forages en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. La zone d'étude est l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) qui est située entre les longitudes 3°40' et 4°55' Ouest et les latitudes 6°20' et 8°10' Nord. Les formations géologiques sont constituées de roches magmatiques et métamorphiques. La méthodologie utilisée a consisté d'abord à appliquer l'analyse en composantes principales normées (ACPN) pour l'identification des variables explicatives pertinentes et expressives du débit des forages. Ensuite, un calage a été effectué avec un échantillon de 100 forages représentant les 2/3 de l'échantillon total afin de déterminer les coefficients de régression linéaire et les erreurs-types associées. Enfin, une évaluation des modèles développés a été réalisée à partir des critères de performance et de robustesse. Les variables les plus pertinentes et expressives pour la prévision du débit de forage sont la transmissivité, l'épaisseur de socle sain foré, la profondeur de la première arrivée d'eau significative et le nombre d'arrivées d'eau. Ainsi, deux modèles ont été développés. L'évaluation des modèles montrent que ceux-ci sont performants avec des coefficients de corrélation variant autour de 0,7, des biais fluctuant entre 10^{-7} et 10^{-2} et des erreurs quadratiques dans l'ordre de 2,5 à 2,9. Ces modèles ont également

démontré leur robustesse avec des valeurs du critère de robustesse fluctuant entre 3,2 et 5,3%. Mais, le modèle 2 est plus performant et plus robuste que le modèle 1.

MOTS-CLEFS: Productivité des forages, Aquifères de socle, Modélisation statistique, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Disposer d'eau de qualité en quantité suffisante en milieu de socle cristallin et cristallophyllien est un besoin vital qui n'est pas satisfait pour les populations en général et celles vivant en milieu de socle en particulier. Nous ne sommes tous égaux devant les situations et les capacités qui peuvent être mobilisées pour répondre à ce besoin, et l'alimentation en eau des populations menacées est la problématique de ce travail. Parce que l'eau souterraine est une ressource de choix, elle est souvent mobilisée pour répondre aux besoins des hommes. En milieu de socle, elle est difficile à appréhender d'où la nécessité d'appliquer des stratégies et des techniques spécifiques telles que la géophysique. En effet, les fonctions physiques (épaisseur d'altération, épaisseur de socle fissuré, profondeurs des fractures hydrauliquement actives et hydrauliques, etc.) et hydrauliques (coefficient d'emmagasinement, transmissivité, etc.) des aquifères peuvent être appréhendées par l'interprétation de sondages électriques et de sondages par résonance magnétique protonique (RMP) [1-7]. Etant en milieu de socle, les arrivées d'eau sont induites par les fractures hydrauliquement actives. Devant les nombreux échecs en matière de prospection des eaux souterraines en milieu de socle, les recherches sur l'eau ont été orientées vers une meilleure connaissance des aquifères des fissures qui sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières et moins exposés aux phénomènes de pollution du fait de la présence de niveaux altérés. C'est dans ce sens que des études visant à rechercher les relations entre la productivité des forages en milieu de socle et la fracturation ont été motivées [8-15].

Malgré l'évolution de la technologie avec le développement de l'utilisation des méthodes géophysiques, les images satellitaires, les modèles numériques de terrain (MNT), etc., il est encore aujourd'hui difficile de prévoir la productivité d'un forage en milieu de socle avant la foration et d'éliminer les sites les moins prometteurs. Plusieurs travaux [16-18] ont permis de jeter les bases d'une modélisation de la productivité des forages en milieu de socle. A chaque échelle de travail, on peut mettre en évidence des paramètres statistiquement corrélés à la productivité du socle [16-18]. Ces paramètres diffèrent d'une échelle à l'autre alors que la productivité n'est toujours due qu'à la fracturation ouverte des terrains. Des modèles statistiques avec pour variable expliquée le débit et pour variables explicatives la vitesse d'avancement de l'outil dans les altérites meubles (Vaa), la vitesse d'avancement de l'outil dans le socle (Vas), la profondeur de la première arrivée d'eau (Pae), le nombre d'arrivées d'eau (Nae), l'épaisseur d'altération (Alt) ou épaisseur des altérites meubles, l'épaisseur de socle traverse (Soc) ou épaisseur des formations recoupées sous la base des altérites meubles ont pu être établis à l'échelle locale [16-18]. Les différents modèles ont démontré leur capacité à prévoir le débit des forages. Il serait donc judicieux de tenir compte des paramètres corrélés à la productivité dans les implantations des forages d'eau. C'est donc dans l'optique de contribuer à la recherche de solutions en vue d'optimiser la prospection hydrogéologique en milieu de socle que cette étude a été menée.

L'objectif général de notre recherche est de concevoir des modèles statistiques capables de prévoir le débit des forages en milieu de socle à partir de paramètres hydrauliques et physiques estimables par les méthodes de prospection géophysique de surface. Il s'agit, d'une part, d'identifier des paramètres hydrauliques et physiques corrélés à la profondeur des forages, et d'autre part, de développer et d'évaluer des modèles statistiques dont les variables explicatives sont issues des résultats du premier objectif. Notre méthodologie a consisté à utiliser l'analyse en composantes principales normées (ACPN) pour l'identification des variables explicatives pertinentes et la modélisation statistique à partir de la régression linéaire multiple pour la prévision du débit des forages. L'originalité de cette étude réside sans doute, d'une part, dans le choix des variables explicatives et d'autre part, dans l'hypothèse selon laquelle ces différentes variables doivent pouvoir être estimées par les mesures géophysiques de surface (sondages électriques et sondages par résonance magnétique protonique(RMP)).

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'ex-région du N'zi-Comoé, située au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, est comprise entre les longitudes 3°40' et 4°55' Ouest et les latitudes 6°20' et 8°10' Nord (Fig. 1) avec une superficie de 19 560 Km². Elle est aujourd'hui divisée en trois (3) régions administratives:

- la région du N'zi avec pour chef-lieu Dimbokro, comprend les départements de Dimbokro, Bocanda et Kouassikou ;

- la région du Iffou avec pour chef-lieu Daoukro, comprend les départements de Daoukro, Prikro, M'Bahiakro, Ouélé et Koffi Annoukro ;
- la région du Moronou avec pour chef-lieu Bongouanou, comprend les départements de Bongouanou, M'Batto et Arrah.

Le relief de la zone d'étude est monotone et constitué d'un plateau légèrement incliné de direction Nord-Sud, avec une altitude moyenne d'environ 150 m. Les collines de la chaîne Baoulé correspondent aux faciès volcano-sédimentaires, principalement les roches vertes. La végétation est constituée de lambeaux de forêt mésophile, et de larges mailles de savanes séparées par des forêts-galeries. Il existe à côté de ces végétations naturelles, des végétations liées à l'action anthropique (mosaïques forêt-cultures, mosaïques savanes-cultures, cultures). Le climat est de type tropical humide avec une alternance de 4 saisons dont deux (2) saisons pluvieuses et deux (2) saisons sèches. Le régime climatique est caractérisé par des précipitations moyennes mensuelles variant entre 11 mm et 198 mm. La hauteur pluviométrique interannuelle calculée sur la période 1950-2000 est de 1155 mm.

La région de l'ex-N'zi-Comoé appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine baoulé-mossi. Du point de vue lithologique, la zone d'étude est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques constituées essentiellement de roches ignées, métamorphiques et volcano-sédimentaires [19] (Fig. 2). On distingue les roches éburnéennes et les roches birimiennes. Les roches éburnéennes sont constituées essentiellement de granitoïdes notamment les granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et les granodiorites. Les formations birimiennes 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. Les différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs systèmes d'accidents majeurs [14, 19-21]. Ces fractures sont de direction préférentiellement Nord-Sud et elles sont susceptibles de faciliter la circulation de l'eau dans les roches. Ces formations géologiques ont été également touchées par le phénomène d'altération. Ainsi, l'altération sur le substratum schisteux est particulièrement épaisse et argileuse. Elle est en moyenne d'une trentaine de mètres et peut atteindre 60 m. En effet, les roches plus ou moins riches en minéraux ferromagnésiens, en minéraux calciques, en plagioclases, en silice et en oxydes, ont une altération qui conduit à la formation d'argiles. L'altération des granites est essentiellement sableuse et peu épaisse (inférieure à 10 m).

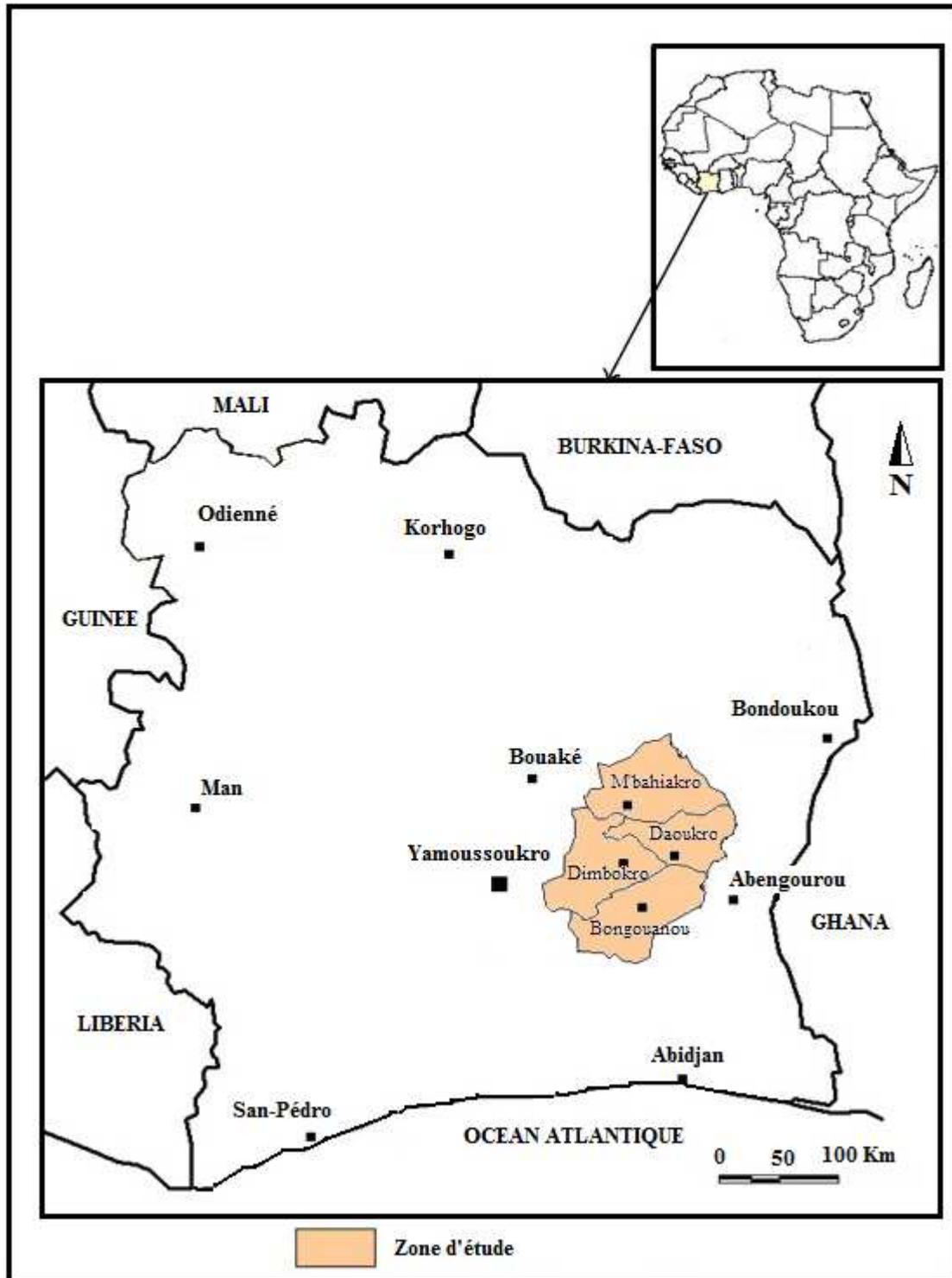


Fig. 1 : Présentation de l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

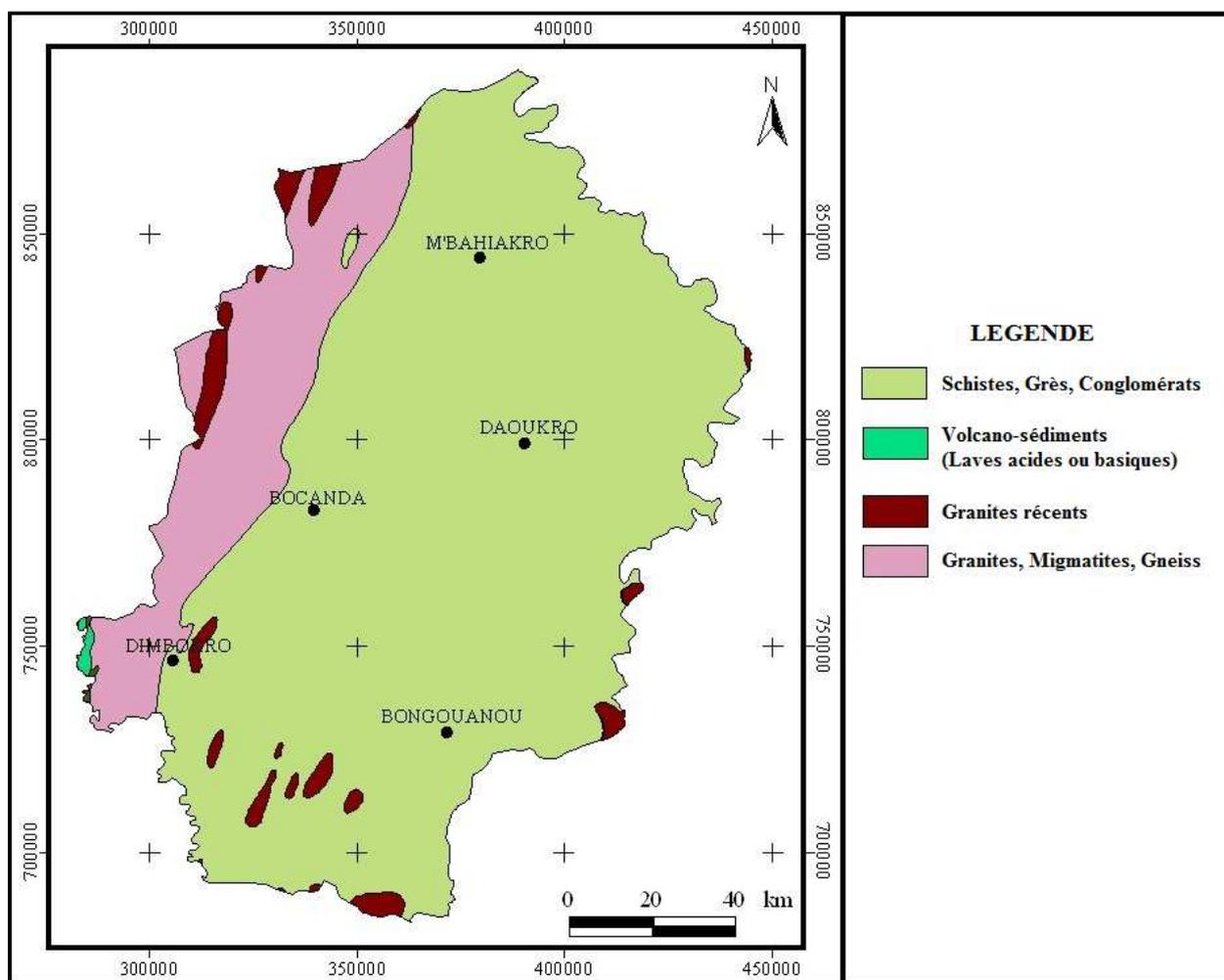


Fig. 2 : Carte géologique de l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 DONNÉES

Les fiches techniques des forages des programmes d'hydraulique villageoise réalisés dans la région de l'ex-région du N'zi-Comoé de 1999 à 2000 « Don Japonais, AEP-II-3 » ont été utilisées. Au total 150 fiches techniques représentant 150 forages ont été retenues pour cette étude (Fig. 3). Ces fiches techniques de forage ont permis d'obtenir des données relatives aux paramètres physiques [l'épaisseur d'altération (Ep_Alt), l'épaisseur forée dans le socle fissuré (Ep_Soc), la profondeur de la première arrivée d'eau (Pae_1), le nombre total d'arrivées d'eau (Nae_1) et la profondeur totale du forage (Pt)] et hydrauliques [le débit de forage ou débit air-lift (Q_f), le débit de la première arrivée d'eau (Qae_1), le niveau statique (N_s), le débit spécifique (Q_s), la transmissivité (T), la conductivité hydraulique (K)]. Les valeurs de transmissivité ont été évaluées par la méthode de Cooper-Jacob en remontée [22] et celles de la conductivité hydraulique ont été estimées par la méthode de Hvorslev [23]. Les caractéristiques statistiques des paramètres hydrauliques et physiques sont consignées dans le tableau 1. L'analyse de ce tableau montre que les valeurs des coefficients de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) (CV) de la majorité des paramètres sont supérieures à 25%. En effet, celles-ci varient entre 33% et 125,09%. La valeur du coefficient de variation de la profondeur d'altération qui est de 21,83% montre que les profondeurs d'altération dans la zone d'étude sont relativement uniformes. Cependant, tous les autres paramètres sont plus variables.

Tableau 1: Caractéristiques statistiques des paramètres étudiés.

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV
Qf	0,4	16	3,8	3,74	98,45
Qae_1	10^{-4}	16,2	2,27	2,83	125,09
Qs	0,01	3,03	0,4	0,47	115,69
Ns	8,85	65,72	36,81	12,17	33,06
T	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$6,72 \cdot 10^{-5}$	123,21
K	$1,79 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$	$7,23 \cdot 10^{-7}$	114
Ep_Alt	4	104	54,2	21,15	21,83
Ep_Soc	0	73,43	24,33	12,68	52,11
Pt	40,5	116,47	78,53	17,14	39,03
Pae_1	17	106,18	44,75	17,63	39,4
Nae	1	6	2,93	1,1	37,66

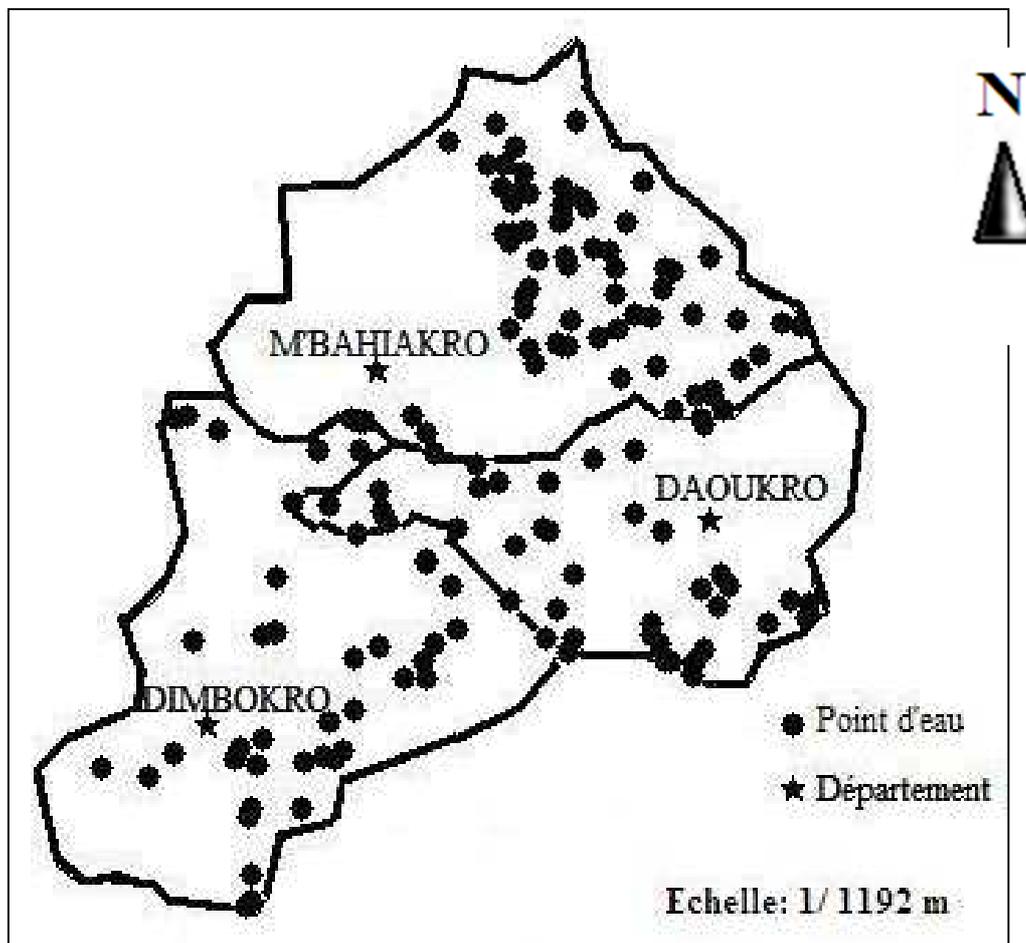


Fig. 3: Carte de répartition spatiale des points d'eau

3.2 IDENTIFICATION DES VARIABLES EXPLICATIVES DES MODÈLES

L'ACPN a été effectuée sur les données provenant de 150 forages d'eau afin de mettre en évidence les paramètres et partant les phénomènes physiques et hydrauliques cités précédemment et qui semblent influencer la productivité des forages en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. Cette méthode a déjà fait l'objet de plusieurs applications dans le domaine de l'hydrodynamique en Côte d'Ivoire [12, 18, 24]. Les variables physiques des forages prises en compte sont l'épaisseur d'altération, l'épaisseur forée dans le roc fissuré, la profondeur de la première arrivée d'eau, le nombre total

d'arrivées d'eau et la profondeur totale du forage. Les variables hydrauliques utilisées sont le débit de forage, le débit de la première arrivée d'eau, le niveau statique, le débit spécifique qui est le rapport du débit de pompage au rabattement induit par ce pompage, la transmissivité et la conductivité hydraulique. 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. 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, laquelle a été effectuée à partir du logiciel Statistica 8.0.

3.3 CONCEPTION DES MODÈLES ET PROCÉDURE DE CALAGE

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 déterminer 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 régression 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. La régression linéaire multiple a déjà été utilisée par plusieurs auteurs [16-18] pour l'étude de la productivité des forages d'eau en milieux de socle. Dans ces différents travaux, les modèles conçus ont démontré leur capacité à simuler la productivité des forages d'eau en milieux de socle de façon générale et particulièrement en Côte d'Ivoire et au Tchad. 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 1) :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_N X_N + C_0 \quad (1)$$

- Y : variable expliquée ;
- X_i : variable explicative ;
- C₀: constante ;
- C_i (1≤i≤N): coefficients de pondération de la variable explicative X_i.

En effet, Y est un vecteur de valeurs observées de débit de forage d'eau, X_i est une matrice de variables indépendantes ou explicatives, C_i est un vecteur de paramètres ou coefficients de régression à estimer, et C₀ 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]:

$$C_i = (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T Y \quad (2)$$

avec X^T la transposée de X.

La régression multiple est une variante de la méthode de régression simple qui peut aider à faire face à la colinéarité en choisissant itérativement les variables avec la plus grande valeur explicative. Une régression multiple ascendante commence avec aucune variable, ou un sous-ensemble des variables disponibles, et ajoute la variable la plus significative (celui avec la plus faible valeur de p, associée à des statistiques estimées F) à chaque étape du modèle. Une régression pas à pas descendante commence avec toutes les variables disponibles et supprime la variable la moins importante à chaque étape. C'est la deuxième forme de régression multiple qui a été utilisée.

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 fonction 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 et la validation sur le tiers (1/3) restant [29-30]. Ainsi, le calage des modèles a été effectué sur un échantillon de 100 forages et la validation sur un échantillon de 50 forages. Le calage a été réalisé de façon automatique avec le logiciel Excel 2013. L'estimation des coefficients de pondération des variables retenues a été réalisée par calage automatique avec le 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 effet, l'erreur-type est au coefficient de régression ce que l'écart-type est à la moyenne d'une variable. Elle consiste donc en une mesure de la variabilité 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. L'erreur-type a été calculé de façon automatique avec le logiciel Excel 2013.

3.4 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES MODÈLES DÉVELOPPÉS

3.4.1 EVALUATION DE LA QUALITÉ DES MODÈLES DÉVELOPPÉS AU MOYEN DE LA PERFORMANCE

La performance des modèles et leur robustesse ont été évaluées à l'aide de critères numériques et graphiques. L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles en phase de calage et en validation. En effet, les performances au calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation [31]. Pour évaluer la performance des modèles développés dans cette étude, le coefficient de corrélation, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et la moyenne biaisée, ont été utilisés comme critères d'évaluation.

Le coefficient de corrélation (R) est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la variable réelle ou mesurée et la variable calculée. Sa formule est (équation 3):

$$R = \frac{\sum_i (Q_i - \bar{Q}) \times (Q'_i - \bar{Q}')}{\sqrt{\sum_i (Q_i - \bar{Q})^2 \times \sum_i (Q'_i - \bar{Q}')^2}} \tag{3}$$

avec :

- Q_i : débit mesuré ;
- Q'_i : débit simulé ;
- \bar{Q} : moyenne des débits mesurés ;
- \bar{Q}' : moyenne des débits simulés.

La relation est dite parfaite si $R = 1$; très forte si $0,8 \leq R < 1$; forte si R se situe entre 0,5 et 0,8 ; d'intensité moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5 ; faible si R se situe entre 0 et 0,2 ; nulle si $R = 0$ [32].

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision. Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (équation 4):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{n}} \tag{4}$$

avec :

- Q_i : débit observé ;
- Q'_i : débit simulé ;
- n: taille de l'échantillon.

Le biais est un critère permettant de mettre en évidence l'écart entre deux grandeurs. Il doit être minimisé (l'optimum est la valeur nulle). Il donne alors l'erreur relative entre les valeurs observées et celles simulées lors des analyses. Lorsque la

moyenne biaisée « B » tend vers zéro, les résultats du modèle sont sans biais, c'est-à-dire que les deux valeurs sont proches et donc le modèle est performant. Ce paramètre est défini par la relation suivante (équation 5):

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - Q'_i| \quad (5)$$

avec :

- Q_i : débit observé ;
- Q'_i : débit simulé.

Outre l'évaluation numérique, des analyses graphiques comparant des débits observés aux débits simulés ont été réalisées afin d'apprécier la qualité de la modélisation effectuée. En pratique, si la simulation était parfaite, c'est-à-dire, si chacune des valeurs simulées par les modèles était égale à la valeur observée, le nuage de points constitué serait aligné et confondu à la droite d'équation $y=x$. Cependant, comme la modélisation n'est pas parfaite, l'évaluation qualitative de la performance des différents modèles a consisté à apprécier la dispersion du nuage de points autour de la première diagonale.

3.4.2 EVALUATION DE LA QUALITÉ DES MODÈLES DÉVELOPPÉS AU MOYEN DE LA ROBUSTESSE

L'une des techniques les plus utilisées pour évaluer la robustesse d'un modèle est la technique du double échantillon [29]. Cette technique permet de tester l'adaptabilité du modèle quelle que soit sa complexité. Le critère de robustesse (R') du modèle a été évalué par la différence du coefficient de corrélation en validation ($R_{\text{validation}}$) et en calage (R_{calage}). Le modèle est dit robuste si le critère de robustesse est inférieur ou égal à 10%. L'expression du critère de robustesse est (équation 6):

$$R' = 100 \times |R_{\text{validation}} - R_{\text{calage}}| \quad (6)$$

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 VARIABLES EXPLICATIVES PERTINENTES DE LA PRODUCTIVITÉ DES FORAGES D'EAU

L'analyse en composantes principales normées (ACPN) a permis de réduire la dimension de l'espace des variables et d'éliminer les variables explicatives non pertinentes. L'analyse des matrices de corrélation, des valeurs propres et variances propres, des coordonnées des variables (Tableaux 2, 3 et 4) et les représentations graphiques (Figures 3 et 4) dans l'espace des variables issues de l'ACPN ont permis de rechercher les principaux facteurs à l'origine de l'évolution des variables.

Les résultats de la matrice de corrélation (Tableau 2) mettent en évidence trois tendances de corrélation :

- fortes corrélations entre les variables hydrauliques particulièrement les couples de variables tels que Qf-T(0,73), Qf-Qs (0,7), T-Qs (0,67) et Qf-Qae_1 (0,55) ;
- fortes voire très fortes corrélations entre d'une part Pt et Pae_1(0,93) et d'autre part entre les couples Ep_alt-Pae_1 (0,86), Ep_alt-Pt (0,80) et Ep_alt-Ep_soc (-0,59) ;
- faibles corrélations entre les paramètres hydrauliques et physiques de façon générale, et particulièrement entre le débit de forage et les paramètres physiques de forage. Seul le niveau statique (Ns) est corrélé à des paramètres tels que la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae_1) (0,68), la profondeur totale de forage (Pt) (0,66) et l'épaisseur d'altération (Ep_alt) (0,54).

Tableau 2 : Matrice de corrélation entre paramètres physiques et hydrauliques.

	Qf	Qae_1	Ns	K	T	Qs	Ep_alt	Ep_Soc	Pt	Nae	Pae_1
Qf	1										
Qae_1	0,55	1									
Ns	-0,16	-0,04	1								
K	0,03	0,02	0,19	1							
T	0,73	0,31	-0,13	0,03	1						
Qs	0,70	0,43	-0,13	0,04	0,67	1					
Ep_alt	-0,07	0,21	0,54	0,10	-0,22	-0,16	1				
Ep_Soc	0,003	-0,27	-0,01	0,04	0,07	0,02	-0,59	1			
Pt	-0,08	0,06	0,66	0,16	-0,21	-0,18	0,80	0,02	1		
Nae	-0,06	-0,19	0,09	0,06	-10 ⁻³	-0,02	0,04	0,15	0,16	1	
Pae_1	-0,03	0,17	0,68	0,13	-0,18	-0,16	0,86	-0,17	0,93	-0,02	1

L'analyse des résultats relatifs aux vecteurs et variances propres (Tableau 3) montre que les trois premiers facteurs F1, F2 et F3 expliquent à eux seuls 96,49% de l'information avec 46,6 % pour le facteur 1, 26,55% pour le facteur 2 et 23,35% pour le facteur 3. Au regard de ces pourcentages exprimés, notre analyse portera sur les plans factoriels F1-F2 et F1-F3.

Tableau 3 : Valeurs propres des paramètres hydrauliques et physiques.

Facteurs	Valeur propre	%Variance	Cumul valeur propre	Cumul variance (%)
Facteur 1	5,31	46,60	5,31	46,60
Facteur 2	3,03	26,55	8,34	73,15
Facteur 3	2,66	23,35	11	96,49

Les figures 4 et 5 montrent les résultats de l'analyse corrélatrice dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3. Le facteur F1 est défini par deux regroupements. Le premier regroupement, situé dans la partie positive est constitué par Ns, Pt, Pae_1 et Ep_alt. Le deuxième regroupement est composé de K et de Ep_Soc. Le facteur F2 est également défini par deux regroupements. En dehors du débit de forage qui est la variable à expliquer, le premier regroupement du facteur F2 contrôle trois autres variables qui sont Qs, T et Qae_1 situés dans la partie positive. Le second regroupement est défini seulement par Nae. Le facteur F3 montre quasiment le même regroupement que le facteur F2. Cependant, on constate que le nombre d'arrivées d'eau (Nae), situé dans la partie négative du facteur F2, est situé dans la partie positive pour le facteur F3. Ce résultat pourrait démontrer le faible poids de cette variable dans la définition du débit de forage d'eau. L'analyse de la matrice de corrélation montre que les différents regroupements traduisent des variables corrélées entre elles. Ce qui veut dire qu'elles apportent la même information (on parle alors de redondance).

En définitive les variables explicatives retenues comme étant les plus influentes sur la productivité des forages d'eau et estimables à partir de données géophysiques sont:

- facteur F1 : la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae_1) et l'épaisseur de socle (Ep_Soc);
- facteur F2 : la transmissivité (T) et le nombre d'arrivées d'eau (Nae);
- facteur F3 : la transmissivité.

Pour la conception des modèles de régression linéaire multiple, deux structures de modèle ont été retenues:

- modèle 1: la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae_1), l'épaisseur de socle (Ep_Soc), la transmissivité (T) et le nombre d'arrivées d'eau (Nae) ;
- modèle 2: la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae_1) et l'épaisseur de socle (Ep_Soc) et la transmissivité (T).

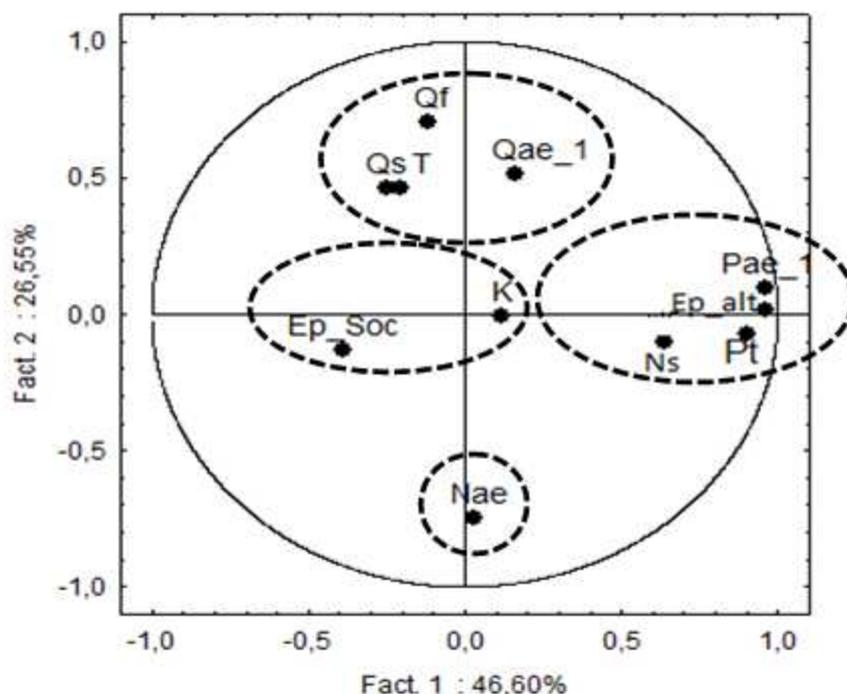


Fig. 4: Plan factoriel F1-F2 des variables.

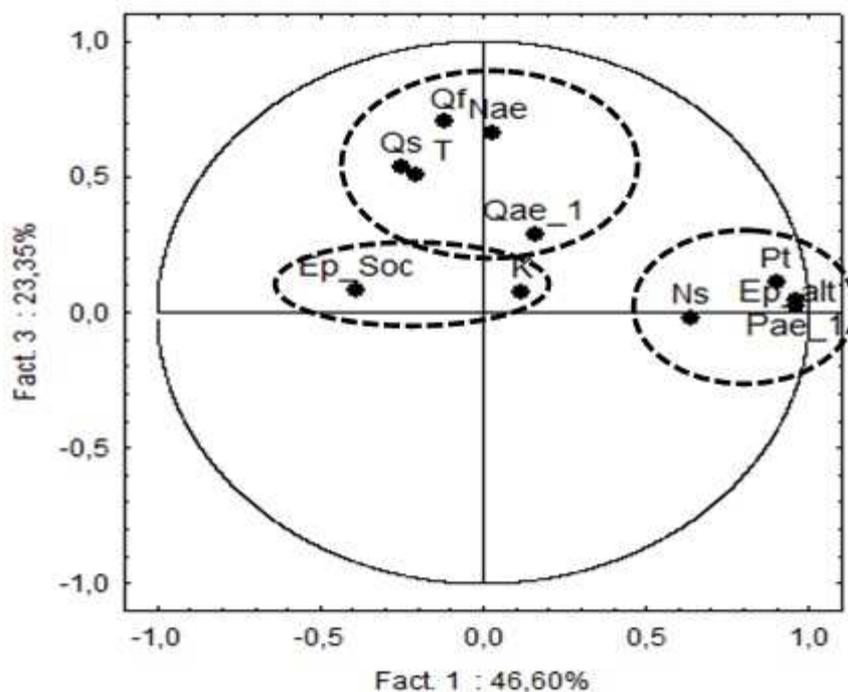


Fig. 5: Plan factoriel F1-F3 des variables.

4.2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION STATISTIQUE DE LA PRODUCTIVITÉ DES FORAGES D'EAU

Les tableaux 4 et 5 donnent les coefficients des régressions linéaires et les erreurs-types de chaque coefficient. On constate que pour les deux modèles, l'erreur-type (ou valeur de probabilité selon le test de Student) relatives aux variables physiques (épaisseur forée dans le socle, nombre d'arrivées d'eau et la profondeur de la première arrivée d'eau significative)

est inférieure à 1%. Quant à celle de la transmissivité, elle est relativement élevée (4,155-4,183). L'erreur-type de la constante est dans l'ensemble inférieure à 1,5%. Les valeurs relativement élevées d'erreurs-types pour la transmissivité sont liées à la relative faiblesse des valeurs de celle-ci (10^{-7} à 10^{-3} m²/s). Ces résultats traduisent des relations étroites entre le débit de forage (variable expliquée) et les variables explicatives en général et les variables physiques au regard du test de Student en particulier. Ceci signifie que chaque variable a une contribution significative sur le débit de forage d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien.

Tableau 4: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 1.

Variables	Coefficients	Erreur-Type
Constante	1,124	1,441
Transmissivité (T)	41 744,069	4155,368
Epaisseur forée dans de socle (Ep_Soc)	$1,286.10^{-2}$	$2,257.10^{-2}$
Nombre d'arrivée d'eau (Nae)	$-3,685.10^{-1}$	$2,415.10^{-1}$
Profondeur de la première arrivée d'eau (Pae_1)	$1,951.10^{-2}$	$1,565.10^{-2}$

Tableau 5: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 2

Variables	Coefficients	Erreur-Type
Constante	$9,807.10^{-2}$	1,284
Transmissivité (T)	41 607,937	4183,022
Epaisseur forée dans de socle (Ep_Soc)	$7,538.10^{-3}$	$2,245.10^{-2}$
Profondeur de la première arrivée d'eau (Pae_1)	$1,971.10^{-2}$	$1,576.10^{-2}$

Les équations de régression obtenues sont :

- modèle 1 :

$$Q=41\ 744,069*T+1,286.10^{-2}*Ep_Soc-3,684.10^{-1}*Nae+1,951.10^{-2}*Pae_1+1,124 \quad (7)$$

- modèle 2 : $Q=41\ 607,937*T+7,538.10^{-3}*Ep_Soc+1,971.10^{-2}*Pae_1+0,098 \quad (8)$

Le tableau 6 présente les performances des deux modèles de simulation des débits de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien développés (modèle 1 et modèle 2).

Tableau 6: Performances des modèles développés.

	Performance en calage		Performance en validation	
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 1	Modèle 2
R	0,726	0,718	0,673	0,687
Biais	$7,092.10^{-4}$	$2,323.10^{-7}$	$2,51.10^{-1}$	$1,447.10^{-2}$
RMSE	2,544	2,575	2,862	2,792

L'analyse du tableau montre de forts coefficients de corrélation variant entre 72 et 73 % pour les deux modèles en phase de calage. Pour la validation, il est également observé de forts coefficients de corrélation oscillant entre 67 et 69% pour les deux modèles. Ces résultats montrent que le débit des forages observé et le débit des forage simulé sont corrélés. Le modèle 1 présente des valeurs de corrélation légèrement plus élevées quelle que soit la phase d'évaluation. Les plus fortes valeurs sont obtenues en phase de calage. Le biais obtenu varie de 10^{-7} à 10^{-4} , en phase de calage et de 10^{-2} à 10^{-1} en phase de validation. Les valeurs les plus faibles ont été obtenues en calage. Le modèle 2 présente particulièrement les valeurs les plus faibles en calage comme en validation. Les différentes valeurs obtenues en calage comme en validation traduisent des résultats satisfaisants d'autant plus que les valeurs sont très proches de 0. Les valeurs de RMSE fluctuent entre 2,5 et 2,9 avec les valeurs les plus faibles en calage. La valeur la plus faible en calage est obtenue pour le modèle 1. Cependant, en validation, la valeur la plus faible a été obtenue pour le modèle 2. Les différentes valeurs au sein d'une même phase d'évaluation sont sensiblement proches. En définitive, les résultats obtenus tendent vers zéro, ce qui traduit une satisfaction générale. Les valeurs du critère de robustesse au regard du coefficient de corrélation des modèles 1 et 2 sont respectivement de 5,3% et 3,1% et restent dans l'ensemble inférieures à 10%.

Une analyse qualitative des résultats de calage (Fig. 6 et 7) et de validation (Fig. 8 et 9) a été effectuée. Les représentations graphiques des débits de forage simulés en fonction des débits de forage observés par les différents modèles montrent que les points sont bien repartis le long de la diagonale ($y=x$). Ces résultats graphiques confirment les résultats des critères numériques d'évaluation des différents modèles et démontrent la capacité des modèles à prévoir des débits à partir des paramètres hydrauliques et physiques des forages qui se rapprochent des débits observés.

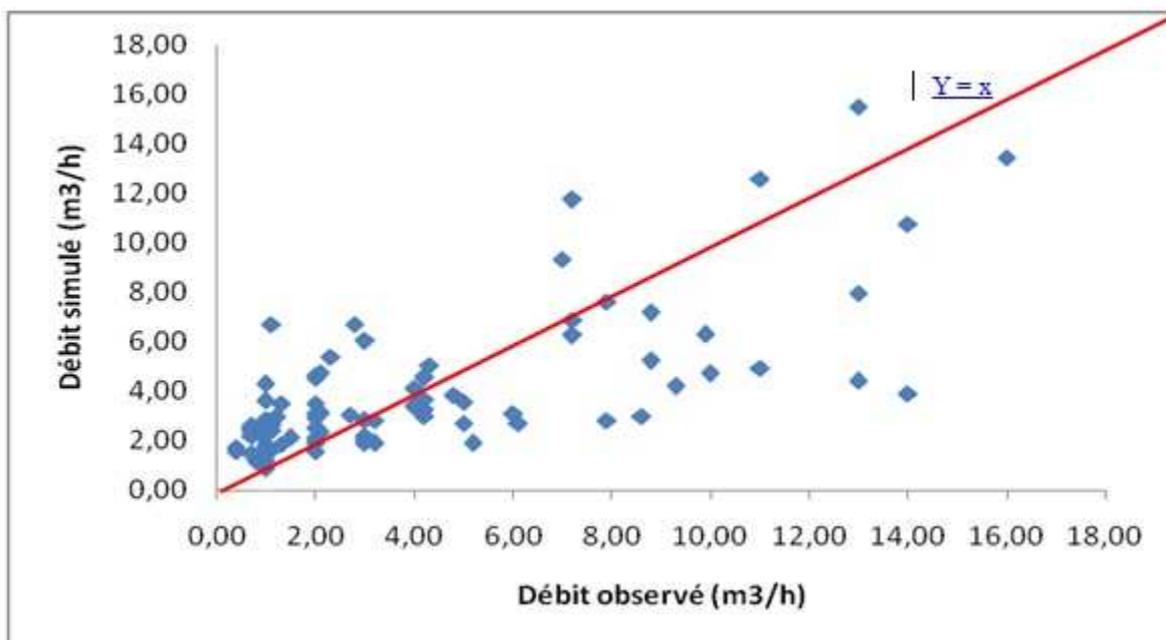


Fig. 6: Débits observés et escomptés (m^3/h) par le modèle 1 en calage.

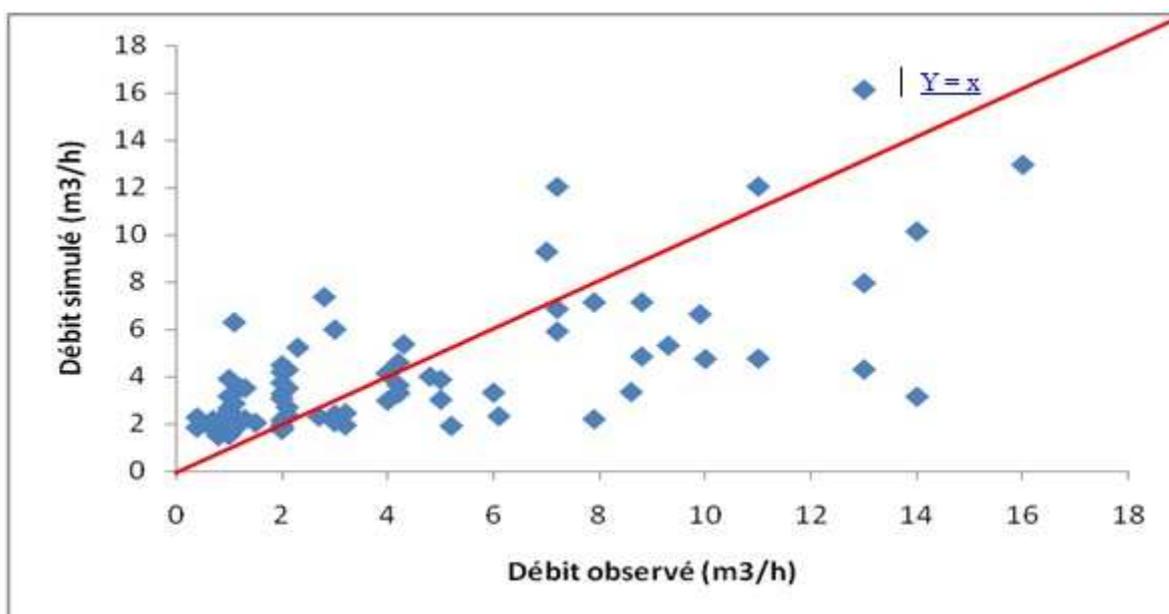


Fig. 7: Débits observés et escomptés (m^3/h) par le modèle 2 en calage.

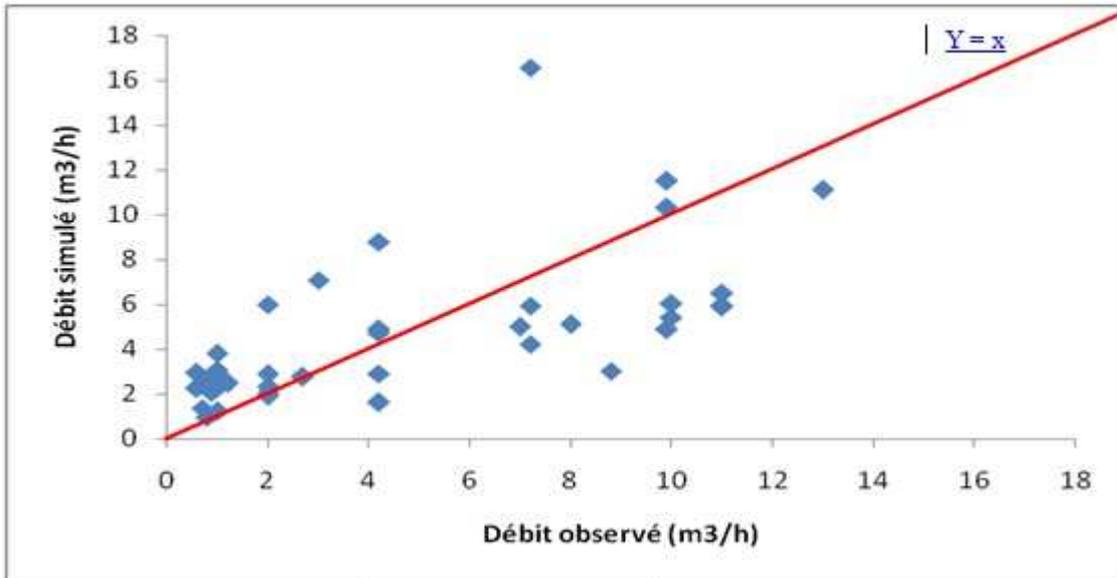


Fig. 8: Débits observés et escomptés (m^3/h) par le modèle 1 en validation.

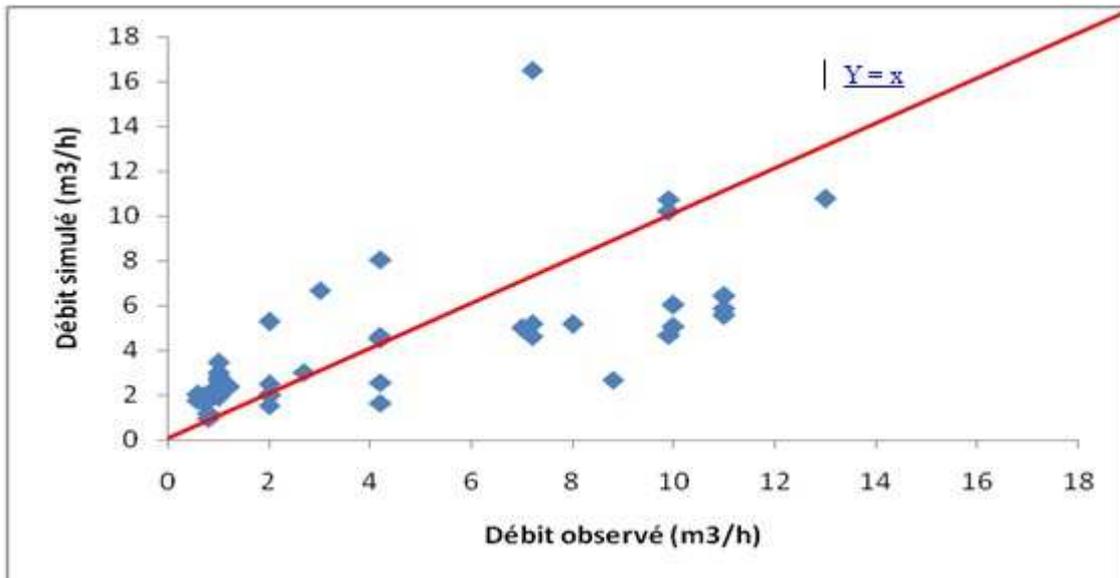


Fig. 9: Débits observés et escomptés (m^3/h) par le modèle 2 en validation.

4.3 DISCUSSION

Les variables explicatives pertinentes et estimables par les mesures géophysiques de surface retenues pour cette étude sont la transmissivité, l'épaisseur de socle, le nombre d'arrivées d'eau et la profondeur de la première arrivée d'eau. En effet, la profondeur de la première arrivée d'eau significative, l'épaisseur de socle et le nombre d'arrivées d'eau peuvent être prédéterminées par les sondages électriques [1, 2, 4, 5, 7]. La profondeur de la première arrivée d'eau significative peut être assimilée à la profondeur de la fracture la plus active du point de vue hydraulique. Le nombre d'arrivées d'eau peut être assimilé au nombre de fractures hydrauliquement actives. Quant à la transmissivité, elle peut être déterminée à partir des sondages électriques et des sondages par résonance magnétique protonique (RMP) [3-6]. Des auteurs [16-18] d'études menées en milieux de socle de Côte d'Ivoire et du Tchad, ont utilisé les mêmes paramètres physiques que ceux retenus dans le cadre de cette étude pour l'établissement des équations de productivité à savoir l'épaisseur de socle, le nombre d'arrivées d'eau et la profondeur de la première arrivée d'eau significative. La différence significative dans le choix des variables se situe dans la transmissivité. En effet, concernant les auteurs précités, le quatrième paramètre pertinent retenu a été la vitesse d'avancement dans le socle. Les paramètres hydrauliques et physiques ont été utilisés dans cette étude pour apprécier

l'apport des paramètres hydrauliques dans la modélisation de la productivité des forages en milieu de socle contrairement aux travaux antérieurs [16-18].

Les valeurs obtenues pour l'erreur-type pour les différentes variables explicatives sont généralement faibles (inférieures à 1%) surtout pour les variables physiques. Ces résultats montrent que chaque variable a une contribution significative sur la le débit de forage d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Les fortes valeurs d'erreur-type obtenues pour la transmissivité seraient dues à la forte variabilité des valeurs de transmissivité. En effet, le coefficient de variation est de 123%, ce qui traduit une série très hétérogène. Au regard des résultats des critères d'évaluation de la performance (coefficient de corrélation, biais, racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) et de la robustesse ainsi que des représentations graphiques, on peut dire que les deux modèles sont performants et robustes. Au niveau de la performance, le modèle 1 a été meilleur en calage mais en validation, c'est le modèle 2 qui a démontré une plus meilleure capacité à prévoir le débit des forages. Quant à la robustesse, le modèle 2 a été plus robuste que le modèle 1. En passant du modèle 2, qui est constitué de trois variables explicatives (transmissivité, épaisseur forée dans le socle fissuré et première arrivée d'eau significative) au modèle 1 composé de quatre variables explicatives (transmissivité, épaisseur forée dans le socle, première arrivée d'eau significative et nombre d'arrivées d'eau), il y a une légère amélioration de la performance quelle que soit la phase, mais de manière globale les performances ne sont pas très satisfaisantes et le coefficient de corrélation (R) demeure toujours d'environ 0,7. On en déduit que l'ajout du nombre d'arrivées d'eau n'a pas apporté suffisamment d'informations significatives au modèle 1 afin de lui permettre de faire une prévision satisfaisante du débit des forages. En effet, le nombre d'arrivées d'eau n'influence pas significativement la productivité des forages d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien sachant qu'un grand nombre d'arrivées d'eau peut produire un débit inférieur à un faible nombre d'arrivées d'eau si celles-ci ont un débit plus important. L'ajout du nombre d'arrivées d'eau comme variable explicative au modèle 1 a engendré une forte baisse de la robustesse donc une augmentation du critère de robustesse (+2,2%). En effet, le modèle 2 produit des performances qui sont plus constantes en passant du calage à la validation comparativement au modèle 1. Le modèle 2 produisant presque les mêmes performances que le modèle 1 alors qu'il est constitué de trois variables explicatives comparé au modèle 1 qui en compte quatre, semble donc le plus parcimonieux. La validation est très essentielle dans l'évaluation d'un modèle et le choix d'un modèle est d'abord guidé par sa performance. Les résultats de notre étude suggèrent que le modèle 2 se présente comme le meilleur modèle pour la prévision du débit des forages d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien en général et particulièrement dans l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire).

5 CONCLUSION

L'objectif général de notre recherche était de développer et d'évaluer des modèles statistiques capables de prédire le débit des forages en milieux de socle cristallin et cristallophyllien à partir de paramètres hydrauliques et physiques estimables par les méthodes de prospection géophysique de surface. La zone test a été l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). L'application de l'analyse en composantes principales normées (ACPN) aux variables hydrauliques des forages d'eau (débit du forage, débit spécifique, débit de la première arrivée d'eau, transmissivité, niveau statique, conductivité hydraulique et nombre d'arrivées d'eau) et physiques (épaisseur d'altérites, épaisseur de socle sain foré, profondeur de la première arrivée d'eau et profondeur totale du forage) a permis d'identifier les variables explicatives les plus pertinentes pour la conception du modèle de productivité en milieu de socle. Les résultats de l'ACPN ont montré que les variables les plus expressives sont la transmissivité, l'épaisseur de socle fissuré foré, la profondeur de la première arrivée d'eau significative et le nombre d'arrivées d'eau. L'organisation de ces différentes variables a permis de proposer deux modèles dont le premier comprend les quatre variables explicatives retenues alors que le deuxième est constitué de trois variables c'est-à-dire privé du nombre d'arrivées d'eau. Les valeurs généralement faibles de l'erreur-type (inférieures à 1%) surtout pour les variables physiques traduisent des relations étroites entre le débit de forage (variable expliquée) et les variables explicatives en général et particulièrement les variables physiques au regard du test de Student. Ceci signifie que chaque variable a une contribution significative sur le débit de forage d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Deux équations ont été établies explicitant la relation entre les variables explicatives et le débit de forage. L'avantage des modèles présentés dans cette étude réside surtout dans de leur relative simplicité et leur caractère explicite. La présente étude montre que par un choix approprié de paramètres, la régression linéaire multiple peut être très performante dans la prévision du débit des forages. Les deux modèles conçus donnent des résultats acceptables avec des performances satisfaisantes en calage comme en validation au regard des critères d'évaluation choisis que sont le coefficient de corrélation (environ 0,7), le biais sur la moyenne (10^{-7} à 10^{-2}) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (2,5 à 2,9). Ces différents modèles sont également robustes avec une valeur du critère de robustesse variant entre 3,2 et 5,3%. Il est intéressant de noter que, même si les deux modèles ont des performances similaires eu égard au coefficient de corrélation et

à l'erreur quadratique, le critère du biais et le critère de robustesse distinguent ces deux modèles. Plus précisément, le modèle 2 a les valeurs de biais les plus faibles en calage comme en validation et est plus robuste que le modèle 1. Ceci suggère que l'ajout du nombre d'arrivées d'eau n'a pas apporté une amélioration de la simulation du débit de forage en milieu de socle. Il ressort donc de cette étude que le modèle statistique ayant comme variables explicatives la transmissivité, l'épaisseur forcée dans le socle fissuré et la profondeur de la première arrivée d'eau significative (modèle 2), pourrait constituer un excellent outil de prévision du débit de forages en milieu de socle cristallin et cristallophyllien.

REFERENCES

- [1] **R. Guerin et Y. Benderitter**, "Shallow karst exploration using mt-vlf and dc resistivity methods". *Geophysical prospecting*, Vol.43, pp.635-653, 1995.
- [2] **C. Meyer**, « Applications de la géophysique aux recherches d'eau souterraine », Technique et documentation, Lavoisier, 183 p., 2001.
- [3] **J.M. Vouillamoz**, « La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive: les sondages par résonance magnétique protonique ». Thèse de Doctorat de l'Université de Paris XI, 216p., 2003.
- [4] **R. Guérin**, "Borehole and surface-based hydrogeophysics", *Journal of Hydrogeology*, Vol.13, pp.251–254, 2005.
- [5] **V. Durand, B. Deffontaines, V. Leonardi, R. Guerin, R. Wyns, G. Marsily et J.L. Bonjour**, « A multidisciplinary approach to determine the structural geometry of hard-rock aquifers. Application to the plancoet migmatitic aquifer (ne Brittany, w France) », *Bulletin de la Société Géologique Française*, Vol.5, pp.227-236, 2006.
- [6] **M. Sina et M. Razack**, « Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène à partir de la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc) ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol.19, N° (3), pp.221-232, 2006.
- [7] **R. Guerin, J.M. Baltassat, M. Boucher, K. Chalikakis, P.Y. Galibert, J.F. Girard, V. Plagnes et V.R. Remi**, « Geophysical characterisation of karstic networks – application to the ouysse system (poumeyssen, France) », *Comptes rendus Geoscience*, Vol.341, pp.810–817, 2009.
- [8] **T. Lasm, K.F. Kouamé, M.S. Oga, J.R.P. Jourda, N. Soro et H.B. Kouadio**, « Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) », *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol.5, N°97, pp.1-15, 2004a.
- [9] **J.P.R. Jourda, M.B. Saley, E.V. Djangoua, K.J. Kouamé, J. Biémi 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 », *Téledétection*, Vol.5, N°4, pp.339-357, 2005.
- [10] **J.P.R. Jourda, E.V. Djangoua, K.F. Kouamé, M.B. Saley, C. Gronayes, J.J. Achy, J. Biémi et M. Razack**, « Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat », *Téledétection*, Vol.6, N°2, pp.123-142, 2006a.
- [11] **J.P.R. Jourda, M.B. Saley, E.V. Djangoua, K.J. Kouamé, J. Biémi 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 », *Téledétection*, Vol.5, N°4, pp. 339-357, 2006b
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **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.55, N°5, pp. 805-820, 2010.
- [15] **V.M. Sorokoby, M.B. Saley, K.F. Kouamé, M.E.V. Djangoua, M. Bernier, K. Affian et J. Biémi**, « 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.
- [16] **P. Gombert**, « Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale ». *IAHS Publ.*, Vol. 241, pp.113-122, 1997.
- [17] **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.

- [18] **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 Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire ». *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 23, N°1, pp. 1-15, 2010.
- [19] **Y.B. Daouda**, « Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain ». Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, 190 p., 1998.
- [20] **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) », *Télédétection*, Vol. 9, N°1, pp. 33-42, 2010.
- [21] **N.H. Kadio, M.B. Saley, B.E. N'dri, A. Ouattara et J. Biémi**, « Contribution à l'interprétation des linéaments par l'exploitation des Pseudo Images, de l'hydrographie en région tropicale humide: Cas du N'zi-Comoé (Centre de la Côte d'Ivoire) », *European Journal of Scientific Research*, Vol. 24, N°1, pp. 74-93, 2008.
- [22] **A.M. Kouassi, K.E. Ahoussi, K.A. Yao, W.E.J.A. Ourega, K.S.B. Yao et J. Biémi**, « Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) », *Larhyss Journal*, N°10, pp. 57-74, 2012a.
- [23] **A.M. Kouassi, J.C. Okaingni, K.E. Kouakou et J. Biémi**, « Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien : cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2, N°2, pp.92-103, 2013.
- [24] **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.
- K.E. Ahoussi, N. Soro, A.M. Kouassi, G. Soro, B.Y. Koffi et S.P. Zadé**, "Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (5), 1753-1765, 2010.
- [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^{ème} édition, 600 p, 2012.
- [29] **A.M. Kouassi, K.F. Kouamé, Y.B. Koffi, K.A. Kouamé, S. Oularé et J. Biémi**, « 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 J.C. et J. Biémi**, «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, N°5, pp.288-296, 2012b.
- [31] **O. Nascimento**, « Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant ». Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, France, 390p, 1995.
- [32] **Y.B. Koffi, T. Lasm, P.A. Ayrat, A. Johannet, A.M. Kouassi, E. Assidjo et J. Biémi**, «Optimisation des modèles Perceptrons Multicouches avec les algorithmes de premier et de deuxième ordre. Application à la modélisation de la relation pluie-débit du Bandama Blanc, Nord de la Côte d'Ivoire ». *European Journal of Scientific Research*, Vol. 17, N°3, pp.313-328, 2007.