



Cit this: *JOWSET*, **2017** (02), N°01, 130-141

Application of multiple linear regression models for predicting drilling water flow in the hard rock aquifers: Example of N'zi-Comoé area (Central-East of Ivory Coast)

A. M. Kouassi^{1(*)}, K. S. A. Raphaël N'Zai², Y. B. Koffi³, J. Biemi³

^[1] 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), Tél. (+225) 30 64 67 15 (Côte d'Ivoire).

^[2] Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro ; Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG) ; Bp: 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) ; Tél. : (+225) 30 64 36 07 (Côte d'Ivoire).

^[3] 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 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire).

*Auteur Correspondant: e-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr ou michel.kouassi@inphb.edu.ci

The aim of this study is to develop parsimonious statistical models that predict the drilling water flow in the hard rock aquifers using hydrodynamic and physical parameters estimable by the geophysical methods for optimizing the hydrogeological prospecting. The study area is the region of the N'zi-Comoé (Central-East of Ivory Coast). The calibration was performed with a sample of 100 drillings (2/3). The evaluation of the quality of the models in validation phase reveals strong correlation coefficients varying from 0.647 (model 2) to 0.660 (model 1). The biases fluctuate between 0.298 (model 3) and 0.377 (model 2) and tend towards 0. The robustness criterion values range from 6.4% (model 1) to 8.0% (model 2) and remain below 10%. It appears that the four models designed are powerful, robust and parsimonious. However, the models 1 and 3 stand out as the best tools for the exploration of groundwater in the crystalline and crystallophyllian aquifers.

Received: 20 December 2016
Accepted: 28 January 2017
Available online: 30 May 2017

Mots-clés:

Productivity of drillings
Hard rock aquifers
Statistical modeling
Ivory Coast

Introduction

1. Contexte problématique et objectif de l'étude

L'eau joue un rôle important dans le développement économique d'un pays et dans la survie des écosystèmes naturels. Les diverses utilisations de l'eau influent sur sa disponibilité, des points de vue de la quantité, de la qualité et

du temps, des divers besoins économiques, sociaux et écologiques. Les ressources en eau deviennent rares et devront être exploitées à bon escient. De ce fait, il est primordial de veiller à ce que chaque homme en dispose en quantité suffisante, tout en préservant la qualité de l'environnement. Cependant, la pénurie d'eau est devenue un problème vécu par toutes les sociétés et, particulièrement, celles des pays en voie de développement [1]. A l'instar des pays en voie de développement, la Côte d'Ivoire connaît des problèmes d'approvisionnement en eau potable. En effet, la

majeure partie du territoire national est occupée essentiellement par les terrains du socle cristallin et cristallophyllien qui représentent 97,5% de sa superficie totale. L'exploitation des eaux souterraines dans ces terrains se fait au moyen de deux types de réservoirs, ceux d'altérites et ceux de fractures. Mais les aquifères de fissures sont les plus recherchés lors des prospections hydrogéologiques, car ils concentrent la majorité des réserves d'eaux souterraines et sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières et moins exposés aux phénomènes de pollution du fait de la présence de niveaux altérés sus-jacents. L'eau souterraine est difficile à appréhender en milieu de socle, d'où la nécessité d'appliquer des stratégies et des techniques spécifiques telles que la géophysique. En effet, les paramètres physiques (épaisseur d'altération meuble, épaisseur de l'horizon fissuré foré, profondeurs des fractures hydrauliquement actives, etc.) définissant la fonction capacitive (porosité, coefficient d'emmagasinement) et les paramètres hydrauliques exprimant la fonction conductrice des aquifères (perméabilité, transmissivité) des aquifères peuvent être appréhendés par l'interprétation de mesures géophysiques malgré la variation de la précision des méthodes géophysiques [2-4].

Devant les nombreux échecs en matière de prospection des eaux souterraines en milieux de socle, les recherches sur l'eau ont été orientées vers une meilleure connaissance des aquifères des fissures. C'est dans ce sens que des études visant à rechercher les relations entre la productivité des forages en milieux de socle et la fracturation ont été motivées [5-11]. Dans le même élan, des approches de modélisation ont été utilisées. Ainsi, la régression linéaire multiple a été utilisée par plusieurs auteurs pour l'étude de la productivité des forages d'eau en milieux de socle [12-18]. Dans ces différents travaux, les modèles conçus ont démontré leur capacité à simuler la profondeur limite d'arrêt de forage, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré et le débit de forage. Pour ce qui concerne spécifiquement le débit de forage, plusieurs modèles ont été développés en fonction des paramètres physiques et hydrauliques des aquifères fissurés [15-16]. Ces travaux ont été basés sur l'analyse statistique multivariée (ACPN) pour la détermination des paramètres qui semblent influencer la productivité des forages d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Les variables retenues comme étant les plus influentes sur la productivité des forages d'eau sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré, l'épaisseur de l'altération meuble, la transmissivité et le nombre d'arrivées d'eau.

L'objectif de cette étude est de concevoir des modèles statistiques parcimonieux capables de prévoir le débit des forages en milieux de socle à partir de paramètres hydrodynamiques et physiques estimables par les méthodes de prospections géophysiques en vue de l'optimisation de la prospection hydrogéologique. Ce travail est basé sur deux

principales hypothèses. La première suppose la détermination des variables explicatives des modèles à concevoir à partir de mesures géophysiques. La deuxième hypothèse admet que les modèles avec un nombre réduit de variables explicatives sont capables de simuler le débit de forage dans les mêmes performances que les premiers modèles qui ont un nombre plus élevé de variables explicatives. La méthodologie a consisté à concevoir des modèles à régressions linéaires multiples, à les évaluer sur la base de critères numériques et graphiques et à analyser leurs rentabilités en vue de prise de décision.

2. Présentation de la zone d'étude

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 Kouassi-kouassikro ;
- la région du Iffou avec pour chef-lieu Daoukro, comprend les départements de Daoukro, Prikro, M'Bahiakro, Ouellé 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. La hauteur pluviométrique interannuelle calculée sur la période 1950-2000 est de 1155 mm. Le régime climatique est caractérisé par des précipitations moyennes mensuelles variant entre 11 mm et 198 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).

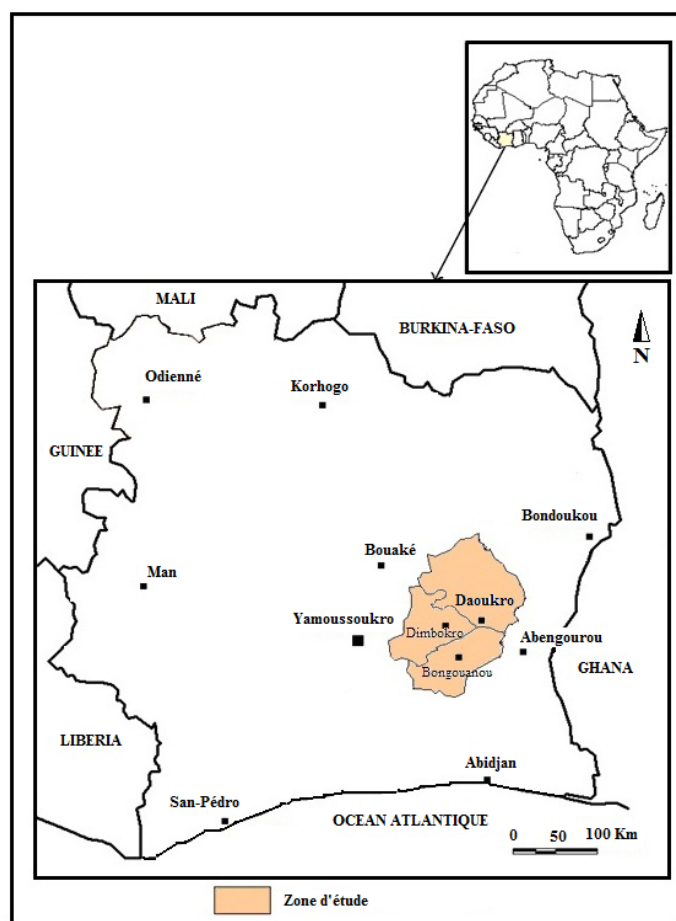
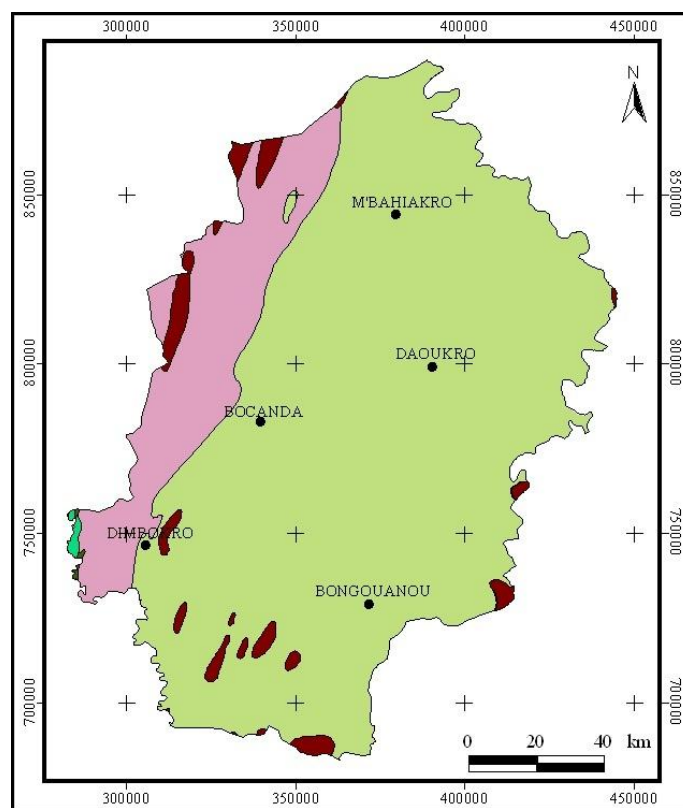


Fig. 1: Localisation de la zone d'étude



LEGENDE

- | | |
|---|--|
| Schistes, Grès, Conglomérats | Granites récents |
| Volcano-sédiments
(Laves acides ou basiques) | Granites, Migmatites, Gneiss |

Fig. 2: Carte géologique de la zone d'étude

On distingue les roches éburnéennes et les roches birimiennes. Les roches éburnéennes sont constituées essentiellement de granitoides 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 [9, 19, 20, 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 meuble 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).

La fréquence des débits de forage faibles à forts (supérieur ou égal à 1 m³/h) est de 67,02% dans l'ex-région du N'zi-Comoé [22]. Les valeurs de conductivité hydraulique varient entre 1,79.10⁻⁸ m/s et 3,80.10⁻⁶ m/s, pour une moyenne de 6,35.10⁻⁷ m/s et un écart-type de 7,23.10⁻⁷. Les différentes classes de transmissivité faible, moyenne et forte regroupent respectivement 23,04%, 58,64% et 18,32% des points d'eau. Les forages ayant une transmissivité supérieure à 10⁻⁵ représentent 76,96%. Les transmissivités moyennes sont majoritaires dans les classes de moyenne à forte au niveau des terrains granitiques (78,57%), dans les grès (69,23%) et dans l'ensemble métamorphique (schistes, métagranites et gneiss) (78,66%). Les transmissivités sont plus fortes dans les terrains métamorphiques (gneiss, métagranites et schistes) et granitiques et moins fortes dans les terrains gréseux. Les formations gréseuses et les formations métamorphiques (gneiss, métagranites et schistes) sont les plus productives. Les épaisseurs d'altération meuble les plus fréquentes se situent dans l'intervalle de 45 à 75 m avec une fréquence de 51%. Dans les formations granitiques, les épaisseurs d'altération se situent entre 5 et 45 m. Au niveau des grès, la majorité des débits obtenus se concentrent dans la tranche d'altération ayant une épaisseur comprise entre 45 et 90 m. Dans les

terrains métamorphiques (gneiss, métagranites et schistes), les forages productifs ont des épaisseurs d'altération se trouvant dans la tranche 20-100 m.

Matériel et méthodes

1. Matériel

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. Ces fiches techniques de forage ont permis d'obtenir des données relatives aux paramètres physiques [épaisseur de l'altération meuble (Ep_Alt) et épaisseur de l'horizon fissuré foré (Ep_Soc)] et hydrodynamiques [débit de forage (Q_f) et transmissivité (T)]. Les valeurs de transmissivité ont été évaluées par la méthode de Cooper-Jacob en remontée [12]. Les caractéristiques statistiques des paramètres hydrodynamiques et physiques sont consignées dans le tableau 1. Le débit de forage va de 0,4 à 16 m³/h avec une moyenne de 3,2 m³/h et un écart-type de 98,45%. La transmissivité varie entre $1,7 \cdot 10^{-6}$ et $3,62 \cdot 10^{-4}$ avec une moyenne de $5,45 \cdot 10^{-5}$ et un écart-type de $6,72 \cdot 10^{-5}$. L'épaisseur de l'altération meuble est comprise entre 4 et 104 m avec une moyenne de 54,2 m et un écart-type de 21,15. Quant à l'épaisseur de l'horizon fissuré foré, elle oscille entre 0 et 73,43 m avec une moyenne de 24,33 m et un écart-type de 12,68. L'analyse de ce tableau 1 montre que les valeurs du coefficient de variation (CV) (rapport de l'écart-type à la moyenne) sont supérieures à 25% pour la transmissivité (123,21%), le débit de forage (98,45%) et l'épaisseur de l'horizon fissuré foré (52,11%) et inférieures à 25% pour l'épaisseur de l'altération meuble (21,83%). L'épaisseur de l'altération meuble est donc homogène alors que la transmissivité, le débit de forage et l'épaisseur de l'horizon fissuré foré sont très variables dans l'espace.

Tableau 1: Caractéristiques statistiques des paramètres étudiés

Paramètres	Min	Max	Moy-	Ecart-type	CV
T (m²/s)	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-5}$	$6,72 \cdot 10^{-5}$	123,2
Q (m³/h)	0,4	16	3,8	3,74	98,45
Ep_Alt (m)	4	104	54,2	21,15	21,83
Ep_Fis (m)	0	73,43	24,33	12,68	52,11

2. Méthodologie

2.1. Choix des variables explicatives des modèles

Le modèle conceptuel hydrogéologique qui sous-tend ce travail est le modèle bicouche [23-25]. En effet, le modèle

conceptuel simple d'aquifère de socle admis est constitué d'un recouvrement semi-perméable capacitif alimenté directement par les précipitations et surmontant l'aquifère de fractures captif, à fonction essentiellement conductrice et drainant la couverture. Une analyse basée sur les variables utilisées par les auteurs tels que Kouadio et al. [14], Doumbia et Fofana [15] et Kouassi et al. [16] et les différentes hypothèses émises a été faite. Il est constaté que les mesures géophysiques ne permettent pas de déterminer de façon efficace et précise la profondeur de la première arrivée d'eau significative surtout en milieux fissurés. En effet, toutes les fractures ne sont pas hydrauliquement actives. Il est difficile de déterminer le débit d'une arrivée d'eau liée à une fracture à partir de mesures géophysiques. Quant au nombre d'arrivées d'eau, en tant que variable explicative, il n'a pas apporté de performance aux modèles conçus par Kouassi et al. [16]. La transmissivité a été retenue comme variable principale vu qu'elle a démontré son apport dans l'amélioration de la performance des modèles existants [15-16]. Ainsi, dans le souci d'optimiser la prospection hydro-géophysique, les variables telles que la profondeur de la première arrivée d'eau significative et le nombre d'arrivées d'eau ont été donc éliminées dans le cadre de la présente étude. Ainsi, trois variables explicatives capables d'être estimées par la géophysique avec beaucoup plus de précision [2, 3, 26-29] ont été retenues. Il s'agit de la transmissivité, l'épaisseur de l'altération meuble et l'épaisseur de l'horizon fissuré foré. Plusieurs structures ont été proposées à partir de ces différentes variables. Le modèle 1 est composé de la transmissivité. Le modèle 2 est constitué de la transmissivité et de l'épaisseur de l'horizon fissuré foré. Le modèle 3 est défini par la transmissivité et l'épaisseur de l'altération meuble. Le modèle 4 est constitué de la transmissivité, de l'épaisseur de l'horizon fissuré foré et de l'épaisseur de l'altération meuble. En somme, la variable expliquée est le débit de forage et les variables explicatives sont la transmissivité, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré et l'épaisseur de l'altération meuble.

2.2. 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 [30]. 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. L'équation d'une régression linéaire multiple 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 [31-32]:

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

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 première 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 [33]. 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 [16-18]. 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 différerait 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 calculée de façon automatique avec le logiciel Excel 2013. Le coefficient de variation c'est-à-dire le rapport de l'erreur-type au coefficient de régression, a été calculé pour chaque variable.

Plusieurs critères ont été développés pour évaluer les différents modèles.

2.3. 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 [34]. 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):

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

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 ≤ 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 [35].

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 4):

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - Q'_i| \quad (4)$$

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.

2.4. 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 [16-18]. 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 5):

$$R' = 100 \times \left| R_{\text{validation}} - R_{\text{calage}} \right| \quad (5)$$

2.5. Analyse de la rentabilité des modèles

Pour chacun des forages réalisés, un seuil de débit Q_0 (correspondant à un niveau de satisfaction donné) auquel est comparé le débit théorique de forage Q_f estimé par les différents modèles est fixé. Dans le cadre de cette étude, deux seuils de débit de 1 m³/h et 2,5 m³/h, représentant respectivement le seuil maximum des débits considérés comme très faibles et faibles selon la classification du CIEH

(Comité Inter-Etats d'Etudes Hydrauliques), ont été fixés. Pour l'analyse, des comparaisons sont effectuées entre le débit potentiel de forage et le seuil fixé. Deux cas possibles se présentent:

-hypothèse 1: $Q_f < Q_0$, on décide de ne pas réaliser le forage ;

-hypothèse 2: $Q_f \geq Q_0$, on décide de réaliser le forage.

L'évaluation économique du projet consiste en l'estimation de l'excédent de dépense mis en évidence par l'application des différents modèles. Pour chaque seuil fixé, le nombre de forages réalisés qui auraient été rejetés par les modèles est déterminé. Pour ce faire, on procède à une analyse comme suit:

- le modèle suggère de réaliser le forage alors que le débit observé (Q_{obs}) est inférieur au seuil fixé ($Q_f \geq Q_0$ et $Q_{\text{obs}} < Q_0$), le modèle n'est pas rentable ;
- le modèle suggère de ne pas réaliser le forage alors que le débit observé est supérieur au seuil fixé ($Q_f < Q_0$ et $Q_{\text{obs}} \geq Q_0$), le modèle n'est pas rentable ;
- le modèle suggère de réaliser le forage alors que le débit observé est supérieur au seuil fixé ($Q_f \geq Q_0$ et $Q_{\text{obs}} \geq Q_0$), le modèle est économiquement rentable ;
- le modèle suggère de ne pas réaliser le forage alors que le débit observé est inférieur au seuil fixé ($Q_f < Q_0$ et $Q_{\text{obs}} < Q_0$), le modèle est économiquement rentable.

Cette analyse peut être résumée dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2: Analyse de la rentabilité des modèles.

	$Q_{\text{obs}} \geq Q_0$	$Q_{\text{obs}} < Q_0$
$Q_f \geq Q_0$	Modèle rentable	Modèle pas rentable
$Q_f < Q_0$	Modèle pas rentable	Modèle rentable

En multipliant le cumul des profondeurs des forages qui n'auraient pas dû être réalisés selon le modèle par le coût du mètre linéaire de forage (80 000 FCFA) [14], on obtient le capital qui aurait pu être économisé dans le cadre de ces campagnes hydrogéologiques.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Architecture des modèles développés

Les tableaux 3, 4, 5 et 6 donnent les coefficients de régressions linéaires et les erreurs-types de chaque coefficient. Pour les quatre modèles, l'erreur-type relative aux variables physiques (épaisseur de l'horizon fissuré foré et épaisseur de l'altération meuble) est comprise entre $1,2 \cdot 10^{-2}$ et $2,5 \cdot 10^{-2}$. Quant à celle de la transmissivité, elle est relativement très élevée (3727-3777). Le coefficient de variation est inférieur à 10% pour le cas de la transmissivité. Il est relativement élevé pour les variables physiques (supérieur à 99%). Ces résultats traduisent des relations relativement étroites entre le débit de forage (variable expliquée) et les variables explicatives. Ceci signifie que chaque variable a une contribution significative sur le débit de forage d'eau en milieu de socle cristallin et cristallophyllien en général et la transmissivité en particulier.

Tableau 3: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 1.

Variables	Coefficient de régression	Erreur-type	Coefficient de variation
Constante	1,565	0,337	21,511
T	38714,635	3727,035	9,627

Tableau 4: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 2

Variables	Coefficient de régression	Erreur-type	Coefficient de variation
Constante	1,993	0,588	29,479
T	38806,142	3732,414	9,618
Ep_Fis	-0,018	0,02	-112,367

Tableau 5: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 3

Variables	Coefficient de régression	Erreur-type	Coefficient de variation
Constante	0,927	0,719	77,596
T	39169,365	3754,379	9,585
Ep_Alt	0,012	0,012	99,683

Tableau 6: Coefficients de régression et erreurs-types du modèle 4

Variables	Coefficient de régression	Erreur-type	Coefficient de variation
Constante	1,316	1,306	99,255
T	39092,713	3777,477	9,663
Ep_Alt	0,009	0,015	171,924
Ep_Fis	-0,009	0,025	-279,942

Les équations obtenues à partir des coefficients de régression sont:

- modèle 1: $Q = 38\,714,635T + 1,565$ (6)

- modèle 2: $Q = 38\,806,142T - 0,018Ep_Fis + 1,993$ (7)

- modèle 3: $Q = 39\,169,365T + 0,012Ep_Alt + 0,927$ (8)

- modèle 4: $Q = 39\,092,713T - 0,009Ep_Fis + 0,009Ep_Alt + 1,316$ (9)

2. Performance des modèles développés

Le tableau 7 présente les performances en phase de calage des quatre modèles de simulation des débits de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien développés. L'analyse du tableau 7 montre de forts coefficients de corrélation variant de 0,724 (modèle 1) à 0,728 (modèle 4). Ces résultats montrent que les débits de forage observés et les débits de forage simulés sont fortement corrélés. Tous les modèles ont sensiblement les mêmes valeurs de coefficient de corrélation donc les mêmes performances en calage en tenant compte du critère de corrélation comme outil d'évaluation de la qualité des différents modèles. Quant au biais, il varie de $3,09 \cdot 10^{-5}$ (modèle 4) à $1,69 \cdot 10^{-1}$ (modèle 1). Les différentes valeurs obtenues traduisent des résultats satisfaisants d'autant plus que ces valeurs de biais tendent toutes vers zéro (0). Au regard des deux critères, le modèle le plus performant est le modèle 4, suivi des modèles 2 et 3. Le modèle 1 a été le moins performant en calage.

Tableau 7: Performances en calage des modèles développés

Critères	M-1	M-2	M-3	M-4
Corrélation	0,724	0,727	0,727	0,728
Biais	$1,69 \cdot 10^{-1}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	$3,989 \cdot 10^{-4}$	$3,09 \cdot 10^{-5}$

NB: M: Modèle

Le tableau 8 présente les performances en phase de validation des quatre modèles de simulation des débits de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien développés. L'analyse du tableau 8 montre de forts coefficients de corrélation allant de 0,647 (modèle 2) à 0,660 (modèle 1). Ces résultats montrent que les débits de forage observés et les débits de forage simulés sont fortement corrélés. Le biais obtenu varie de 0,298 (modèle 3) à 0,377 (modèle 2). Les

différentes valeurs obtenues traduisent des résultats satisfaisants dans l'ensemble. L'analyse des résultats relatifs aux différents critères montrent que le modèle 1 et le modèle 3 sont les plus performants en phase de validation. Tous les modèles ont démontré leur capacité à simuler les débits de forage à partir de données de la même zone d'étude mais qui n'ont pas été utilisées en phase de calage.

Tableau 8: Performances des modèles en validation

	M-1	M-2	M-3	M-4
Corrélation	0,66	0,647	0,653	0,649
Biais	0,362	0,377	0,298	0,322

NB: M: Modèle

Une analyse qualitative des résultats de validation (Fig. 3-6) 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 sensiblement 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 hydrodynamiques et physiques des forages qui se rapprochent des débits observés en phase de validation.

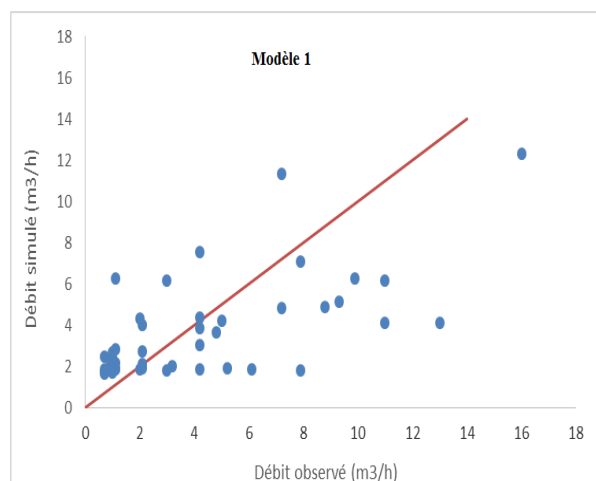


Fig. 3: Débits observés et simulés par le modèle 1 en phase de validation

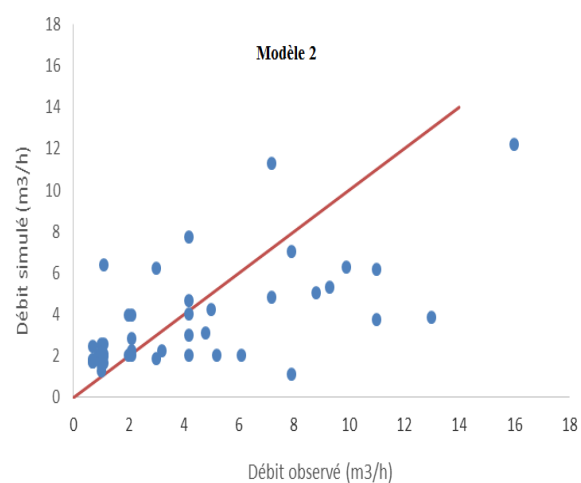


Fig. 4: Débits observés et simulés par le modèle 2 en phase de validation

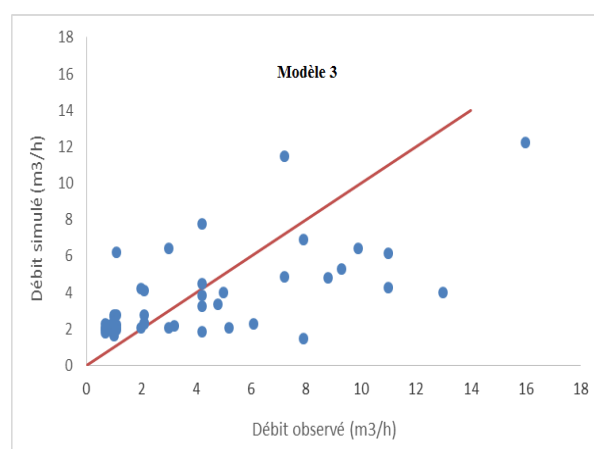


Fig. 5: Débits observés et simulés par le modèle 3 en phase de validation

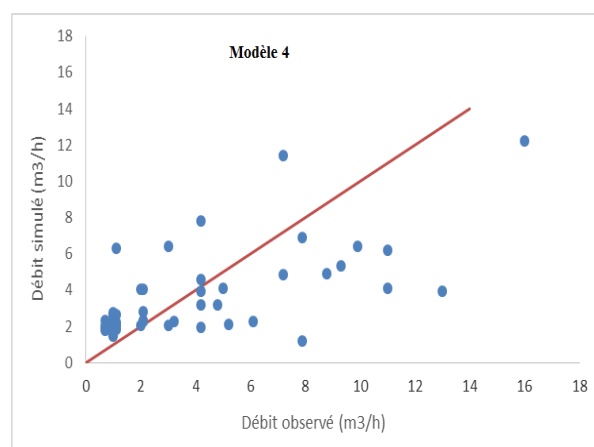


Fig. 6: Débits observés et simulés par le modèle 4 en phase de validation

Les valeurs du critère de robustesse des différents modèles (1, 2, 3 et 4) varient entre 6,4% et 8,0% et restent dans l'ensemble inférieures à 10% (Tableau 9). Les différents modèles sont donc robustes dans l'ensemble. Cependant, les modèles les plus robustes sont les modèles 1 et 3.

Tableau 9: Valeurs du critère de robustesse

Modèles	M-1	M-2	M-3	M-4
Critère de robustesse	6,4%	8,0%	7,4%	7,9%

NB: M: Modèle

3. Rentabilité des modèles développés

Pour chacun des seuils considérés, le test logique a été appliqué sur l'ensemble des 150 forages (Tableau 10). L'application des quatre modèles a permis d'obtenir 19 cas d'échec pour le seuil 1, ce qui représente un taux de succès de 87,33%. Pour le seuil 2, l'application du modèle 1 a permis d'obtenir 33 cas d'échec contre 35 cas pour le modèle 2 et 34 cas pour chacun des modèles 3 et 4. Ainsi, il a été enregistré un taux de succès de 78% pour le modèle 1 contre 76,66% pour le modèle 2 et 77,33% pour les modèles 3 et 4. Ces taux témoignent de la capacité des modèles à permettre de prendre des décisions quant à la réalisation ou non d'un forage.

Tableau 10: Résultats du test logique en termes de taux de succès (%)

	M-1	M-2	M-3	M-4
Seuil 1	87,33	87,33	87,33	87,33
Seuil 2	78,00	76,66	77,33	77,33

NB: M: Modèle

Pour les 150 données de forage utilisées pour le calage et la validation des modèles, le mètre cumulé est de 11 782,02 m. Ainsi le mètre cumulé des forages qui n'auraient pas dû être réalisé selon chacun des modèles a été calculé. Pour le seuil 1, tous les forages auraient été réalisés par l'application des différents modèles. Pour le seuil 2, le linéaire total de forages qui n'aurait pas été réalisé selon chaque modèle a été évalué (Tableau 11). Les différents résultats obtenus montrent que l'application de chacun des modèles aurait permis de réaliser de grandes économies estimées à plusieurs centaines de millions de FCFA (Tableau 11). Cependant, l'estimation du débit de forage au moyen du modèle 1 aurait été plus profitable d'un point de vue économique.

Tableau 11: Rentabilité économique des modèles

	M-1	M-2	M-3	M-4
Profondeur (mL)	4983	4790	4790	4790
Coût (10⁶ de FCFA)	399	383	383	383

NB: M: Modèle

4. Discussion

Les variables explicatives pertinentes et estimables par les mesures géophysiques retenues pour cette étude sont la transmissivité, l'épaisseur de l'altération meuble et l'épaisseur de l'horizon fissuré foré. Plusieurs modèles ont été conçus. Le modèle 1 est constitué d'une seule variable explicative (transmissivité). Le modèle 2 est composé de deux variables explicatives (transmissivité et épaisseur de l'horizon fissuré foré). Le modèle 3 est également constitué de deux variables explicatives (transmissivité et épaisseur de l'altération meuble). Quant au modèle 4, il comprend trois variables explicatives (transmissivité, épaisseur de l'horizon fissuré foré et épaisseur de l'altération meuble). Au regard des résultats des critères d'évaluation de la performance (coefficient de corrélation et biais) et de la robustesse ainsi que des représentations graphiques, on peut dire que les quatre modèles sont performants et robustes. Les modèles les plus performants, robustes et parcimonieux sont les modèles 1 et 3. Ainsi, les modèles 1 et 3 se présentent comme les meilleurs modèles pour la prévision du débit des forages d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. Ces résultats montrent que les variables les plus expressives du débit de forage d'eau en milieu de socle sont la transmissivité et l'épaisseur de l'altération meuble. En effet, plusieurs travaux ont montré l'importance des horizons d'altérites dans l'alimentation en eau des réseaux de fractures [23, 36]. L'épaisseur de l'altération meuble joue un grand rôle dans la productivité des aquifères étudiés. En effet, une importante épaisseur d'altérites peut devenir un facteur de productivité dans la réalimentation des aquifères fissurés à condition que celles-ci présentent une bonne perméabilité. Dans le cas contraire, elles tendent à s'opposer à la réalimentation des fractures sous-jacentes [36]. La zone étudiée se situe dans un contexte de formations volcano-sédimentaires plus précisément, les schistes. Ces schistes redressés à la verticale [37] ont des épaisseurs beaucoup importantes dont la qualité hydrogéologique est favorable à la formation d'eaux souterraines. Quant à la transmissivité, elle se présente comme le paramètre le plus important dans la performance des modèles développés. Dans le cadre de cette étude, l'épaisseur de l'horizon fissuré foré n'a pas apporté de performance aux modèles conçus. Cependant, dans un contexte granito-gneissique, ce paramètre pourrait être plus essentiel.

Par ailleurs, la performance des modèles développés dans le cadre de cette étude a été comparée à celle des études antérieures réalisées sur la même zone [15-16]. Cette comparaison s'est appuyée sur les résultats de la validation. En effet, la validation est très essentielle dans l'évaluation d'un modèle et le choix d'un modèle est d'abord guidé par sa performance [34]. Le modèle 1 de Doumbia et Fofana [15] est constitué de l'épaisseur de socle foré, du nombre d'arrivée d'eau, de la profondeur des arrivées d'eau significatives et de l'épaisseur d'altération meuble. Quant au modèle 2 des mêmes auteurs, il est composé des différentes variables précédentes auxquelles s'ajoute la transmissivité. Le modèle 1 de Kouassi et al. [16] est composé de la transmissivité, de l'épaisseur de l'horizon fissuré foré, du nombre d'arrivée d'eau et de la profondeur des arrivées d'eau significatives. Quant au modèle 2, il est composé des différentes variables précitées hormis le nombre d'arrivée d'eau. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 12. Hormis le modèle 1 développé par Doumbia et Fofana [15], tous les autres modèles présentent de forts coefficients de corrélation. En effet, les coefficients de corrélation varient en général entre 0,647 et 0,682 avec une moyenne de 0,663 et un écart-type de 0,015. Le modèle 1 de Doumbia et Fofana [15] a un coefficient de corrélation de -0,006. Le biais varie entre 0,015 et 0,377 avec une moyenne de 0,236 et un écart-type de 0,138. Au regard du coefficient de corrélation et du biais, le modèle le plus performant est le modèle 2 de Kouassi et al. [16], suivi du modèle 2 de Doumbia et Fofana [15]. Le troisième rang est occupé par le modèle 1 de Kouassi et al. [16]. Les modèles conçus au cours de cette étude semblent relativement moins performants que les modèles antérieurs. Une analyse plus poussée a été effectuée. En effet, les écarts relatifs calculés au niveau des coefficients de corrélation en dehors du modèle 1 de Doumbia et Fofana [15] en s'appuyant sur la valeur la plus élevée des performances (0,682), montrent que ceux-ci oscillent entre 0,29 et 5,13% et restent donc tous inférieurs à 10%.

Tableau 12: Analyse comparative des performances des modèles en phase de validation.

Présente étude				
	M-1	M-2	M-3	M-4
Corrélation	0,66	0,647	0,653	0,649
Biais	0,362	0,377	0,298	0,322
	KOUASSI <i>et al.</i> [16]		DOUMBIA et FOFANA [15]	
	M-1	M-2	M-1	M-2
Corrélation	0,673	0,682	-0,006	0,68
Biais	0,251	0,015	0,042	0,22

NB: M: Modèle

Ces résultats traduisent une différence non significative entre les différentes valeurs de coefficient de corrélation. Il ressort donc que les différents modèles ont sensiblement les mêmes performances.

Dans l'optique de développer des modèles parcimonieux, une discussion basée sur la performance en rapport avec le nombre de variables explicatives a été menée. Il ressort que le modèle 2, développé par Doumbia et Fofana [15] est le moins parcimonieux avec 5 variables explicatives. Viennent ensuite les modèles à 4 paramètres d'entrée. Il s'agit du modèle 1 développé par Kouassi et al. [16] qui présente des performances sensiblement pareilles aux modèles à 3, 2 et 1 paramètre(s). Le modèle à trois paramètres, développé par Kouassi et al. [16] est légèrement plus performant que celui à 3 paramètres développé dans le cadre de cette étude. On pourrait attribuer cette légère différence à la profondeur de la première arrivée d'eau significative remplacée ici par l'épaisseur de l'altération meuble. Le modèle 1 (1 paramètre), les modèles 2 et 3 (2 paramètres) développés dans le cadre de cette étude présentent des performances sensiblement égales à ceux développés par les auteurs précités. L'avantage notable est que les variables explicatives des différents modèles développés dans le cadre de cette étude sont estimables avec beaucoup plus de précision par les méthodes géophysiques.

Conclusion

Les variables explicatives pertinentes et estimables par les mesures géophysiques retenues pour cette étude sont la transmissivité, l'épaisseur de l'altération meuble et l'épaisseur de l'horizon fissuré foré. Plusieurs modèles ont été conçus. Le modèle 1 est constitué d'une seule variable explicative (transmissivité). Le modèle 2 est composé de deux variables explicatives (transmissivité et épaisseur de l'horizon fissuré foré). Le modèle 3 est également constitué de deux variables explicatives (transmissivité et épaisseur de l'altération meuble). Quant au modèle 4, il comprend trois variables explicatives (transmissivité, épaisseur de l'horizon fissuré foré et épaisseur de l'altération meuble). Pour les quatre modèles, l'erreur-type relative aux variables physiques (épaisseur forée dans le socle et épaisseur d'altération) est comprise entre $1,2 \cdot 10^{-2}$ et $2,5 \cdot 10^{-2}$. Quant à celle de la transmissivité, elle est relativement très élevée (3727-3777). Le coefficient de variation est inférieur à 10% pour le cas de la transmissivité. Il est relativement élevé pour les variables physiques (supérieures à 100%). Ces résultats traduisent des relations relativement étroites entre le débit de forage (variable expliquée) et les variables explicatives. Au regard des résultats des critères d'évaluation de la performance (coefficient de corrélation et biais), de la robustesse et de la parcimonie, ainsi que des représentations graphiques, il ressort que les quatre modèles sont performants, robustes et parcimonieux. Sur la base de débits de seuil ($1 \text{ m}^3/\text{heure}$ et $2,5 \text{ m}^3/\text{heure}$) définis,

ces modèles sont capables de permettre de prendre des décisions quant à la réalisation ou non d'un forage. En effet, le coût du mètre total effectivement foré et considéré comme inutile mis en évidence par l'application de chacun de ces modèles est important. Cependant, il l'est encore plus pour l'application du modèle 1 qui aurait permis d'économiser près de trois cent quatre vingt dix neuf millions (398 648 800 FCFA). Ainsi, les modèles les plus performants, robustes et parcimonieux constituant des outils rentables sont les modèles 1 et 3. Ces modèles se présentent donc comme les meilleurs outils pour la prospection des eaux souterraines en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. Dans un contexte d'application de ces modèles dans la prospection hydrogéologique, il est nécessaire de modéliser la transmissivité à partir de résultats de mesures géophysiques. Aussi, dans un esprit de vulgarisation de ces modèles, une transposition de ceux-ci pourrait-elle être faite dans d'autres domaines géologiques (domaine des granitoïdes du paléoprotérozoïque, domaine archéen, domaine SASCA) de la Côte d'Ivoire. En somme, la stratégie d'optimisation est un outil scientifique qui contribue à la maîtrise des décisions d'implantation de forages ayant un débit satisfaisant (au moins 1 m³/heure) et un instrument précieux qui permet de gérer efficacement les budgets alloués aux campagnes de forage tout en minimisant le nombre de forages négatifs.

Références bibliographiques

1. F Baali. *Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région karstique de Chéria N-E Algérien*. Magister Univ. Annaba Algérie, **2001**, 100.
2. J.M Vouillamoz. *La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive : les sondages par résonance magnétique protonique*. Thèse de Doctorat, Université de Paris XI, France, **2003**, 315.
3. M Sinan, 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, **2006**, 19, 3, 221.
4. D Dailey, W Sauck, M Sultan, A Milewski, M Ahmed, W.R Latond, R Elkadiri, J Foster, C Schmidt, T Al Harbi. *Geophysical, remote sensing, GIS, and isotopic applications for a better understanding of the structural controls on groundwater flow in the Mojave Desert, California*. Journal of Hydrology: Regional Studies, **2015**, 3, 211.
5. J.P.R Jourda, E.V Djaoua, K.F Kouamé, M.B Saley, C. Gronayes, J.J Achy, J Biemi, 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*. Télédétection, **2006a**, 6, 2, 123.
6. J.P.R Jourda, M.B Saley, E.V Djaoua, K.F Kouamé, J Biemi, 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, **2006b**, 5, 4, 339.
7. T Lasm, M Youan-Ta, J.P.R Jourda, K.F Kouamé. *Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire)*. European Journal of Scientific Research, **2008**, 21, 1, 196.
8. M Youanta, T Lasm, J.P.R Jourda, K.F Kouamé, 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)*. Télédétection, **2008**, 8, 2, 119.
9. M Koita, H Jourde, D Ruelland, K Koffi, S Pistre, 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, **2010**, 55, 5, 805.
10. V.M Sorokoby, M.B Saley, K.F Kouame, M.E.V Djaoua, M Bernier, K Affian, 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*. Télédétection, **2010**, 9, 3-4, 209.
11. T Lasm, K.F Kouamé, M.S Oga, J.P.R Jourda, N Soro, K.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, **2004**, 5, 97, 15.
12. P Gombert. *Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale*. IAHS Publication, **1997**, 241, 113.
13. 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, **1999**, 12, 3, 597.
14. K.E Kouadio, N Soro, 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, **2010**, 1, 15.
15. S Dombia, A Fofana. *Simulation de la productivité des forages d'eau en milieu de socle: cas de l'ex-région du N'zi-Comoé*. Projet de Fin d'Etude, Département Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, **2013**, 51.
16. A.M Kouassi, K.E Kouakou, Y.B Koffi, J Biemi. *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, **2014a**, 10, 1, 154.
17. A.M Kouassi, K.E Kouakou, K.K.R Kadio, J Biemi. *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*. International Journal of Innovation and Scientific Research, **2014b**, 11, 1, 181.
18. A.M Kouassi, K.E Kouakou, K.A Kouamé, K.K.R Kadio, J Biemi. *Prospection hydrogéologique par optimisation de la profondeur limite d'arrêt de forage en milieux de socle ivoirien: performance et robustesse des modèles*. Afrique SCIENCE, **2016**, 12, 1, 282.
19. D.B Yao. *Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fétékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, **1998**, 190p.
20. N.H Kadio, M.B Saley, B.E N'dri, A Ouattara, J Biemi. *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, **2008**, 24, 1, 74.
21. Y.A N'go, T Lasm, M Koita, 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, **2010**, 9, 1, 33.
22. A.M Kouassi, K.E Ahoussi, K.A Yao, W Ourega, K.B Yao, 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, **2012**, 10, 57.
23. B Dewandel, P Lachassagne, R Wyns, J.C Marechal, M Krishna. *A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering*. Journal of Hydrology, **2006**, 330, 260.
24. B Dewandel, P Lachassagne, F.K Zaidi, S Chandra. *A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India*. Journal of Hydrology, **2011**, 405, 474.
25. P Lachassagne, R Wyns. *Aquifères du socle: nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau*. Géosciences, **2005**, 2, 6.
26. C Meyer. *Applications de la géophysique aux recherches d'eau souterraine*. Technique et documentation, Lavoisier, **2001**, 183.
27. R Guérin. *Borehole and surface-based hydrogeophysics*. Journal of Hydrogeology, **2005**, 13, 251.

28. V Durand, B Deffontaines, V Leonardi, R Guerin, R Wyns, G Marsily, J.L Bonjour. *A multidisciplinary approach to determine the structural geometry of hard-rock aquifers. Application to the planco et migmatitic aquifer (France)*. Bulletin de la Société Géologique de France, **2006**, 5, 227.
29. R Guerin, J.M Baltassat, M Boucher, K Chalikakis, P.Y Galibert, J.F Girard, V Plagnes, V.R Remi. *Geophysical characterisation of karstic networks– Application to the Ouyse system (Poumeyssen, France)*. Comptes Rendus Geoscience, **2009**, 341, 810.
30. M Belanger, N EL-Jabi, D Caissie, F Ashkar, J.M Ribi. *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, **2005**, 18, 3, 403.
31. L Benyahya, D Caissie, L.A.K Mertes, S.J O'Daniel, W.W Woessner, S.A Thomas. *A review of statistical water temperature model*. Canadian Water Resources Journal, **2007**, 32, 3, 179.
32. A Daigle, A St-hilaire, D Peters, D Baird. *Multivariate modeling of water temperature in the Okanagan watershed*. Canadian Water Resources Journal, **2010**, 35, 3, 237.
33. B Hingray, C Picouet, A Musy. *Hydrologie: une Science pour l'Ingénieur*. Edition Presse Polytechniques et Universitaires, Romandes 2^{ème} édition, **2012**, 600.
34. 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, **1995**, 390.
35. Y.B Koffi, T Lasm, P.A Ayrat, A Johannet, A.M Kouassi, E Assidjo, J Biemi. *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, **2007**, 17, 3, 313.
36. F.M Gnamba, M.S Oga, T Gnagne, T Lasm, J Biemi, Y.K Kouakou. *Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, **2014**, 10, 5, 1857.
37. J Biemi. *Contribution de l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens 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 en Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, **1992**, 424.