

Prospection hydrogéologique par optimisation de la profondeur limite d'arrêt de forage en milieux de socle ivoirien : performance et robustesse des modèles

Amani Michel KOUASSI^{1*}, Koffi Eugène KOUAKOU¹, Kassi Alexis KOUAME², Kouao Kabran Roland KADIO³ et Jean BIEMI²

 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
 ² Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire
 ³ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : *michel.a_kouassi@yahoo.fr*

Résumé

Ce travail a pour objectif d'évaluer le pouvoir prédictif de deux modèles statistiques à variables hydrogéologiques à simuler la profondeur limite d'arrêt de forage nécessaire à l'obtention d'un débit minimum de 1 m³/h dans le socle cristallin et cristallophyllien. Les différents modèles ont été analysés au moyen d'un test logique, de critères de performance et de robustesse. Les résultats de cette étude ont montré que les modèles évalués sont performants, robustes et parcimonieux. La stratégie d'optimisation est un outil scientifique qui contribue à la maîtrise des décisions et un instrument précieux qui permet de gérer efficacement les budgets alloués aux campagnes de forage et d'accroître ainsi le nombre d'ouvrages à réaliser sans créer une incidence financière supplémentaire. C'est pourquoi, dans le cadre de l'optimisation de la prospection hydrogéologique du socle en général et particulièrement en Côte d'Ivoire, les deux modèles évalués sont des outils performants à la portée des prospecteurs.

Mots-clés : modèles statistiques, variables hydrogéologiques, performance, robustesse, aquifères de socle, Côte d'Ivoire.

Abstract

Hydrogeological prospecting using optimization of drilling depth limit in ivorian hard rock aquifers : performance and robustness of models

This work aimed to evaluate the predictive power of two statistical models to simulate the hydrogeological variables limit drilling depth required to obtain a minimum flow of $1 \text{ m}^3/\text{h}$ in the hard rock aquifers. The sample used in calibration consists of 1,605 wells representing two thirds of the sample made up from data on Archean and Paleoproterozoic domains (2406 drilling) in Ivory Coast. Internally validation, 802 (1/3) boreholes were used and the above from geological areas.

Finally, in transposition phase in the SASCA domain of Ivory Coast, 209 wells were selected. The different types have been analyzed by means of a logic test, criteria of performance and robustness. The results of this study showed that the estimated models are efficient, robust and parsimonious. The optimization strategy is a scientific tool that helps control decisions and a valuable instrument to effectively manage budgets for drilling campaigns and thus increase the number of works to be executed without creating an additional financial implications. That is why, in the context of optimizing the hydrogeological prospecting in hard rock aquifers in general and particularly in Ivory Coast, the two models evaluated are powerful tools within the reach of prospectors.

Keywords : statistical models, performance, robustness, hard rock aquifers, lvory Coast.

1. Introduction

Le territoire ivoirien est occupé essentiellement par les terrains cristallins et cristallophylliens qui représentent 97,5 % de sa superficie totale. Ces terrains ont des réserves d'eau souterraine aui sont généralement de faible quantité. Ces réserves sont localisées à travers les aquifères sectoriels de socle fissuré difficiles à gérer. Ainsi, on assiste à un taux élevé de forages négatifs lors des implantations des forages. Aussi, les débits d'exploitation sont-ils souvent très faibles ($< 1 \text{ m}^3/\text{h}$). Ces mauvais débits s'expliquent par une mauvaise capture des aquifères de fissure, ce qui contribue à l'entretien du stress hydrique dans le pays. Pour pallier à ce problème et permettre de mettre à la disposition de la population de l'eau de qualité et en quantité suffisante, sans pour autant créer une incidence majeure sur l'enveloppe financière, divers travaux permettant d'optimiser la prospection hydrogéologique du socle ont été réalisés en Côte d'Ivoire [1-3]. Dans ce contexte, deux modèles statistiques de simulation de la profondeur limite de forage ont été conçus [2]. Les variables explicatives de ces modèles sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération. Le premier modèle de simulation de la profondeur limite de forage en milieu de socle a été calé directement à partir des variables explicatives précédentes. Le deuxième modèle, quant à lui, est issu du principe selon lequel la profondeur d'un forage en milieu de socle est la somme du niveau altéré traversé et de l'épaisseur de socle foré. De ce fait, la variable calibrée a été l'épaisseur de socle foré. Les erreurs-types associées aux coefficients de régression généralement faibles (inférieures à 1 %) traduisent des relations étroites entre les variables expliquées (profondeur limite de forage et épaisseur de socle foré) et les variables explicatives [3].

Le modèle de simulation de l'épaisseur de socle foré (ESOF) a été évalué [3]. Les principaux résultats enregistrés montrent que le modèle de simulation de l'épaisseur de socle foré (modèle « ESOF ») est un modèle performant, robuste et parcimonieux. Du fait de sa qualité, le modèle de simulation de l'épaisseur de socle a été utilisé pour déduire la profondeur limite de forage en milieu de socle. L'objectif général de cette étude vise l'évaluation du pouvoir prédictif de deux modèles statistiques à variables hydrogéologiques à simuler la profondeur limite de forage d'eau dans le socle cristallin et cristallophyllien. La méthodologie adoptée a consisté à évaluer les différents modèles à partir de l'application d'un test logique, de critères de performance (coefficient de corrélation, racine carrée de l'erreur quadratique, biais sur la moyenne) et de robustesse (différence de performance en termes de coefficient de corrélation en passant du calage à la validation). Des représentations graphiques mettant en relation les valeurs observées et celles simulées ont été réalisées. L'évaluation des modèles a été effectuée en calage, en validation interne et en validation par transposition.

2. Contextes géographique, géologique et hydrogéologique

La Côte d'Ivoire, espace de notre travail, fait partie des pays du Golfe de Guinée *(Figure 1)*. Elle s'étend sur une superficie de 322 462 Km², environ 1 % du continent africain. Ses frontières dessinent approximativement un carré s'inscrivant entre les coordonnées de 2°30'et 8°30'de longitude Ouest, 4°30' et 10°30' de latitude Nord avec, au Sud, une façade littorale de 550 Km. Elle est limitée au Nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'Est par le Ghana, à l'Ouest par la Guinée et le Libéria et au Sud par l'océan atlantique. *La Figure 1* montre la situation de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest.



Figure 1 : Localisation de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest

Deux grandes zones climatiques se côtoient : le climat équatorial et le climat tropical. Le climat subéquatorial dans le Sud est caractérisé par des précipitations abondantes, qui atteignent en moyenne 1 800 mm. Le climat tropical humide de savane couvre le Centre du pays. Les précipitations annuelles moyennes sont proches de 1 200 mm. Le climat tropical atténué concerne principalement la partie nord du pays et les précipitations moyennes annuelles enregistrées sont généralement inférieures à 1000 mm. Le régime climatique régnant au niveau de l'Ouest de la Côte d'Ivoire est un climat de montagne avec des hauteurs pluviométriques annuelles dépassant parfois les 2 000 mm. Deux grands types de paysages végétaux se partagent le territoire ivoirien : un paysage forestier et un paysage de savane. Le premier correspond à la moitié sud du pays et appartient au domaine guinéen. Le second occupe la moitié nord de la Côte d'Ivoire et se rattache au domaine soudanais [4]. Le socle ivoirien est composé des domaines archéen, paléoprotérozoïque et SASCA (*Figure 2*). Le domaine archéen a été affecté par des déformations tectoniques très importantes attribuées à l'orogenèse léonienne (3500-2900 Ma) et à l'orogenèse libérienne (2900-2500 Ma). Il est caractérisé par les reliefs les plus accidentés de la Côte d'Ivoire. Le domaine archéen est dominé par des granites, des migmatites, des granito-gneiss, des amphibolo-pyroxénites, des charnockites. Le domaine paléoprotérozoïque est subdivisé en deux grands sous-ensembles (ensemble des granitoïdes et formations volcano-sédimentaires). Il a été structuré au cours du mégacycle éburnéen. Ce domaine est constitué d'un socle granito-gneissique dominé par les granites et de formations volcano-sédimentaires (métasédiments et roches vertes).

Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de métabasalte, métaandésite, métadolérite, métagabbro, amphibolite. Il existe un autre domaine où coexistent les formations géologiques des deux grands domaines (domaine archéen et domaine paléoprotérozoïque) : c'est le domaine SASCA (Sassandra-Cavally). Ce domaine est situé dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire depuis Toulepleu, Soubré, Sassandra, Taï jusqu'au fleuve Cavally et est drainé par les fleuves Sassandra et Cavally. Sa particularité est qu'on y trouve à la fois des roches issues de l'orogenèse libérienne et des orogenèses les plus récentes (Burkinienne et Eburnéenne) [5]. Les formations rencontrées dans le domaine SASCA sont les schistes, les micaschistes, les arkoses, les quartzites, les tufs métamorphiques, les metarhyolites, les amphibolites, les metagabbros, les conglomérats, des tufs métamorphiques, les migmatites, les quartzites, les gneiss et les leptynites. En Côte d'Ivoire, les réservoirs d'eaux souterraines de socle se rencontrent dans les horizons d'altérites ainsi que dans les séries volcano-sédimentaires et granito-migmatitiques. Les réservoirs d'altérites varient selon la nature du socle. L'eau circule dans les roches cristallines à travers les réseaux de fractures à fonction drainante, généralement bien alimentés et capables de fournir des débits assez importants quand ils sont bien captés par les forages. En effet, le socle cristallin et cristallophyllien de Côte d'Ivoire a été affecté par les phénomènes tectoniques en y laissant d'importants réseaux de fissures plus ou moins connectés qui sont à l'origine de la formation des nappes souterraines [6-13]. A l'heure actuelle, les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins influençables par les fluctuations saisonnières.



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

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

3. Matériel et méthodes

3-1. Données

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

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

Un ensemble de 2615 fiches techniques représentant 2615 forages ont été retenues. 2406 forages sont issus des zones tests des domaines archéen et paléoprotérozoïque (granitoïdes et formations volcano-sédimentaires), soit 802 forages par zone test. 209 forages sont issus du domaine SASCA.

3-2. Description des modèles

Les modèles utilisés pour simuler la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieu de socle nommés modèles «PROLIFE» sont des modèles statistiques à régressions linéaires. Les deux modèles utilisés dans le cadre de cette étude comportent chacun deux variables que sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative (Pae_1) et l'épaisseur d'altération (Ep_Alt) [2]. L'expression du modèle 1 est la suivante *(Equation 1) :*

$$P_{t} = 0,572 \times P_{ae_{-1}} + 0,097 \times E_{p_{-}Alt} + 37,757$$
(1)

Le modèle 2 est basé sur l'approche définitionnelle de la profondeur de forage en milieu de socle. En effet, la profondeur de forage en milieu de socle est la somme de l'épaisseur d'altération et de l'épaisseur de socle foré. L'équation de l'épaisseur de socle foré a été déjà définie à travers le modèle de simulation de l'épaisseur de socle (modèle « ESOF ») [3] *(Equation 2)*:

$$E_{p_{-}Soc} = 0,491 \times P_{ae_{-}1} - 0,871 \times E_{p_{-}Alt} + 41,965$$
⁽²⁾

Ainsi, le modèle 2 a pour paramètres, l'épaisseur d'altération traversée et l'épaisseur de socle foré simulée (Ep_Soc_{simulée}) par le modèle « ESOF ». Il a pour expression *(Equation 3)*:

$$P_t = E_{p_Alt} + E_{p_Soc}$$
(3)

A partir des *Equations 2 et 3*, l'expression du modèle 2 est *(Equation 4)*:

$$P_{t} = 0,491 \times P_{ae_{-1}} + 0,129 \times E_{p_{-}Alt} + 41,965$$
(4)

Amani Michel KOUASSI et al.

La procédure d'évaluation de la qualité des modèles a consisté à analyser la capacité de simulation des modèles à partir d'un test et de critères de performance et de robustesse. L'échantillon utilisé en phase de calage est constitué de 1 605 forages représentant les 2/3 de l'échantillon constitué à partir des données relatives aux domaines archéens et paléoprotérozoïque (2406 forages). En validation interne, 802 forages (1/3) ont été utilisés. Enfin, en validation par transposition spatiale dans le domaine SASCA, 209 forages ont été retenus.

3-3. Evaluation de la qualité des modèles au moyen d'un test logique

Le test logique appliqué a consisté à comparer la profondeur limite calculée et la profondeur de la première arrivée d'eau significative (débit supérieur ou égal à 1 m³/h) [1]. Le principe sur lequel repose ce test est que les arrivées d'eau sont recherchées dans le niveau fissuré qui se trouve au-dessous du niveau altéré. L'appréciation consiste à dire si le résultat théorique (issu des modèles) est acceptable, c'est-à-dire le forage aurait été arrêté à la bonne côte (succès) ou non (échec). L'hypothèse nulle retenue stipule que la profondeur limite de forage simulée doit être supérieure ou égale à la profondeur de la première arrivée d'eau significative observée. L'hypothèse alternative peut être formulée comme suit : « si la profondeur limite de forage simulée est inférieure à celle de la première arrivée d'eau significative, alors l'application des modèles n'aurait pas permis d'atteindre l'aquifère avant l'arrêt de la foration. Ce cas est considéré comme un échec des modèles. Par contre, si la profondeur limite de forage simulée est telle que l'arrêt de la phase de foration intervient postérieurement à la traversée des fractures suffisamment productives c'est-à-dire supérieure à la profondeur de la première arrivée d'eau significative, alors on a un cas de succès.

3-4. Evaluation de la qualité des modèles au moyen de critères de performance

La performance d'un modèle issue d'une méthode d'apprentissage s'évalue par sa capacité de prédiction ou de généralisation. En effet, les critères de performance mesurent la qualité ou la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'une simulation. 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 *(Equation 5)* :

$$R = \frac{\sum_{i} (\mathbf{P}_{i} - \overline{\mathbf{P}}) \times (\mathbf{P}_{i} - \overline{\mathbf{P}})}{\sqrt{\sum_{i} (\mathbf{P}_{i} - \overline{\mathbf{P}})^{2}} \times \sum_{i} (\mathbf{P}_{i} - \overline{\mathbf{P}})^{2}}}$$
(5)

avec : P_i : profondeur limite de forage observée ; P'_i : profondeur limite de forage simulée ; \overline{P} : moyenne des profondeurs limites de forage simulées.

La corrélation est dite très forte si R est compris entre 1 et 0,80 ; forte si R se situe entre 0,5 et 0,8 ; moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5. 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 *(Equation 6)*:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - P')^2}{n}}$$
(6)

avec : P_i; profondeur limite de forage observée ; P'_i : profondeur limite de forage simulée ; 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-a-dire que les deux valeurs sont proches et donc le modèle est performant. Ce paramètre est défini par la relation suivante *(Equation 7)*:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |P_i - P'_i|$$
(7)

avec : P;; valeurs observées ; P';; valeurs simulées.

3-5. Evaluation de la qualité des modèles au moyen de représentations graphiques

Outre l'évaluation à l'aide d'un critère numérique, une analyse comparative des profondeurs observées et des profondeurs simulées a été réalisée. En effet, des tracés de diagrammes de dispersion des profondeurs simulées en fonction des profondeurs observées a aussi permis 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 du point de vue qualitative de la performance des différents modèles a donc consisté à analyser et à apprécier la dispersion du nuage de points autour de la première diagonale.

3-6. Evaluation de la qualité des modèles au moyen de la robustesse

L'une des techniques les plus utilisées, pour évaluer la robustesse d'un modèle dans les situations les plus proches possibles de celles dans lesquelles il est censé fonctionner, est la technique du double échantillon. Cette technique permet de tester l'adaptabilité du modèle quelle que soit sa complexité. La robustesse implique que les résultats pouvant être obtenus par simulation avec le modèle ne divergent pas lorsque la valeur des variables d'entrée est légèrement modifiée du fait des erreurs et des incertitudes qui leur sont associées, mais qu'ils sont sensibles aux variations des facteurs dont on cherche à estimer les effets. Le critère de robustesse du modèle a été évalué par la différence du coefficient de corrélation en calage (R_{calage}) et en validation ($R_{validation}$). L'expression du critère de robustesse (R') est (*Equation 8*):

$$R' = 100 \times \left| R_{validation} - R_{calage} \right|$$
(8)

Le modèle est dit robuste si le critère de robustesse est inférieur ou égal à 10 %.

4. Résultats

4-1. Résultats du test logique

Les résultats d'application du test logique au niveau du modèle 1 montre qu'en calage, un taux de 99,63 % de succès a été enregistré contre 0,37 % d'échec (6 forages) *(Tableau 1)*. En phase de validation (validation interne et transposition), le modèle 1 a été testé avec un succès total de 100 %.

	Succès		Ec	:hec
	Effectif	Pourcentage (%)	Effectif	Pourcentage (%)
Calage	1599	99,63	6	0,37
Validation interne	801	100	0	0
Transposition	209	100	0	0

Tableau	1	: Résultats	du te	est logique	au niveau	du modèle 1
---------	---	-------------	-------	-------------	-----------	-------------

Les résultats d'application du test logique au niveau du modèle 2 montrent qu'en calage, un taux de 99,19 % de succès a été enregistré contre 0,81 % d'échec *(Tableau 2)*. En phase de validation (validation interne et transposition), le modèle 2 a été testé avec un succès total de 100 %.

	Succès		Ec	:hec
	Effectif	Pourcentage (%)	Effectif	Pourcentage (%)
Calage	1592	99,19	13	0,81
Validation interne	801	100	0	0
Transposition	209	100	0	0

 Tableau 2 : Résultats du test logique au niveau du modèle 2

Ces différents résultats témoignent de la capacité des différents modèles à bien prédire des profondeurs limites de forage permettant de traverser au moins la première fracture productive en milieu de socle. Ils démontrent que l'application des modèles 1 et 2 aurait permis dans chacun des domaines géologiques, de traverser la première fracture productive. Sur la base de ce test, on peut affirmer que les deux modèles sont très performants dans la détermination de la profondeur limite de forage en milieux de socle. Mais le modèle 1 a été plus performant que le modèle 2.

4-2. Résultats de la performance des modèles

L'analyse des résultats de performance obtenus *(Tableau 3)* montre que, dans l'ensemble, les deux modèles expriment en calage, des performances presque similaires. Pour les deux modèles, des valeurs fortes de coefficient de corrélation ont été obtenues (0,655-0,656) avec des valeurs de biais (B) inférieures à 10 et des valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) autour de 12,6. Ces différents résultats sont satisfaisants dans l'ensemble.

Critères	Modèle 1	Modèle 2
Coefficient de corrélation (R)	0,656	0,655
Biais (B)	9,654	9,915
Erreur quadratique (RMSE)	12,595	12,701

 Tableau 3 : Performance des modèles en calage

En validation *(Tableau 4)*, les performances enregistrées montrent que les deux modèles ont exprimé des valeurs fortes de coefficient de corrélation qui fluctuent entre 0,60 et 0,66 avec des valeurs relativement plus élevées en transposition. Les valeurs du biais (B) vont de 9 à 13 avec les valeurs les plus faibles enregistrées en validation interne. L'erreur quadratique (RMSE) fluctue entre 12 et 15. Ces différents résultats sont satisfaisants dans l'ensemble. Les performances en termes de coefficient de corrélation sont presque du même ordre de grandeur (0,6). Mais en transposition, le modèle 2 a été plus performant que le modèle 1. En validation interne comme en transposition, les performances en termes de biais et d'erreur quadratique du modèle 1 sont légèrement meilleures à celles obtenues par le modèle 2.

	Validation interne		Transposition	
Critères	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 1	Modèle 2
Coefficient de corrélation (R)	0,601	0,605	0,611	0,660
Biais (B)	9,729	10,662	11,166	12,466
Erreur quadratique (RMSE)	12,014	12,844	13,001	14,231

 Tableau 4 : Performance des modèles en validation interne et en transposition

Les représentations graphiques des profondeurs limites d'arrêt de forage observées et celles simulées par les différents modèles en phases de validation interne et de transposition montrent en général une bonne répartition des points le long de la diagonale (y = x) *(Figures 3 à 6)*. Ainsi, les résultats graphiques confirment les performances numériques.



Figure 3 : Profondeurs observées (m) et simulées (m) en validation interne par le modèle 1



Figure 4 : *Profondeurs observées (m) et simulées (m) en validation interne par le modèle 2*



Figure 5 : Profondeurs observées (m) et simulées (m) en transposition par le modèle 1



Figure 6 : *Profondeurs observées (m) et simulées (m) en transposition par le modèle 2*

4-3. Résultats de la robustesse des modèles

Les valeurs du critère de robustesse évaluées sont consignées dans le *Tableau 5*. Ces résultats mettent en évidence des valeurs de robustesse inférieures à 10 %. Les deux modèles sont donc robustes, c'est-à-dire qu'ils ont produit des performances en validation très proches de celles enregistrées en calage. Cependant, les deux modèles ont été plus robustes en transposition qu'en validation interne. Le modèle 2 qui a enregistré les plus faibles valeurs de robustesse est donc le modèle le plus robuste.

	Validation interne	Transposition
Modèle 1	5,5 %	4,5 %
Modèle 2	5,0 %	0,5 %

 Tableau 5 : Résultats de l'évaluation de la robustesse des modèles

5. Discussion

Les deux modèles n'ont pas pu atteindre un taux de succès de 100 % en calage mais supérieur à 99 %. Cependant, en phase de validation (interne et par transposition spatiale), chacun des deux modèles a permis d'obtenir un taux de 100 % de succès. Le taux de 100 % atteint en phase de validation interne et en transposition spatiale démontre une grande performance des différents modèles évalués. Ce test a été utilisé pour apprécier la qualité de résultats de travaux réalisés dans la région du Denguélé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) [1]. Sur une population de 146 forages, le modèle à quatre paramètres qu'ils ont développé, a permis d'obtenir un taux de succès de 91,10 %. Dans le but de comparer la performance des modèles évalués dans ce travail à celui développé par [1], le test a été appliqué sur le même jeu de données que celui utilisé par [1]. A l'issu de ce test, l'estimation de la profondeur limite de forage à partir de chacun des modèles évalués dans le cadre de ce travail, aurait permis de traverser à chaque fois la première fracture productive dans la région du Denguélé. Les modèles développés et évalués dans le cadre de ce travail, aurait permis de traverser à chaque fois la première fracture productive dans la région du Denguélé. Les modèles développés et évalués dans le cadre de ce travail [2, 3] ont été plus performants que le modèle de [1] au regard des résultats du test logique.

Les modèles de simulation de la profondeur limite de forage (modèles 1 et 2) ont la même structure et ont été appliqués au même jeu de données. Les résultats obtenus ont montré que ces modèles ont développés à chacune des étapes de l'évaluation des performances très proches voire similaires. Les deux modèles ont été plus robustes en transposition qu'en validation interne. Les représentations graphiques ont mis en évidence les bonnes répartitions des nuages de point le long de la diagonale. L'ensemble de ces différents résultats montre que les modèles étudiés ont été performants en calage comme en validation, dans la simulation de la profondeur limite de forage d'eau dans le socle cristallin et cristallophyllien. La validation en général et la transposition en particulier, étant la phase par excellence d'évaluation de la qualité d'un modèle, les bonnes performances obtenues en validation interne et en transposition, et les bons résultats de robustesse traduisent la capacité des différents modèles à bien simuler des profondeurs limites de forage d'eau sur d'autres espaces géographiques en dehors des zones ayant servi à leur conception (calage) et validation. En considérant l'ensemble des critères de performance définis, on peut affirmer que les différents modèles évalués sont performants et robustes. Des études antérieures réalisées par d'autres auteurs ont été menées avec d'autres paramètres. Dans la région du Denguélé en Côte d'Ivoire, [1] ont défini une profondeur limite dont les variables explicatives sont au nombre de quatre et sont composées de l'épaisseur d'altération, du nombre d'arrivée d'eau, de la vitesse d'avancement de l'outil dans le socle ainsi que de la profondeur de la première arrivée d'eau significative. [15] a également simulé la profondeur limite de forage dans le socle Tchadien à partir de l'épaisseur de recouvrement alluvio-colluvial, de l'épaisseur d'altérites, du nombre total de venues ou arrivées d'eau et de la vitesse d'avancement de l'outil dans le socle sain. Comme les modèles à deux (2) paramètres étudiés dans ce travail ont été établis sur le socle cristallin et cristallophyllien de Côte d'Ivoire, et vu que le modèle à quatre (4) paramètres établi par [1] a été conçu dans la région du Denguélé (domaine paléoprotérozoïque), une analyse comparative entre la capacité de chacun de ces différents modèles et celui développé par [1], à simuler des valeurs proches de celles observées à partir d'un échantillon de 146 forages retenus dans la région du Denguélé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), a été réalisée. Cette région appartient au domaine des granitoïdes du domaine paléoprotérozoïque de Côte d'Ivoire. Cette analyse est basée sur les mêmes critères de performance utilisés précédemment. Les résultats obtenus sont consignés dans le *Tableau 6* et montrent que, quel que soit le critère, les modèles 1 et 2 ont enregistré des performances plus satisfaisantes aue le modèle de [1]. Cependant, le modèle 1 a été plus performant aue le modèle 2. Ces résultats montrent que les profondeurs de forages simulées dans la région du Denguélé à partir des modèles 1 et 2, sont plus proches des profondeurs observées que celles simulées par le modèle de [1]. Ainsi, les modèles 1 et 2, évalués au cours de cette étude, sont plus performants que le modèle de [1].

Critères	Modèle 1	Modèle 2	Modèle de KOUADIO et <i>al.</i> [1]
Coefficient de corrélation	0,611	0,601	0,338
Biais	11,259	12,544	11,385
RMSE	12,941	14,359	14,971

Tableau 6 : Performance des modèles appliqués dans la région du Denguélé

Les modèles évalués disposants de deux (2) paramètres que sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur de l'horizon altéré, et étant plus performants que le modèle de [1], qui en possède quatre (4), sont de ce fait plus parcimonieux. Les deux paramètres utilisés comme variables explicatives dans les modèles évalués sont également des variables explicatives du modèle de [1]. Les deux autres variables explicatives du modèle de [1] sont le nombre d'arrivée d'eau significative et la vitesse d'avancement de l'outil dans le socle. On pourrait donc affecter la relative faiblesse du modèle qu'ils ont développé à la présence des deux dernières variables dont la corrélation linéaire avec la profondeur limite de forage ne serait pertinente. Ainsi, ce résultat vient confirmer le constat général selon lequel, la performance des modèles statistiques à régression linéaire multiple augmente au fur et à mesure que le nombre de paramètres diminue.

6. Conclusion

Les résultats de cette étude dont l'objectif était d'évaluer la capacité de deux modèles à simuler la profondeur limite de forage d'eau nécessaire à l'obtention d'un débit minimum de 1 m³/h dans le socle, ont montré que les modèles évalués sont performants et de performances presque similaires, robustes et parcimonieux.

En effet, de forts coefficients de corrélations ont été obtenus en calage comme en validation (0,60-0,66). Les valeurs du critère de biais sont inférieures à 12,5. Quant aux valeurs de l'erreur quadratique, elles oscillent entre 12,01 et 14,23. Le test logique de « succès » ou « échec » a enregistré des performances allant de 99 % à 100 %. En effet, les deux modèles n'ont pas pu atteindre un taux de succès de 100 % en calage mais supérieur à 99 %. Cependant, en phase de validation (interne et par transposition spatiale), chacun des deux modèles a permis d'obtenir un taux de 100 % de succès. Les valeurs du critère de robustesse évaluées sont inférieures à 6 %. Les deux modèles ont été plus robustes en transposition qu'en validation interne. Le modèle 2 a été le plus robuste. L'étude de la parcimonie de chacun de ces modèles a montré que malgré leur faible nombre de paramètres (2), ils arrivent à mieux simuler la profondeur limite de forage d'eau nécessaire à l'obtention d'un débit minimum de 1 m³/h dans le socle. La stratégie d'optimisation est un outil scientifique qui contribue à la maîtrise des décisions et un instrument précieux qui permet de gérer efficacement les budgets alloués aux campagnes de forage et d'accroître ainsi le nombre d'ouvrages à réaliser sans créer une incidence financière supplémentaire. C'est pourquoi, dans le cadre de l'optimisation de la prospection hydrogéologique du socle en général et particulièrement en Côte d'Ivoire, les deux modèles évalués sont des outils performants à la portée des prospecteurs.

Références

- [1] K. E. KOUADIO, N. SORO, I. SAVANE, « 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, (2010), 1-15.
- [2] A. M. KOUASSI, K. K. R. KADIO, K. E. AHOUSSI, J. BIEMI, «Stratégie de prospection hydrogéologie par prévision de l'épaisseur de socle à forer ». Larhyss Journal, Vol.20, (2014a), 209-224.
- [3] 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, Vol.11, N°1, (2014b), 181-197.
- [4] T. Y. BROU, « Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire ». Mémoire de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, Abidjan, (2005), 226.
- [5] A. N. KOUAMELAN, « Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire - Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque ». Thèse doc. Univ. Rennes I, Mémoires, Géosciences Rennes, n° 73, (1996), 289.
- [6] T. LASM, F. KOUAMÉ, M. S. OGA, J. P. R. JOURDA, N. SORO, 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, (2004), 1-15.
- [7] J. P. R. JOURDA, E. V. DJAGOUA, K. KOUAME, 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, Vol.6, N°2, (2006a), 123-142.
- [8] J. P. R. JOURDA, M. B. SALEY, E. V. DJAGOUA, K. J. KOUAME, 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, Vol.5, N°4, (2006b), 339-357.
- [9] T. LASM, M. YOUAN-TA, J. P. R. JOURDA, K. F. KOUAME, « Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement : Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire)», European Journal of Scientific Research, Vol.21, N°1, (2008), 196-208.

- [10] M. YOUANTA, T. LASM, J. P. R. JOURDA, K. F. KOUAME, 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, Vol.8, N°2, (2008), 119-135.
- [11] M. KOITA, H. JOURDE, D. RUELLAND, K. KOFFI, S. PISTRE, I. SAVANE, « 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) ». Hydrological Sciences Journal, Vol.55, N°5, (2010), 805-820.
- [12] Y. A. N'GO, T. LASM, M. KOITA, I. SAVANE, « 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, (2010), 33-42.
- [13] V. M. SOROKOBY, M. B. SALEY, K. F. KOUAME, M. E. V. DJAGOUA, 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, Vol.9, N°3-4, (2010), 209-223.
- [14] B. TAGINI, «Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale ». Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, SODEMI, Abidjan-Côte d'Ivoire, (1971), 302.
- [15] 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, (1999), 597-608.