



STRATEGIE DE PROSPECTION HYDROGEOLOGIQUE PAR PREVISION DE L'ÉPAISSEUR DE SOCLE A FORER

**KOUASSI A.M.¹, KADIO K.K.R.²,
AHOUSI K.E.³, BIEMI J.³**

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,

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

³Université 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

michel.a_kouassi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif de tester le pouvoir prédictif d'un modèle statistique (modèle « ESOF ») à déterminer l'épaisseur de socle à forer dans un contexte de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien. Ce modèle a été développé selon les régressions linéaires multiples basées sur la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération dans le contexte géologique de socle fracturé ivoirien. L'évaluation du modèle comprend une estimation et une analyse des critères de performance et de robustesse en phases de calage et de validation. Les résultats obtenus ont montré que le coefficient de corrélation (R) varie de 0,582 à 0,731, le biais (B) fluctue entre 10,265 et 12,466 et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) oscille entre 12,664 et 14,213. Les résultats relatifs à la robustesse ont montré que le modèle est robuste dans l'ensemble (8,2%-14,9%). Le modèle « ESOF » est un modèle performant, robuste et parcimonieux. Il peut donc être utilisé dans la stratégie de prospection hydrogéologique en milieux de socle cristallin et cristallophyllien en général et particulièrement en Côte d'Ivoire à partir de ses paramètres d'entrée estimés au moyen des mesures géophysiques

de surface.

Mots clés : Modèle statistique, épaisseur de socle à forer, performance, robustesse, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

This study aims to test the predictive power of a statistical model (model "ESOF") to determine the thickness of base to drill in a context of water drilling in crystalline and cristallophyllian bedrock. This model was developed using the approach of multiple linear regression based on the depth of the first significant arrival of water and the thickness alteration in the geological context of the Ivorian base. The assessment model includes an estimate and analysis of the performance criteria and robustness in calibration and validation phases. The results obtained showed that the correlation coefficient (R) is between 0.582 and 0.731, the bias (B) varies from 10,265 to 12.466, and the mean square error (RMSE) is between 12.664 and 14.213. The results for the robustness showed that the model is robust overall (8.2% -14.9%). The "ESOF" model is an efficient, robust and parcimonious model. It can thus be used in the strategy of hydrogeological prospection in crystalline and cristallophyllian bedrock in general and particularly in Ivory Coast.

Keywords: Statistical model, bedrock thickness to be drilled, performance, robustness, Ivory Coast.

INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, les réservoirs des eaux souterraines de socle se rencontrent dans les horizons d'altérites ainsi que dans les niveaux fissurés et fracturés. A l'heure actuelle, les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins influençables par les variations saisonnières et climatiques. Les campagnes de forages organisées en milieux de socle ivoirien ont permis de constater que la décision d'arrêt de la foration n'est pas rationalisée. Certains forages sont précocement arrêtés dès l'obtention du débit escompté alors que d'autres sont prolongés jusqu'à la profondeur maximale définie dans les clauses techniques du projet, surtout lorsque le résultat du sondage est négatif. Ainsi, dans les bases de données des campagnes de forages, les épaisseurs de socle foré les plus grandes sont en général celles des forages négatifs. Aussi, la profondeur d'un forage en milieux de socle est-elle la somme de l'épaisseur d'altération traversée et de l'épaisseur forée dans le niveau fissuré. En effet, l'épaisseur de socle à forer est l'élément essentiel autour duquel la problématique de la profondeur totale du forage est définie d'autant plus que l'eau est recherchée

dans les niveaux fissurés et fracturés. Il est donc nécessaire de rechercher une épaisseur de socle à forer et au-delà de laquelle il n'est plus possible d'obtenir une venue d'eau significative. En optimisant ce paramètre, la profondeur totale du forage peut être, par la même occasion, optimisée. Ainsi, un modèle statistique de simulation de l'épaisseur de socle à forer (ESOF) a été conçu par Kouassi et al. (2014a) avec pour variables explicatives la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération. Les erreurs-types associées aux coefficients de régression évaluées sont généralement faibles (inférieures à 1%) (Kouassi et al., 2014a). Ces résultats traduisent des relations étroites entre la variable expliquée (épaisseur de socle foré) et les variables explicatives. La problématique de cette étude est la qualité de prévision du modèle développé. Autrement dit, le modèle est-il capable de prévoir des valeurs d'épaisseur de socle à forer proches de celles observées sur la zone de conception à partir des données de calage ? Quelle est sa capacité à simuler les épaisseurs de socle forer en dehors de la zone de conception donc sa transposabilité? En d'autres termes, le modèle est-il performant et robuste?

Cette étude a pour objectif de tester le pouvoir prédictif d'un modèle statistique (modèle « ESOF ») à déterminer l'épaisseur de socle à forer dans un contexte de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristalloyllien.

La méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs fixés a consisté à évaluer le modèle aux moyens des 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). L'évaluation du modèle a été effectuée en calage, en validation interne et en validation par transposition.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

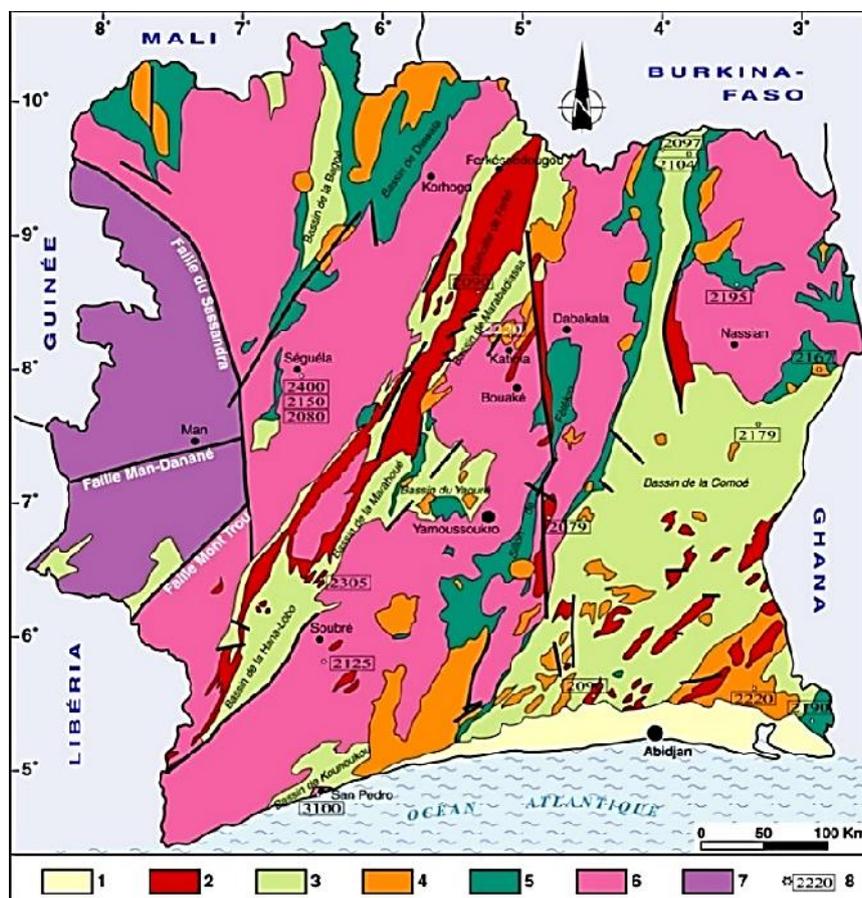
La Côte d'Ivoire, espace de l'étude, fait partie des pays du Golfe de Guinée. Elle est située en Afrique de l'Ouest et s'étend sur une superficie de 322 462 Km², environ 1% du continent africain. Ses frontières dessinent approximativement un carré s'inscrivant entre les coordonnées de 2°30' et 8°30' 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. En Côte d'Ivoire, deux grandes zones climatiques se côtoient: le climat équatorial (partie sud) et le climat tropical (partie nord).



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

Du point de vue géologique, l'accent a été mis sur les domaines archéen, paléoprotérozoïque et SASCA, zones géologiques concernées par cette étude. La Côte d'Ivoire se situe au Sud du craton ouest africain et son histoire géologique s'intègre à celle de la dorsale de Man. La géologie de cette dorsale est connue grâce aux études de plusieurs auteurs dont les plus récentes sont celles de Kouamelan (1996), Djro (1998), Yao (1998), Pothin et al. (2000), etc. Les unités lithologiques ont été affectées par trois orogénèses : Léonienne (3,5-2,9 Ga), Libérienne (2,9-2,4 Ga) et Eburnéenne (2,4-1,6 Ga). La dorsale de Man se subdivise en deux grands domaines à savoir le domaine archéen à l'Ouest appelé «Kénéma-Man» et le domaine paléoprotérozoïque dit «Baoulé-Mossi» à l'Est, séparés par l'accident majeur de Sassandra (Figure 2). Le domaine archéen a été affecté par des déformations tectoniques très importantes attribuées à deux orogénèses, à savoir, l'orogénèse léonienne (3500-2900 Ma) et l'orogénèse libérienne (2900-2500 Ma). Il est caractérisé par les reliefs les plus accidentés de la Côte d'Ivoire. L'essentiel du domaine archéen (plus de 80%) est constitué par les formations libériennes qui se trouvent essentiellement dans la région de Man. Ces formations sont composées de granulites, de migmatites et d'amphibolo-pyroxénites qui sont des métasédiments catazonaux. Elles occupent essentiellement l'Ouest et le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire (Kouamélan, 1996). A ces formations libériennes, sont associées de nombreuses reliques de formations léoniennes essentiellement représentées par un complexe de base cristallin constitué de migmatites et de gneiss granulitiques, connu aussi sous le nom de granito-gneiss et les ceintures supracrustales. A ces deux

ensembles s'associent des granites et des charnockites sous forme d'intrusion dans le socle granito-gneissique, ou sous forme de mobilisat anatectique (Kouamélan, 1996).



1. 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.

Figure 2 : Carte géologique de la Côte d'Ivoire.

Le domaine paléoprotérozoïque est subdivisé en deux grands sous-ensembles (ensemble des granitoïdes et formations volcano-sédimentaires). Le domaine paléoprotérozoïque ou Baoulé-Mossi a été structuré au cours du mégacycle éburnéen. Ce domaine est constitué d'un socle granito-gneissique et de formations volcano-sédimentaires. Le socle granito-gneissique représente plus

de la moitié des formations du domaine Baoulé-Mossi. C'est un ensemble de roches granitiques généralement foliées et migmatisées par endroits. Quant aux ceintures volcaniques, elles bordent généralement les sillons sédimentaires et sont orientées N-S à NE-SW. Les granitoïdes intrudant ces formations sont de composition tonalitique à granodioritique et sont discordants. Les formations volcano-sédimentaires sont essentiellement des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, metagabbro et d'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'orogénèse libérienne et des orogénèses les plus récentes (Burkinienne et Eburnéenne) (Kouamélan, 1996). Les formations rencontrées sont regroupées en trois principales unités d'âges compris entre 1550 Ma et 2100 Ma (Papon et Lemarchand, 1973 *in* Lasm, 2000). Ce sont:

- l'unité de Hana-Lobo comportant des schistes, des micaschistes, des arkoses, des quartzites, des tufs métamorphiques, des metarhyolites, des amphiboles, etc.;
- l'unité de Davo constituée de roches métamorphiques, les micaschistes à deux micas et staurodites et les tufs métamorphiques;
- l'unité de Louga-Kounoukou comportant des metagabbros, des micaschistes à deux micas, des conglomérats, des tufs métamorphiques, des amphibolites.

Outre les formations de ces trois unités, on distingue trois autres ensembles antérieurs à 2500 Ma (cycle libérien):

- les formations de Grabo constituées de gneiss, de micaschistes et de migmatites ;
- les formations de Kabiadioké-Balmer comprenant essentiellement des quartzites ;
- les formations de Tabou-Djidoubaye renfermant des gneiss et des leptynites.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

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. 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. Un échantillon de 146 forages couvrant la région du Denguélé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) a été utilisé. Ces fiches techniques de forage ont permis de collecter plusieurs informations telles que l'épaisseur de socle foré (m), la profondeur de la première arrivée d'eau significative (m) et l'épaisseur d'altération (m).

Méthodologie

Description du modèle et procédure d'évaluation

Le modèle utilisé pour prévoir l'épaisseur de socle à forer est nommé modèle « ESOF ». Il s'agit d'un modèle statistique à deux variables que sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative (débit supérieur ou égal à 1 m³/heure) (Pae_1) et l'épaisseur d'altération (Ep_Alt) (Kouassi et al., 2014a). Son expression est la suivante (équation 1) :

$$Ep_Soc = 0,491 * Pae_1 - 0,871 * Ep_Alt + 41,965 \quad (1)$$

Le modèle « ESOF » a été développé à partir des données du socle cristallin et cristallophyllien ivoirien. Trois zones tests ont été retenues. Il s'agit du domaine archéen, du domaine des granitoïdes du paléoprotérozoïque et du domaine des formations volcano-sédimentaires du paléoprotérozoïque. L'échantillon de calage était constitué de 1605 forages à raison de 535 forages par zone test.

La procédure d'évaluation de la qualité du modèle a consisté à analyser la capacité de prévision du modèle à partir des 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 archéen 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 utilisés.

Evaluation de la qualité du modèle au moyen de critères de performance

Les critères de performance mesurent la qualité ou la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'une simulation. Pour évaluer la performance du modèle « ESOF », trois critères ont été utilisés. Il s'agit du coefficient de corrélation, de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne et de la moyenne biaisée (Belanger et al., 2005; Benyahya, 2007; Benyahya et al., 2007, 2008; Koffi et al., 2007, 2012; Daigle et al., 2010; Kouassi et al., 2013, 2014b).

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 2):

$$R = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

avec :

X_i = épaisseur de socle foré observée ;

Y_i = épaisseur de socle simulée ;

\bar{X} = moyenne des valeurs observées ;

\bar{Y} = moyenne des valeurs 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 ; d'intensité moyenne si R se situe entre 0,2 et 0,5 (Koffi et al., 2006).

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 3):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

avec :

X_i : épaisseur de socle foré observée ;

Y_i : épaisseur de socle simulée ;

n : taille de l'échantillon.

Ce critère définit la différence entre la moyenne des valeurs observées et celle des valeurs calculées (ou prédites). Lorsque la moyenne biaisée « B » tend vers zéro, les résultats du modèle sont sans biais, c'est-à-dire que le modèle est performant. Ce paramètre est défini par la relation suivante (équation 4):

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (4)$$

avec :

X_i : épaisseur de socle foré observée ;

Y_i : épaisseur de socle à forer.

Outre l'évaluation à l'aide d'un critère numérique, une analyse comparative des épaisseurs observées aux épaisseurs simulées a été réalisée. Le tracé de diagrammes de dispersion des épaisseurs simulées en fonction des épaisseurs 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 point autour de la première diagonale.

Evaluation de la qualité du modèle au moyen d'un critère de 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 (Perrin, 2000 *in* Kouassi et al., 2011). 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 (R) en calage et en validation. L'expression du critère de robustesse est (équation 5):

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

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

RÉSULTATS

Résultats de la performance du modèle

Les valeurs des critères d'évaluation de la performance en calage, en validation interne ainsi qu'en validation par transposition ont été calculées (Tableau 1).

Tableau 1 : Performances du modèle en phase de calage et de validation

Critères	Calage	Validation interne	Transposition
Coefficient de corrélation (R)	0,731	0,582	0,649
Biais (B)	10,265	10,462	12,466
Erreur quadratique (RMSE)	13,275	12,664	14,231

Le meilleur coefficient de corrélation (R) a été obtenu en phase de calage (0,731) suivi de la transposition (0,649). La plus faible valeur de corrélation est enregistrée au niveau de la validation interne (0,582). Les valeurs du biais (B) varient de 10,265 (calage) à 12,466 (transposition). La valeur intermédiaire a été obtenue en validation interne (10,462). Les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) oscillent entre 12,664 (validation interne) et 14,213 (transposition). La valeur intermédiaire a été obtenue en calage (13,275). Les représentations graphiques des épaisseurs de socle observées et celles simulées montrent en général une bonne répartition des points le long de la diagonale ($y=x$) (Figures 3-5). Ainsi les résultats graphiques ont permis d'expliquer les résultats quantitatifs obtenus et confirment ceux-ci. Ces résultats montrent que le modèle est performant en calage comme en validation.

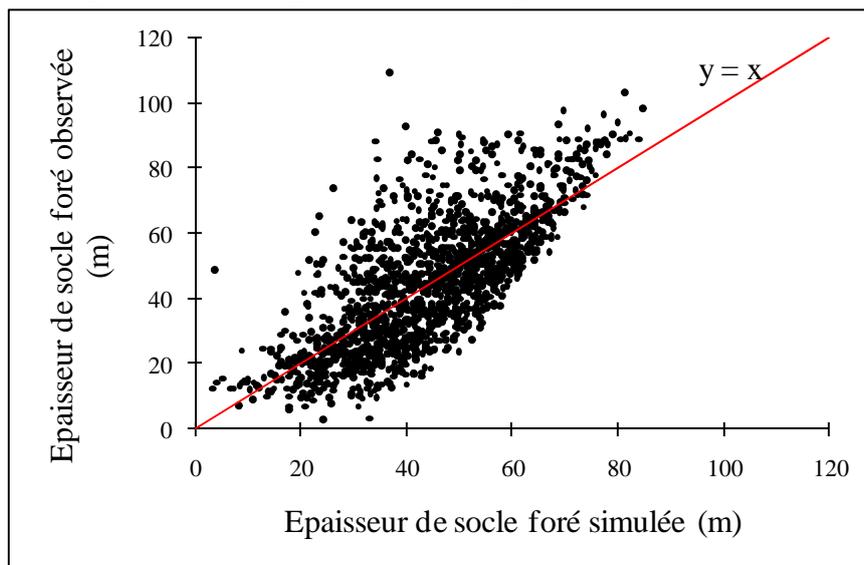


Figure 3 : Epaisseurs de socle foré observées (m) et simulées (m) en phase de calage.

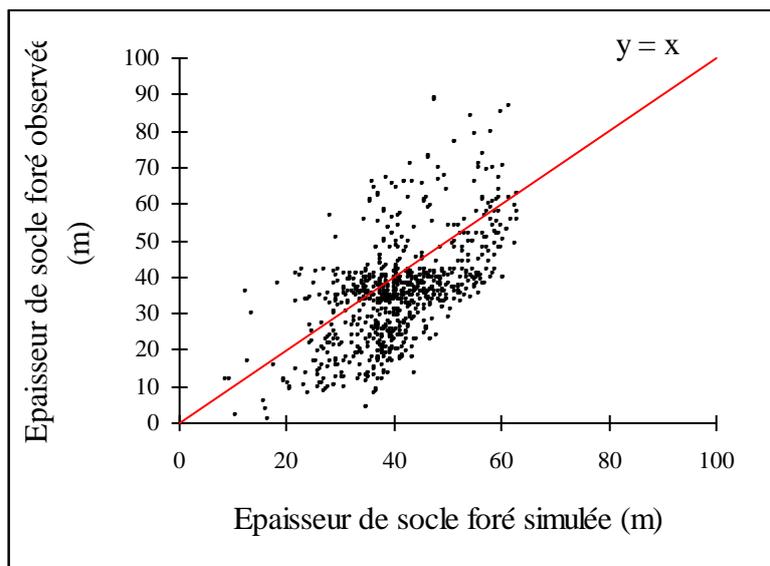


Figure 4: Epaisseurs de socle foré observées (m) et simulées (m) en validation interne.

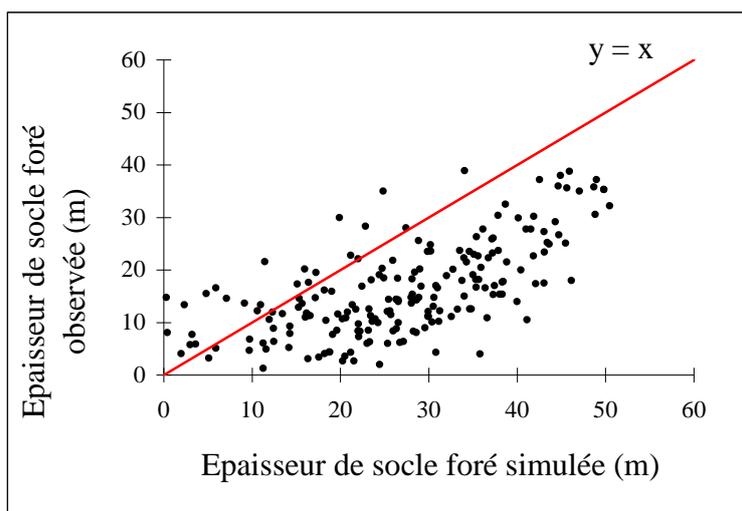


Figure 5: Epaisseurs de socle foré observées (m) et simulées (m) en transposition.

Résultats de la robustesse du modèle

Le critère de robustesse a été évalué d'une part entre la phase de calage et celle de validation interne et d'autre part entre le calage et la validation par transposition spatiale dans le domaine SASCA. Les résultats obtenus montrent que les valeurs du critère de robustesse obtenues sont respectivement 8,2% en transposition et 14,9% en validation interne. Le critère de robustesse est inférieur à 10% en transposition et supérieur à 10% en validation interne. Le modèle a été relativement plus robuste en transposition qu'en validation interne. Ces résultats montrent que le modèle « ESOF » est donc capable de prévoir des épaisseurs de socle à forer proches de celles observées.

DISCUSSION

Les meilleures performances du modèle « ESOF » ont été enregistrées en phase de calage. En effet, les valeurs les plus satisfaisantes du coefficient de corrélation et du biais ont été obtenues à cette phase. Le coefficient de corrélation a été plus satisfaisant en transposition qu'en validation interne. Ce résultat est satisfaisant car il traduit la capacité du modèle à bien simuler les épaisseurs forées dans le niveau fissuré sur des zones autres que celles où les données ont été sélectionnées pour sa conception. Toutefois, au regard du biais et de l'erreur quadratique, la performance obtenue en phase de validation interne est plus importante que celle obtenue en transposition. Ces résultats traduisent la capacité du modèle à bien prévoir l'épaisseur de socle à forer. Les représentations graphiques effectuées ont permis de confirmer les résultats obtenus à partir des critères quantitatifs de performance utilisés. Les résultats de robustesse obtenus témoignent de la transposabilité du modèle « ESOF ». En effet, le modèle a démontré sa capacité à bien prévoir des épaisseurs de socle à forer à partir des données issues d'autres zones en dehors de celle sur laquelle il a été conçu. Ce modèle peut donc être appliqué dans tout domaine de socle cristallin et cristalloydique.

Le modèle « ESOF » dispose de deux paramètres qui sont la profondeur de la première arrivée d'eau significative et l'épaisseur d'altération du socle. Quant au modèle de Kouadio et al. (2010), il possède quatre variables explicatives (vitesse d'avancement de l'outil dans le socle, profondeur de la première arrivée d'eau, le nombre d'arrivée d'eau et épaisseur d'altération). Les résultats de comparaison de la performance du modèle « ESOF » et du modèle conçu par Kouadio et al. (2010), appliqués dans la région du Denguélé (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), montrent que le modèle « ESOF » enregistre des performances plus satisfaisantes ($R=0,730$; $B=12,724$; $RMSE=14,553$) que le modèle de Kouadio et al. (2010) ($R=0,387$; $B=11,317$; $RMSE=15,024$). En effet, une forte valeur de coefficient de corrélation a été obtenue au niveau du modèle « ESOF ». Elle vaut près de deux (2) fois le coefficient de corrélation au niveau

du modèle de Kouadio et al. (2010) qui reste inférieur à 0,5. Les valeurs du critère de biais obtenues pour chacun des deux modèles sont proches, mais celle du modèle établi par Kouadio et al. (2010) est relativement plus faible. Quant à l'erreur quadratique, les valeurs obtenues pour les différents modèles sont sensiblement proches, cependant celle obtenue par le modèle « ESOF » est relativement meilleure. Le modèle « ESOF » disposant de deux paramètres et étant plus performant que le modèle de Kouadio et al. (2010), qui en possède quatre, est de ce fait plus parcimonieux.

Devant les nombreux échecs en matière de prospection des eaux souterraines en milieux de socle, les recherches d'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. Dans ce contexte, la géophysique est aujourd'hui beaucoup sollicitée. En effet, les résultats des interprétations géophysiques permettent d'appréhender l'aquifère aux plans physique (géométrie de l'aquifère) et hydraulique (transmissivité, coefficient d'emmagasinement) (Guérin et Benderitter, 1995; Meyer, 2001; Vouillamoz, 2003; Guérin, 2005; Durand et al., 2006; Sinan et Razack, 2006; Guérin et al., 2009). Ainsi, les paramètres tels que les épaisseurs d'altération et les profondeurs des fractures hydrauliquement actives induisant les arrivées d'eau, peuvent être appréhendés par l'interprétation de mesures géophysiques. De ce fait, les paramètres d'entrée du modèle « ESOF » peuvent donc être estimés au moyen des mesures géophysiques de surface.

CONCLUSION

Les résultats de l'étude montrent que de meilleures valeurs ont été obtenues au niveau du coefficient de corrélation (R) en phase de calage (0,731) suivi de la transposition (0,649). La plus faible valeur de corrélation est enregistrée pour la phase de validation interne (0,582). Les valeurs du biais (B) varient de 10,265 (calage) à 12,466 (transposition). La valeur intermédiaire a été obtenue en validation interne (10,462). Les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE) oscillent entre 12,664 (validation interne) et 14,213 (transposition). La valeur intermédiaire a été obtenue en calage (13,275). Les meilleures performances ont été enregistrées en phase de calage. En validation, le coefficient de corrélation a été plus satisfaisant en transposition qu'en validation interne. Toutefois, au regard du biais et de l'erreur quadratique, la performance obtenue en phase de validation interne est plus importante que celle obtenue en transposition. Les représentations graphiques des épaisseurs de socle observées et celles simulées ont confirmé les résultats numériques. Les valeurs du critère de robustesse obtenues sont respectivement de 8,2% en transposition et 14,9% en validation interne. Le modèle est donc robuste dans l'ensemble, mais il a été plus robuste en transposition. Le modèle de simulation

de l'épaisseur de socle à forer (modèle « ESOF ») est un modèle performant, robuste et parcimonieux. Il peut être utilisé sur le terrain pendant l'exécution des forages d'eau donc dans la stratégie de prospection hydrogéologique en milieux de socle cristallin et cristallophyllien à partir de ses paramètres d'entrée estimés au moyen des mesures géophysiques de surface.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELANGER M., EL-JABI N., CAISSIE D., ASHKAR F. et RIBI J.M. (2005). 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, 403-421.
- BENYAHYA L. (2007). Modélisation statistique de la température de l'eau en rivière et en régime non-hivernal. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D) en sciences de l'eau, Université du Québec, 167p.
- BENYAHYA L., CAISSIE D., MERTES L.A. K., O'DANIEL S.J., WOESSNER W.W., THOMAS S.A. (2007). A review of statistical water temperature models, *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol. 32, n°3, 179-193.
- BENYAHYA L., ST-HILAIRE A., OUARDA T.B., BOBÉE B., DUMAS J. (2008). Comparison of non-parametric et parametric water temperature models on the Nivelle River, France, *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 53, n°3, 640-655.
- DAIGLE A., ST-HILAIRE A., PETERS D., BAIRD D. (2010). Multivariate modeling of water temperature in the Okanagan watershed, *Canadian Water Resources Journal-Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol. 35, n°3, 237-258.
- DJRO S.C. (1998). Evolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 121p.
- DURAND V., DEFFONTAINES B., LEONARDI V., GUERIN R., WYNS R., MARSILY G., BONJOUR J.L. (2006). 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, 227-236.
- GUÉRIN R. (2005). Borehole and surface-based hydrogeophysics, *Journal of Hydrogeology*, Vol. 13, 251–254.
- GUERIN R. et BENDERITTER Y. (1995). Shallow karst exploration using mt-vlf and dc resistivity methods”, *Geophysical prospecting*, Vol. 43, 635-653.
- GUERIN R., BALTASSAT J.M., BOUCHER M., CHALIKAKIS K., GALIBERT P.Y., GIRARD J.F., PLAGNES V., REMI V.R.

- (2009). Geophysical characterisation of karstic networks-application to the ouysse system (Poumeyssen, France), *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 341, 810–817.
- KOFFI Y.B., AHOUSSE K.E., KOUASSI A.M., KPANGUI L.C. et BIEMI J. (2012). Modélisation de la consommation en eau potable dans les capitales africaines au Sud du Sahara: application des réseaux de neurones formels à la ville de Yamoussoukro, capitale politique de la Côte d'Ivoire, *Journal of Asian Scientific Research*, Vol. 2, n°10, 562-573.
- KOFFI Y.B., LASM T., AYRAL P.A., ANNE J., KOUASSI A.M., ASSIDJO E., BIEMI J. (2006). Optimization of Multi-Layers Perceptions Models with Algorithms of First and Second Order. Application to the Modelling of Rainfall-Rainoff Relation in Bandama Blanc Catchment (North of Ivory Coast), *European Journal of Scientific Research*, Vol. 17, n°3, 313-328.
- KOFFI Y.B., LASM T., AYRAL P.A., JOHANNET A., KOUASSI A.M., ASSIDJO E., BIEMI J. (2007). 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, 313-328.
- KOUADIO K.E., SORO N. et SAVANE I. (2010). 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, 1-15.
- KOUAMELAN A.N. (1996). Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïque de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire - Implications pour la transition Archéen-Protérozoïque, Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes I, Mémoires, Géosciences Rennes, 289p.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KADIO K.K.R., BIEMI J. (2014a). 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, 181-197.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KOFFI Y.B., BIEMI J. (2014b). Développement de modèles statistiques pour la prévision du débit de forage d'eau en milieux de socle cristallin et cristallophyllien en Côte d'Ivoire, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 10, n°1, 154-170.
- KOUASSI A.M., KOUAME K.F., KOFFI Y.B, KOUAME K.A., OULARE S. et BIEMI J. (2011). 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 Technologique*, Vol. 11, 1377-1391.
- KOUASSI A.M., MAMADOU A., AHOUSSE K.E., BIEMI J. (2013). Simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines en relation

- avec leurs propriétés géologiques: cas de la Côte d'Ivoire, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol.21&22, 138-166.
- LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen), Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, 274p.
- MEYER C. (2001). Applications de la géophysique aux recherches d'eau souterraine », *Technique et documentation*, Lavoisier, 183p.
- POTHIN K.B.K., GIOAN P., GRONAYES C.C. (2000). Bilan géochronologique du socle précambrien de Côte d'Ivoire, *Bioterre, Revue Internationale des Sciences de la Vie et de la Terre*, Vol. 1, n°1, 36-47.
- SINA M. et RAZACK M. (2006). 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, 221-232.
- YAO D.B. (1998). 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, 190p.
- VOUILLAMOZ J.M. (2003). 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.