



APPLICATION D'UN MODÈLE STATISTIQUE A LA SIMULATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES: CAS DE L'EX-RÉGION DU N'ZI- COMOÉ (CENTRE-EST DE LA COTE D'IVOIRE)

APPLICATION OF A STATISTICAL MODEL TO THE SIMULATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF GROUNDWATER: CASE STUDY OF THE EX-AREA OF N'ZI-COMOÉ (CENTER-EAST OF IVORY COAST).

***KOUASSI A. M.¹, KOUAKOU K. E.¹, AHOUSI KOUASSI E.²,
KOUAME K. F.², BIEMI J.²***

¹Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; BP 1093 Yamoussoukro; (Côte d'Ivoire)

²Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM) ; 22 BP 582 Abidjan 22 ; (Côte d'Ivoire)

michel.a_kouassi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Il est très souvent constaté dans les fiches d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines issues de forage que certains ions majeurs tels que le potassium et le sodium, n'y figurent pas. Ce fait induit l'impossibilité d'établir une balance ionique pour l'analyse de la validité des résultats de laboratoire, de simuler la conductivité électrique à partir de méthodes faisant intervenir tous les ions majeurs, etc. Alors, la problématique que soulève ce travail est la suivante: Est-on capable, à partir des ions majeurs définissant le faciès hydrogéochimique d'une eau souterraine donnée, donc prédominants, de déterminer la conductivité électrique d'une eau ? Sur cette base, est-il possible de préciser la validité des résultats de laboratoire à partir d'une valeur simulée de la conductivité électrique? Ainsi l'objectif de cette étude est de développer

un modèle statistique de régressions linéaires capables de simuler la conductivité électrique des eaux souterraines à partir d'ions majeurs prédominants et définissant le faciès hydrogéochimique des eaux. La zone d'étude est l'ex-région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). Pour atteindre l'objectif, l'approche méthodologique utilisée est basée sur le calage du modèle et l'évaluation de sa performance à partir de critères numériques et graphiques. Les principaux résultats ont montré que le modèle développé et évalué est performant et robuste et est capable de simuler la conductivité électrique des eaux souterraines avec une bonne fiabilité. Ce modèle se trouve à la confluence de la simplicité et de la performance par rapport aux modèles de conductivité électrique existants.

Mots clés : Modèles statistiques, conductivité électrique, ions majeurs prédominants, performance, robustesse, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

It is very often found in the analysis sheets of the physical and chemical parameters of groundwater from drilling that some major ions such as potassium and sodium are not included. This fact induces the impossibility of establishing an ion balance for analyzing the validity of laboratory results, simulating electrical conductivity using methods involving all major ions, and so on. Then, the problem that this work raises is the following: Is it possible, from the major ions defining the hydrogeochemical facies of a given groundwater, therefore predominant, to determine the electrical conductivity of a water? On this basis, is it possible to specify the validity of the laboratory results from a simulated value of the electrical conductivity? The objective of this study is to develop a statistical model of linear regressions capable of simulating the electrical conductivity of groundwater from major predominant ions and defining the hydrogeochemical facies of the waters. The study area is the ex-area of N'zi-Comoé (Center-East of Ivory Coast). To achieve the objective, the methodological approach used is based on the calibration of the model and the evaluation of its performance based on numerical and graphical criteria. The main results showed that the developed and evaluated model is powerful and robust and is able to simulate the electrical conductivity of groundwaters with a good reliability. This model is at the junction of simplicity and performance compared to the existing electrical conductivity models.

Keywords: Statistical models, electrical conductivity, major ions predominate, performance, robustness, Ivory Coast.

INTRODUCTION

Un constat est fait au niveau des données d'analyses de la qualité physico-chimique des eaux souterraines issues des forages réalisés au cours des programmes et projets d'hydraulique et gérés par la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DIGHH) avec ses démembrements que sont les Directions Territoriales de l'Hydraulique (DTH). En effet, certains paramètres tels que le potassium et le sodium, ne figurent pas très souvent dans les tableaux d'analyses physico-chimiques rendus par les sociétés en charge du suivi des forages alors qu'il s'agit d'ions majeurs. Les conséquences sont nombreuses et on peut citer l'impossibilité d'établir une balance ionique pour l'analyse de la validité des résultats de laboratoire, de simuler la conductivité électrique à partir de méthodes faisant intervenir tous les ions majeurs, etc. Alors, la problématique que soulève ce travail est la suivante: Est-on capable, à partir des ions majeurs prédominants et définissant le faciès hydrogéochimique d'une eau souterraine donnée, de déterminer la conductivité électrique d'une eau ? Sur cette base, est-il possible de préciser la validité des résultats de laboratoire à partir d'une valeur simulée de la conductivité électrique ? Selon Kouassi et al. (2010), la projection du chimisme des eaux souterraines de l'ex-région du N'zi-Comoé, dans le diagramme de Piper a révélé deux faciès que sont le faciès bicarbonaté calcique et magnésien (99%) et le faciès chloruré calcique et magnésien (1%). La prédominance du faciès bicarbonaté calcique et magnésien est manifeste dans les eaux souterraines de socle (Ahoussi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2010 ; Lasm et al., 2011 ; Ahoussi et al., 2011 ; Kouassi et al., 2011 ; Ahoussi et al., 2012). Les espèces ioniques dominantes de ces eaux sont donc le bicarbonate, le calcium, le magnésium et les chlorures. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce contexte (Laftouhi et al., 2003 ; Diamantopoulou et al., 2005 ; Zerki et al., 2012a,b ; Zerki, 2013 ; Kouassi et al., 2014 ; Manssouri et al., 2014 ; Manssouri et al., 2015 ; Zerki et al., 2015a,b ; Kouassi et al., 2016a ; Kouassi et al., 2016b ; Kouassi et al., 2017). La particularité de cette étude réside dans le choix des paramètres qui se résument aux ions majeurs prédominants et définissant de ce fait les faciès hydrogéochimiques des eaux souterraines.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle statistique de régressions linéaires pour simuler la conductivité électrique des eaux souterraines à partir d'ions majeurs prédominants.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La région du N'zi-Comoé (actuelles régions du Iffou, du N'zi et du Moronou), 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 (Figure 1). Elle a une superficie de 19 560 km². Sa population est estimée à environ 900 000 habitants en 2014, soit une densité moyenne de 46 habitants au km².

Le relief de la région du N'zi-Comoé est monotone et constitué d'un plateau de direction Nord-Sud, avec une altitude moyenne supérieure à 150 m. Des collines de direction Sud Ouest-Nord Est correspondant au sillon volcano-sédimentaire, traversent la région. 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).

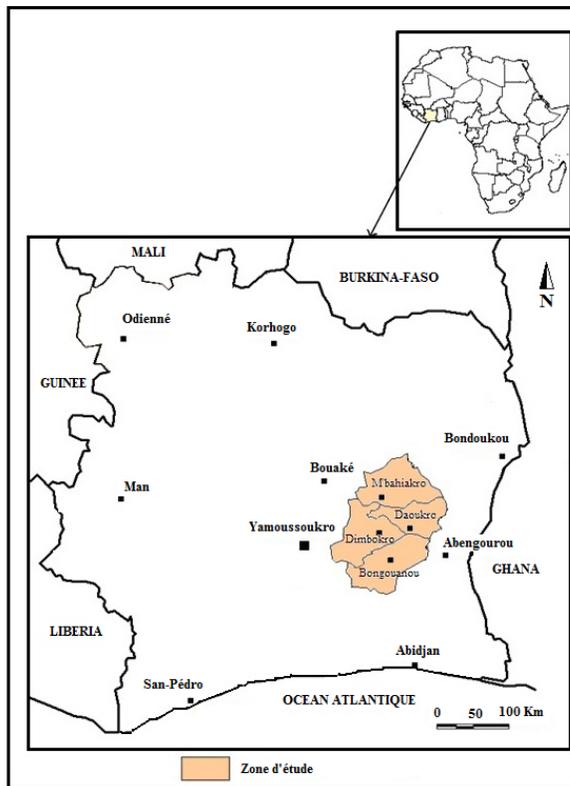


Figure 1 : Localisation de l'ex-région du N'zi-Comoé

Le climat est de type tropical humide avec une alternance de quatre saisons dont deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches (Kouassi et al., 2012a).

Les quatre (4) saisons sont les suivantes (Figure 2) :

- Une grande saison des pluies de mars à juin ;
- Une petite saison sèche de juillet à août ;
- Une petite saison des pluies de septembre à octobre ;
- Une grande saison sèche de novembre à février.

La hauteur pluviométrique moyenne annuelle est de 1155 mm. Les températures moyennes dans la région varient entre 25 °C et 29 °C avec des pics de 28,41 °C à 28,49 °C au cours des mois de février à mars (Figure 3) (Kouassi et al., 2012a).

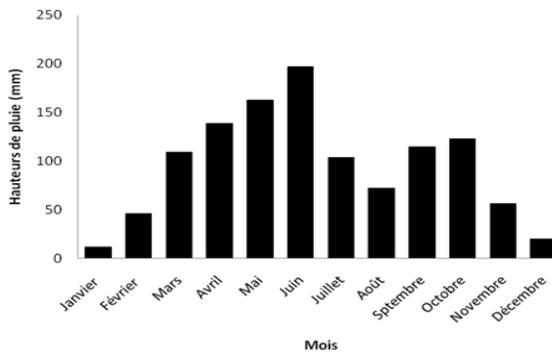


Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle (mm) de l'ex-région du N'zi-Comoé (1961-2000) (Kouassi et al., 2012a)

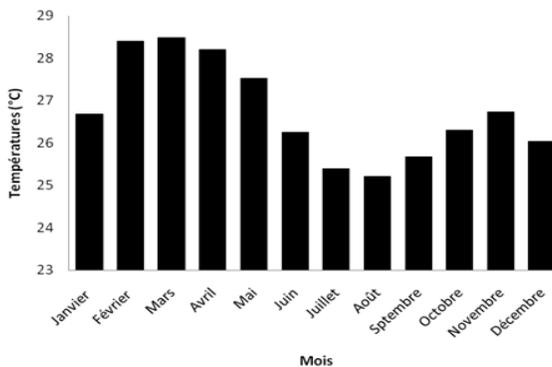


Figure 3 : Températures moyennes mensuelles de l'ex-région du N'zi-Comoé (1961-2000) (Kouassi et al., 2012a)

L'ex-région du N'zi-Comoé est à cheval entre deux bassins que sont le bassin versant de la Comoé et le bassin versant du N'zi. Cependant, elle repose en grande partie sur le bassin versant du N'zi. Le N'zi, affluent du Bandama, prend sa source au Nord de la Côte d'Ivoire dans la région de Ferkessédougou à une altitude de 400 m. Il coule globalement dans une direction Nord-Sud avec une pente moyenne relativement constante de l'ordre de 0,053%. Son affluent principal est le Kan qu'il reçoit à environ 5 km en aval de Dimbokro. Cependant, il existe d'autres affluents importants dont le M'bé en rive gauche entre les stations hydrométriques de Fêtékro et de M'bahiakro et la Baya en rive gauche entre M'bahiakro et Dimbokro.

Le régime hydrologique de la zone d'étude est caractérisé par un régime équatorial de transition atténué. C'est un régime qui est marqué par une période de hautes eaux, d'août à octobre, et une période de basses eaux pendant les mois de novembre, juin et juillet. La période de décembre à mai est marquée par un étiage avec des écoulements faibles, voire nuls (février et mars) (Figure 4) (Kouassi et al., 2012a).

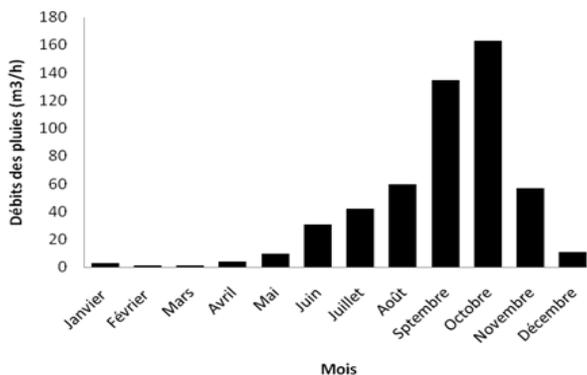


Figure 4 : Régime hydrologique de l'ex-région du N'zi-Comoé (1961-2000)
(Kouassi et al., 2012a)

Selon Kouassi et al. (2012a), le bilan hydrologique montre que l'ex-région du N'zi-Comoé reçoit en moyenne 1154,71 mm de pluie chaque année et l'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle est de 1691,44 mm avec une évapotranspiration réelle (ETR) dont la valeur est de 869,67 mm. L'écoulement de surface est de 179,38 mm d'où la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer pour alimenter les aquifères est de 105,65 mm, soit 9,15 % des précipitations.

L'ex-région du N'zi-Comoé appartient au domaine paléoprotérozoïque encore appelé domaine Baoulé-Mossi. La zone d'étude est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques constituées essentiellement de roches magmatiques et métamorphiques (Figure 5). Les roches magmatiques sont constituées essentiellement de granitoïdes notamment les granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et les granodiorites. Les formations métamorphiques sont essentiellement des formations volcano-sédimentaires représentées par des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite, métagabbro et amphibolite. Les formations volcano-sédimentaires représentent plus de 85% de la superficie de la région contre moins de 15% pour les formations magmatiques. Les différentes formations géologiques ont été affectées par plusieurs familles d'accidents majeurs. Ces fractures sont de direction préférentielle Nord-Sud. Elles sont susceptibles de faciliter la circulation de l'eau dans les roches. Ces formations géologiques ont été également touchées par le phénomène d'altération. Ainsi, l'altération sur le substratum schisteux est particulièrement épaisse et argileuse. Elle est en moyenne d'une trentaine de mètres et peut atteindre 60 m.

D'après les travaux de Kouassi et al. (2012a, 2013a), le débit de forage de l'ex-région du N'zi-Comoé va de 0,4 à 16 m³/h avec une moyenne de 3,2 m³/h. La fréquence des débits de forage faibles à forts (supérieur ou égal à 1 m³/h) est de 67,02%. Les valeurs de conductivité hydraulique varient entre 1,79.10⁻⁸ et 3,80.10⁻⁶ m/s pour une moyenne de 6,35.10⁻⁷ m/s. Les valeurs de transmissivité varient de 9,31.10⁻⁷ à 4,26.10⁻³ m²/s avec une moyenne de 8,16.10⁻⁵ m²/s. Les différents paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique et transmissivité) sont hétérogènes et varient en fonction de la nature géologique des terrains aquifères et de la densité de fracturation de ces terrains. 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 m²/s représentent 76,96%. Les transmissivités moyennes à fortes sont majoritaires 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 sont les plus productives. Le débit spécifique varie entre 0,01 et 3,03 m²/h avec une moyenne de 0,4 m²/h. Le

niveau statique des eaux fluctue entre 8,85 et 65,72 m avec une moyenne de 36,81 m. Le nombre d'arrivée d'eau va de 1 à 6 avec une moyenne de 3.

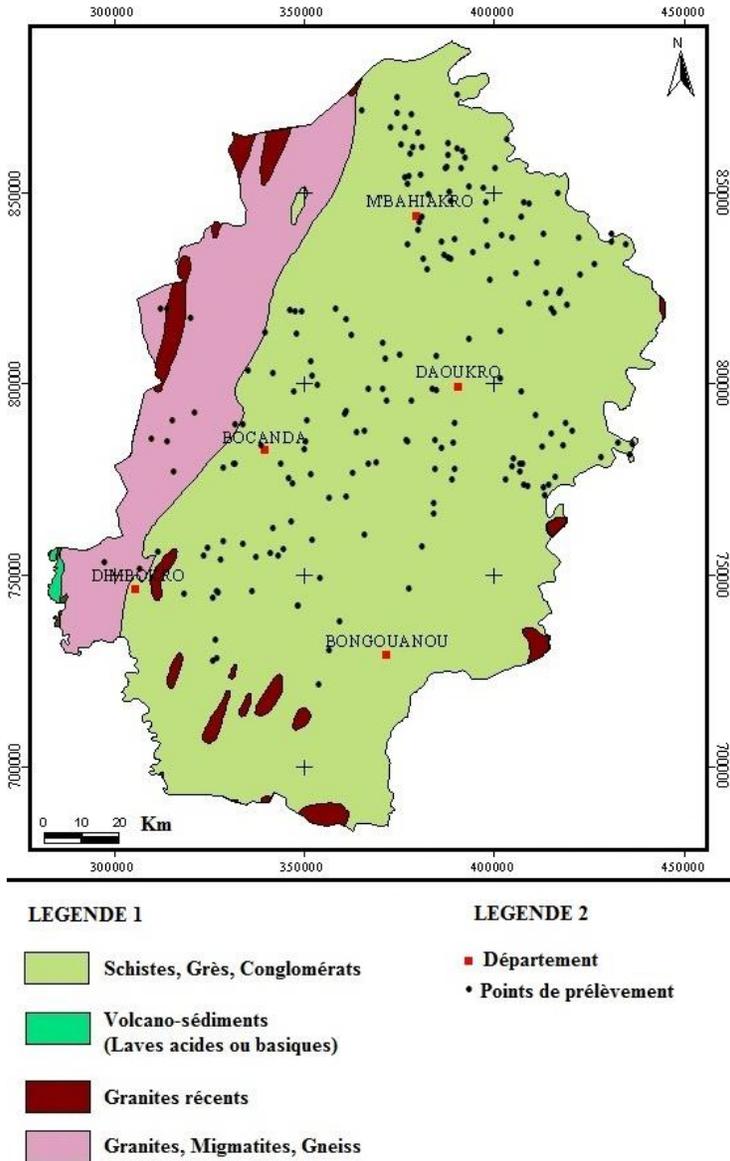


Figure 5 : Carte géologique de l'ex-région du N'zi-Comoé et points d'échantillonnage (Yao, 1998)

Selon Kouassi et al. (2012a, 2013b), l'épaisseur de l'altération meuble est comprise entre 4 et 104 m avec une moyenne de 54,2 m. Les épaisseurs d'altération meuble les plus fréquentes se situent dans l'intervalle de 45 à 75 m avec un taux 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 meuble ayant une épaisseur comprise entre 45 et 90 m. Dans les terrains métamorphiques, les forages productifs ont des épaisseurs d'altération se trouvant dans la tranche 20-100 m. Quant à l'épaisseur de l'horizon fissuré foré, elle oscille entre 0 et 73,43 m avec une moyenne de 24,33 m. Dans l'ex-région du N'zi-Comoé, les profondeurs des forages réalisés varient entre 40 et 120 m avec une profondeur moyenne de 63 m dans les granites, de 84 m dans les grès et de 80 m dans l'ensemble schistes-gneiss-métagranites. La profondeur moyenne dans l'ensemble des formations géologiques est de 79 m. Les profondeurs les plus importantes sont observées dans les terrains métamorphiques (schistes, gneiss et métagranites) et gréseux. Les profondeurs les plus faibles sont obtenues dans les terrains granitiques. La profondeur des premières arrivées d'eau significatives (débit supérieur ou égale à 1 m³/h) oscille entre 17 et 107 m avec une moyenne de près de 45 m.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données de l'étude

L'étude est basée sur un échantillon de 193 forages d'eau. Les données concernent les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques réalisées sur ces forages. Le paramètre de sortie est la conductivité électrique. Les paramètres d'entrée sont le bicarbonate, le calcium, le magnésium et le chlorure. L'appareillage utilisé sur le terrain pour la mesure de la conductivité électrique (CE) est un conductimètre Hach Sension 5. Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène pour être analysés au Laboratoire Privé d'Analyse d'Abengourou (LPA). Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre DR 2010 de type HACH. En effet, il s'agit d'une base de données acquise auprès de la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine (DGIHH).

Démarche méthodologique de l'étude

Conception du modèle 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. En effet, les régressions linéaires multiples sont utilisées pour déterminer la relation linéaire la plus satisfaisante pour prévoir la valeur dépendante qui produit l'erreur-type la moins grande. Dans un tel modèle, chaque variable indépendante est pondérée afin que la valeur des coefficients de régression maximise l'influence de chaque variable dans l'équation finale. Il est possible de manipuler plusieurs variables indépendantes à partir des régressions linéaires multiples, mais seulement une variable dépendante. La régression 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. Ainsi plusieurs auteurs ont simulé les paramètres chimiques des eaux à partir de régressions linéaires multiples (Kouassi et al., 2014, 2016a, 2017). Dans une régression linéaire multiple, l'équation est sous la forme suivante (équation 1) :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_3 X_3 + C_N X_N + C_0 \quad (1)$$

Y : variable expliquée ;

X_i : variable explicative ;

C_0 : constante ;

C_i ($1 \leq i \leq N$): coefficients de pondération de la variable explicative X_i .

En effet, Y est un vecteur de valeurs observées de conductivité électrique de forages d'eau, X_i est une matrice de variables indépendantes ou explicatives (teneur de l'ion bicarbonate, teneur de l'ion calcium, teneur de l'ion magnésium et teneur de l'ion chlore), C_i est un vecteur de paramètres ou coefficients de régression à estimer, et C_0 est un vecteur des résidus ou des perturbations aléatoires. La régression linéaire estime le vecteur C_i comme la solution des moindres carrés (équation 2) :

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

avec X^T la transposée de X.

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. Ainsi, le calage des modèles a été effectué sur un échantillon de 129 forages et la validation sur un échantillon de 64 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 calculé de façon automatique avec le logiciel Excel 2013.

Evaluation de la qualité des modèles développés

La performance des modèles a été évaluée 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 en calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation. Pour évaluer la performance des modèles développés dans cette étude, les critères utilisés sont le coefficient de corrélation et le critère de Nash-Sutcliffe. L'expression du coefficient de corrélation se présente comme suit (équation 3):

$$R = \frac{\sum_i (CE_i - \overline{CE})x(CE'_i - \overline{CE'})}{\sqrt{\sum_i (CE_i - \overline{CE})^2 x \sum_i (CE'_i - \overline{CE'})^2}} \quad (3)$$

avec :

CE_i : conductivité électrique mesurée ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ;

CE'_i : conductivité électrique simulée concentration simulée ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ;

\overline{CE} : moyenne des conductivités électriques mesurées ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ;

$\overline{CE'}$: moyenne des conductivités électriques simulées ($\mu\text{S/cm}$).

Deux variables ont été considérées comme corrélées lorsque leur coefficient de corrélation était supérieur ou égal à 0,60 (Kouassi et al., 2017).

Le critère d'optimisation de Nash-Sutcliffe est généralement utilisé pour évaluer la performance des modèles. Le critère de Nash-Sutcliffe est le rapport de la somme du carré des écarts entre la conductivité mesurée et celle simulée par les modèles et la somme des écarts entre la conductivité électrique mesurée et la moyenne des conductivités mesurées. Il est régi par l'équation suivante (équation 4):

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (CE_i - CE'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (CE_i - \overline{CE})^2} \right) \quad (4)$$

CE_i : conductivité électrique mesurée ($\mu\text{S/cm}$) ;

CE'_i : conductivité électrique simulée ($\mu\text{S/cm}$) ;

\overline{CE} : conductivité électrique moyenne mesurée ($\mu\text{S/cm}$).

Le critère de Nash-Sutcliffe mesure la performance du modèle par rapport à un modèle qui utiliserait la valeur moyenne comme valeur simulée. Le critère de Nash-Sutcliffe varie entre $-\infty$ et 100%. Un critère de Nash-Sutcliffe compris entre 0 et 100% signifie que le modèle est meilleur que si la moyenne avait été utilisée comme valeur simulée. Un critère de Nash-Sutcliffe négatif signifie que la valeur moyenne est plus performante que le modèle testé. Le modèle est considéré comme performant quand les conductivités estimées se rapprochent de celles mesurées sur le terrain, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash-Sutcliffe est proche de 100%. L'échelle suivante peut être utilisée pour apprécier la qualité de la simulation (Perrin, 2000 ; Perrin et al., 2003 ; Kouassi et al., 2012b) :

-Nash-Sutcliffe $\geq 90\%$, le modèle est excellent ;

-Nash-Sutcliffe compris entre 80% et 90%, le modèle est très bon ;

-Nash-Sutcliffe compris entre 60% et 80%, le modèle est bon ;

-Nash-Sutcliffe $< 60\%$, le modèle est mauvais.

En effet, une valeur du critère de moins de 60% ne donne pas une concordance satisfaisante entre les grandeurs observées et simulées par les modèles. Les performances en termes de critère de Nash-Sutcliffe sont l'image de l'adéquation du modèle et du jeu de paramètres calés de l'échantillon étudié.

Le critère de robustesse des différents modèles a été évalué par la différence des critères de performance de la phase de calage à la validation. La robustesse se définit par la formule suivante (équation 5):

$$R' = R_{Validation} - R_{Calage} \quad (5)$$

Le modèle est jugé robuste si la valeur du critère de robustesse varie entre -10 et +10% (Kouassi et al, 2014a,b, 2016c).

Outre l'évaluation numérique, le diagnostic graphique s'avère important car c'est un outil puissant pour valider une régression. Il fournit un nombre important d'informations que les indicateurs statistiques appréhendent mal. Ainsi, des analyses graphiques comparant des concentrations simulées aux concentrations observées ont été réalisées. 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.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Caractéristiques statistiques des paramètres étudiés

D'après le Tableau 1, les eaux souterraines de l'ex-région du N'Zi-Comoé ont des valeurs de conductivité électrique qui fluctuent entre 106 et 1535 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 391,40 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Le bicarbonate varie entre 61 et 451,4 mg/l avec une moyenne de 209,05 mg/l. La teneur du calcium est comprise entre 4,01 et 155 mg/l avec une moyenne de 32,51 mg/l. Pour ce qui concerne le magnésium, sa teneur se situe entre 1,9 mg/l et 48,60 mg/l avec une moyenne de 13,02 mg/l. Au niveau du chlore, la concentration oscille de 3,55 à 237,58 mg/l avec une moyenne de 20,13 mg/l. Tous les paramètres étudiés sont hétérogènes.

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des paramètres étudiés

	Min	Moy	Max	Ecart-type	CV
Conductivité (µS/cm)	106	391,4	1535	200,53	51,23
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	61	209,05	451,4	89,64	42,88
Ca ²⁺ (mg/l)	4,01	32,51	155	23,66	72,78
Mg ²⁺ (mg/l)	1,94	13,02	48,6	6,83	52,45
Cl ⁻ (mg/l)	3,55	20,13	237,58	24,66	122,51

Min=Minimum; Max=Maximum; Moy=Moyenne; CV= Coefficient de Variation

Le coefficient de corrélation évalué entre la variable expliquée (conductivité électrique) et les variables explicatives (ions majeurs prédominants) va de 0,71 (chlore) à 0,88 (calcium) en passant par 0,75 pour le magnésium et 0,74 pour le bicarbonate (Tableau 2). Ces résultats montrent que la conductivité électrique est corrélée aux ions majeurs prédominants.

Tableau 2 : Corrélation entre conductivité électrique et ions majeurs prédominants

Ions majeurs prédominants	Conductivité électrique (µS/cm)
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	0,74
Ca ²⁺ (mg/l)	0,88
Mg ²⁺ (mg/l)	0,75
Cl ⁻ (mg/l)	0,71

Résultats de calage du modèle

Un modèle a été développé à partir de la variable expliquée qui est la conductivité électrique et les différentes variables explicatives (ion bicarbonate, ion calcium, ion magnésium et ion chlorure) définissant les principaux ions majeurs prédominants du faciès chimique des eaux souterraines de l'ex-région du N'zi-Comoé. Les valeurs des erreurs-types des variables explicatives sont comprises entre $7,6.10^{-2}$ et $2,7.10^{-1}$ (Tableau 3). Les coefficients de variation (%) relatifs aux coefficients de régression des différentes variables explicatives obtenus à la suite du calage sont synthétisés dans le tableau 3. Il ressort que tous les coefficients de régression sont homogènes. Quant à celui de la constante, il est hétérogène.

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

Paramètres	HCO ₃	Mg	Ca	Cl	a ₀
Coefficient de régression (a _i)	0,903	2,401	5,687	2,778	6,827
Erreur-type (ē _i)	7,6.10 ⁻²	4,1.10 ⁻¹	9,9.10 ⁻¹	2,7.10 ⁻¹	12,60
Coefficient de Variation	8,412	16,876	17,521	9,758	184,496

L'équation obtenue à partir des coefficients de régression est (6):

$$CE=0,903x[HCO_3]+2,401x[Mg]+ 5,687x[Ca]+2,778x[Cl]+6,827 \quad (6)$$

Performance du modèle de simulation de la conductivité électrique

L'analyse des résultats de performance obtenus (Tableau 4) montre qu'en calage, le modèle a enregistré un très fort taux de performance au niveau des deux critères. En effet, le coefficient de corrélation entre les valeurs de conductivité électrique observées et celles simulées est de 97,384%. Quant au critère de Nash-Sutcliffe, il est excellent avec une valeur de 94,836%. En validation, les performances enregistrées montrent un coefficient de corrélation de 89,479% et un Nash-Sutcliffe de 75,196%. Ainsi, les valeurs du critère de robustesse évaluées (Tableau 4) sont de -2,548% avec le coefficient de corrélation et -14,283% avec le Nash-Sutcliffe. Les différents résultats obtenus montrent que le modèle est performant et robuste.

Tableau 4 : Performance et robustesse du modèle de conductivité électrique

Critères	Calage	Validation	Critère de robustesse (%)
Corrélation (%)	97,384	89,479	-2,548
Nash-Sutcliffe (%)	94,836	75,196	-14,283

Les représentations graphiques présentées sont celles du calage (Figure 6) et de la phase de validation (Figure 7). Ces différentes figures montrent en général une bonne répartition des points le long des axes x=y. Ces résultats confirment les résultats des critères numériques.

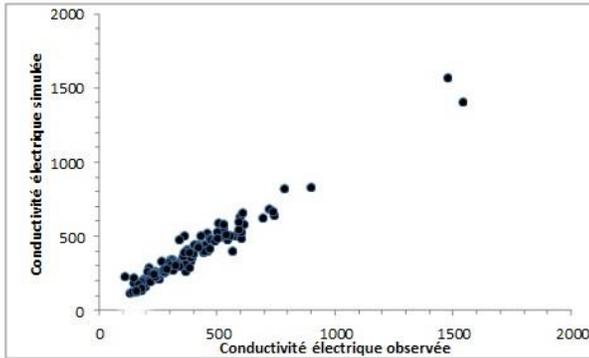


Figure 6 : Conductivité électrique simulée en fonction de la conductivité observée en calage

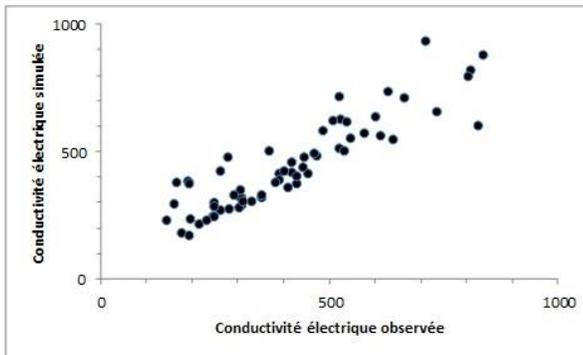


Figure 7 : Conductivité électrique simulée en fonction de la conductivité observée en validation

DISCUSSION

La modélisation de la conductivité électrique à partir des ions majeurs prédominants caractérisant le faciès hydrochimique des eaux souterraines de l'ex-région du N'zi-Comoé a été réalisée. L'analyse des paramètres d'entrée et de sortie du modèle a montré qu'il y a une bonne corrélation (0,71-0,88) entre la conductivité électrique et les ions majeurs étudiés. Tous les paramètres étudiés sont hétérogènes. Les valeurs des erreurs-types des variables explicatives sont comprises entre $7,6.10^{-2}$ et $2,7.10^{-1}$ et les coefficients de régression des variables sont homogènes. Ces résultats obtenus traduisent des relations étroites entre la variable expliquée (conductivité électrique) et les variables explicatives (ions

majeurs du faciès hydrochimique). En phase de calage, les critères de performance ont enregistré des valeurs supérieures à 94%. En validation, les performances enregistrées ont été supérieures à 75%. Ainsi, les valeurs du critère de robustesse évaluées sont de -2,548% avec le coefficient de corrélation et -14,283% avec le Nash-Sutcliffe. Ces résultats montrent que le coefficient de corrélation a été relativement moins variable que le Nash-Sutcliffe en passant du calage à la validation. En calage comme en validation, les deux critères ont enregistré des performances au-delà des seuils définis (60%). Ainsi, le critère de Nash-Sutcliffe, qui traduit un rapprochement entre les valeurs observées et les valeurs simulées confirme les résultats du coefficient de corrélation qui ne traduit pas toujours un rapprochement entre les valeurs observées et les valeurs simulées mais l'existence d'une certaine proportionnalité entre les deux séries. Ainsi, on peut conclure que le modèle développé et évalué est performant et robuste. Il est donc capable de simuler la conductivité électrique des eaux souterraines avec une bonne fiabilité à partir seulement de quatre ions majeurs (ion bicarbonate, ion calcium, ion magnésium et ion chlorure) définissant le faciès hydrogéochimique des eaux souterraines. Ce modèle peut donc être utilisé pour l'étude de la fiabilité des données physico-chimiques. En effet, en absence de certains ions majeurs qui évite l'application de la balance ionique comme moyen d'étude de la fiabilité des données, l'étude de la conductivité électrique observée sur le terrain et celle simulée à partir de modèles, est un moyen d'identification des erreurs commises lors de la détermination des teneurs des ions majeurs au laboratoire (Kouassi et al., 2013a ; Kouassi et al., 2014b ; Kouassi et al., 2016a). Les résultats obtenus au cours de cette étude ont permis d'affirmer que l'analyse de la fiabilité des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines par la modélisation est une approche pertinente.

Dans la littérature, plusieurs modèles de conductivité électrique existent (Soro, 2002 ; Kouassi et al., 2011 ; Kouassi et al., 2013a ; Kouassi et al., 2016a). Ainsi, une analyse comparative de certains modèles a été réalisée. Les fondements mathématiques de ces modèles sont illustrés au Tableau 5. Les variables explicatives de ces modèles sont diverses. Elles sont constituées, soit uniquement de paramètres chimiques (résidu sec, cations majeurs, anions majeurs), soit de combinaison de paramètres physiques [Température (T), pH] et chimiques.

Tableau 5 : Fondements mathématiques de modèles de conductivité électrique

Equations des modèles	
M-1	$CE = \frac{Résidu\ sec(mg / l)}{0,65}$ (Soro, 2002)
M-2	$CE = 63,614 \times \sum cations + 51,331 \times \sum anions - 2,947$ (Kouassi et al., 2016a)
M-3	$CE = 60,337 \times \sum cations + 58,345 \times \sum anions + 0,953T - 51,866pH + 298,950$ (Kouassi et al., 2016a)
M-4	$CE = 0,903x[HCO_3] + 2,401x[Mg] + 5,687x[Ca] + 2,778x[Cl] + 6,827$ (Etude en cours)
M-i : Modèle i	

Au regard des résultats des critères d'évaluation de la performance [coefficient de corrélation (R) et Nash-Sutcliffe (NS)] en phases de calage et de validation ainsi que du critère de robustesse (Kouassi et al., 2013a ; Kouassi et al., 2016a), les différents modèles sont performants et robustes (Tableau 6). En effet, les performances sont toutes supérieures à 60% (seuil de performance acceptable) en calibration comme en validation, en dehors du Nash-Sutcliffe du modèle 3 en validation. Elles varient en calage entre 94,84 et 98,60%. Quant à la validation, les performances oscillent entre 19,18 et 96%.

Tableau 6 : Comparaison des performances de modèles de conductivité électrique

Type de modèle	Critères	Calage	Validation	Robustesse	Ecart relatifs
Modèle 1	R (%)	-	92,67	-	
	NS (%)	-	82,10	-	
Modèle 2	R (%)	98,50	96,00	-2,50	-3,59
	NS (%)	96,85	87,61	-9,24	-6,71
Modèle 3	R (%)	98,60	90,00	-8,60	2,88
	NS (%)	97,10	19,18	-77,92	76,64
Modèle 4	R (%)	97,38	89,48	-7,90	3,44
	NS (%)	94,84	75,20	-19,64	8,40

Une première analyse comparative basée sur les performances en calibration et en validation des modèles conçus par Kouassi et al. (2013a, 2016a, étude en cours) montre que le modèle 2 est le plus performant et le plus robuste, suivi du modèle 4. Le modèle 3 se présente comme le modèle le moins performant et le

moins robuste. Une deuxième analyse axée sur la comparaison des modèles développés par Kouassi et al. (2013a, 2016a, étude en cours) au modèle de référence (modèle 1) uniquement en phase de validation a été faite. Ainsi, des écarts relatifs ont été évalués en considérant les performances du modèle 1 comme les valeurs de référence (Tableau 6). Ces écarts montrent des valeurs négatives au niveau du modèle 2 et des valeurs positives au niveau des modèles 3 et 4. Ces résultats compris en général dans l'intervalle $[-6,71\% ; +8,40\%]$ donc appartenant à l'intervalle de référence $]-\infty ; +10\%]$, montrent qu'en dehors du modèle 3, les modèles 2 et 4 ont des performances proches de celles du modèle de référence (modèle 1). Il est constaté que les paramètres physiques (température et pH) n'ont pas apporté une amélioration de la performance du modèle 3 pour la simulation de la conductivité électrique. Les écarts négatifs obtenus au niveau du modèle 2 mettent en évidence une prédominance de la performance du modèle 2 sur le modèle de référence (-3,59% et -6,71%). Quant au modèle 4, il reste relativement moins performant que le modèle de référence mais avec une différence pas statistiquement très significative (3,44% et 8,40%). Ainsi le modèle de référence (modèle 1) se trouve en termes de performance entre le modèle 2 et le modèle 4.

Les modèles 1, 2 et 3 nécessitent la connaissance des teneurs de tous les ions majeurs alors que le modèle 4 ne demande en entrée que quatre ions majeurs dominants de l'eau étudiée (ion bicarbonate, ion magnésium, ion calcium et ion chlorure). L'avantage que présente le modèle 4 (étude en cours) réside donc dans la faiblesse du poids des informations à collecter. Sa limite est qu'il ne s'applique que lorsque les variables d'entrée citées sont dominantes pour le point d'eau étudié. Ce modèle se trouve donc à la confluence de la simplicité et de la performance.

CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus montrent que les eaux souterraines de l'ex-région du N'Zi-Comoé (actuelles régions du N'zi, de l'Iffou et du Moronou) ont des valeurs de conductivité électrique qui fluctuent entre 106 et 1535 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 391,40 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Le bicarbonate varie entre 61 et 451,4 mg/l avec une moyenne de 209,05 mg/l. La teneur du calcium est comprise entre 4,01 et 155 mg/l avec une moyenne de 32,51 mg/l. Pour ce qui concerne le magnésium, sa teneur se situe entre 1,9 mg/l et 48,60 mg/l avec une moyenne de 13,02 mg/l. Au niveau du chlore, la concentration va de 3,55 à 237,58 mg/l avec une moyenne de 20,13 mg/l. Le coefficient de corrélation évalué entre la variable expliquée (conductivité électrique) et les variables explicatives (ions

majeurs prédominants) va de 0,71 (chlore) à 0,88 (calcium) en passant par 0,75 pour le magnésium et 0,74 pour le bicarbonate. Tous les paramètres étudiés sont hétérogènes. Les valeurs des erreurs-types des variables explicatives sont comprises entre $7,6.10^{-2}$ et $2,7.10^{-1}$ et les coefficients de régression des variables sont homogènes. En phase de calage, les critères de performance ont enregistré respectivement 97,384% et 94,836% pour le coefficient de corrélation et le critère de Nash-Sutcliffe. En validation, les performances enregistrées mettent en évidence un coefficient de corrélation de 89,479% et un Nash-Sutcliffe de 75,196%. Ainsi, les valeurs du critère de robustesse évaluées sont de -2,548% avec le coefficient de corrélation et -14,283% avec le Nash-Sutcliffe. Ainsi, on peut conclure que le modèle développé et évalué est performant et robuste. Il est donc capable de simuler la conductivité électrique des eaux souterraines avec une bonne fiabilité. Ce modèle se trouve à la confluence de la simplicité et de la performance par rapport aux modèles de conductivité électrique existants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Direction Territoriale de l'Hydraulique (DTH) de Yamoussoukro pour leur avoir fourni les données d'analyses physico-chimiques utilisées dans cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHOUSSE K.E., KOFFI Y.B., KOUASSI A.M., SORO G., SORO N., BIEMI J. (2012). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 6, n°4, pp.1854-1873. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.40>.
- AHOUSSE K.E., OGA M.S., KOFFI Y.B., KOUASSI A.M., SORO N., BIEMI J. (2011). Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol.5, n°5, pp.2114-2132.
- AHOUSSE K.E., SORO N., KOFFI Y.B., SORO G., BIEMI J. (2010). Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol.4, Issue 3, pp.782-797.

- AMADOU H., LAOUALI M.S. ET MANZOLA A.S. (2014). Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux de la zone de Zinder (Sud-Est du Niger). *International Journal of Biological and Chemical Science*, Vol.8, n°4, pp.1904-1916.
- DIAMANTOPOULOU M.J., ANTONOPOULOS V.Z., PAPAMICHAIL D.M. (2005). The use of a neural technique for the prediction of water quality parameters of Axios river in Northern Greece. *EWRA European water*, Vol.11, n°12, pp.55-62.
- FEKHAOUI M. (1990). Recharges hydrobiologiques sur le moyen Sebou soumis aux rejets de la ville de Fès ; suivi d'une macro-pollution et évaluation de son indice sur les composantes physiques, chimiques et biologiques de l'écosystème. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Rabat, Université Mohammed V, 213p.
- KOUASSI A.M., AHOUSSE K.E., KOUAKOU K.E., MAMADOU A., BIEMI J. (2016a). Use of statistical models for the prediction of an indicator parameter of the groundwaters quality: Case study of fissured aquifers groundwaters of Ivory Coast. *Journal of Water Sciences & Environment Technologies*, Vol.1, n°2, pp.67-75.
- KOUASSI A.M., AHOUSSE K.E., KOUAKOU K.E., MAMADOU A., BIEMI J. (2016b). Analyse comparative entre la distribution des fréquences de conductivité électrique et les faciès géochimiques des eaux des aquifères de socle (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Science*, Vol.10, n°1, pp.435-446.
- KOUASSI A.M., AHOUSSE K.E., YAO K.A., OUREGA W., YAO K.B., BIEMI J. (2012a). Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), *Larhyss journal*, n°10, 57-74.
- KOUASSI A.M., YAO K.A., AHOUSSE K.E., SEKI C.L., YAO N.A., KOUASSI K.I., BIEMI J. (2010). Apports des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol.4, n°5, pp.1816-1838.
- KOUASSI A.M., YAO K.A., AKE A.Y., BIEMI J. (2011). Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, n°5, pp.2155-2169. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i5.35>.
- KOUASSI A.M., KADIO K.K.R., AHOUSSE K.E., BIEMI J. (2014a). Stratégie de prospection hydrogéologie par prévision de l'épaisseur de socle à forer. *Larhyss Journal*, n°20, pp.209-224.
- 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, pp.154-170.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KOFFI Y.B., MEITÉ D., BIEMI J. (2017). Application of statistical models for the simulation of groundwater ions major: case

- study of ex-area of N'zi-Comoé (East central of Ivory Coast). Environmental and water sciences, public health & territorial intelligence, Vol.1, n°1, pp.11-26.
- KOUASSI A.M., KOUAKOU K.E., KOUAMÉ K.A., KADIO K.K.R., BIEMI J. (2016c). Prospection hydrogéologique par optimisation de la profondeur limite d'arrêt de forage en milieu de socle ivoirien: performance et robustesse des modèles, *Afrique SCIENCE*, Vol.12, n°1, pp.282-296.
- KOUASSI A.M., MAMADOU A, AHOUSI K.E., BIEMI J. (2014c). Conception de modèles statistiques à variables hydrochimiques pour la prédiction de la conductivité électrique des eaux souterraines. *Larhyss Journal*, n°20, pp.189-207.
- KOUASSI A.M., MAMADOU A., AHOUSI K.E., BIEMI J. (2013a). 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*, n°21&22, pp.138-166.
- KOUASSI A.M., N'GUESSAN B.T.M., KOUAMÉ K.F., KOUAMÉ K.A., OKAINGNI J.C., BIEMI J. (2012b). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans les relations pluie-débit à partir du modèle GR2M: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Cote d'Ivoire), *Comptes Rendus Géoscience*, n°344, pp.288-296.
- KOUASSI A.M., OKAINGNI J.C., KOUAKOU K.E., BIEMI J. (2013b). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristalloyphyllien: cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.2, n° 1, pp.61-71.
- LAFTOUHI N.E., VANCLOOSTER M., JALAL M., WITAM O., ABOUFIRASSI M., BAHIR M., PERSOONS E. (2003). Groundwater nitrate pollution in the Essaouira Basin (Morocco). *Geoscience*, n°335, pp.307-317.
- LASM T., DE LASME O., OGA Y.M.S., YOUAN-TA M., BAKA D., KOUAME K.F., YAO K.T. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Science*, Vol.5, n°2, pp.642-662.
- MANSSOURI T., SAHBI H., MANSSOURI I. (2014). Elaboration of stochastic mathematical models for the prediction of parameters indicative of groundwater quality Case of Souss Massa- Morocco-IJCER, *International Journal of Computational Engineering Research*, Vol.4, n°5, 31-40.
- MANSSOURI T., SAHBI H., MANSSOURI I., BOUDAD B. (2015). Utilisation d'un modèle hybride base sur la RLMS et les RNA-PMC pour la prédiction des paramètres indicateurs de la qualité des eaux souterraines: cas de la nappe de SOUSS-MASSA-MAROC, *European Scientific Journal*, Vol.11, n°18, pp.35-46.
- PERRIN C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 287 p.

- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, n°279, pp.275-289.
- SORO N. (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat ès sciences naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, p. 272.
- YAO D.B. (1998). Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fetekro (Cote d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paleoproterozoïque du craton ouest-africain. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orleans, France, 190p.
- ZERKI N. (2013). Apport de la chimométrie pour l'analyse et l'interprétation de quelques paramètres physico-chimiques influençant la répartition des métaux lourds, des éléments nutritifs et des anions dans les eaux de l'oued de Bouregreg. Thèse de Doctorat, Université Mohamed V AGDAL, faculté des sciences, Rabat, 148p.
- ZERKI N., ACHELHI K., BCHITOU R., BOUHOUSS A. (2015a). Modeling and optimization the conductivity of wastewater discharged into the river Bouregreg (Rabat, Morocco) in function of ions: chlorides, sulphates, nitrates and bicarbonates, *Journal of Industrial Engineering Research*, Vol.1, n°3, pp.35-40.
- ZERKI N., ACHELHI K., BCHITOU R., BOUHOUSS A. (2015b). Correlation study between Nitrate, Nitrite, Chloride and Sulfate in Natural Waters of Bouregreg River (Rabat, Morocco), *Journal of Industrial Engineering Research*, Vol.1, n°4, pp.129-135.
- ZERKI N., BCHITOU R., BOUHOUSS A. (2012a). Modélisation et optimisation de la conductivité des eaux naturelles de l'Oued Bouregreg (Rabat, Maroc) en fonction de quelques anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-). 1^{er} Colloque international REZAS12, Ressources en eau dans les zones arides et semi-arides. Enjeux et perspectives. Cas du continent africain, Béni-Mellal, Maroc (14, 15 et 16 Novembre 2012).
- ZERKI N., BOUHOUSS A., BCHITOU R. (2012b). Modeling and Optimization the Effect of Some Anions on the Water Conductivity. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol.6, n°10, pp.396-402.