

SIMULATION DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES EN RELATION AVEC LEURS PROPRIÉTÉS GÉOLOGIQUES: CAS DE LA CÔTE D'IVOIRE

**Amani Michel KOUASSI^{1*}, Amos MAMADOU²,
Kouassi Ernest AHOUSSE³ et Jean BIEMI³**

*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*

* Correspondance, e-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Ce travail, réalisé dans le contexte géologique ivoirien, porte sur l'apport de l'étude de la conductivité électrique à l'analyse de la fiabilité des données physico-chimiques des eaux souterraines. La méthodologie adoptée est fondée sur la balance ionique basée sur l'analyse des ions majeurs et la simulation de la conductivité électrique par un modèle empirique. La problématique est d'analyser la concordance des différentes approches en termes de fiabilité des données physico-chimiques. Les résultats de la balance ionique au seuil de 10% montrent que seuls les échantillons de Bondoukou et de Guiglo-Duekoué ne sont pas fiables. Les résultats de la simulation de la conductivité électrique ont confirmé la fiabilité des échantillons de Tiébissou-Didiévi, ex-N'zi-Comoé, Agboville et Tiassalé et la non fiabilité de l'échantillon de Guiglo-Duekoué. Cependant, l'échantillon de Bondoukou, déclaré non fiable par la balance ionique, s'est avéré fiable au regard des résultats de la simulation de la conductivité électrique.

Mots-clés : *fiabilité, paramètres physico-chimiques, eaux souterraines, balance ionique, conductivité électrique, simulation.*

ABSTRACT**Contribution of the study of the electrical conductivity to the analysis of the reliability of the physico-chemical data of groundwater: Application to the geological context of Ivory Coast**

This work, done in the ivoirian geological context, focuses on the contribution of the study of the electrical conductivity in the reliability analysis of physico-chemical data of groundwater. The methodology adopted is based on the ionic balance based on the analysis of major ions and simulation of electrical conductivity by an empirical model. The problem is to analyze the consistency of the different approaches in terms of reliability of the physico-chemical data. The results of the ionic balance at the 10% show that only samples of Bondoukou and Guiglo-Duekoué are unreliable. The results of the simulation of the electrical conductivity confirmed the reliability of samples of Tiébissou-Didiévi, Ex-N'zi-Comoé, Agboville and Tiassalé and the unreliability of the Guiglo-Duekoué sample. However, the sample of Bondoukou declared unreliable by the ionic balance, proved reliable in terms of the simulation results of the electrical conductivity.

Keywords : *reliability, physico-chemical, groundwater, ionic balance, electrical conductivity, simulation.*

I - INTRODUCTION

L'eau représente la source de vie, elle est probablement la plus importante de toutes les ressources naturelles. Elle est vitale aussi bien pour tous les organismes vivants, les grands écosystèmes que pour la santé humaine. Les eaux souterraines constituent le deuxième réservoir mondial d'eau douce. Elles sont beaucoup moins vulnérables que les eaux de surface. Les eaux souterraines issues des nappes captives et superficielles sont des ressources en eaux exploitées par l'homme pour divers usages [1]. La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel dépend généralement de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle rencontre lors de son écoulement. Ainsi, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité [2]. La détermination de la qualité des eaux de pompage se fait par l'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les échantillons d'eau prélevés dans les forages. Ainsi, il paraît important d'étudier la fiabilité des données d'analyse physico-chimiques dès lors que les résultats des interprétations en dépendent.

Pour vérifier cette fiabilité, un certain nombre de critères sont utilisés. Il s'agit principalement de l'étude de la balance ionique et de la corrélation entre les conductivités électriques mesurées sur le terrain et celles obtenues par calcul. En effet, la balance ionique, méthode généralement utilisée, rend compte de la fiabilité des analyses physico-chimiques effectuées au laboratoire [3-4] permettant ainsi de déceler d'éventuelles erreurs commises lors du prélèvement ou du dosage des échantillons. La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouve sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissouts ou la minéralisation dans l'eau. C'est un paramètre mesuré *in situ* et qui permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau.

Des contrastes de conductivité électrique permettent de mettre en évidence, des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltrations [5]. La conductivité électrique est l'un des moyens de validation des analyses physico-chimiques de l'eau: la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle calculée à partir de la minéralisation totale. La validation se fait d'une part par comparaison entre les valeurs mesurées sur le terrain et celles obtenues au laboratoire et d'autre part par confrontation des valeurs mesurées à celles simulées par les modèles établis [6]. Dans un tel contexte, certaines questions méritent d'être posées. Quelle est la pertinence de l'analyse de la fiabilité des données physico-chimiques réalisée à partir de la simulation de la conductivité électrique ? Existe-t-il une concordance entre la fiabilité au sens de la balance ionique et la fiabilité au sens de la simulation de la conductivité électrique ? En d'autres termes, un échantillon fiable à partir de l'analyse de la balance ionique le serait-il au regard de la simulation de la conductivité électrique ?

Dans l'optique d'apporter des solutions à cette problématique, l'objectif général assigné à ce travail est d'étudier la fiabilité des données d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines dans le contexte géologique ivoirien. Deux objectifs spécifiques ont été définis:

- i) analyse de la balance ionique des eaux souterraines;
- ii) simulation de la conductivité électrique des eaux souterraines.

L'hypothèse de travail a consisté à supposer qu'il existe une concordance entre la fiabilité au sens de la balance ionique et la fiabilité au sens de la simulation de la conductivité électrique. La méthodologie adoptée pour répondre à ces objectifs est basée d'une part sur l'évaluation des erreurs de la balance ionique ainsi que des critères statistiques de comparaison des éléments majeurs (somme des anions majeurs et somme des cations majeurs)

(coefficient de corrélation, biais et erreur quadratique). D'autre part, une simulation de la conductivité électrique par un modèle empirique a été effectuée avec comme critères d'analyse des résultats, le coefficient de corrélation, le coefficient de Nash-Sutcliffe et le coefficient de Clabour-Moore.

II- PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

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.

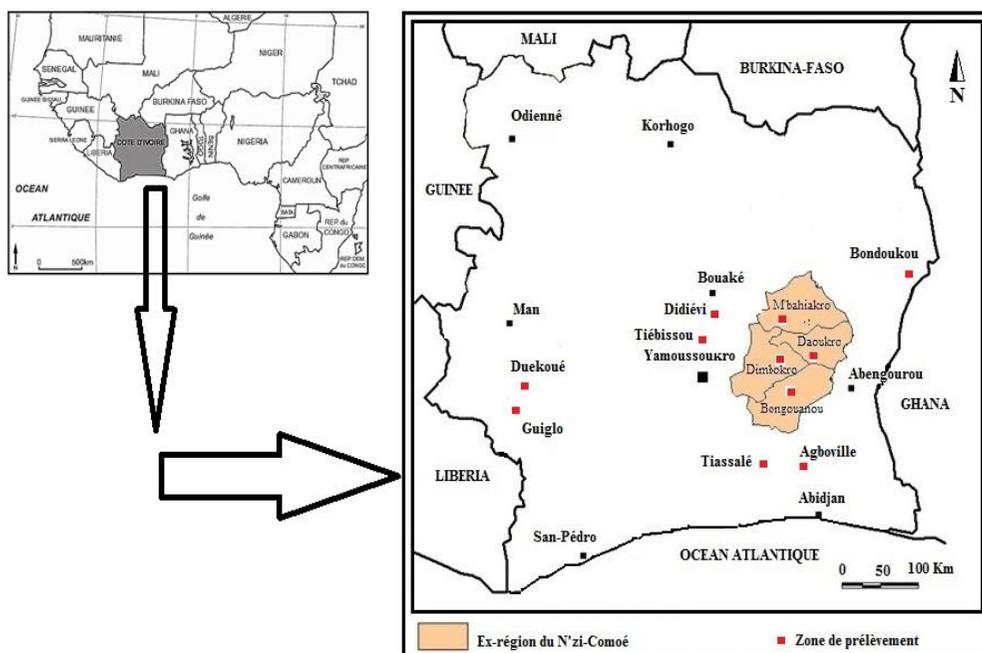


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Deux grandes zones climatiques se côtoient : le climat équatorial et le climat tropical. Le climat subéquatorial dans le Sud est caractérisé par des températures de faibles amplitudes (de 25 à 30 °C), un fort taux d'humidité (de 80 à 90%) et des précipitations abondantes, qui atteignent à Abidjan 1 766 mm et à Tabou 2 129 mm. Ce climat est constitué de deux saisons

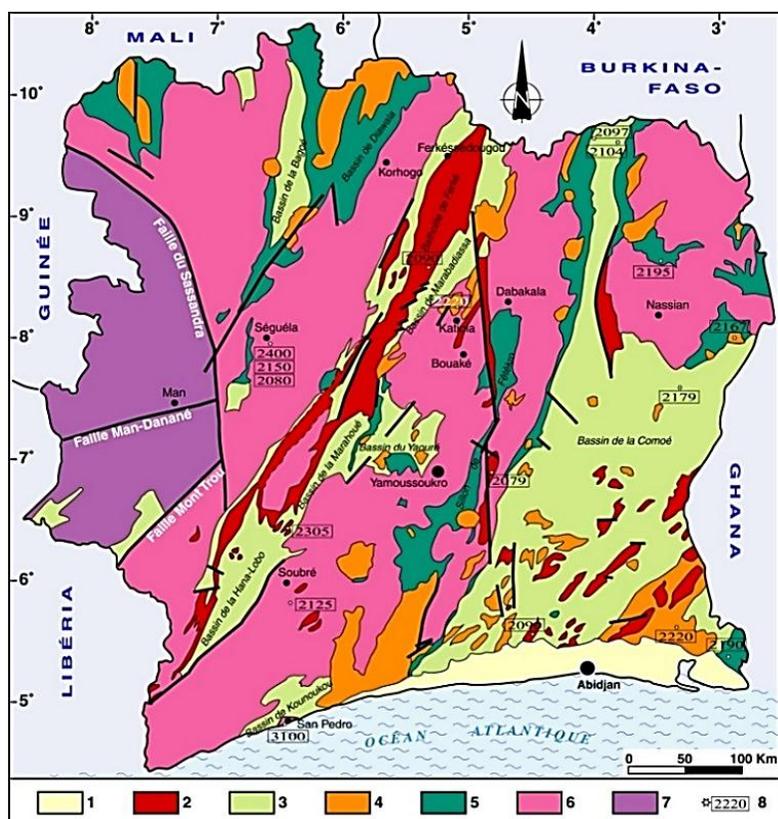
sèches et deux saisons humides. Le climat tropical humide de savane couvre le Nord de la zone forestière du Sud et le Sud de la région des savanes. Les températures, à amplitudes plus importantes, y oscillent entre 14 et 33 °C avec une hygrométrie de 60 à 70% et des précipitations annuelles moyennes de 1 200 mm. Cette région climatique connaît également quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses).

Le climat tropical atténué concerne principalement la partie nord du pays. Les amplitudes thermiques quotidiennes et annuelles y sont relativement importantes, de l'ordre de 20 °C, le taux d'humidité, inférieur à celui du Sud du pays, varie de 40 à 50 %. La zone considérée est caractérisée par la présence intermittente entre les mois de décembre et février d'un vent frais et sec, l'harmattan. On y relève deux saisons: l'une sèche, de novembre à juin, ponctuée par quelques pluies au mois d'avril, et l'autre pluvieuse, couvrant la période de juillet à octobre. 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.

Ce régime se caractérise par deux saisons, une longue saison des pluies qui s'étend sur huit mois (de mars à octobre) et une petite saison sèche qui dure quatre mois (de novembre à février). Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux. Les températures annuelles varient globalement entre 15 et 33°C avec une moyenne de 25°C. Une moyenne de 2 272 heures d'ensoleillement par an est enregistrée. L'humidité relative varie entre 61 et 99% avec une valeur moyenne de 98% à Man. Les vents de direction N-S (harmattan et alizé boréal) sont dominants en saison sèche tandis qu'en saison des pluies, c'est le vent de la mousson de direction NW- SE qui prédomine.

Cette synthèse met l'accent sur la géologie des 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. 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 [7-8]. 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 mobilisation anatectique [8].



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 [9]

Le domaine paléoprotérozoïque est subdivisé en deux grands sous-ensembles (ensemble des granitoïdes et ensemble des 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, 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'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 [10]. 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 stauroidites et les tufs métamorphiques;
- l'unité de Louga-Kounoukou comportant des métagabbros, 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.

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. Ainsi, sur les granitoïdes, ils sont composés, de haut en bas, de cuirasse latéritique, sables argileux et arènes grenues dont l'épaisseur peut atteindre 50 m. Les arènes grenues constituent les niveaux les plus productifs et donc les plus recherchés. Les réservoirs d'altérites des séries volcano-sédimentaires sont en général les plus épais et peuvent atteindre 100 m. Les séries volcano-sédimentaires sont des complexes schiste-gréseux très hétérogènes à nombreux plis isoclinaux, dont les flancs sont généralement redressés. Ces roches se caractérisent par d'importantes schistosités pouvant augmenter la porosité des réservoirs.

Elles peuvent également acquérir des potentialités en eau énormes, quand elles sont affectées par des phénomènes de fracturation. Leur perméabilité est généralement faible et donc les ressources qu'elles renferment sont limitées. Cependant, dans les cas où la roche présente une intercalation détritique ou volcano-détritique jouant le rôle de drain, ces réservoirs peuvent acquérir une importante fonction capacitive en profondeur [11]. Les réservoirs des granito-migmatites sont caractérisés par un nombre élevé des arrivées d'eau dans les forages profonds réalisés directement dans le socle. Ce qui témoigne de la richesse en eau des formations cristallines, non nécessairement altérées [11]. 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 des domaines archéen et paléoproterozoïque, unités géologiques qui intéressent notre étude, constituent le domaine des aquifères fissurés qui se sont formés au cours des divers événements tectoniques qui les ont affecté en y laissant d'importants réseaux de fissures plus ou moins connectés qui sont à l'origine de la formation des nappes souterraines [12-18]. A l'heure actuelle, les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins influençables par les fluctuations saisonnières. Quant aux puits réalisés dans les altérites, ils sont placés sous l'influence directe du rythme des saisons.

III - MATÉRIEL ET MÉTHODES

III-1. Données

L'étude est basée sur six échantillons composés de plusieurs forages d'eau issus de différentes régions géologiques de la Côte d'Ivoire. Les données concernent les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques

réalisées sur ces forages. Le seul paramètre physique utilisé concerne la conductivité électrique. Les paramètres chimiques sélectionnés sont d'une part les cations majeurs (le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium) et d'autre part, les anions majeurs (le bicarbonate, le chlore, le nitrate, le sulfate). La conductivité électrique a été mesurée *in situ*. En ce qui concerne les zones de l'ex-région du N'zi-Comé, Guiglo-Duekoué, Tiébissou-Didiévi, Bondoukou et Tiassalé, les échantillons d'eau ont été analysés au Laboratoire d'Analyse d'Abengourou (LPA) et ceux d'Agboville ont été analysés au Laboratoire National d'Essai de Qualité, de Métrologie et d'Analyse (LANEMA). Les données de cette étude sont issues de plusieurs sources:

- projet « Don Japonais » : ex-région du N'zi-comoé ;
- projet CESPPCC (Comité d'Examen et de Suivi des Projets et Programmes de la filière Café-Cacao) : Guiglo-Duékoué ;
- programmes d'hydraulique villageoise réalisés par le gouvernement ivoirien : Tiébissou-Didiévi ;
- projets de recherche (travaux personnels): Agboville, Tiassalé et Bondoukou.

Les données de conductivité électrique utilisées ont été corrigées de l'effet de la température.

III-2. Méthodes

III-2-1. Analyse de la balance ionique

L'étude de la fiabilité des données a consisté d'une part à une vérification du bilan ionique. Cette vérification a été précédée d'une analyse des ions majeurs intervenant dans l'évaluation du bilan ionique. Sachant qu'une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10% [4], les balances ioniques ont été systématiquement vérifiées pour l'ensemble des échantillons analysés. L'erreur sur la balance ionique (BI) est donnée en pourcentage et calculée par la relation suivante (*équation 1*) :

$$BI(\%) = 100 \times \left| \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \right| \quad (1)$$

- $\sum \text{cations}$: somme des cations majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent ;
- $\sum \text{anions}$: somme des anions majeurs contenus dans l'eau en milliéquivalent ;

– BI : Erreur sur la balance ionique.

La fiabilité de l'analyse des données a été également vérifiée à partir de la régression linéaire simple entre la somme des cations majeurs et la somme des anions majeurs. Des critères quantitatifs ont été utilisés pour comparer le rapprochement entre la somme des cations et la somme des anions au sein des différents échantillons. Il s'agit du coefficient de corrélation, de la racine carrée de l'erreur quadratique et du critère de biais.

Le coefficient de corrélation est utilisé pour estimer la corrélation entre la somme de cations majeurs et celle des anions majeurs. Son équation est la suivante (*équation 2*):

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

- X_i : somme des cations majeurs du point d'eau considéré (méq/L) ;
- Y_i : somme des anions majeurs du point d'eau considéré (méq/L) ;
- \bar{X} : moyenne de la somme des cations majeurs du point d'eau considéré (méq/L) ;
- \bar{Y} : moyenne de la somme des anions majeurs du point d'eau considéré (méq/L).

La corrélation sera jugée meilleure lorsqu'elle est supérieure ou égale à 0,70 (Kouassi *et al.*, 2010). La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error, RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance des analyses effectuées au laboratoire. Ainsi, une bonne analyse est celle qui minimise la différence entre la somme des cations majeurs et celle des anions majeurs. L'analyse est donc bien optimisée si la valeur de « RMSE » est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite balance ionique. Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (*équation 3*) :

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

- X_i : somme des cations majeurs du point d'eau considéré (méq/L) ;
- Y_i : somme des anions majeurs du point d'eau considéré (méq/L).

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 éléments majeurs lors des analyses. En effet, ce critère définit la différence entre la moyenne de la somme des cations majeurs et de celle des anions majeurs. Il est défini par la relation suivante (*équation 4*) :

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

- X_i : somme des cations majeurs du point d'eau considéré (méq/L) ;
- Y_i : somme des anions majeurs du point d'eau considéré (méq/L).

Il désigne la somme des cations et la somme des anions. Il doit être minimisé (l'optimum est la valeur nulle). Lorsque la moyenne biaisée « B » tend vers zéro, les résultats obtenus sont sans biais, c'est-à-dire que les deux valeurs sont proches.

III-2.2. Simulation de la conductivité électrique par un modèle empirique

La fiabilité des résultats des analyses physico-chimiques peut être étudiée à l'aide de l'étude de la corrélation entre les valeurs de la conductivité électrique simulées par des modèles et celles observées sur le terrain [6]. Plusieurs approches ont été définies pour la simulation de la conductivité électrique [6, 19]. Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude semble le plus performant [6]. Ce modèle définit la conductivité électrique (CE) comme une fonction linéaire de la somme des ions majeurs (résidus secs). La formule utilisée à cet effet est définie de la façon suivante [6]:

$$CE = \frac{\text{Résidu sec}(mg / l)}{0,65} \quad (5)$$

Pour apprécier l'adéquation entre les conductivités électriques mesurées sur le terrain et celles simulées à partir du modèle, des critères de performance ont été définis. Ainsi, le coefficient de corrélation, le critère de Nash-Sutcliffe et le critère de Clabour-Moore ont été retenus. En effet, plusieurs auteurs [5, 20-22] ont utilisé ces critères pour rendre compte de la performance des modèles.

Le coefficient de corrélation est utilisé pour estimer la corrélation linéaire entre la conductivité électrique mesurée sur les échantillons d'eau et celle simulée avec le modèle empirique. Son équation est la suivante (*équation 6*):

$$R = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

- X_i : conductivité électrique mesurée ($\mu\text{S/cm}$) ;
- Y_i : conductivité électrique simulée ($\mu\text{S/cm}$) ;
- \bar{X} : conductivité électrique moyenne mesurée ($\mu\text{S/cm}$) ;
- \bar{Y} : conductivité électrique moyenne simulée ($\mu\text{S/cm}$).

La corrélation sera jugée meilleure lorsqu'elle est supérieure ou égale à 0,70 [5].

Le critère d'optimisation de Nash-Sutcliffe est généralement utilisé pour évaluer la performance des modèles [23]. Dans le cas de notre étude, le critère 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 7*):

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right) \quad (7)$$

- X_i : conductivité électrique mesurée ($\mu\text{S/cm}$) ;
- Y_i : conductivité électrique simulée ($\mu\text{S/cm}$) ;
- \bar{X} : 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%. Le critère de Nash-Sutcliffe varie entre $-\infty$

et 100% et L'échelle suivante peut être utilisée pour apprécier la qualité de la simulation [24] :

- 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 $\leq 60\%$, 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. En effet, les performances en terme 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 Clabour-Moore rend compte de l'écart relatif entre les valeurs observées et celles simulées. Ce dernier correspond à la moyenne des écarts relatifs calculés en valeurs absolues sur la grandeur étudiée. Ce critère attribue le même poids à tous les résidus. Il est défini par la formule suivante [25]:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right| \quad (8)$$

- X_i : conductivité électrique mesurée ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ;
- Y_i : conductivité électrique simulée ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Il attribue le même poids à tous les résidus. Lorsque E vaut 0 %, les grandeurs simulées sont égales aux grandeurs observées. Lorsque E=100%, les grandeurs simulées sont deux fois plus fortes que les grandeurs observées.

Outre l'évaluation à l'aide de critères numériques, une analyse comparative des conductivités électriques observées aux conductivités électriques simulées ont été réalisées. Le tracé des diagrammes de dispersion des conductivités électriques simulées en fonction des conductivités électriques observées a aussi permis d'apprécier la qualité des simulations effectuées.

IV - RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

IV-1. Résultats de l'analyse de la balance ionique

Les résultats de calcul des valeurs de l'erreur de la balance ionique des différents échantillons sont consignés dans le **Tableau 1**. La balance ionique globale des différentes zones tests oscillent entre 0,32% (Tiébissou-Didiévi) et 22,13% (Guiglo-Duekoué). Les zones tests présentant des balances ioniques globales satisfaisantes donc inférieures à 10% sont Tiébissou-Didiévi, Ex-N'zi-Comoé, Agboville et Tiassalé. Les échantillons de Bondoukou et de Guiglo-Duekoué indiquent des valeurs de balance ionique globale non équilibrées donc excédant 10%. L'analyse des taux de points d'eau vérifiant la balance ionique pour un échantillon donné a montré que seules les données des zones tests de Tiébissou-Didiévi (96,39%) et de l'ex-N'zi-Comoé (54,4%) présentent des valeurs supérieures à 50%. Ces deux échantillons sont suivis respectivement de Tiassalé (39%) et d'Agboville (35%). Les données d'aucun forage de Guiglo-Duekoué ne vérifie la balance ionique au seuil de 10%.

Tableau 1 : Résultats de la balance ionique au seuil de 10% des échantillons utilisés.

	Balance ionique globale (%)	Taux de balances ioniques fiables	
		Effectif	Pourcentage
Tiébissou-Didiévi	0,32	51	96,39
Ex-N'zi-Comoé	2,03	64	54,40
Agboville	2,27	5	35,17
Tiassalé	9,93	13	39,00
Bondoukou	16,45	3	17,02
Guiglo-Duekoué	22,13	0	0,00

Le **Tableau 2** montre les valeurs des critères de comparaison des ions majeurs des différents échantillons. Les valeurs des coefficients de corrélation oscillent entre 0,77 (Bondoukou) et 0,98 (Tiébissou-Didiévi). Ces résultats montrent que la somme des cations majeurs et la somme des anions sont fortement voire très fortement corrélées. Les valeurs de biais obtenues varient de 0,08 (Tiébissou-Didiévi) à 1,63 (Tiassalé). Les zones tests de Tiébissou-Didiévi, ex-région du N'zi-Comoé, Guiglo-Duekoué et Agboville présentent des valeurs de biais inférieures à l'unité tandis que les régions de Tiassalé et de Bondoukou affichent des valeurs supérieures à 1. Les zones tests telles que Tiébissou-Didiévi, ex-région du N'zi-Comoé et Agboville,

présentent des valeurs de RMSE inférieures à 1 (de 0,35 à 0,91). Les trois autres zones tests ont des valeurs supérieures à 1 (de 1,16 à 2,48). Un classement par ordre croissant des valeurs de biais et de RMSE montre que les zones tests occupent les mêmes rangs quel que soit le critère. En d'autres termes, les meilleures valeurs de biais correspondent aux meilleures valeurs de RMSE.

De façon générale, les meilleures valeurs de coefficient de corrélation correspondent aux meilleures valeurs de biais et de RMSE. Aussi, les valeurs les moins satisfaisantes de coefficient de corrélation correspondent-elles aux mauvaises valeurs de biais et de RMSE. Cependant, certains échantillons tels que ceux d'Agboville et de Tiassalé ne respectent pas cette tendance. En effet, l'échantillon de Tiassalé qui a un coefficient de corrélation de 0,88 possède des valeurs de biais (1,63) et de RMSE (2,48) supérieures à 1 et fait partie des résultats les moins satisfaisants. En inverse, la zone test d'Agboville qui a de meilleurs résultats en termes de biais (0,48) et de RMSE (0,75) a un coefficient de corrélation relativement faible (0,85).

Tableau 2 : Résultats de comparaison entre anions majeurs et cations majeurs.

	Coefficient de corrélation	Biais	RMSE
Tiébissou-Didiévi	0,98	0,08	0,35
Ex-N'zi-Comoé	0,87	0,68	0,91
Agboville	0,85	0,46	0,75
Tiassalé	0,88	1,63	2,48
Bondoukou	0,77	1,02	1,56
Guiglo-Duekoué	0,87	0,9	1,16

Des courbes représentatives des corrélations des sommes des concentrations des anions majeurs en fonction de celles des cations majeurs ont été réalisées. Trois cas de figures se présentent. Le premier cas de figure met en évidence une répartition très satisfaisante autour de la première bissectrice. C'est le cas de la zone test de Tiébissou-Didiévi (**Figure 3**). Ces résultats confirment bien ceux obtenus suite à l'analyse des critères de comparaison et de l'erreur de la balance ionique.

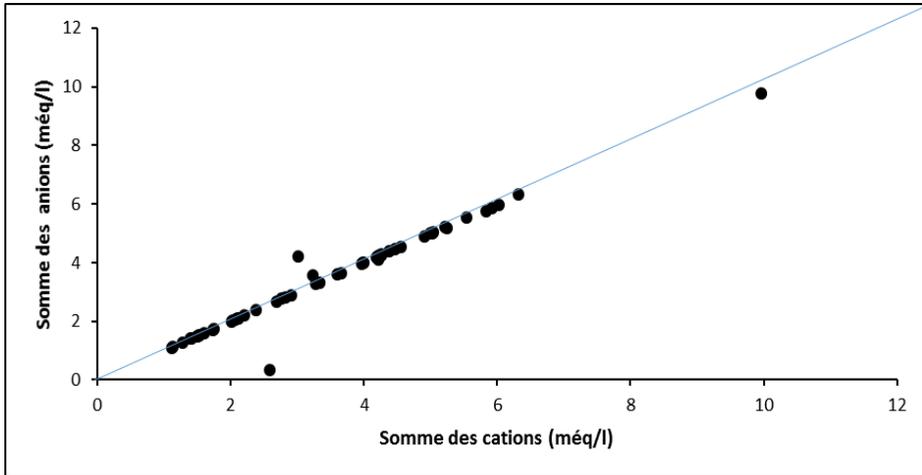


Figure 3 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de Tiébissou-Didiévi.*

Le deuxième cas de figure présente un regroupement satisfaisant des points autour de la première bissectrice. Il s'agit des données d'Agboville, de l'ex-région N'zi-Comoé et de Tiassalé (*Figures 4, 5 et 6*). Ces courbes présentent une agglomération des points autour de la première bissectrice pour des faibles valeurs des éléments majeurs. Lorsque les valeurs de la somme des cations majeurs et celles des anions majeurs augmentent, les points ont tendance à s'éloigner de cette droite. Ce qui explique les fortes valeurs de corrélation obtenues pour ces différentes séries.

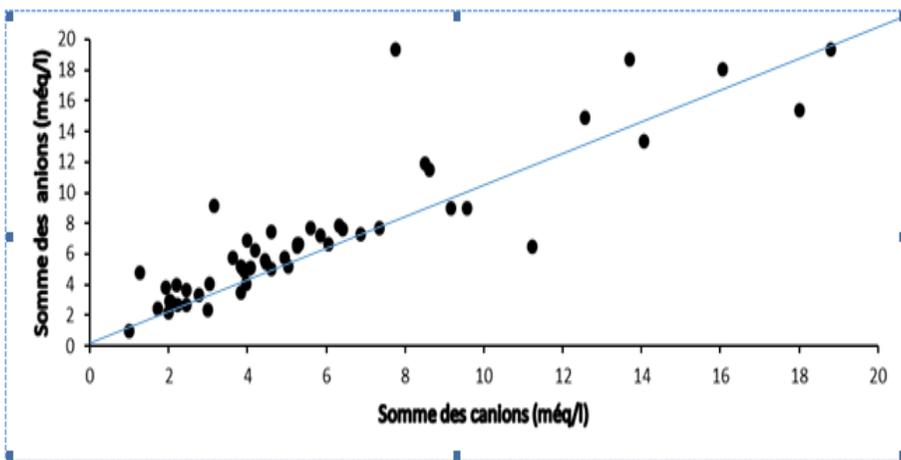


Figure 4 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de la zone d'Agboville.*

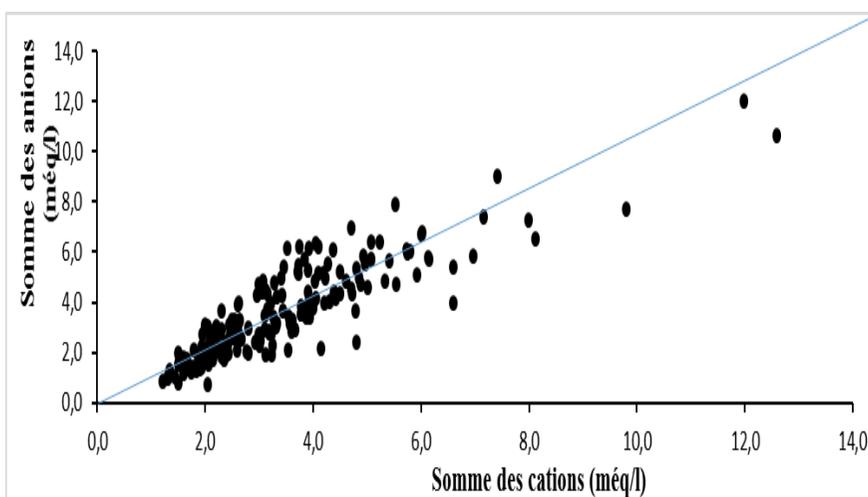


Figure 5 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de l'ex-région du N'zi-Comoé.*

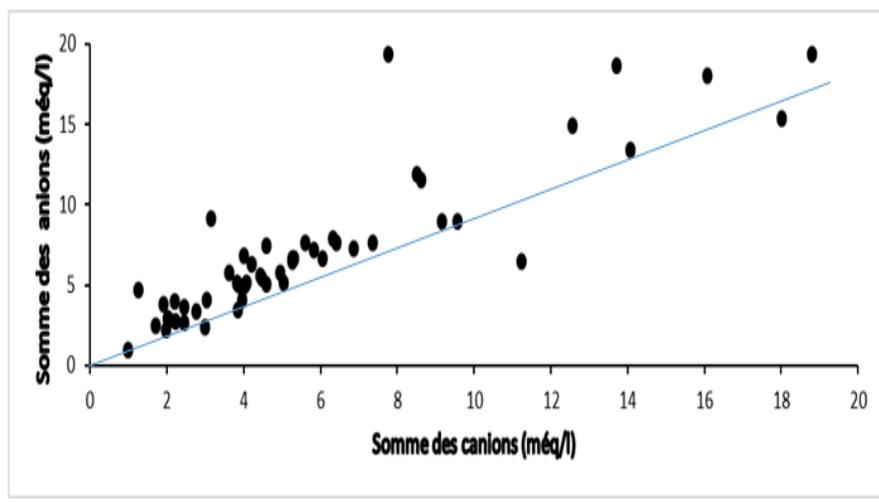


Figure 6 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de la zone de Tiassalé.*

Le troisième cas de figure concerne les données des zones de Bondoukou et de Guiglo-Duekoué qui présentent une répartition hétérogène des points (*Figures 7 et 8*). En effet, les zones de Bondoukou et de Guiglo-Duekoué donnent des points décalés vers la partie supérieure de la première bissectrice. Bien que ces points présentent une agglomération acceptable, ils ne sont pas répartis le long de la première bissectrice. Le fait que ces points

soient localisés au-dessus de la première bissectrice implique que les valeurs des anions majeurs sont plus élevées dans cette série que celles des cations majeurs.

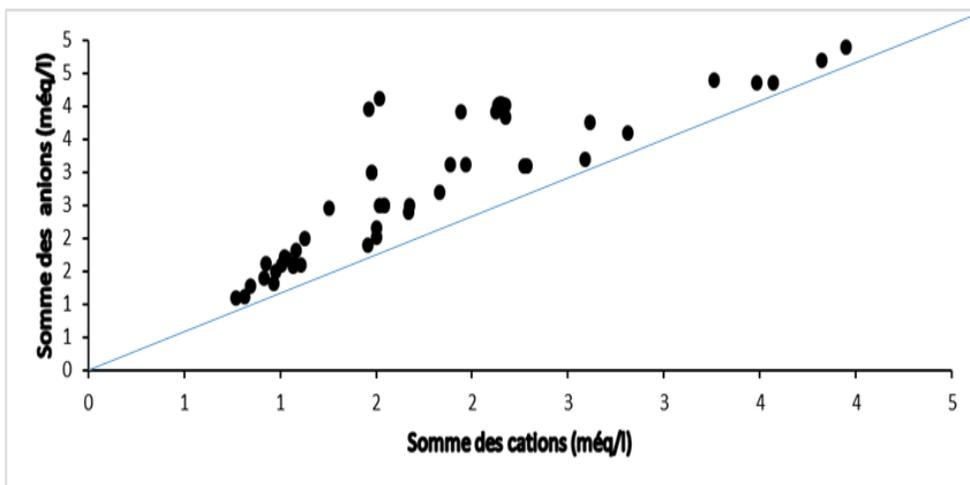


Figure 7 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de la zone de Guiglo-Duekoué.*

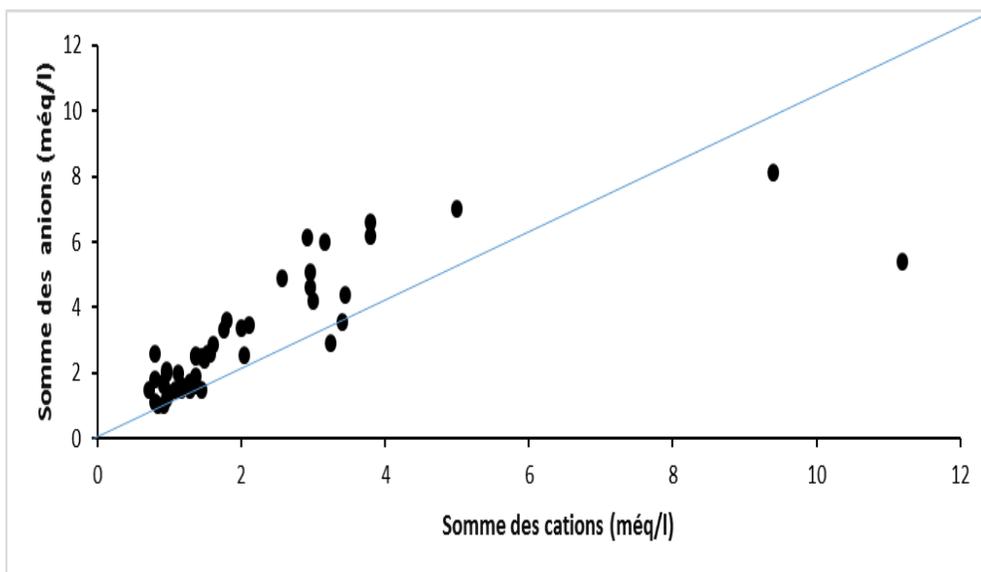


Figure 8 : *Corrélation entre cations majeurs et anions majeurs de la zone de Bondoukou.*

IV-2. Résultats de la simulation de la conductivité électrique

Les résultats de l'application du modèle empirique aux différentes zones tests sont consignés dans le *Tableau 3*. En effet, de très fortes valeurs du coefficient de corrélation allant de 0,89 (Guiglo-Duekoué) à 0,98 (Bondoukou) sont observées. Ces fortes valeurs du coefficient de corrélation observées (supérieures à 0,70) renseignent sur une bonne corrélation entre les conductivités électriques simulées et celles observées. Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe oscillent entre -107,57 et 95,87%. La valeur négative du critère de Nash-Sutcliffe (-107,57%) obtenue pour la zone test de Guiglo-Duekoué implique que le modèle ne simule pas bien les conductivités électriques de cette zone.

Cependant, les autres régions présentent de très bonnes valeurs du critère de Nash-Sutcliffe (supérieures à 60%) traduisant une simulation très satisfaisante de la conductivité électrique dans ces zones. Les valeurs du critère de Clabour-Moore varient de 0,09 (9%) à 0,62 (62%). Les valeurs sont bonnes dans l'ensemble sauf dans les zones d'Agboville (62%) et Guiglo-Duekoué (33%). La zone test de Guiglo-Duekoué qui a enregistré la plus mauvaise valeur du critère de Nash-Sutcliffe a également la plus faible au niveau du coefficient de corrélation et possède une valeur relativement élevée du critère de Clabour-Moore. La zone test d'Agboville qui a obtenu un résultat pas significatif au regard du critère de Clabour-Moore (62%) a un coefficient de corrélation très fort (0,90). Les valeurs de ces différents critères sont satisfaisantes dans l'ensemble hormis quelques zones présentant des valeurs moins satisfaisantes. Ces résultats montrent que le modèle appliqué est performant. Ainsi, si la conductivité électrique des eaux traduit la minéralisation totale, cela signifie que le modèle prend bien en compte l'essentiel de la minéralisation des eaux.

Tableau 3 : Résultats des critères de performance du modèle empirique.

	Coefficient de corrélation	Nash-Sutcliffe	Clabour-Moore
Tiébissou-Didiévi	0,92	68,96	0,29
Ex-N'zi-Comoé	0,94	87,95	0,15
Agboville	0,90	73,83	0,62
Tiassalé	0,93	83,88	0,27
Bondoukou	0,98	95,87	0,2
Guiglo-Duekoué	0,89	-107,57	0,33

Les représentations graphiques des résultats des zones étudiées ont été réalisées pour mettre en évidence la qualité des valeurs de la conductivité électrique simulée (*Figures 9 à 14*). Ces courbes traduisent la corrélation entre les valeurs des conductivités électriques mesurées et celles simulées par le modèle empirique. Les graphes des valeurs des conductivités électriques simulées et celles mesurées des zones tests de l'ex-région du N'zi-Comoé, de Bondoukou et de Tiassalé (*Figures 9, 10 et 11*) présentent des points regroupés autour de la première bissectrice ($y=x$). Ce qui traduit une bonne corrélation entre les valeurs simulées et celles mesurées. Cependant, lorsque les valeurs des conductivités électriques augmentent, les points ont tendance à s'éloigner de cette droite. Cela est traduit par la divergence des courbes de tendance et la première bissectrice qui au départ étaient presque confondues.

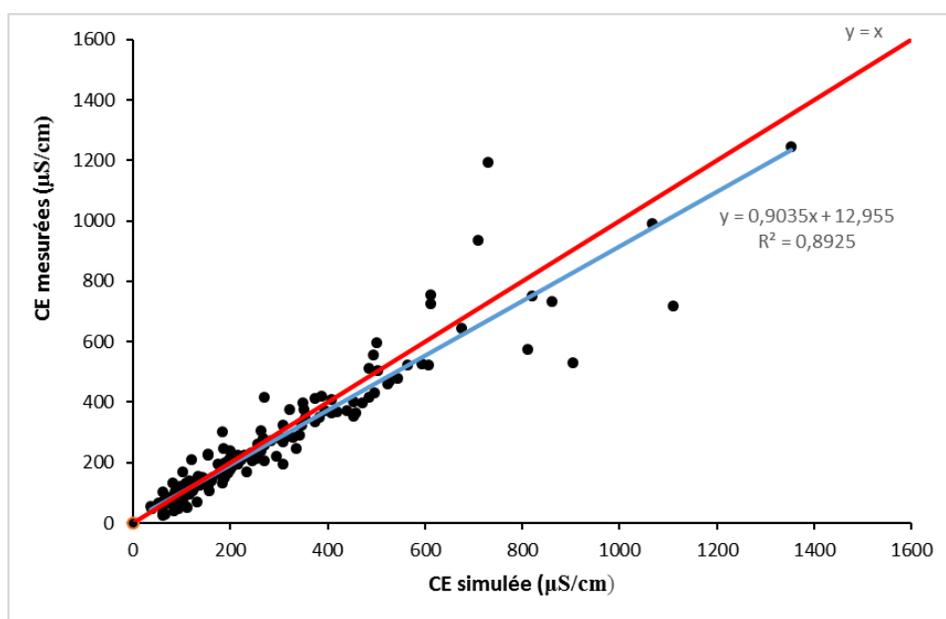


Figure 9 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans l'ex-région du N'zi-Comoé.

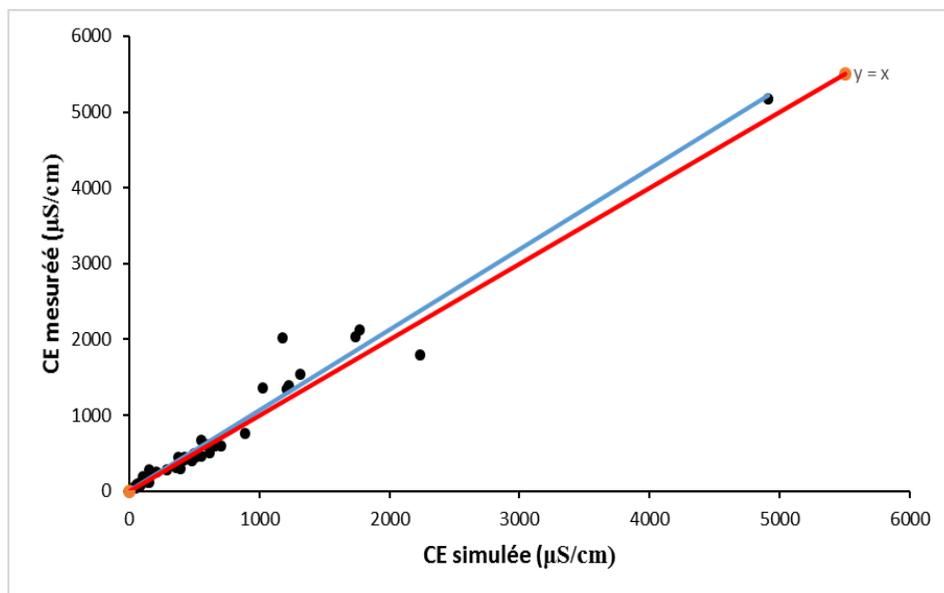


Figure 10 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans la zone de Bondoukou.

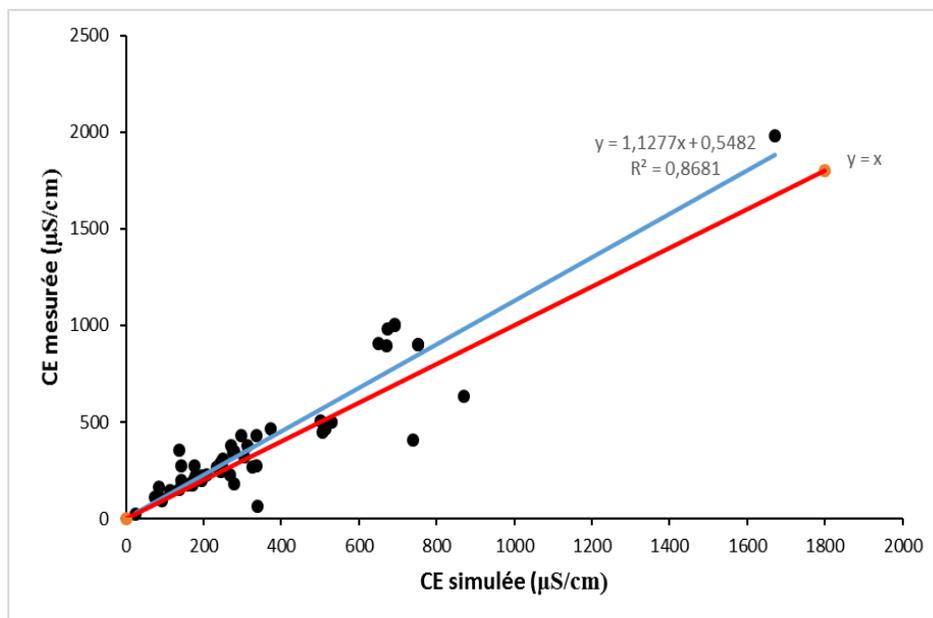


Figure 11 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans la zone de Tiassalé.

Les *Figures 12, 13 et 14* montrent l'évolution des conductivités électriques simulées et celles mesurées dans les zones d'Agboville, de Guiglo-Duekoué

et de Tiébissou-Didiévi. La zone d'Agboville présente une agglomération des points pour des faibles valeurs de conductivité électrique (inférieures à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mais ces points sont plus situés au-dessus de la première bissectrice (**Figure 12**). Les graphes des zones de Guiglo-Duekoué et Tiébissou-Didiévi présentent des points décalés en dessous de la première bissectrice (**Figure 13 et 14**). Les courbes de tendance obtenues pour ces valeurs sont plus situées en dessous de la première bissectrice. Cela est plus poussé pour les résultats de Guiglo-Duekoué que celles de Tiébissou-Didiévi. Ce qui traduit une mauvaise simulation des valeurs de conductivité électrique de ces zones par le modèle utilisé. Les résultats obtenus avec les représentations graphiques confirment bien ceux obtenus avec les critères de performance. Ainsi, ces trois dernières zones tests ont présenté chacune au moins une faiblesse au regard des différents critères de performance.

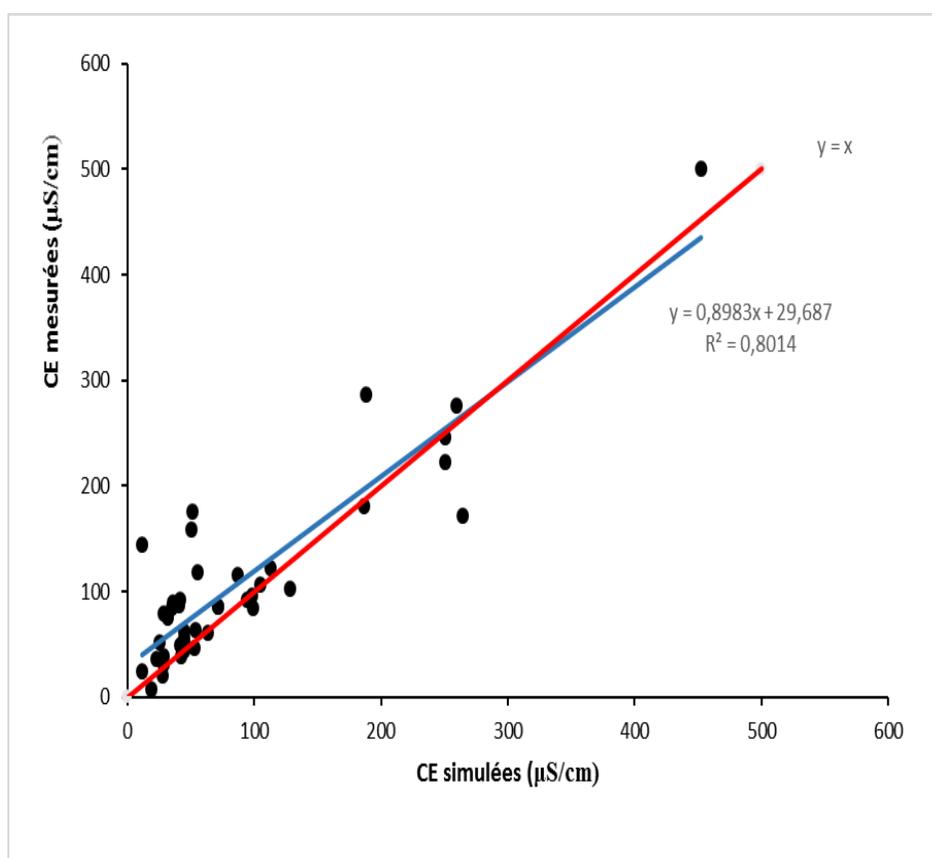


Figure 12 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans la zone d'Agboville.

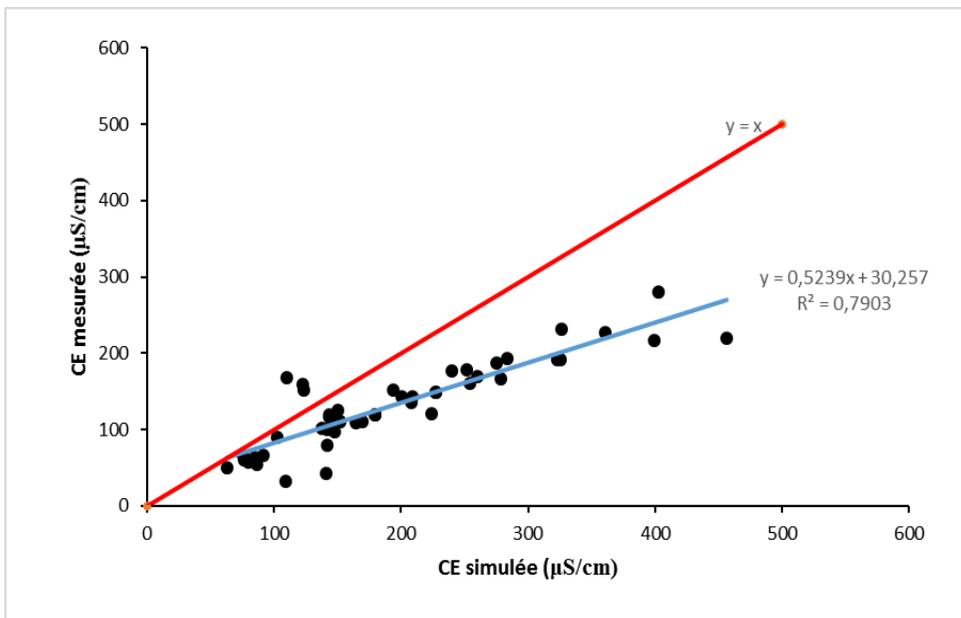


Figure 13 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans la zone de Guiglo-Duekoué.

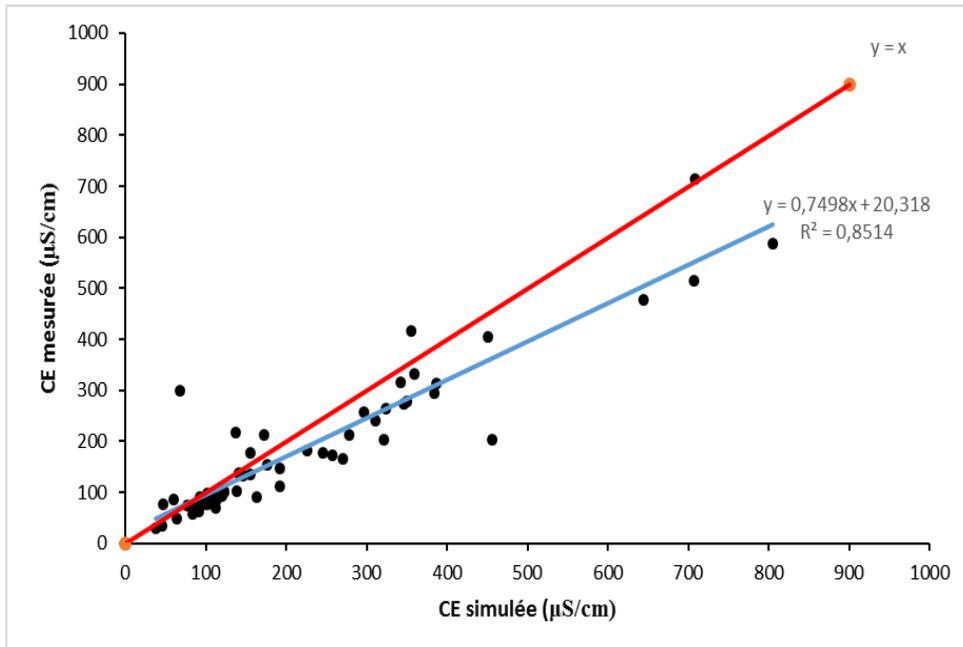


Figure 14 : Conductivités électriques mesurées et simulées dans la zone de Tiébissou-Didiévi.

V - DISCUSSION

L'analyse de la balance ionique a été réalisée. Les zones tests n'ont pas toutes présenté une balance ionique équilibrée. En outre, les résultats sont beaucoup moins satisfaisants dans l'ensemble en considérant les taux de balances ioniques équilibrées par forage et par échantillon. Ces défaillances sont les résultats des erreurs commises lors de l'analyse des données. Deux causes peuvent dans ce cas être invoquées : les méthodes analytiques utilisées sont peu précises ou bien un ou plusieurs éléments en solution n'ont pas été dosés. Dans notre cas, l'analyse des données a montré la présence de tous les éléments majeurs au niveau des différents échantillons. Par conséquent, les causes pourraient provenir du manque de précision dans les méthodes d'analyse utilisées. En comparant les résultats d'analyse de l'erreur sur la balance ionique et les résultats des critères d'analyse des éléments majeurs, on constate que les échantillons à balance équilibrée présentent de meilleures valeurs des critères de comparaison. Ces résultats montrent que l'étude de la balance ionique donc la fiabilité des données physico-chimiques des eaux souterraines peut être valablement être réalisée à partir de critères statistiques tels que le coefficient de corrélation, le biais sur la moyenne et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

L'application du modèle empirique à partir des différents échantillons a fourni des résultats satisfaisants dans l'ensemble avec de forts coefficients de corrélation compris entre 0,89 et 0,94, de fortes valeurs de Nash-Sutcliffe généralement comprises entre 68,96 et 95,87%, et des valeurs relativement faibles de Clabour-Moore généralement comprises entre 15 et 30%. Le modèle a simulé des conductivités électriques qui se rapprochent de celles observées. Il est donc performant. Cependant, au regard du critère de Nash-Sutcliffe, l'échantillon de Guiglo-Duekoué a été mal simulé avec une valeur négative de Nash-Sutcliffe (-107,57%). Cet échantillon présente également la plus faible valeur de corrélation et une forte valeur de Clabour-Moore (33%). L'échantillon d'Agboville a enregistré une forte valeur de Clabour-Moore. Mais contrairement à l'échantillon de Guiglo-Duekoué, il a obtenu de fortes valeurs en termes de coefficient de corrélation (90%) et de Nash-Sutcliffe (73,83%). Si les conductivités électriques observées traduisent la minéralisation des eaux et que les conductivités simulées correspondent à celles-ci, alors il en ressort que le modèle a pris en compte l'essentiel de la minéralisation des eaux de ces différents échantillons. Les résultats obtenus à partir de la modélisation montrent que les différents échantillons étudiés sont fiables sauf celui de Guiglo-Duekoué.

Une comparaison des résultats de la balance ionique et ceux de la simulation de la conductivité électrique a été effectuée. Cette analyse comparative montre que les résultats concordent dans l'essentiel des cas. Les échantillons de Tiébissou, Ex-N'zi-Comoé, Agboville et Tiassalé considérés comme fiables au regard de la balance ionique sont été également fiables au regard des résultats de la modélisation. L'échantillon de Guiglo-Duekoué, jugé non équilibré donc non fiable par la procédure de la balance ionique et également qualifié de non fiable par les résultats de la modélisation. Cependant, l'échantillon de Bondoukou, déclaré non fiable par l'analyse de la balance ionique, s'est avéré fiable au regard des résultats simulation de la conductivité électrique. Ce résultat présente le seul cas de discordance majeure entre la balance ionique et la simulation de la conductivité électrique.

VI - CONCLUSION

Le calcul de l'erreur globale sur la balance ionique au seuil de 10% a donné des valeurs oscillant entre 0,32% et 28,56%. Au regard de la balance ionique globale, 66,67% des zones étudiées (Tiébissou-Didiévi, Ex-N'zi-Comoé, Agboville et Tiassalé) ont montré une balance ionique équilibrée tandis que les autres zones (Bondoukou et Guiglo-Diékoué) affichent des résultats non satisfaisants. Ces résultats ont montré une conformité avec ceux obtenus par la comparaison des éléments majeurs au moyen des critères statistiques tels que le coefficient de corrélation (0,90-0,98), le biais (0,08-1,63) et la RMSE (0,35-2,48). Les résultats d'application du modèle empirique ont donné des résultats généralement satisfaisants. En effet, les valeurs du coefficient de corrélation fluctuent entre 0,89 et 0,98. Quant aux valeurs du critère de Nash-Sutcliffe, elles oscillent entre 68,96 et 95,87%, sauf Guiglo-Duekoué qui a enregistré une valeur négative (-107,57). Le critère de Clabour-Moore prend des valeurs allant de 0,15 à 0,62. Le modèle a donc démontré sa capacité à simuler la conductivité électrique des eaux souterraines des aquifères de socle. Il est donc jugé performant dans la simulation de la conductivité électrique. Une comparaison des résultats de la balance ionique et ceux de la simulation de la conductivité électrique montre que les résultats sont concordants dans la majorité des cas. Les échantillons de Tiébissou, Ex-N'zi-Comoé, Agboville et Tiassalé sont fiables au regard de la balance ionique et de la modélisation de la conductivité électrique. L'échantillon de Guiglo-Duekoué est jugé non fiable par les deux approches. Cependant, l'échantillon de Bondoukou, déclaré non fiable par l'analyse de la balance ionique, s'est avéré fiable au regard des résultats simulation de la conductivité électrique. Ce résultat présente le seul cas de discordance majeure entre la balance

ionique et la simulation de la conductivité électrique. Malgré cette controverse, on peut affirmer qu'à l'instar de la balance ionique, la simulation de la conductivité électrique est un moyen de vérification de la fiabilité des résultats d'analyse physico-chimique des eaux souterraines. Cependant, dans l'optique d'améliorer les résultats de la modélisation, une question se pose: utiliser des modèles dont les paramètres d'entrée seront constitués de la somme des cations majeurs et de la somme des anions majeurs, paramètres servant à l'analyse de la balance ionique, ne pourrait-il pas contribuer à améliorer la capacité des modèles à analyser la fiabilité des données physico-chimiques ?

RÉFÉRENCES

- [1] - K.E. AHOUSSE, N. SORO, A.M. KOUASSI, G. SORO, B.Y. KOFFI, S.P. ZADE, « Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 4, N°5, (2010), 1753-1765.
- [2] - P. JAIN, J.D. SHARMA, D. SOHU, P. SHARMA, "Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District". *International Journal of Environmental Science and Technologies*, Vol. 2, N°4, 2005, 373-379.
- [3] - E.H. AHMAD, «L'aquifère carbonaté karstique de Chekka (Liban) et ses exutoires sous-marins. Caractéristiques hydrogéologiques et fonctionnement ». Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II de l'Université Saint Joseph, (2008), 261p.
- [4] - G.A. HOUMED, "Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimental et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (corne de l'Afrique) ». Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, (2009), 220 p.
- [5] - A.M. KOUASSI, K.A. YAO, K.E. AHOUSSE, L.C. SEKI, A. YAO, K.I. KOUASSI, J. BIEMI, « Apport 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, (2010), 1816-1838.
- [6] - A.M. KOUASSI, K.A. YAO, A.Y. AKÉ, J. BIEMI, « 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, (2011), 2155-2169.

- [7] - J. CAMIL, « Pétrographie, chronologie des ensembles archéens et formations associées de la région de Man (Côte-d'Ivoire): implications pour l'histoire géologique du craton ouest-africain ». Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, (1984), 306 p.
- [8] - 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 de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université Rennes I, Mémoires, Géosciences Rennes, n° 73, (1996), 289 p.
- [9] - B. TAGINI, « Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale ». Thèse de Doctorat, Université, Lausanne, SODEMI, Abidjan, Côte d'Ivoire, N°5, (1971), 302 p.
- [10] - T. LASM, « Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques 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, 272 p.
- [11] - J. BIEMI, « Contribution de l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) ». Thèse de Doctorat d'Etat Sciences Naturelles. Université d'Abidjan, (1992), 424 p.
- [12] - T. LASM, K.F.KOUAME, N. SORO, J.P.R. JOURDA, et J. BIEMI, « Analyse géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie spatiale aéroportée et satellitaire. Application à la région de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) », *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°5, (2004), 135-154.
- [13] - J.P.R. JOURDA, M.B. SALEY, E.V. DJAGOUA, K.J. KOUAME, J. BIEMI et M. RAZACK, « Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation », *Télédétection*, Vol.5, N°4, (2006), 339-357.
- [14] - T. LASM, M. YOUAN-TA, J.P.R. JOURDA, et K.F. KOUAMÉ, « Fracture Networks Analysis in Crystalline Basement: Case of Bondoukou Area (Northeast Côte d'Ivoire) », *European Journal of Scientific Research*, Vol.21, N°1, (2008), 196-208.

- [15] - M. YOUANTA, T. LASM, J.P. JOURDA, K.F. KOUAME, et M. RAZACK, «Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) », *Téledétection*, Vol.8, N°2, (2008), 119-135.
- [16] - M. KOITA, H. JOURDE, D. RUELLAND, K. KOFFI, S. PISTRE et 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). *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.55, N°5, pp. 805-820, 2010.
- [17] - Y.A. N'GO, T. LASM, M. KOITA et 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) », *Téledétection*, Vol. 9, N°1, (2010), 33-42.
- [18] - V.M. SOROKOBY, M.B. SALEY, K.F. KOUAME, M.E.V. DJAGOUA, M. BERNIER, K. AFFIAN et 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 », *Téledétection*, Vol. 9, N°3-4, (2010), 209-223.
- [19] - F. LALBAT, «Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France) ». Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, (2006), 234p.
- [20] - M. BELANGER, N. EL-JABI, D. CAISSIE, F. ASHKAR, J.M. RIBI, « Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple ». *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 18, N°3, (2005), 403-421.
- [21] - M. FILION, «Modélisation de la qualité de l'eau et prévision des débits par la méthode des réseaux de neurones ». Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Se.), (2007), 109 p.
- [22] - A.M. KOUASSI, B.T.M. N'GUESSAN, K.F. KOUAME, K.A. KOUAME, J.C. OKAINGNI, J. BIEMI, « Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans les relations pluie-débit à partir du modèle GR2M : cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire) ». *Comptes Rendus Géoscience*, Vol. 344, N°5, (2012), 288-296.

- [23] - A.M. KOUASSI, K.F. KOUAME, B.T.A. GOULA, T. LASM, J.E. PATUREL et J. BIEMI, « Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie-débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol. 11, (2008), 207-229.
- [24] - Y.B. KOFFI, P.A. AYRAL, A.M. KOUASSI, T. LASM, K.E. AHOUSI et J. BIEMI, «Modélisation des débits des rivières sous climat tropical humide par les réseaux de neurones formels : application de deux variantes de perceptrons multicouches sur le Bandama Blanc de Côte d'Ivoire ». *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, Vol. 11, (2011), 1377-1391.
- [25] - B. HINGRAY, C. PICOUET, A. MUSY, « Hydrologie: une science pour l'ingénieur ». Edition Presse Polytechniques et Universitaires, Romandes, 2^{ème} édition, (2012), 600 p.