

Processus de minéralisation des eaux souterraines et transfert de flux en milieu de socle fissuré: cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Mali)

[Groundwaters mineralization process and transfer of flow within fissured aquifers: Case of transboundary basin of Comoé (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Mali)]

Ismaila OUATTARA, Bamory KAMAGATÉ, Amidou DAO, Dabissi NOUFÉ, and Issiaka SAVANÉ

Laboratoire GéoSciences et Environnement (LGE), UFR Sciences et Gestion de l'Environnement (SGE),
Université Nangui Abrogoua (UNA), 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study is a preliminary reflection on monitoring of waters physicochemical quality and contaminants transfer within fissured aquifers of Comoé Basin (Côte d'Ivoire). It aims to understand the mechanisms of water flow transfer and the hydrogeochemical processes controlling waters mineralization. Statistical and geochemical methods have been applied on physicochemical data obtained during two sampling campaigns (dry and wet season). Statistic method by means of SOM(s) (Self Organizing Maps) enabled waters classifying. As regards Piper's diagram and the saturation index (obtained with PHREEQC model) were applied to include chemical specificities of classes and water renewal processes. The water flow transfers appear guided by a hydraulic continuity either within each aquifer (internal continuity) or between these aquifers themselves. These transfers are also characterized by a strong relationship between groundwater and rivers with possibility of aquifers refill via the rivers. The origins of dissolved elements are mainly due to natural processes (interaction between bedrock and water, dissolution/precipitation, ion exchanges). However, secondary processes such as anthropic pollution by the agricultural and/or domestic effluents would influence waters mineralization. This study will be used as reference to a more detailed study on monitoring of waters quality and the transfer of contaminants within comoe river catchment.

KEYWORDS: mineralization, SOM model, groundwater-river relation, fissured aquifers, Comoé Basin.

RESUME: Cette étude s'inscrit dans un cadre plus global de surveillance de la qualité physicochimique des eaux et des flux de contaminants en milieu fissuré dans le bassin de la Comoé (Côte d'Ivoire). L'objectif est de comprendre les principaux mécanismes de transfert de flux d'eau et les processus hydrogéochimiques qui gouvernent la minéralisation des réservoirs hydriques. Une approche couplée statistique-géochimie a été adoptée sur des données d'analyses physicochimiques acquises à l'issue de deux campagnes d'échantillonnages (saison sèche et humide). La statistique au moyen des SOM (*cartes auto-organisatrices*) a permis de classer les eaux en fonction de leur similarité physico-chimique. Le diagramme de piper et les indices de saturation à travers le modèle PHREEQC ont permis de comprendre les spécificités chimiques au sein des classes d'eaux et les processus de renouvellement des eaux qui y règnent. Les transferts de flux apparaissent être guidés par une continuité hydraulique à la fois interne aux aquifères d'altérites et de socle fissuré et entre ces aquifères eux-mêmes. Ces transferts se caractérisent également par une forte interaction nappe-rivière avec possibilité de recharge des nappes via les cours d'eau. La minéralisation des eaux du bassin versant de la Comoé est à la fois régie par des processus naturels (interaction eau-roche et mise en solution de produits d'altération, dissolution/précipitation et échange de bases) et des activités anthropiques essentiellement d'origine domestique et agricole. Dans une perspective plus large, cette étude servira de base de référence à une étude plus détaillée de surveillance et de suivi de la qualité des eaux et des flux de contaminants dans le bassin de la Comoé.

MOTS-CLEFS: minéralisation, modèle SOM, relation nappe-rivière, aquifères fissurés, Bassin Comoé.

1 INTRODUCTION

Le bassin versant de la Comoé est d'un intérêt stratégique sous régional du fait de son caractère transfrontalier. Les ressources naturelles en eau de ce bassin sont en effet partagées entre la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Ghana et le Mali. Il présente également un intérêt scientifique du fait d'un fonctionnement hydro-géo-logique différencié et complexe, partant des zones de socle cristallin et cristallophyllien du bouclier canadien dans la moitié Nord (roches silicatées recouvertes de dépôts superficiels discontinus et fortement hétérogènes d'altérites[1]) aux recouvrements sédimentaires côtiers de l'Atlantique au Sud (sables et roches carbonatées [2], [3], [4], [5]), en passant par les roches clastiques et métamorphiques sédimentaires au Centre [1], [6]. Cet intérêt scientifique est renforcé par un gradient bioclimatique continental et un important contraste de sensibilité à l'occupation du sol ; ceci en liaison avec un régime de mousson à climat semi-aride et savanes herbeuses au Nord et guinéen humide à forêt dense au Sud [7], [8], [9].

Par ailleurs, le bassin de la Comoé se caractérise par une importante mutation socio-économique aux impacts grandissants sur l'environnement et les ressources naturelles (déforestation, destruction des sols, dégradation de la qualité des eaux...[7]). Ces mutations sont essentiellement le fait d'une agriculture extensive à usage incontrôlé d'intrants chimiques et d'une forte croissance démographique augmentant la pression sur les ressources en eau en particulier. Dans le bassin versant de la Comoé, les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau des populations. Celles-ci sont logées dans les aquifères superficiels d'altérites (captés via des puits villageois mal entretenus) potentiellement vulnérables car peu profonds et sensibles aux variations du climat et aux activités humaines. Ces réservoirs d'altérites sont assimilables à un milieu poreux du fait de leur nature argilo-sableuse. Sous-jacentes à ce premier réservoir, des fractures profondes du socle cristallin et cristallophyllien accédés au moyen de forages d'hydraulique villageoise plus modernes, constituent un deuxième réservoir généralement pérenne et mieux protégé dont les potentialités en eau sont étroitement liées à la densité et à l'importance de la fracturation [10].

Il est bien connu qu'en milieu de socle fissuré, l'hétérogénéité physique du milieu est un facteur déterminant d'acquisition et de contrôle de la qualité chimique des eaux naturelles [11], mais sur le bassin de la Comoé, les processus de minéralisation de ces importantes ressources et les mécanismes qui gouvernent les transferts de flux restent encore très peu connus. Les interactions hydrauliques entre les réservoirs et la part de la minéralisation naturelle des eaux et celle induite par les activités humaines le sont davantage. Les composés dissous constituant des traceurs environnementaux indispensables à la compréhension du chimisme de l'eau [12], [13], [14] peuvent être introduits dans l'eau soit naturellement [13], [15] soit par les activités anthropiques par le biais de contamination d'origine agricole ou fécale [3], [16], [17].

Ce travail se positionne comme une réflexion préliminaire à la mise en place d'un dispositif plus intégré de surveillance de la qualité physico-chimique des eaux de ce bassin et des flux de contaminants. L'objectif est de comprendre les processus majeurs qui régissent la minéralisation et la qualité des eaux naturelles et leur transfert dans le bassin de la Comoé à travers une approche croisée statistique et géochimie.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le Bassin versant transfrontalier du fleuve Comoé (Fig.1) est d'une superficie de 78 000 km² dont 90% repose sur la Côte d'Ivoire et le reste est partagé entre la Burkina Faso, le Ghana et le Mali. Avec un régime climatique sous contrainte de mousson, il regroupe une zone climatique de type tropical de transition au nord (1350 à 1500 mm de pluie/an), une autre de type équatorial de transition atténué au centre (1150 à 1400 mm de pluie/an) et une zone climatique de type équatorial de transition (1400 à 2300 mm de pluie/an) au sud [8], [9]. Ce bassin repose sur trois principales provinces géologiques. La première est constituée de granites syn-tectoniques qui se présentent en massifs extrêmement vastes (granites calco-alcalins tels que les granites à muscovite, granites à deux micas, granites à amphibole et biotite et granodiorites), la seconde est formée de granites post-tectoniques qui forment de petits massifs circonscrits et dont la nature peut être calco-alcaline (granodiorites de Bondoukou et Aboisso) ou hyper-alcaline (petits massifs de Dabakala) et la troisième située dans la région sub-littorale de la basse côte est constituée de sédiments tertiaires [1], [18]. Ces différentes formations géologiques ont été affectées par des fractures de direction préférentiellement Nord-Sud (aquifères de fractures) et ont été également touchées par le phénomène d'altération. Cette altération sur le substratum schisteux est argileuse et d'une épaisseur particulièrement variable (moins d'un mètre à près de 60 mètres avec une moyenne de 30 mètres): c'est l'aquifère d'altérites.

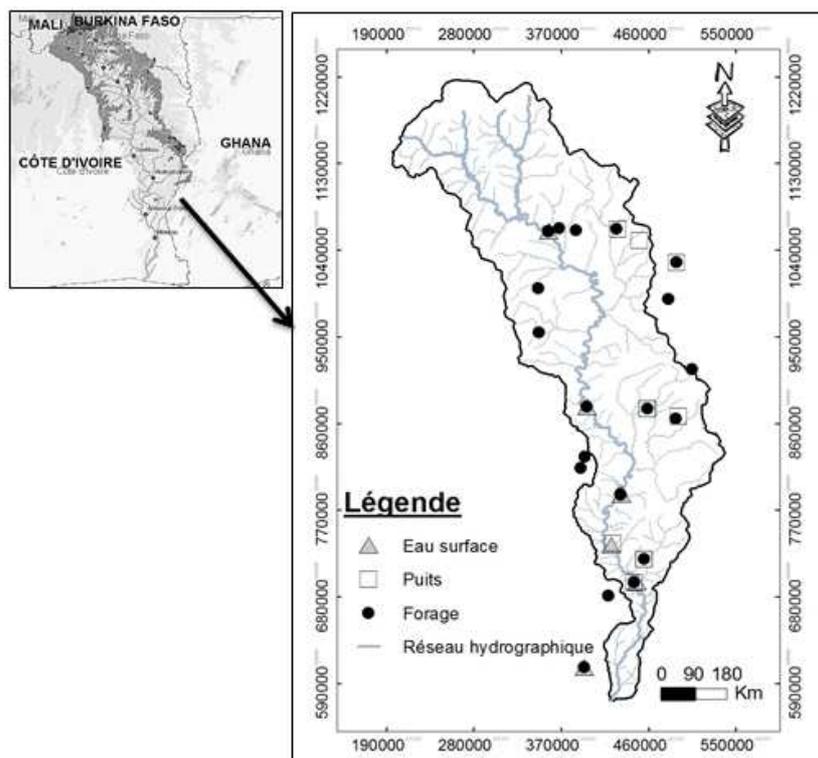


Figure 1. Situation géographique du bassin de la Comoé et points de mesure physicochimique.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 DONNÉES DE L'ÉTUDE

Trente-quatre points de mesures physicochimiques d'eaux souterraines (puits pour les aquifère d'altérites et forages pour les aquifères de socle) ont fait l'objet de prélèvement à la fois en saison sèche et humide. Six points d'eau de surface ont également fait l'objet d'échantillonnage à titre de comparaison. La figure 1 ci-dessus présente la répartition spatiale des points d'eau prélevés. Les paramètres physicochimiques mesurés *in situ* dans les différentes eaux sont : la température ($T^{\circ}\text{C}$), le potentiel d'hydrogène (pH), l'oxygène dissous (OD), la conductivité électrique (CE) mesurés à l'aide d'une sonde multi-paramètres CRISON MM 40. Les analyses pour la détermination des concentrations en ions majeurs sont effectuées au laboratoire National d'Appui et d'Aide au Développement Agricole (LANADA) d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Ce sont Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et SiO_2 analysés par spectrométrie d'absorption moléculaire, Na^+ et K^+ par spectrométrie d'absorption à la flamme (PHF 90D) et HCO_3^- par titrimétrie.

Pour la suite du travail et pour une meilleure compréhension, les initiales des échantillons de la saison sèche sont codées en majuscule et celle des échantillons de la saison humide sont codées en minuscule suivi du numéro d'ordre de l'échantillonnage. Ainsi, les eaux de surface seront représentées par les initiales « ES » et « es », les puits par « P » et « p » et les forages par « F » et « f » respectivement en saison sèche et en saison humide suivi du numéro d'ordre d'échantillonnage. A titre illustratif, « ES1 » représentera l'échantillon d'eau de surface n°1 prélevé en saison sèche et son équivalent en saison humide sera noté « es1 ».

2.2 MÉTHODES

2.2.1 DISCRIMINATION STATISTIQUE DES EAUX : APPLICATION DU MODELE SOM (SELF ORGANIZING MAPS)

DÉFINITION

Les cartes auto-organisatrices de Kohonen ou *Self Organizing Maps (SOM)* sont des réseaux de neurones non-supervisés qui permettent d'ordonner et de classer des échantillons en fonction de leur similarité. Le modèle SOM se compose d'une couche d'entrée qui est la matrice de présence-absence des individus (matrice des points de mesures) qui est directement

reliée à une couche bidimensionnelle de sortie dite carte de Kohonen. Celle-ci est composée des neurones artificiels de sortie (Fig.2). Le modèle estime les intensités de connexion entre les couches d'entrée et de sortie en utilisant un procédé concurrentiel non supervisé, décrit par [19]. Ce procédé recherche itérativement des similarités parmi les données observées et les représente dans la carte de sortie avec les valeurs finales des poids où les neurones de sortie se trouvent en lignes et les points de mesure en colonnes.

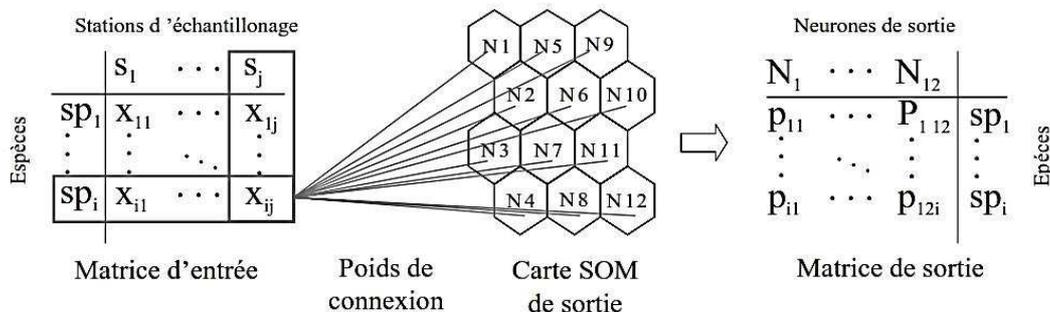


Figure 2. Matrice (ou couche) d'entrée et de sortie de la Carte auto-organisatrice simplifiée [20].

PHASE D'APPRENTISSAGE DU MODÈLE

Elle met en correspondance l'espace des entrées et la carte et aura pour but d'adapter les poids W de telle sorte que des individus proches dans l'espace d'entrée soient associés au même neurone ou à des neurones proches dans la carte de sortie. L'apprentissage se fait avec différentes tailles de cartes et la taille optimale est choisie en minimisant les erreurs dites de quantification (QE) et de topographie (TE) [20]. Les neurones obtenus à partir de la carte sont ensuite regroupés à l'aide d'une procédure de classification hiérarchique ascendante (CAH). Cette classification consiste à définir un critère d'agrégation des classes qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance qui existerait entre les échantillons en fonction des paramètres étudiés. Le critère de regroupement est le critère de *Ward* qui semble la plus pertinente selon [21]. Le nombre de regroupements provenant de cette classification guidé par la valeur de la distance euclidienne est laissé au choix de l'utilisateur et doit donc être déterminé selon les objectifs de l'application et l'appréciation de l'analyste [22]. L'interface SOM Toolbox (version 2) sous Matlab utilisée pour la réalisation de la carte de Kohonen et de la classification a été développée par l'Université de Technologie d'Helsinki (<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/>).

Avant l'utilisation des données dans le modèle SOM, les variables (valeurs des paramètres physicochimiques) sont ramenées à une même hiérarchie. Elles sont donc standardisées à travers une transformation des échantillons d'origine en leur moyenne centrée-réduite. La valeur standardisée de la variable est notée Z_{ij} et s'écrit selon l'équation (1) :

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_m}{S_j} \quad Eq.1$$

X_{ij} désigne la valeur réelle de la variable, X_m représente la valeur moyenne de la série et S_j l'écart type de celle-ci.

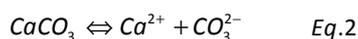
2.2.2 CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUES DES EAUX

DIAGRAMME DE PIPER

Le diagramme de Piper, diagramme ternaire d'évaluation géochimique des eaux introduit par [23] a été utilisé pour l'identification et la représentation des faciès hydrogéochimiques majeures qui déterminent la prédominance des ions primaires. La réalisation du diagramme a été possible grâce à la version 6.5 du logiciel DIAGRAMMES de l'université d'Avignon, France (<http://www.lha.univ-avignon.fr/>). Une description détaillée de la méthode est consultable dans [24].

INDICES DE SATURATION

Les indices de saturation (IS) permettent d'apprécier l'état d'équilibre (ou de déséquilibre) physicochimique de l'eau vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés au contact de la roche [25]. L'état d'équilibre d'une réaction de solubilité d'un minéral est caractérisé par sa constante d'équilibre K [26]. En considérant l'équation de solubilité de la calcite suivante:



$$K_s = (a_{Ca^{2+}})_{eq} \times (a_{CO_3^{2-}})_{eq} \quad Eq.3$$

Où $a_{Ca^{2+}}$ et $a_{CO_3^{2-}}$ sont les activités des espèces Ca^{2+} et CO_3^{2-} lorsque l'équilibre de la réaction est atteint. L'état d'avancement de la réaction est caractérisé par le quotient de réaction Q_R , aussi appelé produit d'activité ionique, qui s'écrit de manière identique à la constante d'équilibre seulement qu'ici la réaction se déroulant n'est plus à l'équilibre. Le calcul de l'indice de saturation (IS) se fait selon l'équation (4):

$$IS = \text{Log} \frac{Q_R}{K_s} \quad Eq.4$$

Du fait de l'imprécision des mesures de pH *in situ*, [27] propose de considérer comme saturée une eau ayant un indice de saturation compris dans l'intervalle +/- 0,5 :

- $IS > 0,5$, la solution est sursaturée par rapport au minéral, et le minéral peut potentiellement précipiter ;
- $IS = 0,5$, la solution est en état d'équilibre avec le minéral ;
- $IS < 0,5$, la solution est sous saturée et le minéral peut potentiellement se dissoudre.

La détermination des indices de saturation a été effectuée en utilisant le code de calcul PHREEQC [28] incorporé au logiciel DIAGRAMMES 6.5.

3 RESULTATS

3.1 CLASSES STATISTIQUES DES POINTS D'EAU ECHANTILLONNES

3.1.1 CHOIX DES MATRICES DE SORTIE (DIMENSION DE LA CARTE DE KOHONEN)

A l'issue de la phase d'apprentissage, les dimensions des matrices retenues (carte de Kohonen) sur la base des valeurs minimales de QE et TE sont indiquées en gras dans le tableau 1. Ainsi, la matrice retenue pour la saison sèche est de dimension [5x6] soit 30 cellules (Fig.3) pour des erreurs minimales de quantification (QE) égale à 0,531 et de topographie (TE) de 0,000 et celle retenue pour la saison humide est [4x8] soit 32 cellules (Fig.3) pour des erreurs minimales de quantification (QE) égale à 0,529 et de topographie (TE) de 0,000.

Tableau 1. Choix des matrices en fonction de la taille (N) de l'échantillon et des erreurs de quantification (QE) et de topographie (TE) ; la matrice retenue est en gras.

Saison	N	√N	Matrice possible	QE	TE
Sèche	36	30	5x6	0,531	0,000
			6x5	0,533	0,000
Humide	40	31,62	6x5	0,525	0,025
			5x6	0,552	0,050
			8x4	0,533	0,050
			4x8	0,529	0,000

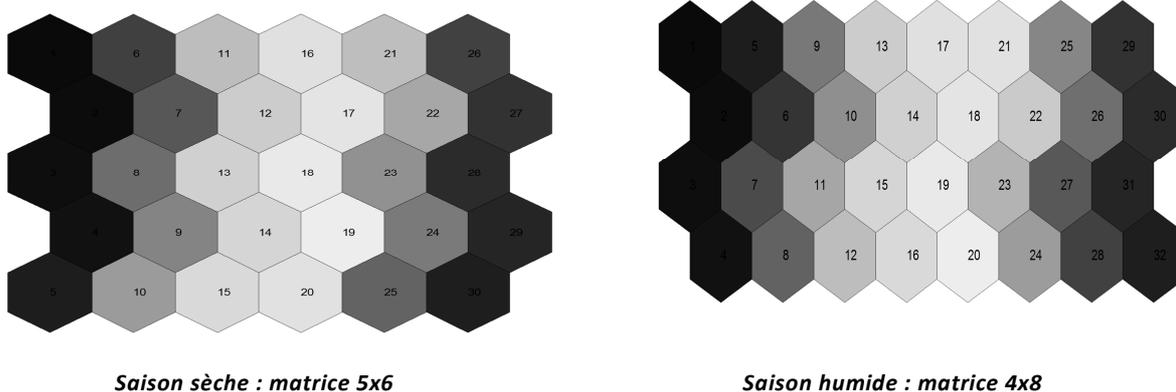


Figure 3. Cartes auto-organisatrices de Kohonen générées à partir des matrices choisies.

3.1.2 DENDROGRAMMES DE CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE

La classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de regrouper l'ensemble des eaux de la saison sèche en 3 classes distinctes chimiquement (C.I ; C.II ; C.III) avec un niveau de coupure de l'arbre à 1 (Fig.4a). Au-delà d'une distance euclidienne de 1 soit 1,4 les échantillons des classes C.I et C.II se rapprochent pour en former une seule classe distincte de la classe C.III. Quant à la saison humide, une classification plus distinctive apparaît lorsque la distance euclidienne est de 0,75 (Fig.4b). Pour cette distance, les échantillons sont regroupés en 4 classes (C'.I ; C'.II ; C'.III ; et C'.IV). Par contre, avec un niveau de coupure de l'arbre à 1, on obtient 3 groupes tout comme la classification obtenue en saison sèche. Ainsi, les échantillons des classes C'.II et C'.III formeraient une même classe et seraient différents des classes C'.I et C'.IV.

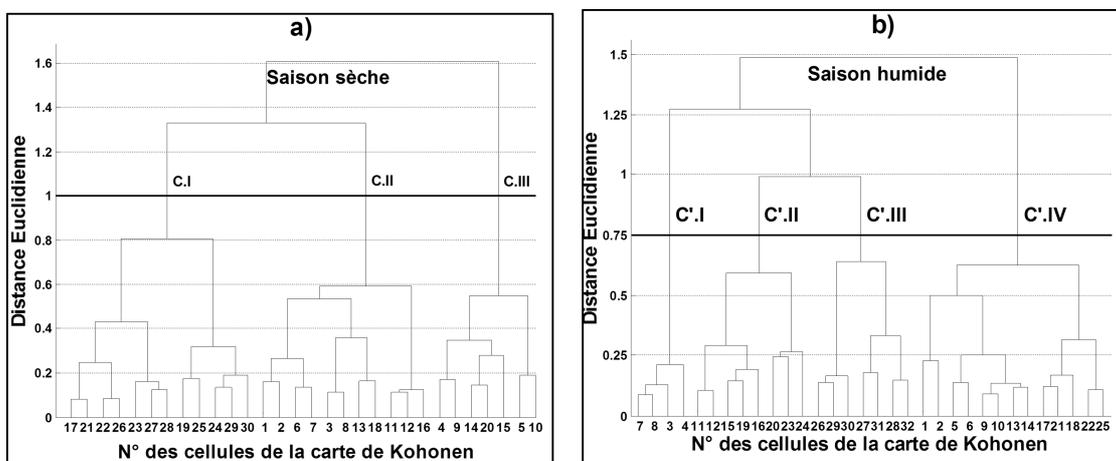


Figure 4. Denogramme de classification des cellules de la carte de Kohonen en fonction des paramètres physico-chimiques : (a) saison sèche, (b) saison humide.

3.1.3 REPARTITION DES ECHANTILLONS SUR LA CARTE DE KOHONEN

Pendant la saison sèche, les échantillons constitutifs des différentes classes, générés à partir du dendrogramme à une distance euclidienne de 1 sont repartis sur la carte de Kohonen de la figure 5a. Aussi la représentativité des réservoirs dans chaque classe est discutée dans le tableau 2. Toutes les classes apparaissent hétérogènes à divers degrés :

- **La classe C.I** (P5, P9, F2, F3, F4, F9, F11, F12, F14, F17, F18, F19, F20, F21), exceptée la présence de deux échantillons de puits (P5 et P9), reste majoritairement constituée d'eau de la nappe de socle avec près de 33% de représentativité.
- **La classe C.II** (ES1, ES2, ES3, ES4, ES5, ES6, P1, P2, P3, P4, P7, F1, F7, F10, F13, F15) apparaît particulièrement hétérogène car caractérisée par le regroupement d'eaux de surface, de nappes d'altérites et de nappes de socle (puits et forages) à des proportions presque identiques.

- **La classe C.III** (P6, P8, F5, F6, F16, F22) se distingue par le regroupement d'eaux souterraines (nappe d'altérites et de socle) avec une légère prédominance des eaux de la nappe de socle.

Pendant la saison humide, les classes demeurent plus ou moins hétérogènes tout comme en saison sèche (Fig.5b et tab.2) :

- **la classe C'.I** qui était caractéristique des nappes de socle en saison sèche devient caractéristique des nappes d'altérites à près de 80% (présence d'un seul échantillon de forage (f22)).
- **Les classes C'.II et C'.III** à elles seules contiennent la quasi-totalité des eaux de la nappe de socle avec près de 38% des échantillons.
- **La classe C'.IV** est mixte comme la classe C.II en saison sèche avec une parité entre nombre de puits et échantillons d'eaux de surface.

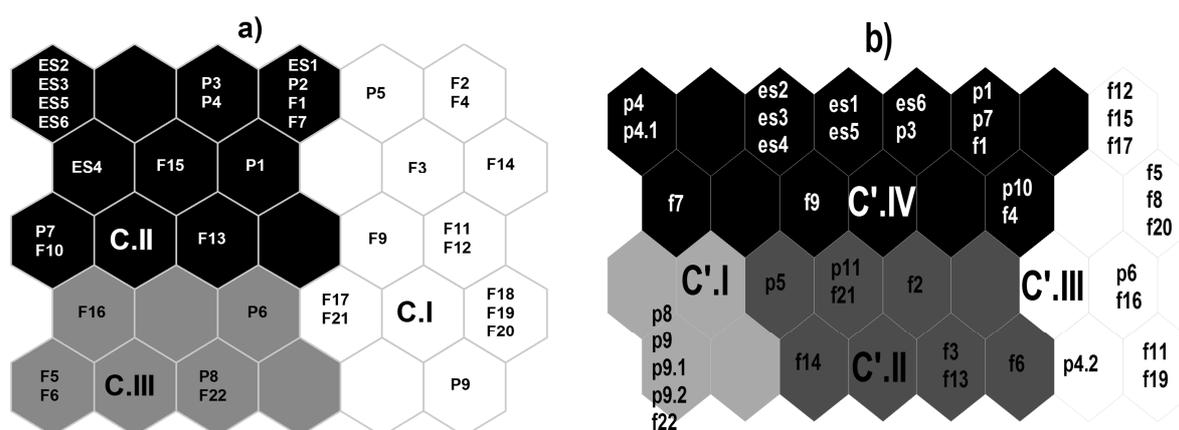


Figure 5. Répartition des classes d'eau issues du dendrogramme sur la carte de Kohonen : (a) saison sèche, (b) saison humide

Tableau 2. Nombre d'échantillons et représentativité des eaux de surface, des puits et des forages dans chaque classe de Kohonen.

Type d'eau	Saison sèche			Saison humide			
	C.I	C.II	C.III	C'.I	C'.II	C'.III	C'.IV
Total points d'eau	14	16	6	5	8	11	16
% Eaux de surface	0	16,67	0	0	0	0	15
% Puits (altérites)	5,56	13,89	5,55	10	5	5	15
% Forages (socle)	33,33	13,89	11,11	2,5	15	22,5	10

3.1.4 DIFFERENCIATION PHYSICO-CHEMIE DES CLASSES D'EAU

L'importance des paramètres physicochimiques dans la classification des points d'échantillonnage est indiquée dans la figure 6 et le tableau 3.

En saison sèche (Fig.6a et Tab.3) :

- **La classe C.I** majoritairement constituée d'eau de nappes de socle (Fig.5) présente une conductivité moyenne caractéristique de concentrations moyennes en éléments dissous ; seuls les éléments SiO_2 et PO_4^{2-} et F^- présentent des fortes concentrations, les autres étant moyennement ou faiblement représentés.
- **La classe C.II** étant la plus hétérogène (présence à la fois d'eaux de surface, d'altérites et de socle) présente une conductivité électrique plus faible que celle de la classe **C.I** avec des concentrations en éléments dissous également plus faibles. Ici seul Na^+ présente une concentration moyenne particulièrement élevée, les autres étant faiblement ou très faiblement représentés.

- **La classe C.III**, composée uniquement d'eaux souterraines (légère prédominance des nappes de socle), apparaît être la plus riche en minéraux dissous avec une plus forte conductivité électrique. Cette classe présente des teneurs particulièrement très fortes en PO_4^{3-} et Na^+ , et fort en HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et NO_3^- , le tout accompagné d'une faible acidité.

En saison humide (Fig.6b et Tab.3) :

- **La classe C'.I**, avec une moyenne de 578,75 $\mu S.cm^{-1}$ (Tab.4), est la plus minéralisée. Tout Comme la classe **C.III** en saison sèche, la classe **C'.I** est plus riche en minéraux issus de l'altération avec un pH moyen légèrement basique de $7,20 \pm 0,08$.
- **La classe C'.II**, tout comme la **classe C'.III**, est riche en silice comparativement aux autres groupes. Ces deux classes renferment à elles seules la quasi-totalité des échantillons de **C.III**. Elles seraient l'équivalentes de cette classe en saison humide. Toutefois, la **classe C'.II** se distingue de la **classe C'.III** par ses teneurs plus importantes en HCO_3^- , Ca^{2+} et PO_4^{3-} (Tab.4)
- **La classe C'.III** renferme dans l'ensemble des échantillons à forte minéralisation avec une conductivité moyenne de 349,25 $\mu S.cm^{-1}$ (Tab.4). Ces eaux restent les plus riches en SiO_2 et en ions F^- et NO_3^- comparativement à la **classe C'.II**.
- **La classe C'.IV** pauvre en SiO_2 est caractéristique des eaux les moins minéralisées avec les plus faibles teneurs possibles en anions et en cations. Certains échantillons de cette classe s'assimilent à la **classe C'.III** en terme d'importance des teneurs en NO_3^- .

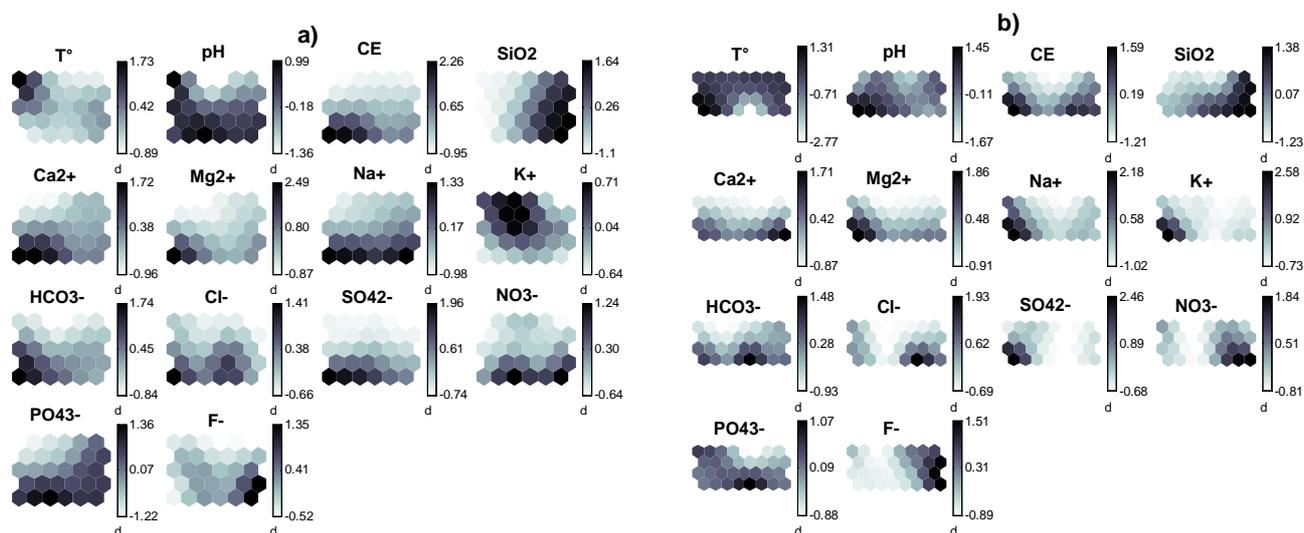


Figure 6. Poids des paramètres physico-chimiques dans la définition des classes : a) saison sèche et b) saison humide.

Tableau 3. Différenciation physico-chimique des classes d'eau en saison sèche et humide.

Période	Classe	Paramètre physicochimique													
		T	pH	CE	SiO ₂	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	PO ₄	F	NO ₃
Saison sèche	C.I	++	++	++	++++	++	+	+++	+	++	++	++	+++	+++	++
	C.II	+++	+	+	+	+	+	++	++++	+	++	+	++	+	+
	C.III	+	++++	+++	++	+++	+++	++++	++	+++	+++	+++	++++	++	+++
Saison humide	C'.I	+++	++++	++++	++	+++	++++	++++	++++	+++	++	++++	++	+	+
	C'.II	++	++	++	+++	++	++	+	+	+++	+++	+	+++	+	++
	C'.III	+++	++	+++	++++	+++	++	++	++	++	++	+	++	+++	+++
	C'.IV	+++	++	+	++	+	+	+	+	+	+	++	+	+	+

Tableau 4. Valeurs moyennes et écart-types en méq.L-1 des paramètres physico-chimiques des classes de Kohonen.

Période	Classe	T	pH	CE	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻
Saison sèche	C.I	28,81	6,76	225,36	67,68	1,46	0,77	0,52	0,08	1,79	1,07	0,14	0,01	0,03	0,06
		±1,27	±10,58	±121,94	±112,83	±10,76	±10,66	±10,34	±10,04	±11,03	±11,05	±10,23	±10,00	±10,02	±10,07
	C.II	29,99	6,64	150,93	21,91	0,77	0,37	0,32	0,12	1,17	0,67	0,04	0,01	0,02	0,06
		±2,08	±1,55	±111,18	±8,43	±0,83	±0,36	±0,22	±0,06	±1,08	±0,74	±0,04	±0,00	±0,02	±0,07
	C.III	28,14	7,46	656,00	21,00	3,39	1,96	0,84	0,07	3,72	1,82	0,61	0,02	0,02	0,10
		±1,16	±2,78	±287,48	±11,35	±1,29	±1,02	±0,36	±0,40	±1,54	±1,37	±0,50	±0,44	±0,63	±0,63
Saison humide	C'.I	25,07	7,20	578,75	28,13	0,89	0,62	0,01	0,59	1,25	0,81	0,45	0,01	0,00	0,04
		±1,79	±0,08	±172,01	±8,83	±0,47	±0,21	±0,00	±0,34	±0,49	±0,42	±0,39	±0,00	±0,00	±0,01
	C'.II	20,95	6,43	412,35	33,63	0,82	0,34	0,00	0,11	1,10	1,35	0,02	0,01	0,00	0,05
		±4,68	±0,05	±402,62	±10,62	±0,46	±0,16	±0,00	±0,08	±0,60	±2,11	±0,03	±0,00	±0,00	±0,04
	C'.III	23,48	5,72	349,25	50,53	0,60	0,34	0,01	0,14	0,89	0,76	0,08	0,01	0,02	0,08
		±0,58	±1,12	±96,22	±4,59	±0,40	±0,24	±0,001	±0,09	±0,44	±0,34	±0,14	±0,00	±0,01	±0,04
	C'.IV	23,73	6,20	226,40	21,43	0,41	0,23	0,001	0,07	0,36	0,37	0,001	0,00	0,00	0,07
		±0,24	±0,91	±100,48	±9,55	±0,19	±0,11	±0,001	±0,03	±0,30	±0,27	±0,00	±0,00	±0,00	±0,03

3.2 PROCESSUS DE MINERALISATION DES EAUX

3.2.1 FACIÈS HYDROCHIMIQUES

En saison sèche, la signature chimique des eaux reste contrôlée par deux principaux hydro-faciès hydrochimiques : l'hydro-faciès bicarbonaté calco-magnésien et l'hydro-faciès chloruré nitraté calco-magnésien. Quelques échantillons (de la classe II principalement) se caractérisent toutefois par l'hydro-faciès bicarbonaté sodi-potassique (Fig. 7).

En saison humide, les deux principaux hydro-faciès de la saison sèche se maintiennent (bicarbonaté calco-magnésien et chloruré nitraté calco-magnésien) mais le troisième hydro-faciès n'apparaît plus (Fig. 7).

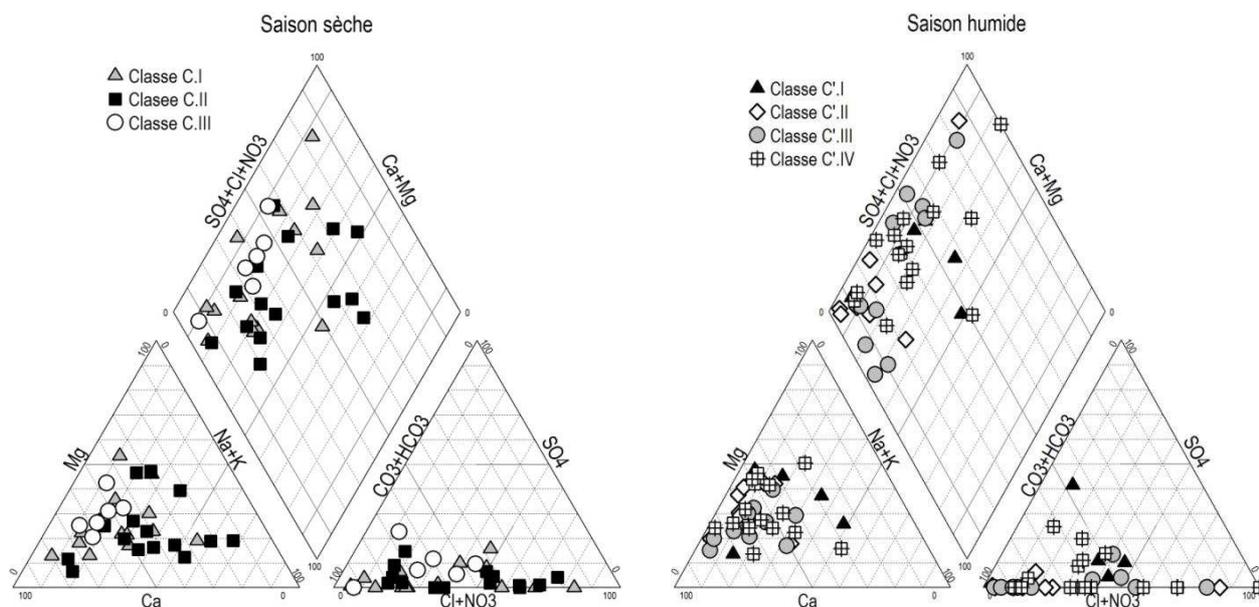


Figure 7. Diagramme ternaire de Piper des classes d'eau de Kohonen en saison sèche et en saison humide

3.2.2 ETAT D'EQUILIBRE PHYSICO-CHIMIQUES DES CLASSES D'EAU

L'état d'équilibre des eaux est apprécié à partir des indices de saturation vis-à-vis de la calcite et la dolomite. Les gammes de variation des indices montrent que l'IS-Calcite varie entre -5,28 et +1,48 et l'IS-Dolomite entre -10,99 et +2,27 pour les deux saisons.

En saison sèche, la figure 8 indique que les eaux des classes **C.I** et **C.II** sont sous-saturées par rapport à la calcite avec des IS-médians respectifs de -1,21 et -1,76. Toutefois, la **classe C.I** reste plus encline à la saturation que la **C.II**. On enregistre le même cas de figure de sous-saturation vis-à-vis de la dolomite. Pendant la même saison, tous les échantillons de la classe C.III sont en équilibre vis-à-vis de la calcite ($-0.5 \leq IS \leq 0.5$) quand seulement 25% le sont pour la dolomite.

En saison humide, toutes les classes sont sous-saturées par rapport à la dolomite et à la calcite. Les indices varient entre -0,48 et -5,09 pour la calcite et entre -1,68 et -10,91 pour la dolomite (Fig.9). Comparativement à la saison sèche, les indices en saison humide baisse avec des valeurs médianes plus faibles. Toutefois, les classes **C'.I** et **C'.II** ont une propension à la dissolution. Ces deux classes, de par la distribution des valeurs des indices, se rapprochent plus de la zone d'équilibre que les eaux des classes **C'.III** et **C'.IV**.

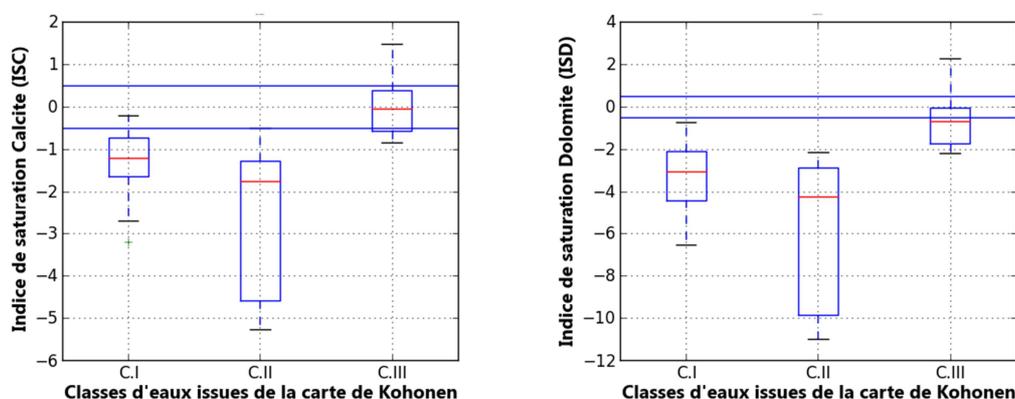


Figure 8. Distribution des indices de saturation par rapport à la calcite (ISC) et la dolomite (ISD) des classes d'eau en saison sèche.

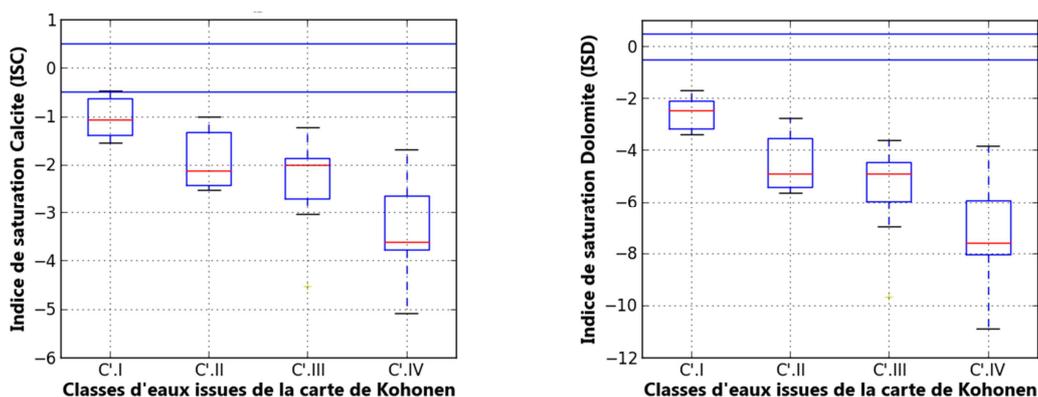


Figure 9. Distribution des indices de saturation par rapport à la calcite (ISC) et la dolomite (ISD) des classes d'eau en saison humide.

4 DISCUSSION

La discrimination statistique et géochimique des échantillons a permis de classer les points d'eau de surface, de nappes d'altérites et de nappes de socle fissuré en fonction des similarités liées aux compositions chimiques et à leurs variations saisonnières. Parmi les principales classes identifiées indépendamment de la saison, certaines présentent une homogénéité

interne (classes formées d'eaux de même origine) tandis que d'autres en présentent une forte hétérogénéité traduite par la présence dans une même classe d'eaux de surface, de nappes d'altérites et de nappes de socle montrant ainsi que l'origine de l'eau et la nature de l'aquifère n'influencent pas significativement cette classification.

Cependant, si la présence de classes à composition homogène, c'est à dire formées d'eaux ayant des caractéristiques similaires du fait d'une unique origine apparaît logique, les classes hétérogènes formées d'eaux d'origines différentes mais ayant des caractéristiques similaires sont à relier à des processus plus complexes. Il est établi que la minéralisation des eaux souterraines, en conditions naturelles, provient d'une part de la nature des roches traversées au cours de l'infiltration et d'autre part du temps de contact entre l'eau et les minéraux [29], [30]. Si tel était le cas ici, les eaux de surface du fait de leur caractère ouvert aux précipitations devraient être moins minéralisées que les eaux de puits. Ensuite le socle cristallin fissuré recevant l'eau des couches plus superficielles des altérites sus-jacentes devraient être davantage minéralisé. Selon cette règle d'évolution croissante de la minéralisation avec la profondeur, une nette discrimination sur la base du différentiel de minéralisation entre eaux de surface, eaux des altérites et eaux du socle fissuré devrait prévaloir. Cette absence de discrimination nette entre les eaux pourraient traduire alors d'une part, une connexion hydraulique avec possibilité de mélange d'eau entre les différentes nappes logées dans les altérites [31], [32], [33] et d'autre part entre les fissures du socle cristallin [34]. A cette première connexion hydraulique, pourrait s'ajouter une continuité hydraulique entre les aquifères d'altérites et les aquifères du socle fissuré, continuité qui aura tendance à rapprocher les caractéristiques physico-chimiques des eaux de ces deux aquifères. Mais, la présence de classes à composition homogène laisse toutefois penser que cette deuxième continuité hydraulique est localisée et ne concernerait pas l'ensemble de la surface des aquifères ; une présence probable de nappes perchées isolées par endroit [31] pourrait expliquer également les compositions homogènes des classes.

Par ailleurs, le rapprochement des caractéristiques physico-chimiques des eaux de surface de celles des eaux souterraines (classes hétérogènes) pourrait traduire aussi une forte interaction nappe-rivière [35] avec possibilité pour les cours d'eau de constituer des drains de vidange pour les aquifères du socle fissuré, mais aussi pour les fractures qui pourraient constituer des couloirs permettant l'évacuation de ces eaux de surface. Cette idée est confortée par l'assertion selon laquelle les grands cours d'eau ivoiriens sont généralement logés dans les fractures du socle cristallin et cristallophyllien [36]. En accord avec cette interaction nappe-rivière, l'hétérogénéité interne des classes montre en outre que les eaux souterraines plus récentes car recevant directement les précipitations pourraient être des zones préférentielles de recharge de la nappe où le temps nécessaire à la mise en solution des minéraux est relativement court selon [37], [38] traduisant un fort taux de renouvellement (temps de séjour court) en eau des aquifères. Cette idée du temps de séjour court est confortée par les niveaux de sous-saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite de la plupart des eaux. Cette sous-saturation traduit un niveau de renouvellement élevé et un âge récent des eaux souterraines selon [39].

En marge de la minéralisation naturelle (interaction eau-roche) des eaux caractérisée par un faciès bicarbonaté calco-magnésien dominant, une part de minéralisation induite caractéristique d'un faciès chloruré nitraté calco-magnésien est enregistrée. Cette minéralisation induite est traduite par une forte prévalence de nitrate et chlorure dans certaines eaux souterraines due certainement aux activités humaines en surface et au pluvio-lessivage qui conduiraient ces éléments dissous via les infiltrations vers les nappes [40], [17], [41]. Selon [42], [41], [43], l'excès de chlorures et nitrates dans les eaux proviendrait d'effluents de système d'assainissement inadéquat et/ou d'effluents agricoles qui percolent dans la zone saturée atteignant la nappe.

5 CONCLUSION

L'approche couplée statistique-géochimie adoptée dans cette étude a permis de comprendre les processus majeurs qui régissent les transferts de flux et la minéralisation des eaux naturelles sur le bassin versant de la Comoé. Les transferts de flux sont en effet guidés par une continuité hydraulique à la fois interne aux aquifères (altérites et socle fissuré) et entre les aquifères d'altérites et de socle. Ces transferts se caractérisent par une forte interaction nappe-rivière avec possibilité de recharge des nappes (régulièrement renouvelées) via les cours d'eau. La minéralisation des eaux du bassin versant de la Comoé est à la fois le fait de processus naturels (interaction eau-roche et mise en solution de produits d'altération, dissolution/précipitation, et les phénomènes d'échanges de bases) et des activités anthropiques (domestiques et agricoles) qui introduisent essentiellement les nitrates et chlorures dans le milieu.

Ces résultats préliminaires importants constitueront la base d'orientation à une étude plus détaillée pour la mise en place d'un dispositif plus intégré et une chaîne d'approches scientifiques de surveillance et de suivi de la qualité des eaux et des flux de contaminants dans le bassin transfrontalier de la Comoé.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous adressons nos sincères remerciements aux animateurs du Programme d'Appui à l'Enseignement Supérieur (PAES) dans l'espace UEMOA pour avoir accepté de financer notre projet de recherche. Au-delà de ce remerciement, c'est à l'endroit de l'UEMOA que va notre reconnaissance, notre institution sous régionale sans laquelle nous n'aurions pas pu atteindre ces importants résultats scientifiques.

REFERENCES

- [1] J. M. Lamachère, "Développement de l'agriculture dans l'ORD de la Comoé. Phase II, étude hydrologique," 1987.
- [2] K. K. Jean, J. J. Patrice, S. M. Bachir, D. S. Kouakou, A. A. Tawa, L. Yves, C. Vincent, and B. Jean, "Modeling of groundwater flow and drawdown evolution simulation of Abidjan aquifer (Côte d'Ivoire)," *J. Asian Sci. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 344–364, 2013.
- [3] I. K. Kouamé, L. K. Kouassi, B. Dibi, I. D. Rascanu, G. Romanescu, and I. Sandu, "Potential Groundwater Pollution Risks by Heavy Metals from Agricultural Soil in Songon Area (Abidjan, Côte d'Ivoire)," *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 4, no. December, pp. 1441–1448, 2013.
- [4] B. Adiaffi, C. Marlin, Y. Marie, S. Oga, R. Pichon, and J. Biemi, "Approche semi-quantitative de la minéralisation des aquifères schisteux en zone équatoriale de transition : cas de la région Sikensi-Agboville (Côte d ' Ivoire)," *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 6, no. 5, pp. 2228–2240, 2012.
- [5] Y. M. S. Oga, T. Lasm, M. Massault, D. Baka, G. Ake, C. Marlin, J. Biemi, and C. Hillaire-Marcel, "Caractérisation et suivi isotopique des eaux de la nappe semi-captive du Maestrichtien de la Côte d ' Ivoire," *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 991–1004, 2011.
- [6] B. Dabin, N. Leneuf, and G. Riou, "Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2.000.000, Notice explicative," Abidjan, 1960.
- [7] D. Noufé, G. Mahé, B. Kamagaté, É. Servat, a. Goula Bi Tié, and I. Savané, "Climate change impact on agricultural production: the case of Comoe River basin in Ivory Coast," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 6667, no. September, pp. 1–12, 2015.
- [8] D. Noufé, "Changement hydroclimatique et transformations de l'agriculture: l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire," Thèse de Doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, p. 375, 2011.
- [9] K. E. Kouakou, "Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: Cas du bassin versant de la Comoé," Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, p. 204, 2011.
- [10] P. Lachassagne and R. Wyns, "Aquifères de socle : Nouveaux concepts. Application à la prospection et à la gestion de la ressource en eau," *Rev. Géoscience du BRGM*, vol. 2, no. Septembre, pp. 33–37, 2005.
- [11] V. Ayraud, "Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes," Thèse de Doctorat, Université Rennes 1, p. 312, 2005.
- [12] S. Diop, F. Diome, M. Samb, and R. Sarr, "Hydrogeochemical Relationships between Spring and Subsurface Waters in the Dindéfello Area of South Eastern Senegal," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 6, no. December, pp. 1743–1754, 2014.
- [13] R. Brodie, B. Sundaram, R. Tottenham, S. Hostetler, and T. Ransley, "An Overview of Tools for Assessing Groundwater-Surface Water Connectivity," *Bur. Rural Sci. Canberra.*, p. 133, 2007.
- [14] C. Fetter, *Contaminant hydrogeology*. New York, USA: Macmillan Publishing Co., 1993.
- [15] E. Giménez-Forcada, A. Bencini, and G. Pranzini, "Hydrogeochemical considerations about the origin of groundwater salinization in some coastal plains of Elba Island (Tuscany , Italy)," *Env. Geochem Heal.*, vol. 32, pp. 243–257, 2010.
- [16] S. M. Rashrash, B. M. Ben Ghawar, and A. M. Hweesh, "Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrochemical Data : Case Study (Al Wahat Area East of Libya)," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 7, no. March, pp. 369–377, 2015.
- [17] A. Shorieh, G. Porel, and M. Razack, "Assessment of Groundwater Quality in the Dogger Aquifer of Poitiers , Poitou-Charentes," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 7, no. February, pp. 171–182, 2015.
- [18] S. Touré, J.-P. Pupin, and R. Yobou, "Nouvelles caractérisations pétrologiques et géochronologiques du granite sub-alcalin potassique d'Ayamé, Sud-Est de la Côte d'Ivoire," *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 115–137, 2009.
- [19] T. Kohonen, "Self-Organizing Maps," in *Springer Series in Information Sciences*, 30th ed., Springer-Verlag, Berlin., 2001.
- [20] I. A. Aguilar, "Les peuplements de poissons comme outil pour la gestion de la qualité environnementale du réseau hydrographique de la Garonne," Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, p. 134, 2004.
- [21] V. Cloutier, R. Lefebvre, R. Therrien, and M. M. Savard, "Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system," *J. Hydrol.*, vol. 355, pp. 294–313, 2008.

- [22] A. N. Rousseau, P. D. Lafrance, R. D. Quilbé, E. M. Caron, M. M. Grenier, M.-P. Lavignen, and S. Savary, "Développement de normes de performance agro-environnementales atteignables (NPA) sur quatre bassins versants canadiens," *Rapp. N° R-924*, p. 217, 2007.
- [23] A. M. Piper, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis," Washington, 1953.
- [24] J. D. Hem, *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, Third Edit. U.S. Geological Survey Water Supply, 1989.
- [25] R. Cidu, R. Biddau, and L. Fanfani, "Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy).," *J. Geochemical Explor.*, vol. 100, pp. 125–132, 2009.
- [26] C. A. J. Appelo and D. Postma, "Ion Exchange," in *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed., Balkema, pp. 241–309, 2005.
- [27] T. Paces, "Chemical characteristics and equilibration in natural water-felsic rock-CO₂ system," *Geochim. Cosmochim. Acta*, Oxford, vol. 36, p. 217-240, 1972.
- [28] D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, "User's Guide To PHREEQC (version 2) — a Computer Program for Speciation, and Inverse Geochemical Calculations," *Water-Resources Investig. Rep. 99-4259*, no. 2, p. 326, 1999.
- [29] L. Sigg, W. Stumm, and P. Behra, *Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*. Paris: Masson, 1992.
- [30] C. A. J. Appelo and D. Postma, "Variable dispersivity in a column experiment containing MnO₂ and FeOOH-coated sand," *J. Contam. Hydrol.*, vol. 40, pp. 95–106, 1999.
- [31] L. Séguis, S. Galle, M. Arjounin, S. Boubkraoui, J. Bouchez, I. Braud, F. Cazenave, C. Depraetere, M. Gosset, L. Le Barbé, F. Malinur, B. Cappelaere, G. Favreau, C. Peugeot, J. Seidel, V. Demarez, V. Le Dantec, A. Legchenko, H. Robain, C. Camerlynck, C. Otle, I. Zin, M. Zribi, F. Jacquin, B. Kamagate, and E. Lawin, "Caractérisation des processus hydrologiques sur le super-site de la Donga. Haut bassin de l'Ouémé (Bénin), ORE AMMA-CATCH," in *Atelier Instrumentation et Expérimentation, Paris 23-24 mars 2004 INSU – METEO France - IFREMER Caractérisation*, 2004.
- [32] B. Kamagaté, L. Séguis, G. Favreau, J.-L. Seidel, M. Descloîtres, and P. Affaton, "Processus et bilan des flux hydriques d'un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin (Donga, haut Ouémé)," *Comptes Rendus Géosciences, Elsevier Masson*, vol. 339, no. 6, pp. 418–429, 2007.
- [33] S. Galle, L. Séguis, M. Arjounin, T. Bariac, J.-M. Bouchez, I. Braud, J.-M. Cohard, M. Descloitre, G. Favreau, B. Kamagaté, J.-P. Laurent, M. Le Lay, F. Malinur, C. Peugeot, H. Robain, and J. Seghieri, "Evaluation des termes du bilan hydrologique sur le bassin versant de la Donga par mesure et modélisation," *multigr.*, p. 6, 2007.
- [34] B. Kamagate, A. Mariko, L. Séguis, A. Dao, H. Bokar, and D. L. Goné, "Différenciation hydrogéochimique entre les nappes superficielles des altérites et profondes du socle fissuré dans le bassin versant de Kolondieba (Sud du Mali): approche statistique par la méthode SOM des réseaux de neurones," in *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010)*. IAHS Publ., 2010, vol. 340, p. 9.
- [35] A. Dao, B. Kamagaté, A. Mariko, L. Séguis, H. B. Maïga, B. T. A. Goula, and I. Savané, "Deconvolution of the flood hydrograph at the outlet of watershed Kolondieba in the south of Mali," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 2, no. 5, pp. 1174–1181, 2013.
- [36] I. Savané, B. B. Goze, Q. H. J. Gwyn, and J. Biémi, "Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu cristallin: cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. Télédétection des ressources en eau," *AUPELF-UREF, Les Press. l'Université du Québec*, pp. 111–120, 1993.
- [37] F. Hamzaoui Azaza, R. Bouhlila, and M. Gueddari, "Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques," *Geo-Eco-Trop.*, vol. 36, pp. 49–62, 2012.
- [38] S. Diop and M. N. Tijani, "Chemical Evolution of Groundwater in the Dindéfello Plain Area in South-Eastern," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 6, no. December, pp. 1793–1815, 2014.
- [39] M. S. Oga, T. Lasm, T. K. Yao, N. Soro, M. B. Saley, D. Kouassi, and F. Gnamba, "Caractérisation chimique des eaux des aquifères defracture: Cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire," *Eur. J. Sci. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 72–87, 2009.
- [40] M. H. Rezaie-boroon, J. Chaney, and B. Bowers, "The Source of Arsenic and Nitrate in Borrego Valley Groundwater Aquifer," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 6, no. November, pp. 1589–1602, 2014.
- [41] S. A. Mande, M. Liu, F. Liu, M. L. Bawa, and H. Chen, "Factor analysis as an example of qualitative and quantitative method for modeling hydrogeochemical processes of coastal sedimentary basin of Togo," *African J. Microbiol. Res.*, vol. 5, no. 31, pp. 5554–5559, 2011.
- [42] A. Alassane, R. Trabelsi, L. F. Dovonon, and D. J. Odeloui, "Chemical Evolution of the Continental Terminal Shallow Aquifer in the South of Coastal Sedimentary Basin of Benin (West-Africa) Using Multivariate Factor Analysis," *J. Water Resour. Prot.*, vol. 7, no. April, pp. 496–515, 2015.
- [43] M. Prasad Bala Krishna and A. L. Ramanathan, "Solute Sources and Processes in the Achankovil River Basin , Western Ghats , Southern India / Sources de Solutés et Processus Associés Dans le Bassin du Fleuve Achankovil , Ghats Occidentaux , Inde du Sud Solute sources and processes in the Achankovil Riv," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 50, no. 2, pp. 340–354, 2005.