

DISCRIMINATION PHYSICO-CHIMIQUE DES RÉSERVOIRS HYDRIQUES EN MILIEU DE SOCLE : CAS DU BASSIN VERSANT DE KOLONDIÈBA AU SUD DU MALI

**Amidou DAO^{1*}, Bamory KAMAGATE¹, Adama MARIKO²,
Hamadoun Bokar MAIGA², Albert GOULA BI TIE¹
et Issiaka SAVANE¹**

*¹Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Géosciences et
Environnement, 02 BP 801 Abidjan 01, Côte d'Ivoire*

*²Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT),
BP 242 Bamako, Mali*

*Correspondance, e-mail : daoamidou@hotmail.fr

RÉSUMÉ

Le bassin versant de Kolondieba situé en milieu soudanien de socle au Sud du Mali, a été retenu dans le cadre du programme RIPIECSA (Recherches Interdisciplinaires et Participatives sur les Interactions entre Ecosystèmes, Climats et Sociétés en Afrique) pour étudier la relation entre les écoulements et les réservoirs hydriques souterrains dans un contexte de forte variabilité climatique et intensification agricole. L'objectif de cet article est de parvenir à la discrimination physico-chimique entre les réservoirs d'altérites et les réservoirs de socle fissuré. Cette discrimination est basée sur la méthode des RNA (Réseaux de Neurones Artificiels) compilée avec le modèle SOM (Self Organising Map). Les données d'entrée du modèle sont douze paramètres physico-chimiques (pH, T°C, CE, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) issus des nappes d'altérites et des nappes de socle, captées respectivement dans les puits et les forages. Les résultats ont montré que les nappes d'altérites plus superficielles se différencient par leur composition chimique plus importante en anions (HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻) tandis que les nappes de socle se distinguent par leur température plus élevée et leur richesse en cations (Ca²⁺ et Na⁺).

Mots-clés : *réseau de neurones artificiels, discrimination physico-chimique, réservoirs d'altérites, réservoirs de socle fissuré, bassin versant de Kolondieba.*

ABSTRACT

Physicochemical discrimination of water reservoirs in granitic basement : the case study of watershed Kolondieba in the south of Mali

The watershed Kolondieba in the south of Mali was selected by the research program RIPIECISA (Interdisciplinary Research and Participatory on Interactions between Ecosystems, Climate and Societies in Africa) to study the relationship between runoff and groundwater in a strong climate variability and agricultural intensification context. The aim of this paper is to achieve the physico-chemical discrimination between shallow aquifers and deep aquifers. This discrimination is based on the method of ANN (Artificial Neural Network) complied with SOM model (Self Organising Map). The input data of the model are twelve (12) physico-chemical parameters (pH, T°C, EC, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) sampled on the watershed from superficial groundwater and deep ones, respectively captured in wells and drills. The results showed that shallow aquifers differ in their chemical by larger composition in anions (HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻) while deep aquifers are differentiated by their temperature more high in cations (Ca²⁺ and Na⁺).

Keywords : *Artificial Neural Network, physico-chemical discrimination, shallow aquifers, deep aquifers, watershed Kolondieba.*

I - INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest a subi une sécheresse particulièrement forte durant les quarante dernières années. Calculé par rapport à la période 1950-1970, le déficit pluviométrique occasionné sur la période 1970-1990 a été d'environ 30% au Sahel (Sénégal, Mali, Burkina Faso et Niger) et légèrement moins marqué pour les pays bordant le golfe de Guinée [1]. Toutefois, la tendance aujourd'hui de cette sécheresse est à la modération notamment dans les zones les plus anciennement marquées comme au Niger et au Burkina [2]. Cette baisse des précipitations a entraîné une chute importante des écoulements des grandes rivières. En effet, le fleuve Sénégal a perdu 60% de ses écoulements pour une baisse pluviométrique de 30% tandis que l'Ouémé au Bénin a perdu 40% de son écoulement pour un déficit des précipitations de 15-20% [3]. Il en est de même pour l'écoulement annuel du Bani au Mali, principal affluent du Niger qui s'est vu amputé de 70% de ses eaux [1]. L'évolution du climat dans le bassin versant Kolondieba entre 1960 et 2011 s'est caractérisée par deux ruptures majeures dans le régime pluviométrique.

Une première intervenue à la fin de la décennie 60 a occasionné un déficit de l'ordre de 20% tandis qu'une seconde après 1992 s'est matérialisée par un excès de 17%. La réponse hydrologique à ce regain a été une augmentation de 100% soit près de 6 fois l'excédent pluviométrique [4]. En plus, la principale activité économique sur le bassin versant de Kolondièba, sous-emboulement du Bani et siège de la présente étude, est la culture du coton dont la superficie exploitée augmente de façon exponentielle depuis 1960 à nos jours [5]. Cette activité destructrice du couvert végétal semble impacter le processus de production de l'écoulement par l'augmentation des ruissellements de types hortonien qui se caractérisent par une incapacité d'infiltration sur sols nus non saturés [6]. Ainsi, dans le cadre du programme international de recherche RIPIECISA (Recherches Interdisciplinaires et Participatives sur les Interactions entre les Ecosystèmes, le Climat et les Sociétés en Afrique), le bassin versant de Kolondièba a été retenu pour caractériser l'impact de la variabilité climatique et de l'intensification agricole sur les ressources en eau.

L'un des objectifs de ce programme est de comprendre le mécanisme de production de l'écoulement et le processus de transfert de flux entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines. Pour y parvenir, notre démarche repose sur l'hypothèse formulée par [7] selon laquelle, à un instant donné, les eaux recueillies à l'exutoire d'un bassin versant proviennent de plusieurs sources attribuées à la vidange de réservoirs spécifiques, situés à différentes profondeurs. En zones sahéliennes, les écoulements sont caractérisés par des écoulements principalement hortonien du fait des sols peu couverts, aux surfaces encroûtées et des nappes relativement profondes avec pour principaux points de recharge le fond des vallées et les mares [8].

En zone soudanienne de socle fissuré comme c'est le cas de cette étude, il est admis que le débit des cours d'eau est majoritairement d'origine souterraine en période d'inter-cruée [1]. Les eaux souterraines y sont logées à la fois dans les réservoirs d'altérites et dans les réservoirs de socle fissurés sous-jacents aux premiers [9]. Dans cet article, notre objectif est d'abord de discriminer les nappes de ces deux types de réservoirs hydriques, afin de comprendre le mécanisme de production de l'écoulement dans un second temps. Pour y parvenir, nous avons appliqué la méthode des réseaux de neurones.

II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de Kolondièba est un sous-bassin du Bani, principal affluent du fleuve Niger au Mali. Il est sous l'influence du climat tropical de transition ou climat sud-soudanien.

C'est un bassin transfrontalier à cheval entre le Mali et la Côte d'Ivoire d'où s'étend moins de 5% des 3050 km² de sa superficie (**Figure 1**). La pluviométrie annuelle entre 2009 et 2011 (période d'étude) est supérieure à la moyenne calculée sur la période 1960-2011 (1125 mm). Le relief est dominé par des plaines surmontées de quelques sommets isolés dont l'altitude varie entre 320 m et 360 m. La végétation la plus dense est formée de forêts galeries le long des cours d'eau. Au fur à mesure qu'on s'y éloigne elle est clairsemée, offrant une canopée épaisse à moins épaisse.

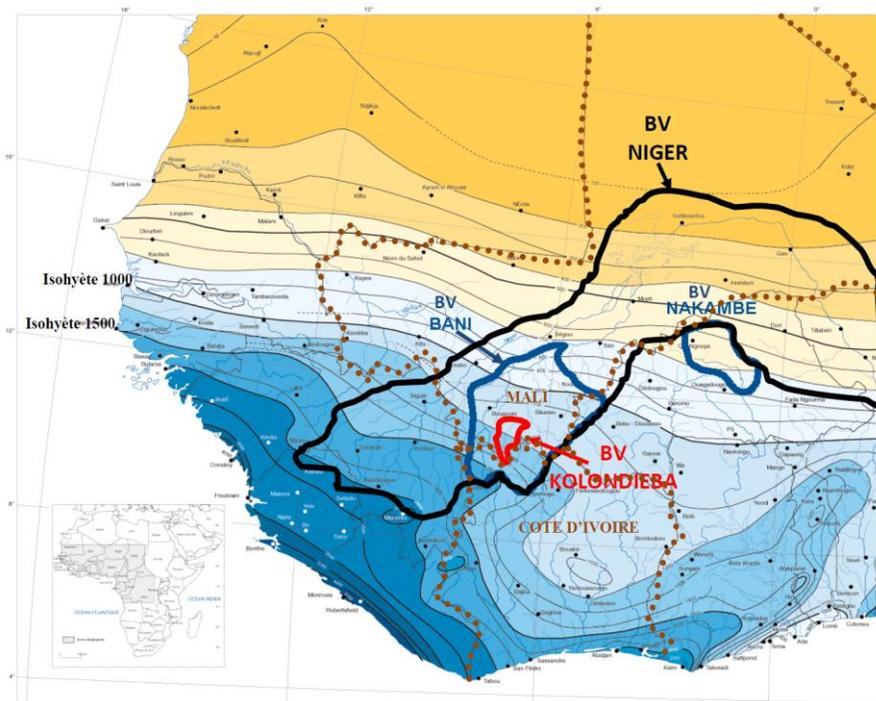


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de Kolondieba

La relation pluie-débit-nappe montre que la recharge des nappes superficielles d'altérites (puits) se fait au fur et à mesure que le niveau de la rivière monte jusqu'à atteindre son maximum en période de pic pluviométrique (août-septembre). Mais peu avant la fin de la saison pluvieuse, la rivière tarit de façon exponentielle jusqu'à son assèchement total (**Figure 2**). Cela pourrait s'interpréter par un faible apport des nappes souterraines dont le rôle est d'assurer l'écoulement de base des cours d'eau [10]. La discrimination des réservoirs hydriques souterrains est donc indispensable à la compréhension du processus de transfert de flux entre le réseau hydrographique et les types de nappes contributives.

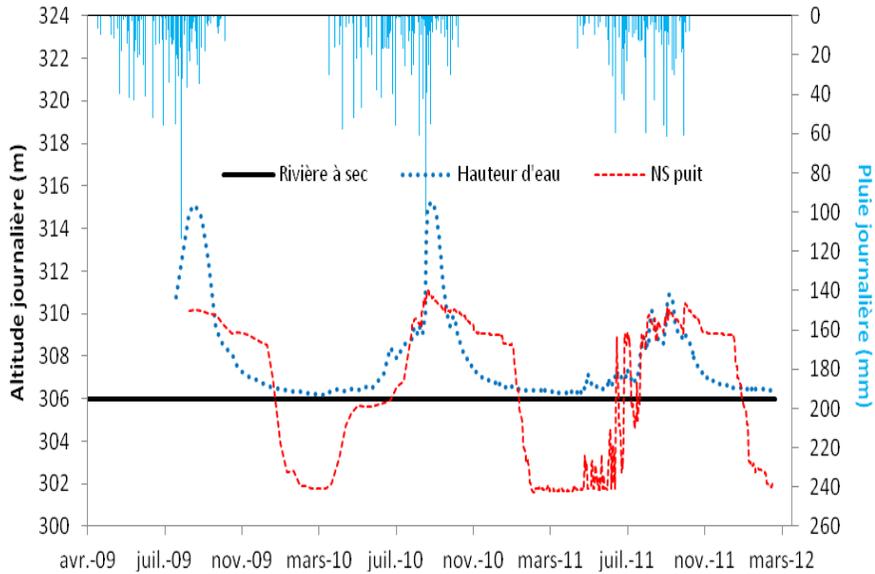


Figure 2 : Relation pluie-débit-nappe à l'exutoire du bassin versant de Kolondièba

La géologie du bassin versant est constituée majoritairement de granite avec une intrusion de schiste en amont et dans sa partie centrale. Les coupes lithostratigraphiques des piézomètres sur le bassin montrent que les réservoirs d'altérites se situent à une profondeur moyenne de 20 m tandis que les réservoirs de socle fissuré sont à environ 40 m (**Figure 3**).

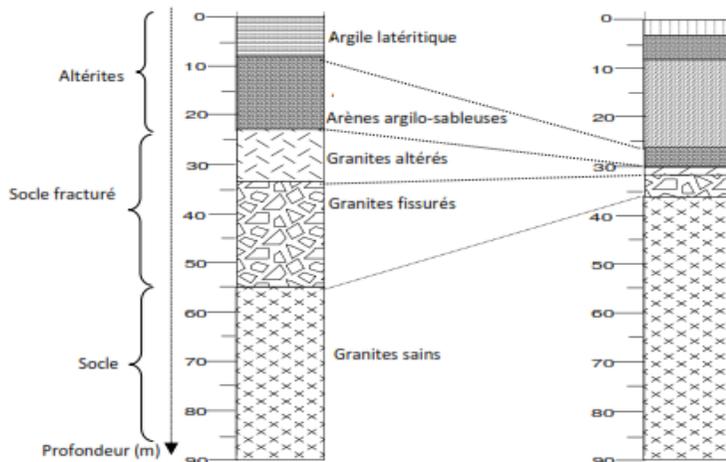


Figure 3 : Coupes lithostratigraphiques des piézomètres sur le bassin versant de Kolondièba

La minéralisation naturelle des eaux en milieu de socle est un ensemble complexe de réactions physico-chimiques (principalement acide-base, échanges ioniques et phénomènes d'oxydoréduction) entre les matrices solides (minéraux) et le milieu aqueux. La composition chimique des eaux naturelles, en dehors des pollutions généralement d'origine anthropique, est le résultat combiné de la composition chimique des précipitations qui atteignent le sol et des réactions avec les minéraux présents dans l'encaissant. La désagrégation mécanique est la première étape du processus de minéralisation des eaux. Elle consiste à l'arrachement, au transfert et à la sédimentation des particules de roche par l'eau [11]. Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et HCO_3^- sont les produits classiques de l'altération des roches silicatées [12].

Leurs concentrations dans l'eau demeurent généralement très peu influencées par les pollutions anthropiques. NO_3^- , K^+ , Cl^- sont souvent issus des pollutions fécales et agricoles mais peuvent aussi avoir des origines naturelles pédologiques. En Côte d'Ivoire de fortes teneurs en NO_3^- dans les nappes de fissure ont été attribuées à la déforestation [13]. En dehors des évaporites l'anhydride ou le gypse (Ca_2SO_4) et des sulfures (pyrite : FeS_2) rares en milieu de socle, SO_4^{2-} ne peuvent provenir que des fertilisants soufrés ou même des lessives souvent pratiquées aux alentours des puits [14]. Tout ceci associé à une lithologie caractérisée par une forte variabilité verticale des formations géologiques peut avoir une incidence notable sur la minéralisation des nappes par conséquent sur la discrimination des niveaux aquifères.

III - DONNÉES ET MÉTHODES

III-1. Données

Le travail expérimental s'est déroulé sur la période 2009-2011. A cet effet, des échantillons d'eau ont été prélevés à l'extrême de la saison sèche (mars-avril) et pendant le pic pluviométrique (août-septembre) sur le bassin versant, dans des puits foncés dans les altérites et dans les forages captant dans le socle fissuré simultanément avec des eaux de surface qui ne seront pas valorisées dans cet article (**Figure 4**). Les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* sont : Température ($T^\circ\text{C}$), pH, Conductivité Electrique (CE) et Total of Dissolved Solids (TDS) ou Solides Totaux Dissous au moyen du multiparamètre CRISON MM 40 tandis que les ions majeurs: Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} sont analysés par spectrométrie au laboratoire de chimie analytique de l'Université de Bamako.

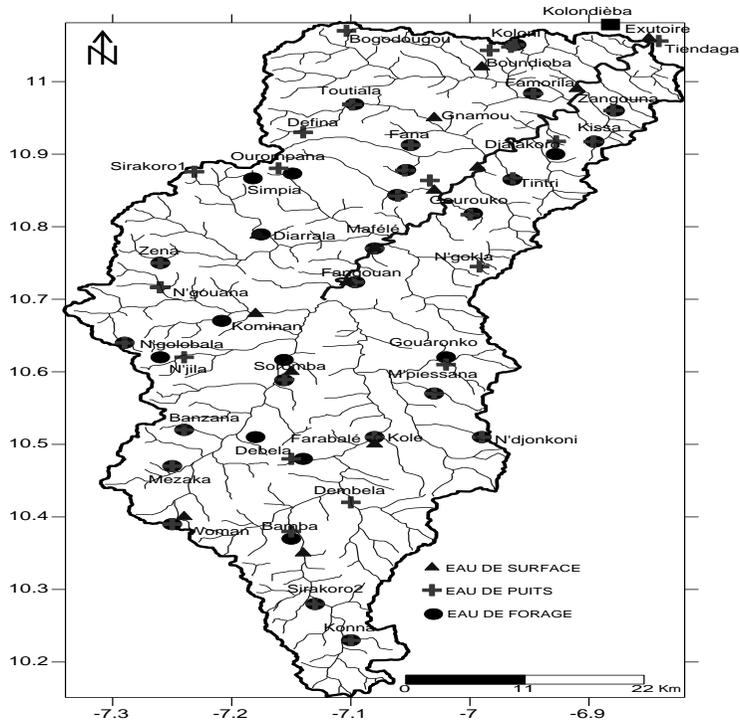


Figure 4 : Sites d'échantillonnage des paramètres physico-chimiques dans le bassin versant de Kolondjié

III-2 Méthodes

III-2-1 Description des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

Le Réseau de Neurones Artificiels (RNA) est un concept qui fonctionne sur le même modèle que le cerveau humain. Chaque neurone représente une fonction algébrique [15] et chaque point de connexion (appelé coefficient ou poids) entre deux cellules joue le rôle d'une synapse qui est l'élément principal d'interaction entre les neurones (Figure 5).

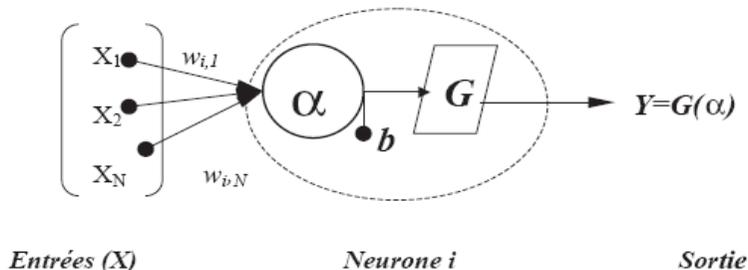


Figure 5 : Neurone artificiel à entrées multiples [15]

Chaque cellule reçoit des entrées sous forme vectorielle (X), effectue une somme pondérée (α) et génère à l'aide d'une fonction de transfert (G) linéaire ou non, un résultat réel (Y) de la forme :

$$Y = G(WX + b) \quad (1)$$

où $W = (W_{i,1}; W_{i,2}; \dots; W_{i,N})$ sont les poids du neurone i ; $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ sont les entrées du neurone i (ou vecteur d'entrée), b est le biais du neurone et $\alpha = (b + WX)$ est la somme pondérée des entrées appelées entrées nettes ou potentielles du neurone i et constitue l'argument de la fonction de transfert ou fonction d'activation G du neurone i . La fonction d'activation non linéaire classique est la fonction sigmoïde inspirée par le neurone formel, définie par :

$$G(\alpha) = (1 - e^{-\alpha})^{-1} \quad (2)$$

III-2-2. Modèle SOM (Self Organising Map)

L'algorithme des cartes auto-organisatrices ou SOM sont des réseaux de neurones non-supervisés qui permettent d'ordonner et de classer des espèces en fonction de leur similarité [16]. Ces modèles neuronaux artificiels partagent avec les algorithmes classiques d'ordination, l'idée de représenter des données multidimensionnelles dans un espace de dimension inférieure (généralement un plan). Contrairement aux méthodes classiques, les SOM traitent avec beaucoup d'aisance les données extrêmes c'est-à-dire de grande abondance ou extrême rareté [17]. Leur application est basée sur une technique de classification non linéaire capable de montrer des patrons simplifiés à partir des bases de données complexes en identifiant des groupes semblables. Ils se composent d'une couche d'entrée qui est la matrice de présence-absence des espèces directement reliée à une couche bidimensionnelle de sortie dite carte de Kohonen. Celle-ci est composée par des neurones artificiels de sortie ou "nodes". Ils estiment les intensités de connexion entre les couches d'entrée et de sortie en utilisant un procédé concurrentiel non supervisé. Ce procédé recherche itérativement des similarités parmi les données observées et les représente sur la carte de sortie. Enfin, les SOM produisent une matrice 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 6*).

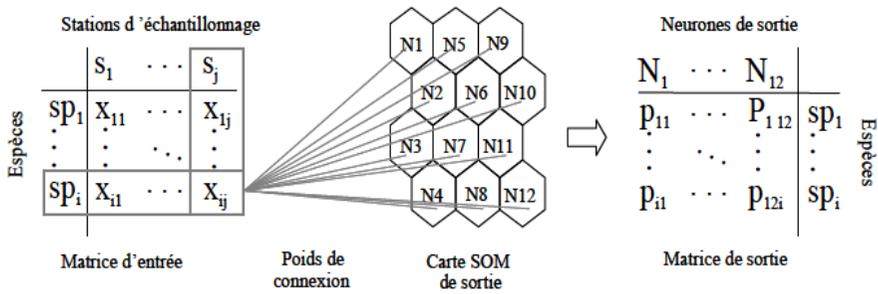


Figure 6 : Représentation simplifiée des SOM [17]

Comme dans les méthodes d’ordination, les deux dimensions (axes) permettent de préserver la topologie (distance relative) et de visualiser la proximité entre les espèces. **La Formule** mathématique qui permet de se rapprocher de la matrice connaissant la taille de l’échantillon ou espèce afin d’éviter plusieurs itérations est la suivante.

$$5\sqrt{N} \tag{3}$$

Avec N la taille de l’échantillon. Les matrices possibles s’obtiennent par les termes de la décomposition du produit $5\sqrt{N}$ en sous multiples consécutifs. Après avoir calculé les erreurs de quantification (QE) et de Topologie (TE) de chaque matrice possible, celle à retenir est celle qui a QE et TE simultanément faibles.

III-2-2-1 Codage des échantillons recueillis sur le bassin versant de Kolondièba pour l’entrée du modèle

Les douze (12) paramètres physico-chimiques : T° , pH, CE, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-} mesurés dans les échantillons de puits et de forages, sont les données d’entrée du modèle SOM dont l’exécution se fait sous le logiciel MATLAB. Leurs “ poids ” sont estimés à la sortie dans des cellules sur la carte de Kohonen. Dans un souci d’obtenir une même matrice représentative du bassin versant aussi bien en saison sèche qu’humide, il a été choisi 60 échantillons en saison sèche et 56 en saison humide constitués du couple (puits, forage) par localité noté (Px, Fx). La lettre “P” représente puits et la lettre “F” forage, les indices x représentent l’ordre alphabétique des localités. Par exemples, (P₁, F₁), (P₂, F₂) représentent les couples (puits, forage) choisis respectivement dans les localités Bamba et Banzana (cf. **Figure 4**). Les matrices obtenues à partir de la taille des deux échantillons en fonction de l’**Equation 3** sont de la forme (8X7).

III-2-2-2 Méthode d'interprétation des résultats à la sortie du modèle SOM

A la sortie du modèle, les "poids" des paramètres dans les cellules sont évalués par un code couleur compris entre 1 et 5 (**Figure 7**).

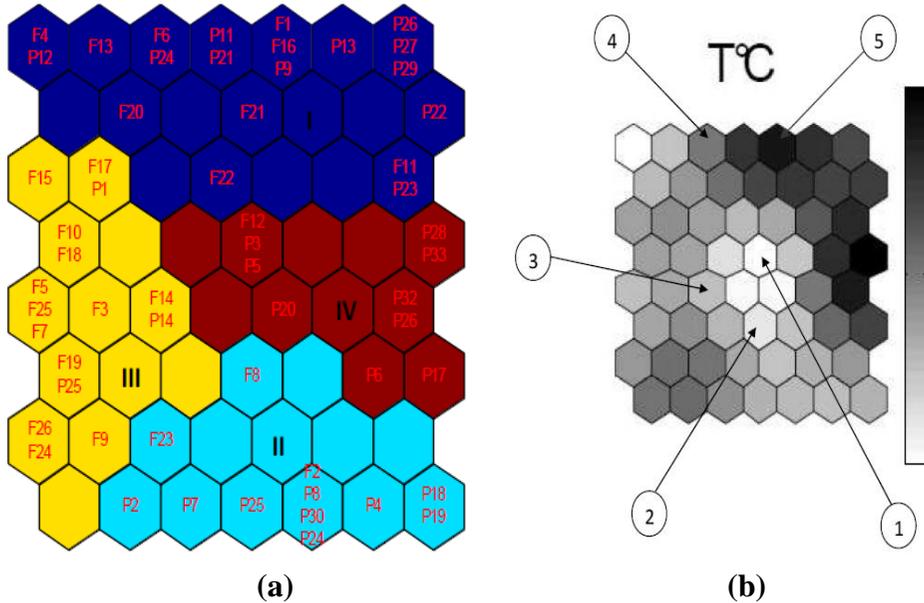


Figure 7 : Exemple de mise en relation des échantillons (a) et leur code (b) sur la même matrice de Kohonen pour le paramètre $T^{\circ}C$

Le «poids» du paramètre dans l'échantillon s'obtient en établissant le rapport entre la position de l'échantillon dans une cellule et son code couleur. Par exemples les échantillons F₂₆ et F₂₄ correspondent au code 4 ; P₂₈ et P₃₃ correspondent au code 5 ; F₁₂, P₃ et P₅ correspondent au code 1. Ainsi, l'écart entre la moyenne des codes pour le paramètre étudié dans les forages et les puits dans un même groupe est noté Em . Il permet d'apprécier la dominance de ce paramètre dans les deux types de réservoirs et les discriminer. L'écart de moyenne Em se calcul par la formule suivante:

$$Em = mF - mP \quad (4)$$

avec mF = moyenne des codes du paramètre étudié dans les différents forages du groupe, mP = moyenne des codes du paramètre étudié dans les différents puits du groupe.

- Si $m^F = m^P$, alors $Em = 0$, par conséquent pas de discrimination entre réservoirs de socle et d'altérites pour le paramètre étudié.
- Si $m^F > m^P$, alors $Em > 0$, par conséquent le paramètre étudié est plus dominant dans les réservoirs de socle que d'altérites.
- Si $m^F < m^P$, alors $Em < 0$, par conséquent le paramètre étudié est plus dominant dans les réservoirs d'altérites que de socle.

Une moyenne générale de cet écart est calculée en fonction de celle de tous les groupes de l'espèce (puits ou forage) et permet de faire la discrimination globale entre réservoirs d'altérites et réservoirs de socle sur le bassin versant de Kolondièba.

IV - RÉSULTATS

IV-1. Regroupement des échantillons par affinité

Le regroupement des cellules par affinité est basé sur les dendrogrammes issus de la classification hiérarchique de toutes cellules de la **Figure 8**. Les groupes de cellules sont donc choisis sur la base du critère de Ward dont la distance euclidienne est 1. L'objectif est de conserver le même nombre de groupe d'une saison à une autre. On peut donc remarquer que le groupe I et IV sont liés dans la hiérarchisation ascendante en saison sèche tandis que le groupe II est lié au groupe III. En saison humide, les groupes III et IV sont plus proches et très éloignés des groupes I et II qui sont aussi très distants. Après avoir constitué une carte des quatre (4) groupes de cellules, celle des échantillons lui est superposée (**Figure 9a, b**). Les cartes des 'poids' des douze (12) paramètres physico-chimiques des échantillons sont par la suite générées (**Figure 9a', b'**). Cela fait, on établit la correspondance entre les échantillons et leur code dans chaque cellule.

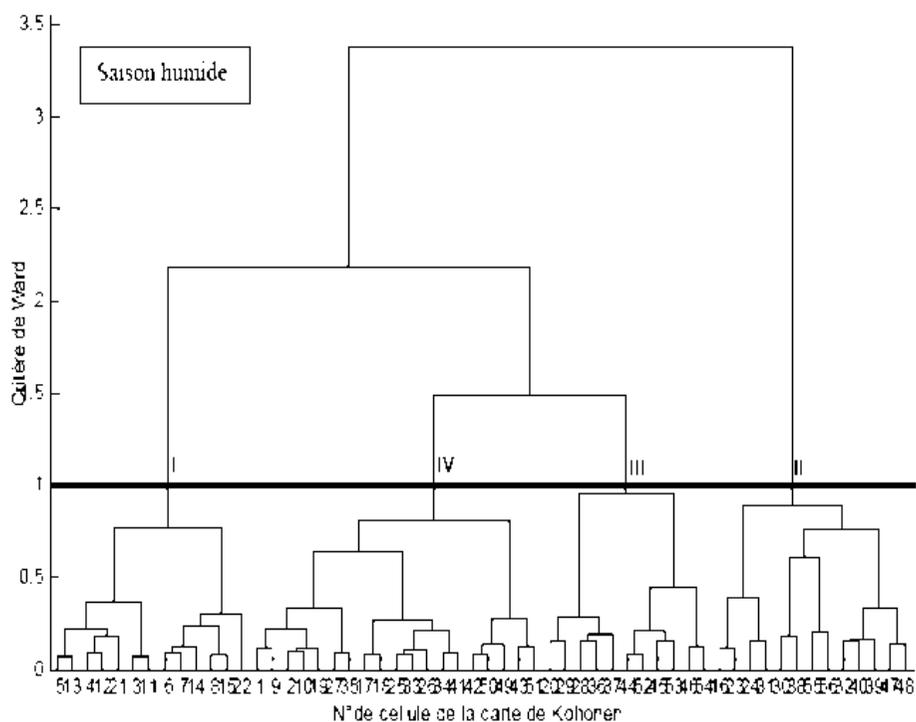
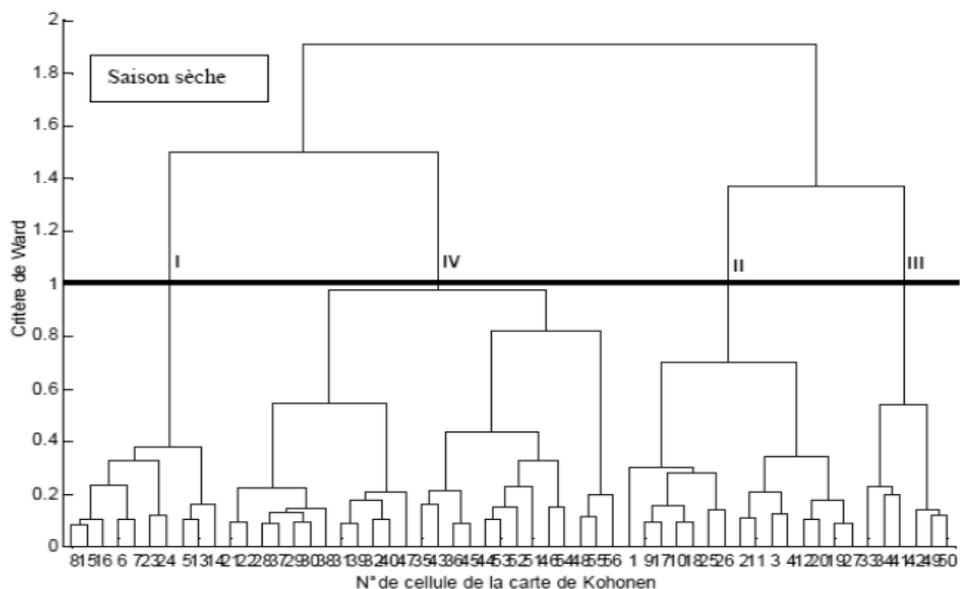


Figure 8 : Dendrogrammes de classification hiérarchique des cellules

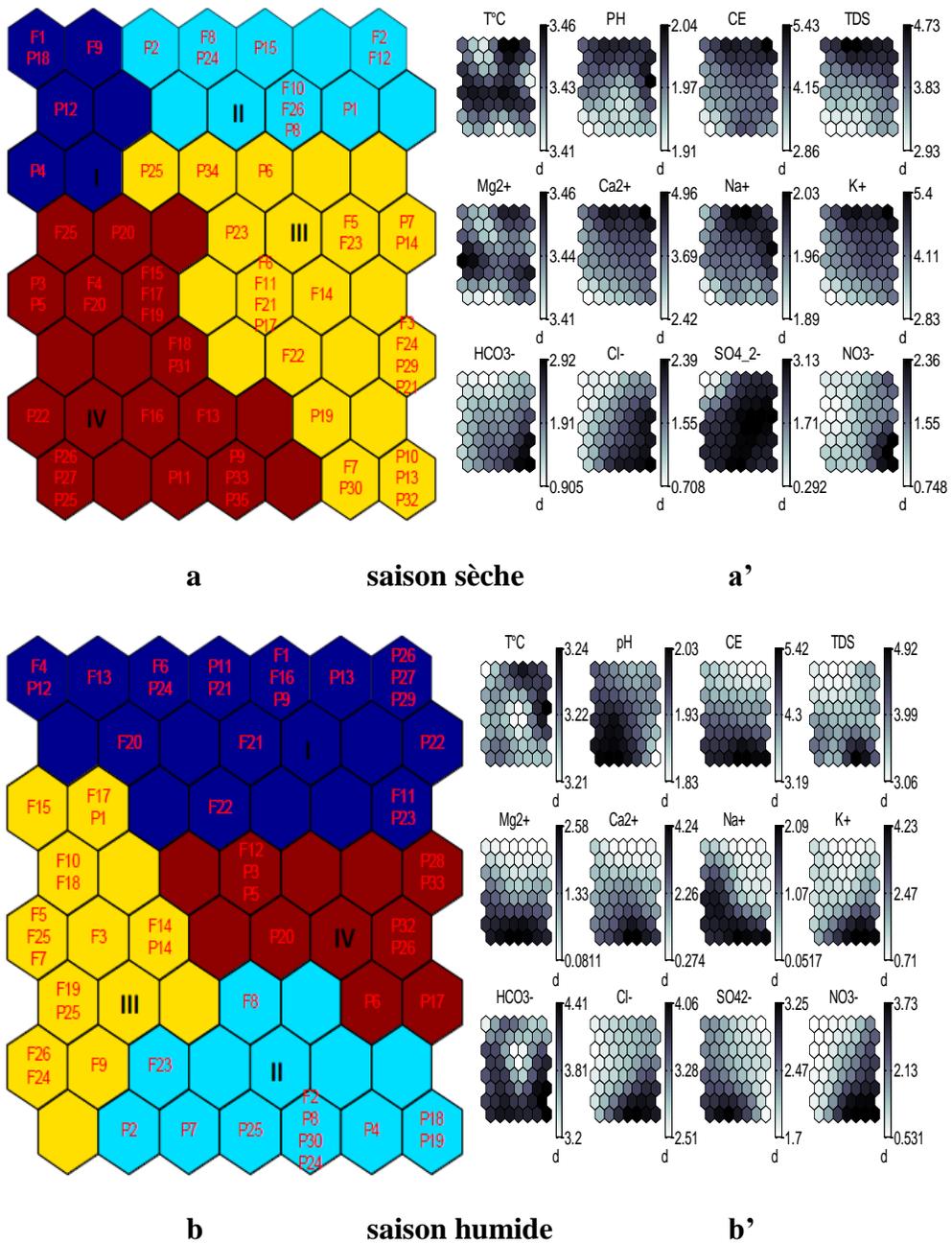


Figure 9 : Répartition des échantillons par groupe (a) et le "poids" de chaque paramètre physico-chimique (b) sur la carte de Kohonen

IV-2. Dénombrement des puits et des forages à la sortie du modèle SOM

En saison sèche, on dénombre 26 forages contre 34 puits sur un effectif de 60 échantillons tandis qu'en saison humide, on dénombre 22 forages contre 34 puits sur un effectif de 56 échantillons (*Tableau 1*). Cela est en accord avec les données d'entrée du modèle. Le nombre d'échantillons de forages et de puits est variable au sein des groupes d'une saison à une autre. Cela semble mettre en évidence un effet de saison qui apparaît comme un facteur très déterminant dans la minéralisation des eaux souterraines du bassin versant de Kolondièba.

Tableau 1 : Résultats du dénombrement des puits et des forages identifiés par groupe d'échantillon sur la carte de Kohonen (N = taille échantillon, nF = nombre de Forage, nP = nombre de Puits)

Saison	Groupe	N	nF	nP
Saison sèche	I	05	02	03
	II	10	05	05
	III	24	10	14
	IV	21	09	12
Total	04	60	26	34
Saison humide	I	20	09	11
	II	12	03	09
	III	14	09	05
	IV	10	01	09
Total	04	56	22	34

IV-3. Interprétation des résultats

Pour rappel, l'interprétation des écarts de moyenne (Em) permet de faire la discrimination physico-chimique entre les réservoirs d'altérites représentées par les eaux de puits et les réservoirs de socle par les eaux de forages. Cette discrimination est faite distinctement en saison sèche et en saison humide au sein des 4 groupes d'une part et sur l'ensemble du bassin d'autre part.

IV-3-1 Discrimination par groupe d'échantillon

Tableau 2 : Discrimination physico-chimique en saison sèche (groupe I)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison sèche)									
Gpe	Paramètre	Forage			Puits			mP	Em
		F ₁	F ₉	mF	P ₄	P ₁₂	P ₁₈		
I	pH	4	4	4	5	5	4	5	-1
	T°C	4	4	4	4	5	4	4	0
	CE	4	4	4	4	5	4	4	0
	TDS	4	4	4	4	5	4	4	0
	Mg ²⁺	4	2	3	4	4	4	4	-1
	Ca ²⁺	4	3	3	4	4	4	4	-1
	Na ⁺	3	3	3	4	4	3	4	-1
	K ⁺	4	3	3	4	4	4	4	-1
	HCO ₃ ⁻	4	1	3	2	2	4	3	0
	Cl ⁻	4	1	3	1	1	4	2	1
	SO ₄ ²⁻	2	1	2	2	1	2	2	0
	NO ₃ ⁻	4	2	3	1	1	4	2	1

Interprétation Tableau 2

Em < 0 pour les paramètres pH, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺ donc paramètres plus dominants dans les nappes d'altérites que de socle.

Em > 0 pour les paramètres Cl⁻, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres T°C, CE, TDS, HCO₃⁻, SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 3 : Discrimination physico-chimique en saison sèche (groupe II)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison sèche)														
Gpe	Paramètre	Forage					Puits							
		F2	F8	F10	F12	F26	mF	P1	P2	P8	P15	P24	mP	
II	pH	4	4	5	4	5	4	4	1	5	5	4	4	0
	T°C	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
	CE	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	4	1
	TDS	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	4	0
	Mg ²⁺	4	4	4	4	4	4	4	2	4	5	4	4	0
	Ca ²⁺	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	4	1
	Na ⁺	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	0
	K ⁺	5	5	4	5	4	5	4	4	4	4	5	4	1
	HCO ₃ ⁻	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1
	Cl ⁻	3	1	3	3	3	3	2	1	3	2	1	2	1
	SO ₄ ²⁻	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	0
	NO ₃ ⁻	4	1	4	4	4	3	2	2	4	3	1	2	1

Interprétation Tableau 3

Em > 0 pour les paramètres CE, Ca²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres pH, T°C, TDS, Mg²⁺, Na⁺, SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètre

Tableau 4 : Discrimination physico-chimique en saison sèche (groupe III)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison sèche)																															
Cp	Paramètre	Forage										Puits										Em									
		F6	F11	F21	F5	F23	F14	F22	F7	F3	F24	mF	P25	P23	P6	P23	P17	P7	P14	P19	P30		P29	P21	P10	P13	P32	mP			
III	pH	5	5	5	4	4	5	5	3	4	4	4	2	4	4	4	4	5	1	1	3	3	4	4	3	3	3	3	3	1	
	T°C	2	2	2	4	4	4	2	3	4	4	3	3	2	3	4	2	5	5	2	3	4	4	3	3	3	3	3	3	0	
	CE	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	0	
	TDS	2	2	2	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	4	2	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	
	Mg ²⁺	4	4	4	3	3	4	2	4	5	5	4	2	3	3	3	4	3	3	4	4	5	5	4	4	4	4	4	4	0	
	Ca ²⁺	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	1	
	Na ⁺	4	4	4	4	4	4	5	3	4	4	4	3	3	4	4	4	5	5	2	3	4	4	3	3	3	3	3	4	0	
	K ⁺	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4	0	
	HCO ₃ ⁻	3	3	3	4	4	3	3	5	5	5	4	2	2	2	4	3	3	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	0
	Cl ⁻	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	4	2	2	3	4	4	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	0
	SO ₄ ²⁻	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	NO ₃ ⁻	4	4	4	3	3	3	3	5	5	5	4	1	2	2	3	4	3	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	0

Interprétation Tableau 4

Em > 0 pour les paramètres pH et Ca²⁺ donc paramètres plus dominant dans les nappes de socle que d’altérites.
 Em = 0 pour les paramètres T°C, CE, TDS, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 5 : Discrimination physico-chimique en saison sèche (groupe IV)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison sèche)																								
Gpe	Paramètres	Forage									Puits													
		F25	F4	F20	F15	F17	F19	F18	F16	F13	mF	P3	P5	P20	P31	P22	P25	P26	P27	P11	P9	P33	P35	mP
	pH	4	5	5	5	5	5	5	3	5	4	4	3	5	3	3	3	3	2	1	1	1	3	2
	T°C	3	4	4	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1
	CE	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	2	1	1	1	4	4	4	4	2	2
	TDS	3	3	3	3	3	3	2	2	1	2	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mg ²⁺	4	5	5	5	5	5	3	2	3	4	5	5	4	3	3	2	2	2	1	1	1	1	2
	Ca ²⁺	3	3	3	4	4	4	3	2	3	3	3	3	3	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1
IV	Na ⁺	3	4	4	4	4	4	3	3	4	3	4	4	3	3	1	1	1	1	3	4	4	4	2
	K ⁺	3	3	3	4	4	4	3	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	2	2	2	2	1
	HCO ₃ ⁻	2	2	2	3	3	3	3	3	4	3	2	2	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2
	Cl ⁻	2	2	2	3	3	3	3	3	4	3	2	2	2	3	2	2	2	2	5	5	5	5	3
	SO ₄ ²⁻	4	4	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
	NO ₃ ⁻	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	2	2	2	1

Interprétation Tableau 5

Em > 0 pour les paramètres pH, T°C, CE, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺ et HCO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 6 : Discrimination physico-chimique en saison humide (groupe I)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison humide)																							
Gpe	Paramètres	Forage										Puits										Em	
		F4	F13	F20	F6	F21	F22	F11	F1	F16	mF	P12	P24	P11	P21	P13	P26	P27	P29	P22	P23		P9
I	pH	1	2	3	3	4	2	4	5	5	3	1	3	4	4	4	4	4	4	5	5	4	-1
	T°C	4	3	4	3	3	4	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0
	CE	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	0
	TDS	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	1	2	0
	Mg ²⁺	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	Ca ²⁺	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Na ⁺	2	2	3	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	K ⁺	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0
	HCO ₃ ⁻	1	2	3	4	2	1	4	3	3	3	1	4	4	4	2	2	2	2	3	3	3	0
	Cl ⁻	1	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	0
	SO ₄ ²⁻	3	3	4	3	2	2	1	2	2	2	3	3	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1
NO ₃ ⁻	1	1	1	1	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	1	2	-1	

Interprétation Tableau 6

Em < 0 pour les paramètres pH, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes d'altérites que de socle.

Em > 0 pour les paramètres Ca²⁺, Na⁺, SO₄²⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres, T°C, CE, TDS, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 7 : Discrimination physico-chimique en saison humide (groupe II)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison humide)		Forage				Puits										<i>Em</i>	
Gpe	Paramètres	F23	F8	F2	mF	P2	P7	P25	P8	P30	P24	P4	P18	P19	<i>mP</i>		
II	pH	3	4	3	3	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	1	
	T°C	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	4	1	
	CE	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	
	TDS	3	3	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	5	-1
	Mg ²⁺	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	Ca ²⁺	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	Na ⁺	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	K ⁺	4	3	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-1
	HCO ₃ ⁻	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
	Cl ⁻	4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-1
	SO ₄ ²⁻	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	4	1
	NO ₃ ⁻	4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-1

Interprétation Tableau 7

Em < 0 pour les paramètres TDS, K⁺, Cl⁻, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes d'altérites que de socle.

Em > 0 pour les paramètres pH, T°C, SO₄²⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres CE, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 8 : Discrimination physico-chimique en saison humide (groupe III)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison humide)																				
Gpe	Paramètres	Forage										Puits							mP	Em
		F15	F17	F10	F18	F25	F7	F3	F14	F26	F24	F19	Mf	P1	P5	P14	P9	P25		
III	pH	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	0
	T°C	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	0
	CE	3	3	3	3	4	4	4	3	5	5	4	4	3	4	3	5	4	4	0
	TDS	2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	3	3	0
	Mg ²⁺	3	3	3	3	4	4	4	2	5	5	4	4	3	4	2	5	4	4	0
	Ca ²⁺	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	3	3	0
	Na ⁺	4	4	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	4	5	3	5	5	4	1
	K ⁺	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
	HCO ₃ ⁻	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	0
	Cl ⁻	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	0
	SO ₄ ²⁻	3	3	3	3	3	3	3	2	4	4	3	3	3	3	2	4	3	3	0
NO ₃ ⁻	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	

Interprétation Tableau 8

Em > 0 pour le paramètre Na⁺ donc paramètre plus dominant dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres pH, T°C, CE, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres dans le groupe III.

Tableau 9 : Discrimination physico-chimique en saison humide (groupe IV)

Codage du poids des paramètres physico-chimiques dans les échantillons (saison humide)														
Gpe	Paramètres	Forage		Puits										Em
		F12	mF	P3	P5	P20	P6	P28	P33	P32	P26	P17	mP	
IV	pH	1	1	1	1	1	4	5	5	5	5	4	3	-2
	T°C	5	5	5	5	4	3	3	3	3	3	2	3	2
	CE	2	2	2	2	3	4	3	3	3	3	4	3	-1
	TDS	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	0
	Mg ²⁺	2	2	2	2	2	4	3	3	3	3	4	3	-1
	Ca ²⁺	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	0
	Na ⁺	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1
	K ⁺	2	2	2	2	2	4	3	3	3	3	3	3	-1
	HCO ₃ ⁻	1	1	1	1	2	5	5	5	5	5	5	4	-3
	Cl ⁻	2	2	2	2	2	4	3	3	4	4	5	3	-1
	SO ₄ ²⁻	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	0
	NO ₃ ⁻	2	2	2	2	3	5	5	5	4	4	5	4	-2

Interprétation Tableau 9

Em < 0 pour les paramètres pH, CE, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes d'altérites que de socle.

Em > 0 pour les paramètres T°C, Na⁺, donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

Em = 0 pour les paramètres, TDS, Ca²⁺, SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

IV-3-2 Discrimination par réservoir hydrique

Tableau 10 : Discrimination physico-chimique en saison sèche

Gpe	Paramètre	mF	mP	Gpe	Paramètre	mF	mP	Gpe	Paramètre	mF	mP	Gpe	Paramètre	mF	mP
I	pH	4	5	I	T°C	4	4	I	CE	4	4	I	TDS	4	4
II	pH	4	4	II	T°C	4	4	II	CE	5	4	II	TDS	4	4
III	pH	4	3	III	T°C	3	3	III	CE	4	4	III	TDS	3	3
IV	pH	5	3	IV	T°C	3	2	IV	CE	4	2	IV	TDS	2	1
	Moyenne	4	4		Moyenne	4	3		Moyenne	4	4		Moyenne	3	3
I	Mg ²⁺	3	4	I	Ca ²⁺	4	4	I	Na ⁺	3	4	I	K ⁺	4	4
II	Mg ²⁺	4	4	II	Ca ²⁺	5	4	II	Na ⁺	4	4	II	K ⁺	5	4
III	Mg ²⁺	4	4	III	Ca ²⁺	4	3	III	Na ⁺	4	4	III	K ⁺	4	4
IV	Mg ²⁺	4	2	IV	Ca ²⁺	3	2	IV	Na ⁺	3	2	IV	K ⁺	3	2
	Moyenne	4	4		Moyenne	4	3		Moyenne	4	4		Moyenne	4	4
I	HCO ₃ ⁻	3	3	I	Cl ⁻	3	2	I	SO ₄ ²⁻	2	2	I	NO ₃ ⁻	2	3
II	HCO ₃ ⁻	2	1	II	Cl ⁻	3	2	II	SO ₄ ²⁻	4	4	II	NO ₃ ⁻	2	3
III	HCO ₃ ⁻	4	4	III	Cl ⁻	4	4	III	SO ₄ ²⁻	5	5	III	NO ₃ ⁻	4	4
IV	HCO ₃ ⁻	3	2	IV	Cl ⁻	3	3	IV	SO ₄ ²⁻	4	4	IV	NO ₃ ⁻	1	1
	Moyenne	3	3		Moyenne	3	3		Moyenne	4	4		Moyenne	2	3

Interprétation Tableau 10

mF - mP < 0 => Em < 0 pour le paramètre NO₃⁻, donc paramètre plus dominant dans les nappes d'altérites que de socle.

$mF - mP > 0 \Rightarrow Em > 0$ pour les paramètres $T^{\circ}C$, Ca^{2+} , donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

$mF - mP = 0 \Rightarrow Em = 0$ pour les paramètres pH, CE, TDS, Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

Tableau 11 : Discrimination physico-chimique en saison humide

Gpe	Paramètre	mF	mP												
I	pH	3	4	I	$T^{\circ}C$	3	3	I	CE	2	2	I	TDS	2	2
II	pH	3	3	II	$T^{\circ}C$	5	4	II	CE	5	5	II	TDS	4	5
III	pH	3	3	III	$T^{\circ}C$	5	5	III	CE	4	4	III	TDS	3	3
IV	pH	1	3	IV	$T^{\circ}C$	5	3	IV	CE	2	3	IV	TDS	2	2
	Moyenne	3	3		Moyenne	5	4		Moyenne	3	4		Moyenne	3	3
I	Mg^{2+}	1	1	I	Ca^{2+}	2	1	I	Na^{+}	2	1	I	K^{+}	1	1
II	Mg^{2+}	5	5	II	Ca^{2+}	5	5	II	Na^{+}	5	5	II	K^{+}	4	5
III	Mg^{2+}	4	4	III	Ca^{2+}	3	3	III	Na^{+}	5	4	III	K^{+}	2	2
IV	Mg^{2+}	2	3	IV	Ca^{2+}	3	3	IV	Na^{+}	2	1	IV	K^{+}	2	3
	Moyenne	3	3		Moyenne	3	3		Moyenne	4	3		Moyenne	2	3
I	HCO_3^{-}	3	3	I	Cl^{-}	2	2	I	SO_4^{2-}	2	2	I	NO_3^{-}	1	2
II	HCO_3^{-}	5	5	II	Cl^{-}	4	5	II	SO_4^{2-}	5	4	II	NO_3^{-}	4	5
III	HCO_3^{-}	4	4	III	Cl^{-}	1	1	III	SO_4^{2-}	3	3	III	NO_3^{-}	1	1
IV	HCO_3^{-}	1	4	IV	Cl^{-}	2	3	IV	SO_4^{2-}	2	2	IV	NO_3^{-}	2	4
	Moyenne	3	4		Moyenne	2	3		Moyenne	3	3		Moyenne	2	3

Interprétation Tableau 11

mF- mP < 0 => Em < 0 pour le paramètre CE, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ donc paramètres plus dominants dans les nappes d'altérites que de socle.

mF- mP > 0 => Em > 0 pour les paramètres T°C, Na⁺ donc paramètres plus dominants dans les nappes de socle que d'altérites.

mF- mP = 0 => Em = 0 pour les paramètres pH, TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻ donc pas de discrimination par rapport à ces paramètres.

V - DISCUSSION

En saison sèche, le rapprochement des groupes I et IV dans la classification ascendante, est assurée par une composition chimique égale en HCO₃⁻ et en SO₄²⁻ aussi bien dans les réservoirs d'altérites que de socle. Les groupes II et III sont très proches du point de vue physico-chimique à l'exception des paramètres Cl⁻ et du NO₃⁻ plus dominants dans les réservoirs de socle que d'altérites. Cela peut s'expliquer par le caractère semi-conductif des aquifères observé par endroit par [18]. En saison humide, les eaux du groupe I et II se rapprochent par Mg²⁺ et HCO₃⁻ mais se différencient par une augmentation du NO₃⁻ dans les réservoirs d'altérites contre une élévation de T°C dans les réservoirs de socle. Les groupes III et IV sont liés par Ca²⁺, SO₄²⁻ et TDS dans les deux types de réservoirs. Les paramètres physico-chimiques de chaque groupe d'échantillon varient fortement d'une saison à une autre sauf dans les groupes III où les 12 paramètres ne permettent pas une véritable discrimination des réservoirs.

Sur les douze (12) paramètres physico-chimiques considérés dans l'ensemble des eaux souterraines du bassin, pH, TDS, Mg²⁺ et SO₄²⁻ sont globalement invariants d'une saison à une autre. Parmi ceux-ci, le Mg²⁺ dont la cinétique de mise en solution est très lente, est un bon indicateur du temps de résidence de l'eau souterraine [19]. Les réservoirs d'altérites se démarquent par un excès de K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻ et NO₃⁻, produits de la respiration racinaire et de la minéralisation de la matière organique du sol selon [12]. Mais, ils peuvent provenir de la précipitation du CO₂ dégagé par les feux de brousse pratiqués massivement chaque fin d'hivernage, des dérivés chlorés et des engrais de types NPK utilisés dans la culture intensive du coton sur le bassin versant. Les autres paramètres Ca²⁺, Na⁺, produits classiques de l'altération des roches silicatées [14] y compris le T°C, discriminent les nappes de socle.

VI - CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de faire une discrimination physico-chimique entre les réservoirs d'altérites et les réservoirs de socle fissuré par les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). Cette méthode a permis de mettre en évidence les spécificités géochimiques intrinsèques à chaque type de réservoir hydrique. En effet, les réservoirs d'altérites se différencient par leur richesse en anions (HCO_3^- , Cl^- et NO_3^-) produits majoritairement issus de la respiration racinaire, de la minéralisation de la matière organique du sol et des intrants agricoles. Les réservoirs de socle plus profonds se différencient par les cations (Ca^{2+} , Na^+) produits classiques de l'altération des roches silicatées en milieu de socle. Une fois ces deux types de réservoirs différenciés, la prochaine étape de notre travail consiste à caractériser la signature chimique des précipitations et des eaux de surface en vue de la détermination de l'origine de l'écoulement sur le bassin versant de Kolondièba.

REMERCIEMENTS

Sincères remerciements au comité de pilotage du programme RIPIECSA pour avoir initié ce réseau de recherche, au comité de pilotage du programme AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analyses) et à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) pour leur synergie avec RIPIECSA dans divers ateliers et conférences qu'ils ont organisés dans le cadre notre formation.

RÉFÉRENCES

- [1] - G.MAHE, P. DIELLO, J.P. PATUREL, B. BARBIER, H. KARAMBIRI, A. DEZETTER, C. DIEULIN, N. ROUCHE "Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel: impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambé au Burkina Faso", Sécheresse, 21 (4) (2010) 330-332.
- [2] - T.LEBEL, & A. ALI "Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007)", Journal of Hydrology. 375 (1-2), (2009) 52-64.
- [3] - T.LEBEL & T. VISCHEL, "Climat et cycle de l'eau en zone tropicale: un problème d'échelle" Comptes rendus de Geosciences. 337 (2005) 29-38.
- [4] - A. DAO, B. KAMAGATE, A. MARIKO, B. T. A. GOULA, L. SEGUIS, H. B. MAIGA, I. SAVANE, "Impact de la variabilité climatique et réponse hydrologique du bassin versant transfrontalier de Kolondièba au Sud du Mali" European Journal of Scientific Research (43) 4. (2010) 434-444.

- [5] - CMDT, "Bilan technique de production agricole en zone CMDT (Compagnie Malienne pour le Développement du Textile): campagne 2002-2003", Communication à la réunion de concertation IER-CMDT-OHVN, Bamako, N°Tarla les 19, 20 et 21 février 2003, 43 p.
- [6] - P.DIELLO, "Interrelations Climat-Homme-Environnement dans le Sahel Burkinabé: impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique", Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier2, 304p, (2007).
- [7] - L. SÉGUI, B. KAMAGATÉ, G. FAVREAU, M. DESCLOITRES, J.-L. SEIDEL, S. GALLE, "Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa) Inter-annual variability of water budget" *Journal of Hydrology*. 402, (2011)1–13.
- [8] - G. FAVREAU, "Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel: dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du Kori de Dantiandou (Sud-ouest du Niger)" Thèse de doctorat, Université de Paris XI, 258 p (2000).
- [9] - G. CASTANY, "Traité pratique des eaux souterraines", Dunod, Paris, (1998).
- [10] - Y. TARDY, V. BUSTILLO, & J-L. BOEGLIN, "Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa", *Applied Geochemistry* (19) (2004) 469–518.
- [11] - R.L. Fornis, H.R. Vermeulen, & J.D. Nieuwenhuis, "Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies" *Journal of Hydrology*. 300, (2005) 20-32.
- [12] - C.A.J. APPELO & D. POSTMA, "Geochemistry, groundwater and pollution" A. ABALKEMA Rotterdam, 536 P (1999).
- [13] - J.P. FAILLAT, "Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone intertropicale humide. Exemple de la Côte d'Ivoire," *Journal of Hydrology*, 113, (1990) 231-264.
- [14] - B. KAMAGATE, 2006, "Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant en milieu tropical de socle au Bénin: bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé)" Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France, 320p, (2006).
- [15] - T.KOHONEN, "Self-Organizing Maps. Springer-Verlag, Series" in *Informatique Sciences*, 30, Heindelberg, 362p, (1995).
- [16] - K. F. KONAN, "Composition, structure et déterminisme de la diversité ichtyologique des rivières côtières du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (Soumié - Eholié - Ehania - Noé)" Thèse de l'Université Abobo-Adjamé, 167p (2008).

- [17] - P. COULIBALY, F. ANCTIL, B. BOBÉE, “Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l’art ”. *Can. J. Civ. Eng.* 26(1999)293–304
- [18] - MALI, “Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali. Ministère de l'Industrie de l'Hydraulique et de l'Énergie du Mali, Programme des Nations Unies pour le Développement, préparé par le Département de la Coopération Technique et pour le Développement, projet MLI/84/005, Exploitation, évaluation et gestion des ressources en eaux souterraines” Volume I: Rapport, 289 p., volume II, annexes, 113 p, (1990).
- [19] - B.Garry, “Etude des processus d’écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques : expérimentation hydrodynamique et hydrochimique sur les sites du laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB) de Rustrel et de fontaine de Vaucluse” Thèse de Doctorat de l’Université d’Avignon et des pays du Vaucluse, 212p, (2007).