

Différenciation hydrogéochimique entre les nappes superficielles des altérites et profondes du socle fissuré dans le bassin versant de Kolondièba (sud du Mali): approche statistique par la méthode SOM des réseaux de neurones

BAMORY KAMAGATE¹, ADAMA MARIKO³, LUC SEGUIS², AMIDOU DAO¹, HAMADOUN BOKAR³ & DROH LANCINE GONE¹

¹ *Université d'Abobo-Adjamé, Laboratoire de GéoSciences et Environnement, 02 BP 801 Abidjan 01*
kambamory2@yahoo.fr

² *HydroSciences Montpellier, Université de Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 5, France*

³ *Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT), BP 242 Bamako, Mali*

Résumé Le bassin versant de Kolondièba (3010 km², sous-bassin versant du Bani, principal affluent du Fleuve Niger au Mali, en milieu soudanien de socle), a été retenu dans le cadre du programme international RIPIECISA (Recherches Interdisciplinaires et Participatives sur les Interactions entre les Ecosystèmes, le Climat et les Sociétés en Afrique de l'Ouest) afin de préciser l'impact de la variabilité climatique sur le bilan des flux hydriques. L'objectif de ce travail est mieux caractériser les spécificités hydrogéochimiques des eaux souterraines (nappes d'altérite et de fissures) en vue de mieux comprendre leur contribution dans la production des écoulements. La méthode d'ordination statistique SOM (Self Organising Maps) des réseaux de neurones a été utilisée pour mieux discriminer les individus (points de mesures) en mettant en évidence les relations non linéaires impossibles à obtenir avec les méthodes classiques d'ordination. Aucune particularité chimique nette ne se dégage du fait d'une forte variabilité chimique interne à chacun des aquifères considérés traduisant une possible déconnexion d'une part entre les différentes nappes logées dans les altérites et d'autre part entre les fissures du socle cristallin.

Mots clefs différenciation physico-chimique; réseau de neurones; nappes d'altérite et nappes de socle; RIPIECISA; bassin versant de Kolondièba

Hydrogeochemical differentiation between shallow alterite and deep fractured bedrock aquifers in the catchment of Kolondieba (southern Mali): statistical approach by SOM neural networks

Abstract The Kolondieba watershed (3010 km², sub-watershed of Bani, the main tributary of the Niger River in Mali, in the Soudanian area), was designed under the International Program RIPIECISA (interdisciplinary and participatory research on Interactions between Ecosystems, Climate and Societies in West Africa) to understand the impact of climate variability on the balance of water flow. The objective of this work is to characterize the hydrogeochemical characteristics of groundwater (alterite and bedrock fractured aquifer) to better understand their contribution in the flow production. The statistical method of ordination SOM (Self Organizing Maps) of neural networks was used to discriminate individuals by identifying nonlinear relationships impossible to obtain with conventional methods of ordination. No significant chemical peculiarity can be found due to high chemical variability internal to each aquifer considered, reflecting on a disconnection between the different alterite groundwater on one hand and, on the other, between the fractures of the crystalline basement.

Key words physico-chemical differentiation; neural network; altérite aquifer and fractured aquifer; RIPIECISA; Kolondieba watershed

INTRODUCTION

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 de l'Ouest), le sous-bassin versant du Bani, le bassin versant de Kolondièba (3010 km²) en milieu soudanien de socle a été retenu pour comprendre l'impact du changement climatique et des activités anthropiques sur les ressources en eau. L'un des objectifs de ce projet est la connaissance des mécanismes de production des écoulements et les processus de transfert de flux entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines dans un contexte de forte variabilité climatique.

A un instant donné, les eaux recueillies à l'exutoire d'un bassin versant proviennent de plusieurs sources. Elles sont attribuées à la vidange de réservoirs spécifiques, situés à différentes

profondeurs, de la surface au plus profond (Boeglin & Tardy, 1997). Cependant, il est admis qu'en milieu soudanien, le débits des cours d'eau est majoritairement d'origine souterraine en période d'inter-cruce (Bariac *et al.*, 1995; Gremillon *et al.*, 2000; Tardy *et al.*, 2004; Kamagaté, 2006). En zone de socle, ces eaux souterraines sont à la fois logées dans des aquifères d'altérite et des aquifères du socle fissuré, sous jacents aux premiers. L'objectif de ce travail est de mieux caractériser les spécificités hydrogéochimiques des eaux de ces deux aquifères à partir d'une approche statistique basée sur la méthode SOM (Self Organising Maps) des réseaux de neurone.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de Kolondièba est situé à 95% au sud du Mali, entre les longitudes 7.34°W et 6.82°W et les latitudes 10,15°N et 11.08°N. Seulement 5% du bassin se trouve en Côte d'Ivoire (Fig. 1). Sous climat tropical de transition, ce bassin reçoit en moyenne 1080 mm de pluie par an (calculé sur la période 1960–2008). La saison des pluies dure au moins 6 mois (Mai à Octobre), avec environ 90 jours de pluies par an (Kamaté, 1980). Le réseau hydrographique sur le bassin est plus ou moins dense. Le relief est constitué de plateaux en amont du bassin, de plaines au centre et de bas-fonds en aval dont l'altitude varie en moyenne entre 320 m et 360 m. Il existe cependant des massifs anciens isolés dont les sommets culminent autour de 560 m. La géologie du bassin versant est constituée de socle dans sa majeure partie. On observe une intrusion de schiste du centre au nord avec la direction WSW–ENE comme orientation des fractures majeures. Le sud du bassin est montagneux et marqué par le birrimien (Guiraud & Travi, 1990).

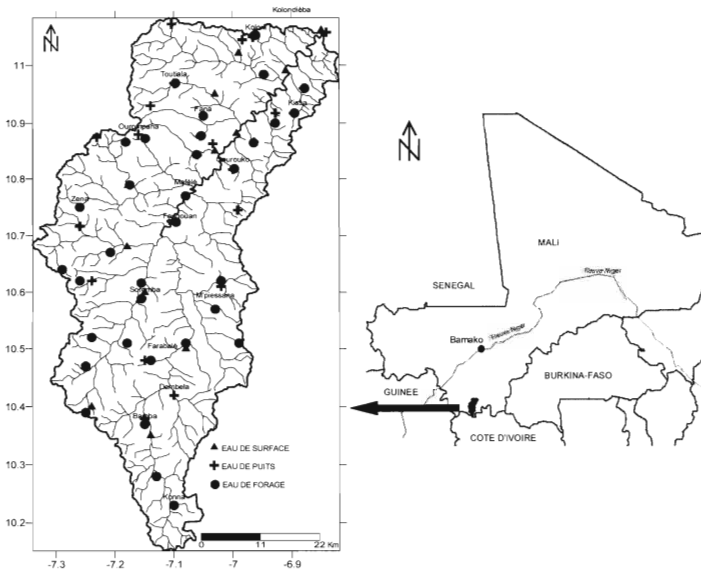


Fig. 1 Situation géographique et points de mesure physico-chimiques.

MATERIEL ET METHODES

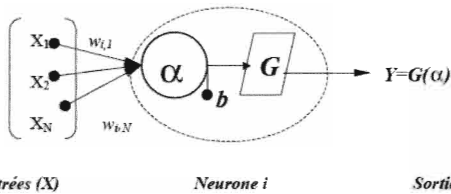
Acquisition des données

Trente et un (31) échantillons d'eau de puits villageois et 29 échantillons d'eau de forages ont été prélevés en saison sèche (Mars 2009). Vingt six échantillons d'eau de puits villageois et 31 échantillons d'eau de forages ont été prélevés en saison humide (Octobre 2009) pour la

caractérisation des eaux souterraines. Les puits villageois sont foncés dans la zone d'altération de nature silteuse ou argilo-sableuse (15–20 m d'épaisseur en moyenne) à nappe phréatique qui tarit par endroit en saison sèche. Plus profonds, les forages d'hydraulique villageoise captent généralement un réservoir constitué de réseau de fractures du socle cristallin. Les échantillons prélevés ont fait l'objet de mesures physico-chimiques *in situ* (conductivité électrique, température, pH) au moyen d'un multimètre CRISON MM 40 et au laboratoire (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-}) par spectrométrie.

Description du modèle SOM

Définitions des réseaux de neurones (RNA). Les réseaux de neurones artificiels fonctionnent sur le même modèle que le cerveau humain composé de neurones. Chaque neurone représente une fonction algébrique (Dreyfus *et al.*, 2002) 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. La représentation mathématique du neurone est illustrée à la Fig. 2.



Entrées (X) Neurone i Sortie

Fig. 2 Neurone artificiel à entrées multiples (Coulibaly, 1998).

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 potentiel 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:"

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

Définition du modèle SOM

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. Comme dans les méthodes d'ordination, les deux dimensions (axes) permettent de préserver la topologie (distance relative) et de visualiser la proximité entre les échantillons. L'algorithme de classification a été développé par Kohonen (1982). Par rapport aux méthodes d'ordination linéaires et de classification habituellement utilisées pour extraire des groupes d'échantillons, dont l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse des Correspondances (AC) et la classification hiérarchique (cluster), ce modèle permet de remédier aux effets "fer à cheval" dans les ACP et "d'arche" dans l'AC qui créent une forte distorsion lorsqu'il y a des relations non-linéaires entre les individus.

Le SOM se compose d'une couche d'entrée qui est la matrice de présence-absence des individus (représenté ici par les points de mesure) qui est directement reliée à une couche bidimensionnelle de sortie dite carte de Kohonen. Celle-ci est composée par des neurones artificiels de sortie ou "nodes"

(Fig. 3). Le SOM estime les intensités de connexion entre les couches d'entrée et de sortie en utilisant un procédé concurrentiel non supervisé, décrit par Kohonen (1982). Ce procédé recherche itérativement des similarités parmi les données observées et les représente dans la carte de sortie. Enfin, le SOM produit 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.

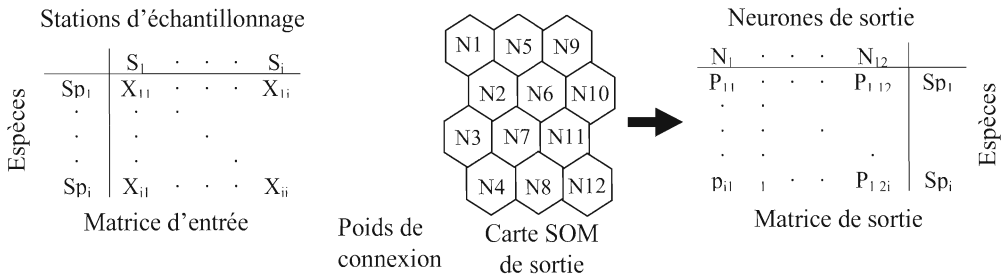


Fig. 3 Représentation simplifiée de la carte auto-organisatrice (SOM).

Étapes de l'application des SOM

Apprentissage de la carte de Kohonen Cela consiste à définir l'architecture d'un RNA qui revient à faire un choix judicieux du vecteur d'entrée, de la taille du réseau (ou nombre total de couches et de neurones), de la structure du réseau, c'est-à-dire le type d'interconnexion entre les couches de neurones et des fonctions de transfert. Les SOM utilisées sont dites non supervisée parce que les valeurs du jeu de données sont uniquement utilisées dans la couche d'entrée et aucune indication concernant les valeurs attendues dans la couche de sortie n'est apportée au système. 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). Selon Kohonen (1982), la QE qui mesure la résolution de la carte est la moyenne des distances entre chaque vecteur d'entrée et son BMU (Best Matching Unit) ou neurone vainqueur. La TE représente la proportion des vecteurs de données pour lesquels les 1er et 2ème BMU ne sont pas adjacents.

Algorithme de l'apprentissage L'apprentissage met en correspondance l'espace des entrées et la carte et elle a pour but d'adapter les poids W de telle manière que des exemples proches dans l'espace d'entrée sont associés au même neurone ou à des neurones proches dans la carte. Les différentes étapes de l'algorithme sont:

- les objets virtuels sont initialisés par des objets pris au hasard parmi le jeu de données;
- un objet réel est choisi au hasard et présenté à la couche d'entrée;
- la distance entre cet objet et chaque objet virtuel est calculée;
- l'objet virtuel le plus proche est dit "Best Matching Unit (BMU)"; et
- tous les neurones au voisinage du BMU sont modifiés (mise en ordre et d'ajustement).

Classification ascendante hiérarchique La classification hiérarchique (Dreyfus *et al.*, 2002) appliquée à la carte consiste à regrouper les échantillons ayant un comportement similaire sur un ensemble de variables. C'est une méthode de classification automatique qui permet d'effectuer la seconde phase nécessaire à l'élaboration du classifieur en regroupant les neurones (Fig. 4). Il s'agit de calculer une hiérarchie de partitions qui permet de regrouper d'une manière différente les neurones. Les différentes partitions sont déterminées de manière itérative, en commençant par la partition la plus fine, composée de l'ensemble des singletons (les neurones). A partir de cette partition initiale, on procède à des regroupements successifs en fusionnant à chaque itération deux sous-ensembles de neurones. Le choix des sous-ensembles est effectué à l'aide d'une mesure de similitude, définie entre deux sous-ensembles. On choisit les deux sous-ensembles de neurones les plus semblables, au sens de la mesure choisie.

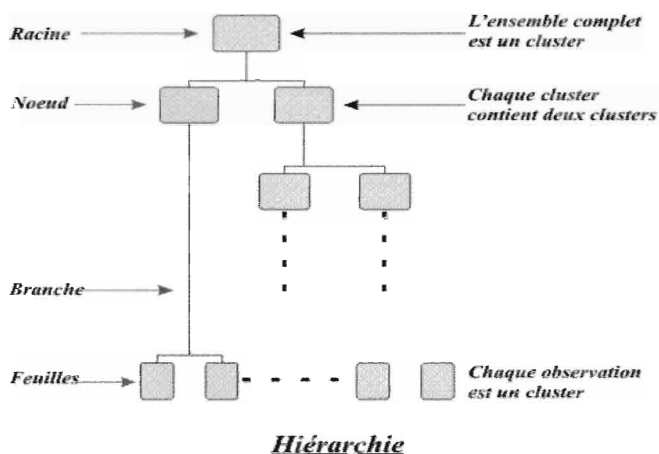


Fig. 4 Hiérarchisation d'une classification non supervisée (Clustering).

RESULTATS DES SOM

Le résultat, sous forme de dendrogramme, est une suite de classifications emboîtées en regroupant les neurones les plus proches, puis les groupes les plus proches au sens d'une distance convenable. Le nombre de groupes provenant de cette classification est laissé au choix de l'utilisateur. Il doit être déterminé selon les objectifs de l'application et l'appréciation de l'analyste (Rousseau *et al.*, 2007). Mais le choix de la matrice représentative des échantillons sur la carte de Kohonen est basé sur les valeurs de paramètres QE et TE qui doivent être simultanément minimisés au mieux et dont le produit est plus proche du résultat $5\sqrt{N}$. L'interface SOM Toolbox (Version 2) sous Matlab® est utilisée pour la réalisation de la carte de Kohonen et la classification a été développée par l'Université de Technologie d'Helsinki (<http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/>). La classification des eaux se fait sur la base des paramètres physico-chimiques qui constituent les paramètres d'entrée du modèle ou variables.

RESULTATS ET DISCUSSION

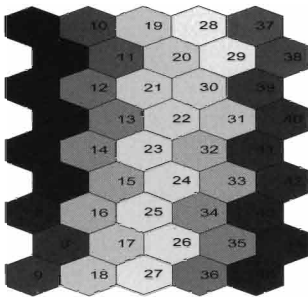
Choix des matrices de sortie

Sur la base des valeurs minimum des paramètres QT et TE, la matrice retenue pour l'ensemble des eaux (eau de surface, nappe d'altérites et nappe de fissure) est indiquée en gras dans le Tableau 1. Il apparaît que cette matrice varie de la saison sèche à la saison humide parce que pour cette dernière saison, la taille N des échantillons est encore plus importante.

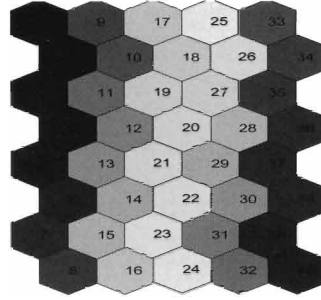
Les paramètres QE et TE ayant été judicieusement choisis, le nombre de neurones générés automatiquement par le modèle SOM est le produit de ces deux paramètres. Ainsi, on retient 40 cellules pour la saison sèche et 45 cellules pour la saison humide (Fig. 5).

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

| Saison | N | $5\sqrt{N}$ | Matrice possible | QE | TE |
|--------|-----|-------------|------------------|-------|-------|
| Sèche | 70 | 40.8 | 7×6 | 0.387 | 0.043 |
| | | | 8×5 | 0.384 | 0.029 |
| | | | 9×5 | 0.413 | 0.000 |
| Humide | 89 | 47.2 | 7×7 | 0.416 | 0.045 |



Saison humide: Matrice 9X5



Saison sèche: Matrice 8X5

Fig. 5 Réseau de neurones générés en fonction des matrices choisies.

Dendrogrammes de la classification hiérarchique

Les dendrogrammes issus de la classification ont permis de regrouper l'ensemble des échantillons en six groupes par saison sur une distance euclidienne de 0.65 (Fig. 6). Cette distance permet de rassembler les cellules par paire de groupes ayant les mêmes ascendants, donc en forte relation. En saison sèche, les cellules du groupe GI et groupe GII forment une paire, le groupe GIII va avec le groupe GIV et le groupe GV avec le groupe GVI. Au delà d'une distance euclidienne supérieure à 1, les échantillons de la saison sèche constitués par les GI, GII, GIII et GIV se rapprochent et semblent se différencier de ceux des groupes GV et GVI. En saison humide, les parités relevées plus haut pour la saison sèche ont disparu au profit de nouvelles parités. Le GI apparaît isolé de l'ensemble des autres groupes. Les GII et GIII d'une part et GIV et GV d'autre part seraient liés, avec une relation moins précise avec le GVI.

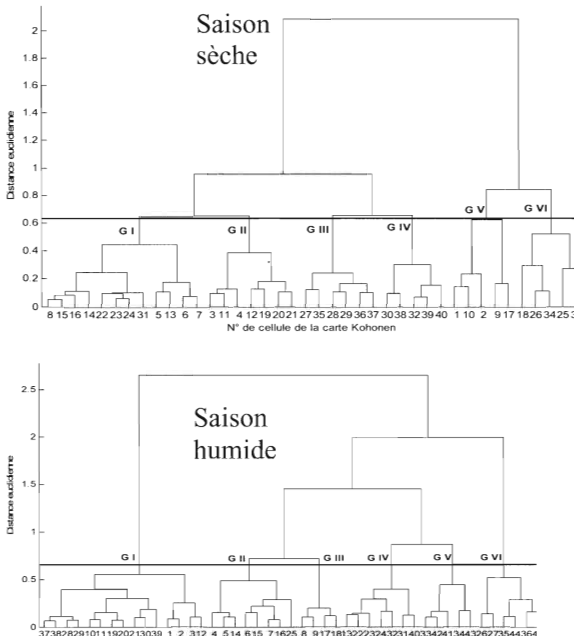


Fig. 6 Dendrogrammes de classification hiérarchique des cellules de la carte de Kohonen sur la base des paramètres physico-chimiques des différentes eaux du bassin versant.

Répartition des échantillons sur la carte de Kohonen

Les échantillons constitutifs des différents groupes générés à partir des dendrogrammes à une distance euclidienne de 0.65 sont repartis sur la carte de Kohonen (Fig. 7). En saison sèche, les G.I et G.II apparaissent homogènes et se caractérisent par le regroupement d'eaux de surface. Les autres groupes (G.III à G.VI) sont plus ou moins hétérogènes car constitués à la fois d'échantillons de puits et de forages dont les proportions varient d'un groupe à un autre et d'une saison à une autre. Cette forte hétérogénéité se conserve en période humide (Tableau 2).

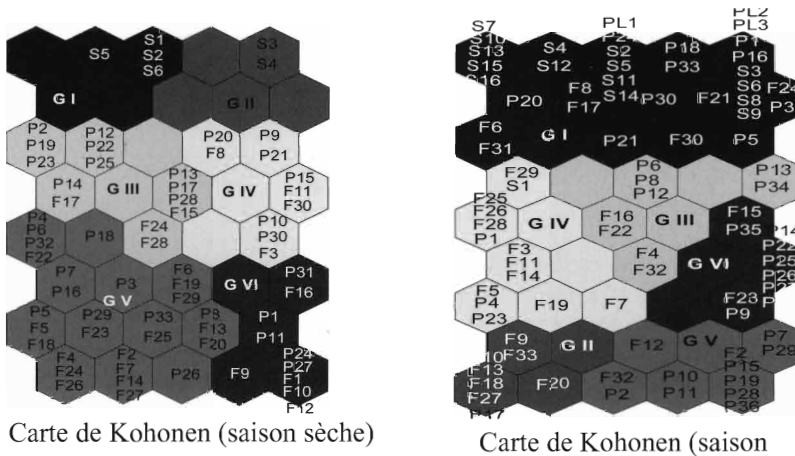


Fig. 7 Répartition des groupes d'échantillons issus des dendrogrammes sur la carte de Kohonen: PL = eau de pluie, S = eau de surface, P = eau de puits, F = eau de forage.

Tableau 2 Nombre d'échantillons par groupe et représentation (%) des puits et forages.

| Saison | Groupe | Echantillon total | % forages (socle) | % puits (altérite) |
|---------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Saison sèche | GI et GII | 0 | 0 | 0 |
| | GIII | 14 | 29 | 71 |
| | GIV | 10 | 40 | 60 |
| | GV | 29 | 59 | 41 |
| | GVI | 9 | 44 | 56 |
| | GI | 17 | 41 | 59 |
| Saison humide | GIII | 7 | 100 | 0 |
| | GIII | 9 | 44 | 56 |
| | GIV | 14 | 71 | 29 |
| | GVI | 10 | 20 | 80 |
| | GV | 12 | 25 | 75 |

Différenciation physico-chimique

En saison sèche, les nappes d'altérite se particularisent par des gradients de HCO_3^- moyen et de Na^+ faible. Les gradients dominants sont uniquement le fait des cations (Mg^{2+} , Ca^{2+} et K^+) pour la plupart des groupes et NO_3^- seulement pour GIV (Tableau 3). Ce comportement des nappes d'altérite est semblable à celui des nappes de fissure pour la même saison et ce schéma est quasiment identique à celui de la saison humide.

Tableau 3 Différenciation physico-chimique en période sèche (variabilité des paramètres semblable à celle de la saison humide).

| Aquifère | Groupe | Nbre points | Intensité des paramètres physico-chimiques | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|-------------|--|------|------|------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| | | | T°C | pH | CE | TDS | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | |
| Eau de surface (indicatif) | I | 4 | + | ++++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++++ | ++ | ++++ | +++ | +++ | + | |
| | II | 2 | ++ | ++++ | ++ | ++ | ++ | +++ | ++++ | + | ++++ | ++++ | +++ | ++ | |
| Altérites | III | 10 | ++ | + | ++ | ++ | ++++ | ++ | + | +++ | ++ | ++ | ++++ | ++ | |
| | IV | 6 | +++ | ++ | ++ | ++ | ++++ | +++ | + | +++ | ++ | ++ | +++ | ++++ | |
| | V | 12 | ++++ | ++ | ++ | ++ | ++++ | ++ | + | +++ | + | + | +++ | ++ | |
| | VI | 5 | ++++ | ++ | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ | + | ++++ | + | + | ++ | ++ | |
| Socle fissuré | III | 4 | ++ | + | ++ | ++ | ++++ | ++ | + | +++ | ++ | ++ | ++++ | ++ | |
| | IV | 4 | +++ | ++ | ++ | ++ | ++++ | +++ | + | +++ | ++ | ++ | +++ | ++++ | |
| | V | 17 | ++++ | ++ | ++ | ++ | ++++ | ++ | + | +++ | + | + | +++ | ++ | |
| | VI | 4 | ++++ | ++ | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ | + | ++++ | + | + | ++ | ++ | |

(+) = faible, (++) = moyen, (+++) = fort, (++++) = très fort.

Au regard de la distribution et des poids des paramètres physico-chimiques, malgré la discrimination des sous-groupes d'échantillons aussi bien en nappes d'altérite qu'en nappes de fissures, on retient une absence de particularité nette de chacun de ces deux types d'aquifère indépendamment des saisons. Ceci est le fait d'une forte hétérogénéité chimique interne à chaque aquifère, qui pourrait être liée à une déconnexion d'une part par entre les différentes nappes logées dans les altérites et d'autre part entre les fissures du socle cristallin (Kamagaté, 2008). 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 (Sigg *et al.*, 1992; Appelo & Postma, 1999). Si tel était le cas, le socle fissuré recevant l'eau des couches plus superficielles des altérites devraient enregistrer les plus fortes minéralisations, notamment les plus fortes concentrations en produits d'altération tels que les cations. Ce schéma est contraire à ce qu'on observe sur notre zone dont le transfert de flux apparaît plus complexe probablement du fait de la très forte hétérogénéité lithologique du milieu.

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de caractériser les eaux souterraines (nappes d'altérite et nappes de fissures) du bassin versant de Kolondieba en périodes sèche et humide en vue de mieux dégager les spécificités chimiques. Une très forte hétérogénéité chimique aussi bien en nappes d'altérite qu'en nappes de socle est observée. Cette hétérogénéité ne permet pas de mieux dégager les spécificités intrinsèques à chacun de ces deux réservoirs. Dans une perspective plus orientée vers les spécificités internes de chaque système aquifère (altérite et fissures), une étude plus fine axée sur les sous-groupes de puits et de forages identifiés devra permettre de mieux comprendre cette hétérogénéité chimique.

REFERENCES

- Appelo, C. A. J. & Postma D. (1999) *Geochemistry, groundwater and pollution*. A. A Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Bariac, T., Millet, A., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi, C., Grimaldi, M., Sarrazin, M., Hubert, P., Mollicova, H., Bruckler, L., Valles, V., Bertuzzi, P., Bes, B., Gaudu, J. C., Horoyan, J., Boulegue, J., Jung, F., Brunet, Y., Bonnefond, J. M., Tournebize, R. & Granier, A. (1995) Décomposition géochimique de l'hydrogramme de crue sur un petit bassin versant Guyanais (Piste Saint-Elie, dispositif ECEREX, Orstom-CTFT, Guyane Française). In: *L'hydrologie tropicale: geoscience et outil pour le developpemnt* (ed. by P. Chevalier & B. Pouyaud), 249–269. IAHS Publ 238. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Boeglin, J.-L. & Tardy, Y. (1997) Érosion chimique et mécanique sur le bassin amont du Niger (Guinée, Mali). Découpage d'hydrogramme en quatre écoulements. *CR Acad. Sci. Paris*. **325**, 125–131.

- Coulibaly, P., Anctil, F. & Bobée, B. (1999) Prévision hydrologique par réseaux de neurones artificiels: état de l'art. *Can. J. Civ. Engng* **26**, 293–304.
- Dreyfus, G., Martinez, J.-M., Samuelides, M., Gordon, M. B., Badran, F., Thiria, S. & Hérault, L. (2002) Réseaux de neurones: cartes auto-organisatrices et classification automatique. *Eyrolles* **2**, 287–335.
- Gremillon, P., Gonyeau, A. & Wanielista, M. (2000) Application of alternative hydrograph separation models to detect changes in flow in a watershed undergoing urban development. *Hydrol. Processes* **14**, 1485–1501.
- Guiraud, R. & Travi, Y. (1990) Hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. *Ministère de la Coopération et du Développement*, Paris, France.
- Kamaté, B. (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.
- Kamaté, B., Séguis, L., Goné, D. L., Favreau, G. & Koffi, K. (2008) Processus hydrogéochimiques et séparation d'hydrogrammes de crue sur un bassin versant en milieu soudanien de socle au Bénin (Donga, haute vallée de l'Ouémé). *Rev. Sci. Eau* **21**, 363–372.
- Kamaté, C. (1980) Climat. In: *Atlas du Mali, les éditions J.A.*, 14–17.
- Kohonen, T. (1982) Clustering, taxonomy, and topological maps of patterns. In: *Proc. 6ICPR, Int. Conf. on Pattern Recognition*, 114–128. IEEE Computer Soc. Press, Washington, DC, USA.
- Rousseau A. N., Lafrance P. D., Quilbé R. D., Caron E. M., Grenier M. M., Lavignen M.-P. & Savary S. (2007) Développement de normes de performance agro-environnementales atteignables (NPA) sur quatre bassins versants canadiens. *Centre Eau, Terre et Environnement Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE). Rapport no. R-924 31 mars 2007.*
- Sigg, L., Stumm, W. & Behra, P. (1992) Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. *Masson*, Paris, France.
- Tardy, Y., Bustillo, V. & Boeglin, J.-L. (2004) Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa. *Appl. Geochem.* **19**, 469–518.

IAHS Publication 340
ISSN 0144-7815

 friend 2010



Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

Eric Servat

Siegfried Demuth

Alain Dezetter

Trevor Daniell

Co-editors: *Ennio Ferrari, Mustapha Ijjaali, Raouf Jabrane,
Henny van Lanen & Yan Huang*



Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

ERIC SERVAT

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),
Université Montpellier 2, France*

SIEGFRIED DEMUTH

*Hydrological Processes and Climate Section, Division of Water Sciences,
Natural Sciences Sector, UNESCO, Paris, France*

ALAIN DEZETTER

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),
Université Montpellier 2, France*

TREVOR DANIELL

*School of Civil and Environmental Engineering,
University of Adelaide, Australia*

Co-edited by: ENNIO FERRARI, MUSTAPHA IJJAALI,
RAOUF JABRANE, HENNY VAN LANEN & YAN HUANG

Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco,
25–29 October 2010.

IAHS Publication 340

in the IAHS Series of Proceedings and Reports

Published by the International Association of Hydrological Sciences 2010

IAHS Publication 340

ISBN 978-1-907161-13-1

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

©IAHS Press 2010

This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit use, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. No part of this publication may be electronically reproduced, transmitted or stored in a retrieval system, and no use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without specific written permission from IAHS Press.

The papers included in this volume have been reviewed and some were extensively revised by the Editors, in collaboration with the authors, prior to publication.

IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.

The information, data and formulae provided in this volume are reproduced by IAHS Press in good faith and as finally checked by the author(s); IAHS Press does not guarantee their accuracy, completeness, or fitness for a given purpose. The reader is responsible for taking appropriate professional advice on any hydrological project and IAHS Press does not accept responsibility for the reader's use of the content of this volume. To the fullest extent permitted by the applicable law, IAHS Press shall not be liable for any damages arising out of the use of, or inability to use, the content.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available from:
IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK
tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: jilly@iahs.demon.co.uk

Printed by Information Press

Cover picture: Southern Morocco by Eric Servat