

PROPOSITION D'UN SUPPORT D'AIDE À LA DÉCISION POUR L'AMÉLIORATION DE L'ACCÈS À UNE EAU SOUTERRAINE DE MEILLEURE QUALITÉ DANS UN CONTEXTE DE CONTAMINATION GÉOGÉNIQUE AU FLUORURE AU BÉNIN (AFRIQUE DE L'OUEST).

Tossou, Joël^{1,2,3}; Hermans, Thomas¹; Orban, Philippe¹; Dovonon, Léonce^{2,3}; Boukari, Moussa² & Brouyère, Serge¹

¹GEO3, Université de Liège (Belgique)

²LHA, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

³Direction Générale de l'Eau (Bénin)

E-mail: tossou.joel@yahoo.fr

Résumé

Les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin de la partie centrale du Bénin (Département des Collines) présentent des concentrations élevées en fluorure, allant jusqu'à 7 mg/L alors que la norme recommandée par l'OMS est de 1.5 mg/L. La consommation de ces eaux à fortes teneurs en fluorure impacte la santé humaine. La population de la région est effectivement largement affectée par la fluorose dentaire. Les investigations hydrogéochimiques révèlent que l'origine de ces teneurs anormales est géogénique avec une forte contribution des minéraux ferromagnésiens, principalement la biotite.

Ce travail se propose de réaliser une double cartographie à l'échelle du département des Collines: (i) une carte de l'estimation des teneurs en fluorure dans les eaux souterraines par krigeage ordinaire et (ii) une carte de la probabilité d'excéder la valeur guide de l'OMS (1.5 mg/L) en fluorure dans les eaux par krigeage d'indicatrices.

Outre la cartographie en elle-même, l'analyse de la structure spatiale des données (teneurs en fluorure des eaux souterraines) à travers le calcul des variogrammes montre qu'il existe un lien fort entre celles-ci et les structures géologiques dominantes, confirmant l'origine géogénique du fluorure.

Ces informations cartographiques serviront de support à la décision pour les décideurs et les gestionnaires de la ressource quant au choix judicieux des zones de captage d'eau potable pour minimiser/éviter les risques de fortes teneurs en fluorure.

Mots clés: fluorures, carte d'estimation, carte de prédiction, département des Collines, Bénin

1. Introduction

Au Bénin, les eaux souterraines sont largement exploitées pour l'approvisionnement en eau potable des communautés. Dans la partie centrale du pays (département des Collines), ces ressources sont fortement contaminées. L'un des principaux problèmes de qualité des eaux souterraines de la région concerne les teneurs en fluorure (jusqu'à 7 mg/L) dépassant les normes recommandées par l'OMS et engendrant de nombreux cas de fluorose dentaire dans le département [2; 6].

Dans le contexte des régions de socle comme la partie centrale du Bénin où la disponibilité de l'eau du point de vue quantitatif est déjà problématique, une défaillance qualitative de celle-ci devient alors catastrophique pour les populations. C'est pourquoi des efforts doivent être conjugués afin de prévenir ou juguler ces difficultés. Ces efforts passent par des investigations approfondies en vue de consolider les connaissances de la ressource dans ces diverses composantes: quantité, qualité, protection, allocations, etc.

Ce travail a pour but d'analyser la variabilité spatiale des teneurs en fluorure dans les eaux souterraines à l'échelle du département des Collines en vue de donner des orientations aux décideurs pour le choix approprié de sites de captage d'eau potable pour minimiser/éviter les risques de fortes teneurs en fluorure. Dans ce cadre, une modélisation géostatistique des données collectées (teneurs en fluorure des eaux souterraines) a permis de proposer des supports d'aide à la décision à travers la réalisation de cartes d'estimation des concentrations en fluorure et de probabilités de dépassement de la norme dans les eaux souterraines du département des Collines. Deux approches géostatistiques ont été utilisées: le krigeage ordinaire pour réaliser la carte d'estimation des teneurs et le krigeage d'indicateurs pour la carte de probabilité de dépasser la valeur seuil de 1.5 mg/L. Dans cette contribution, seul le krigeage d'indicateur et l'outil de prédiction seront présentés. Les données et informations plus étendues sur la thématique peuvent être consultées dans [6].

2. Zone d'étude

La zone d'étude est située au centre du Bénin, département des Collines (entre 7°27' et 8°46' latitude nord et entre 1°39' et 2°44' longitude est) avec une superficie d'environ 14000 km² et comprend les six communes du département à savoir Dassa-Zoumé, Savalou, Bantè, Savè, Ouessè et Glazoué (figure1).

Le climat est de type soudano-guinéen de transition avec une saison pluvieuse (mars à octobre) et une saison sèche (novembre à février). La moyenne pluviométrique annuelle (entre 1981- 2010) est de 1100 mm et l'évapotranspiration annuelle moyenne est de l'ordre de 1000 mm. Les températures varient entre 21°C et 35°C au cours de l'année.

La géologie est dominée par les formations migmatito-gneissiques et granitiques d'âge précambrien. Une série volcano-sédimentaire de faible étendue est présente dans la partie méridionale de la zone. Les aquifères sont constitués de deux réservoirs superposés en contact hydraulique permanent: un réservoir supérieur de la frange altérée, jouant un rôle capacitif et un réservoir sous-jacent dans la zone fissurée et fracturée ayant une fonction surtout drainante [1].

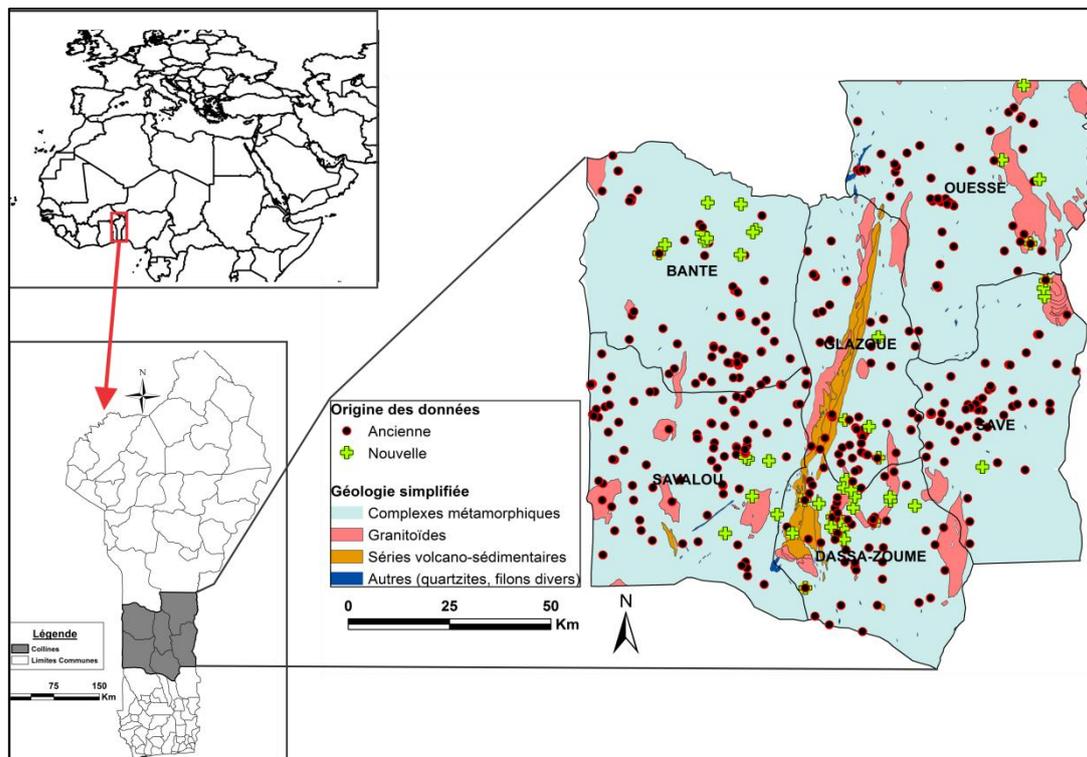


Figure 1. Situation de la zone d'étude, répartition des points de données et géologie simplifiée

3. Données et méthode

Les données utilisées sont constituées de 483 valeurs de concentrations en fluorure des eaux souterraines, provenant aussi bien de la Base de Données Intégrées (BDI) de la Direction Générale de

l'Eau du Bénin (données collectées entre 2002 et 2012) et des récentes campagnes de collecte de données (2013-2015) (**figure 1**).

La réalisation de la carte de prédiction est basée sur le krigeage d'indicatrices consistant à effectuer l'analyse spatiale non pas directement de la propriété étudiée, mais des différentes fonctions dites «indicatrices» issues d'un codage binaire de cette propriété. Il s'agit donc du choix d'une ou plusieurs valeurs-seuils et de la transformation de la variable étudiée en fonctions "indicatrices" de ces valeurs-seuils [3; 7].

Soient $v(x_i)$ les valeurs de la variable V en des points de coordonnées x_i . En considérant une valeur seuil donnée v_c de la variable V , on définit une fonction binaire I telle que pour tout point d'échantillonnage, on a:

$$\begin{cases} I(x_i, v_c) = 1 \text{ si } v(x_i) \leq v_c \\ I(x_i, v_c) = 0 \text{ si } v(x_i) > v_c \end{cases}$$

On qualifie I de fonction indicatrice de v_c , la valeur-seuil. D'après [5], l'espérance de cette fonction est égale à la probabilité que $V(x)$ soit inférieure ou égale à v_c :

$$E[I(x, v_c)] = P[V(x) \leq v_c].$$

Le variogramme expérimental des fonctions indicatrices définies par le choix du seuil, est donnée par l'équation:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \text{ où}$$

$\gamma(h)$ est la valeur du variogramme expérimental à la distance h ; $n(h)$ est le nombre de paires d'échantillons situés à la distance h ; $Z(x_i)$ est la valeur mesurée de la variable Z à la position x_i .

L'ajustement au variogramme expérimental est fait avec un modèle sphérique.

Dans cette étude, la valeur-seuil utilisée est de 1.5 ppm et correspond à la teneur en fluorure maximale admissible pour les eaux de boisson selon les normes nationales et de l'OMS.

Le logiciel SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software [4]) a été utilisé. La grille de calcul utilisée est de 120 x 140 avec des mailles de 0.01 x 0.01 (distance en degrés décimaux¹).

4. Résultats et discussions

4.1 Analyse de la structure spatiale des données: Calcul de variogrammes

Les **figures 2a et b** montrent les variogrammes respectivement pour les azimuts 0° et 90°. On note une meilleure corrélation spatiale dans la direction Nord-Sud (0°) avec une portée de 0.2 contre 0.1 pour l'azimut 90°. Il existe également un effet de pépite (0.12) traduisant la perte de corrélation spatiale sur une courte distance. Les paramètres (pépite, portée, contribution) de ce variogramme seront alors utilisés pour le krigeage d'indicatrices et la réalisation de la carte de prédiction.

¹ L'utilisation des distances en degrés décimaux ou en Kilomètre n'a pas d'effets sur les calculs au regard de la latitude (proche de l'équateur) à laquelle se trouve la zone d'étude et son étendue: 1° ≈ 110 km

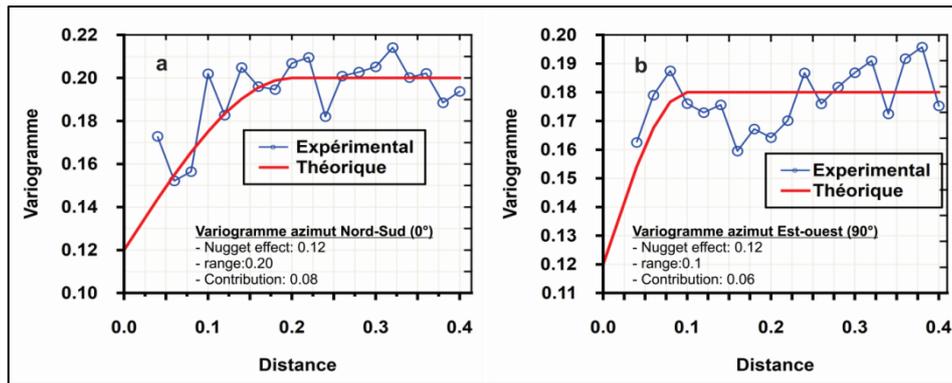


Figure 2. Variogramme d'indicateurs ajusté sur les données log-transformées (a) azimuth Nord-Sud et (b) azimuth Est-Ouest

4.2 Cartographie prédictive des probabilités de teneurs en fluorure supérieures à la norme admissible (1.5 ppm)

La carte des probabilités par krigeage d'indicateur et celle des variances associées sont présentées respectivement sur les **figure 3a et b**. La **figure 3a** permet ainsi de visualiser en chaque point de la zone (département des Collines) la probabilité de dépasser le seuil, soit une teneur en fluorure supérieure à 1.5 ppm dans les eaux souterraines.

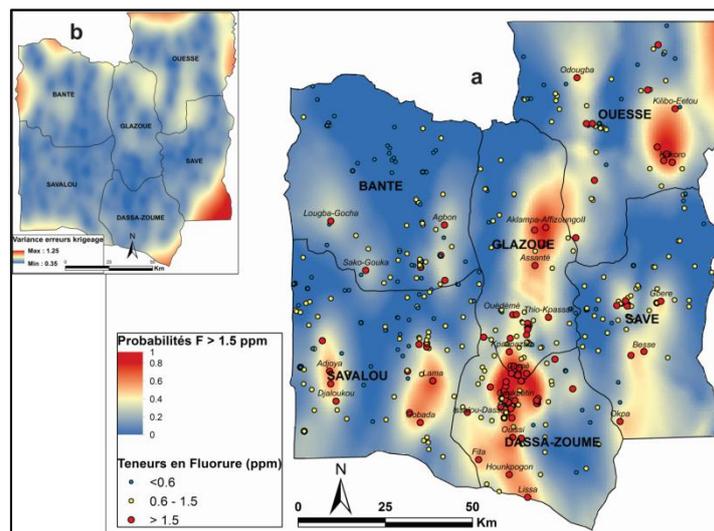


Figure 3. Carte des probabilités d'apparition des teneurs en fluorures supérieures à 1.5 mg/L dans les eaux souterraines (a) carte de krigeage d'indicateurs et (b) variances des erreurs de krigeage

La carte krigée d'indicateurs (**figure 3a**) montre que le secteur à probabilité très forte (entre 0.80 et 1) le plus étendu est localisé dans les environs de Dassa-Zoumé, principalement entre le bassin volcano-sédimentaire et la queue Est de la chaîne de collines en S de granite porphyrique. Ceci signifie que lorsqu'un échantillon d'un point d'eau est pris dans cette zone, il y a plus de 8 chances sur 10 qu'il dépasse la norme en vigueur pour les fluorures (1.5 ppm).

La carte krigée d'indicateurs fait apparaître de façon plus perceptible l'effet de l'anisotropie Nord-Sud et donc la proximité entre la géologie et l'évolution des concentrations. On aperçoit ainsi que les zones à probabilités élevées s'étalent suivant une même direction que les couches géologiques, ceci en cohérence avec l'anisotropie révélée.

5. Conclusion

La carte réalisée (probabilité de dépassement de la norme) permet de circonscrire les zones géographiques caractérisées par de probables fortes teneurs en fluorure dans les eaux souterraines. Les zones à risque potentiel de fluorure sont mises en exergue. De telles zones sont notamment celles qui cumulent des probabilités d'occurrences supérieures à 0.6 et des teneurs en fluorure dépassent

1.5 mg/L dans les eaux (étendues en rouge sur la carte). Ces informations cartographiques serviront de support à la décision pour les décideurs et les gestionnaires de la ressource quant au choix judicieux des zones de captage d'eau potable dans le département des Collines. Les scientifiques y trouveront également les éléments de base pour des investigations ultérieures.

Références

- [1] **Boukari, M. (1982)**. Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique Intertropicale: l'Hydrogéologie de la région de Dassa-Zoumé (Bénin). *Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle en Géologie Appliquée, mention Hydrogéologie, Université de Dakar (Sénégal)*. **173p**
- [2] **Dovonon, F. C. L. (2011)**. Qualité chimique des eaux souterraines dans la commune de Dassa-Zoume (Bénin) : Impacts sanitaires des teneurs hors normes en fluorures et essais de traitement à l'os calciné de bovins. *Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)*. **200p**
- [3] **Isaaks, E. H. et Srivastava, R. M. (1989)**. Applied geostatistics. *Oxford University Press, New York*. **582p**
- [4] **Remy, N., Boucher, A. et Wu, J. (2011)**. Applied Geostatistics with SGeMS: A Users' Guide. *Cambridge University Press*. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139150019>. **322p**.
- [5] **Rivoirard, J. (1990)**. Introduction to disjunctive kriging and nonlinear geostatistics. *Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris*. **98p**
- [6] **Tossou, Y. Y. J. (2016)**. Caractérisation des anomalies fluorées eaux souterraines du socle cristallin Précambrien du Bénin central (Afrique de l'Ouest). Apport des outils hydrogéochimiques, pétrographiques et minéralogiques. *Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences de l'Ingénieur, Université de Liège (Belgique)*. **181p**
- [7] **Walter, C. (1993)**. L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique. *Science du sol* 31(4). **215-231**