

CARTOGRAPHIE GÉOSTATISTIQUE DE LA SALINITÉ DES EAUX DE
LA NAPPE DU COMPLEXE TERMINAL DE L'OUED RIGH (SAHARA
ALGÉRIEN)

HALASSA YOUNESS ^(A), **BELKESIER M**^{ED (A-B)}, **KECHICHED R.** ^(A-B), **BENHAMIDA**
S ^(A-C). & **HABES S**^(D).

^(a) *Département des Sciences de la terre et l'univers, Université Kasdi Merbah*

Ouargla

^(b) *Laboratoire des Réservoirs Souterrains: Pétroliers, Gaziers et Aquifères, Université Kasdi Merbah Ouargla, 30000 Algérie*

^(c) *Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) Direction Régionale Sud BP 140 Ouargla*

^(d) *Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie Annaba*

Email: Geolassa@yahoo.fr Résumé:

Les eaux du Complexe Terminal (CT) ont fait l'objet de cette étude afin de caractériser la salinité et sa cartographie géostatistique. Ces eaux ont une forte minéralisation, dont la concentration des éléments chimiques dépasse les normes recommandées par l'OMS. Au total 766 forages ont été utilisés pour le traitement géostatistique de la salinité. Les résultats obtenus montrent une évolution spatiale de la salinité orientée du Sud vers le Nord en générale à l'exception d'une forte salinisation localement au centre de la vallée de l'Oued Righ. La géostatistique non-paramétrique a été effectuée sur les analyses de la salinité (résidu sec). Pour cela, un codage binaire des concentrations a été fait pour une concentration de 5230 mg/l valeur moyenne dans toute la vallée de l'Oued Righ. Le Krigeage d'indicateurs a permis d'estimer les probabilités I (5230mg/l) dans la nappe en utilisant un modèle de nœud (500*500 m). La cartographie automatique a permis de visualiser la répartition de la probabilité krigée pour la concentration des résidus secs de 2530 mg/l. Ces résultats peuvent être utilisés au choix d'implantation de nouveaux forages ou pour l'exploitation sélectives des eaux.

Mots clés : Salinité, résidu sec ; Krigeage d'indicateur ; Complexe Terminal, Algérie.

Introduction :

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. [3] Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales [9]. La région de l'Oued Righ est l'une des régions les plus anciennement cultivées Elle s'étend sur une longueur de 150 km Sud – Nord et une largeur allant de 20 à 30 km. Est- Ouest. [8].

La salinité des eaux et du sol du Oued Righ a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Jean Fabre 2004; Belksir M., 2009; Bouznade I., 2009; Bettahar A., 2013; Bouchahm N. et al, 2013), pour expliquer l'origine, les causes et l'évolution de ce phénomène. Notre objectif est de caractériser la salinité au sein de la nappe, ainsi la cartographie géostatistique du Complexe Terminal

Présentation de la zone d'étude :

La vallée de l'Oued Righ est une entité économique bien précise, qui regroupe près de 50 Oasis situées au Nord-Est du Sahara, longeant les rives Ouest du grand Erg Oriental et au Sud du massif des Aurès [4]. Elle s'étend sur un axe Sud- Nord sur

environs 150 Km, entre les coordonnées suivantes ; la latitude 32°54' à 39°9' Nord et longitude de 05°50', 05°75' Est ; elle couvrant près de 20000 ha environ de palmiers. La vallée de l'Oued Righ débute au côté Nord à Ain chikh à 500 Km au Sud –Est d'Alger, 330 Km au Sud de Constantine [4].

Géologie et hydrogéologie de la zone d'étude :

La région de l'Oued Righ se présente comme une cuvette synclinale du Bas Sahara qui fait partie d'une large fosse de direction N-S. Les formations géologiques allant du Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie sous le Grand Erg Oriental. Seuls quelques affleurements sont observés, sur les bordures. La prospection géophysique et les sondages pétroliers ont précisé la profondeur du socle Précambrien, située entre 3000 et 5000 m .il s'ensuit que les dépôts sédimentaires ont environ 4000 m d'épaisseur [4].

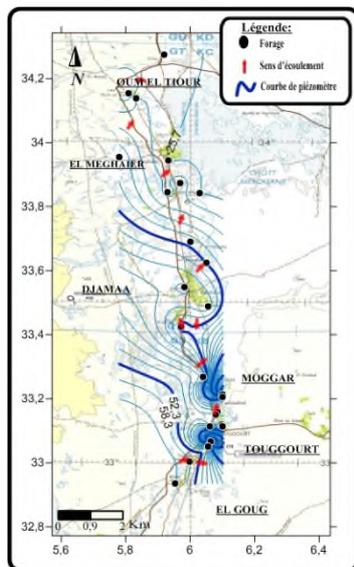
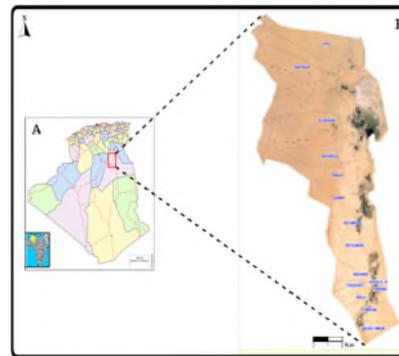


Fig2: Carte piézométrique du Complexe Terminal de l'Oued Righ en 2013

Fig. 1 : Situation géographique de la vallée de l'oued Righ (A. N. R. H, 2015)

A. Situation géographique de la région d'étude (http://www.nationsonline.org/oneworld/map/algeria_map.htm)
B. Vue satellitaire de la vallée d'Oued Rgh (Google earth, 2014)



Dans le bassin de l'Oued Righ, il existe deux systèmes aquifères :

- ❖ Le premier profond étendu, dit le Continentale Intercalaire (CI), constitué en grande partie par des sables et des grès d'âge Albien. Cette nappe est ainsi captive, à l'exception des bordures
- ❖ Le deuxième est multicouche, peu profond, moins étendu que le premier dit Le Complexe Terminal (CT), constitué de deux ensembles différents:
 - L'e premier constitué par les calcaires d'âge Sénonien-Eocène CT3
 - L'autre continentale constitué par des sables, graviers et des grés d'âge Mio-Pliocene caractérise la 1^{ère} et la 2^{ème} nappe du Complexe Terminal (CT1) (CT2) (Nappe des sables)
- ❖ Un aquifère superficiel qui surmonte ces deux ensembles dit nappe Phréatique contenue dans les sables fins à moyens d'âge Quaternaire à récent

Matériel et méthodes

Description des données utilisées

L'étude hydro chimique été faite sur les données des échantillons de l'eau de la nappe Complexe terminale (CT) de la région de l'Oued Righ. Au totale 97 échantillons, représentent 97 forages de l'A.E.P. et l'I.R.R. Les analyses ont été effectuées au niveau du service de laboratoire de l'ANRH et ADE d'Ouargla en 2014. Et 766 forages pour le traitement géostatistique. L'implantation des forages a été effectuée (Fig.3).

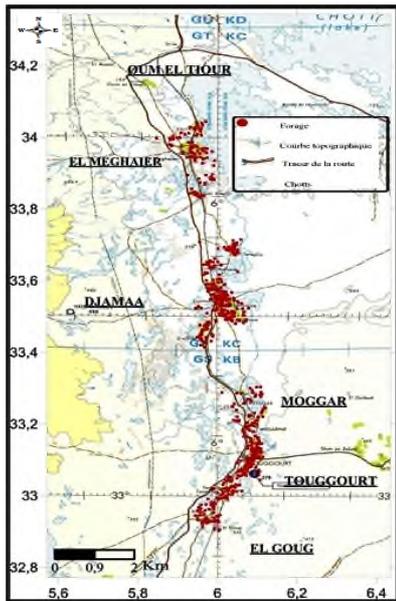


Fig.3: Plan des forages de la nappe Complexe
Terminal de la région de l'Oued Righ

Le traitement géostatistique a fait appel à l'utilisation

Définition du variable régionalisée retenue

La variable régionalisée choisie est la salinité (Résidue Sec). Ce choix est dicté par son importance pour la caractérisation des eaux. La salinité (RS) est un élément caractérisé par une grande minéralisation des eaux

Objective et méthodes

L'objectif de cette étude se focalise à l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique pour la cartographie des concentrations des résidus secs de la nappe du complexe terminal au niveau de la zone Oued Righ. L'utilisation du krigeage d'indicateurs est favorisée par rapport au krigeage ordinaire ou d'autres méthodes déterministes (inverse des distances et la triangulation linéaire simple, ...etc.).

- La géostatistique

La géostatistique a été définie par Matheron en 1971 en tant que l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels [7].

- Le variogramme

C'est l'outil de base de la géostatistique. Soit deux variables aléatoires, $z(x)$ et $z(x+h)$ mesurées en 2 points " x " et " $x+h$ ", la variabilité entre ces deux points (Fig. 4) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(x, h)$ appelée variogramme [1].

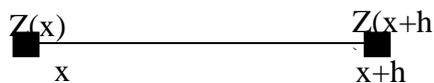


Fig. 4 : Représentation des points de mesure de la variable.

Le variogramme théorique est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire $[z(x) - z(x+h)]$ soit :

$$E = \left\{ \left[Z(x) - Z(x+h) \right]^2 \right\} = 2\gamma(x, h)$$

En général, le variogramme $\gamma(x, h)$ (ou semi-variogramme) est estimé

par la formule suivante:

$$2\gamma(h, \theta) = \frac{1}{N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [z_i(x) - z_i(x+h)]^2$$

Le variogramme expérimental calculé doit être ajusté par un modèle mathématique. Les schémas théoriques d'usage courant sont classés en schémas à palier, schémas sans palier et schémas à effet de trous (Fig. 5).

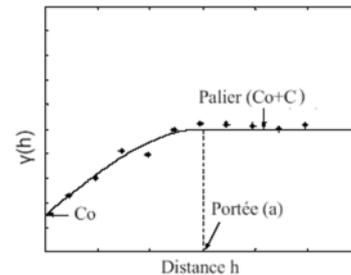


Fig. 5 : Représentation graphique du variogramme - Le krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices a été initié par JOURNEL (1983). Le développement mathématique a été effectué par plusieurs auteurs [2][11][5][10]. Le krigeage d'indicatrices consiste à effectuer l'analyse spatiale non pas directement de la propriété étudiée (concentrations de la salinité des forages d'eau), mais des différentes fonctions dites «indicatrices» issues d'un codage binaire de cette propriété [6]. Cette géostatistique dite non-paramétrique ne tient compte des valeurs des variables, ces dernières sont codées par 1,0 selon un seuil donné.

Soit $Z(x)$ une V.A. continue définie au point x et $F(x,c)$, la fonction de répartition de la V.A. au point x pour la valeur « c ». Par définition :

$$F(x,c) = P(Z(x) \leq c) = E[I(x,c)] \text{ Où}$$

$$I(x,c) = 1 \text{ si } Z(x) \geq c, \quad 0 \text{ si } Z(x) < c$$

Pour estimer $I(x,c)$, il suffit de coder les $Z(x_i)$; calculer et modéliser le variogramme des indicatrices $I(x_i,c)$; et effectuer le krigeage.

Résultats et discussions

A. Codage des concentrations

La concentration limite (*cut-off*) du résidu sec choisie est de 5230 mg/l (moyenne des résultats), en effet, pour estimer $I(5230)$; qui la concentration tolérable du résidu sec en eau, servant de l'information disponible il suffit d'effectuer un codage binaire ($P = 0$ si $Z(F) \geq 5230$ mg/l, $P = 1$ si $Z(F) < 5230$ mg/l) (Tableau. 1); de calculer et modéliser le variogramme des indicatrices $I(5230)$ en fin effectuer le krigeage. Il s'agit de faire un krigeage des probabilités (et non pas des concentrations)

Tableau. 1 : Codage binaire des concentrations du fluor analysées en mai 2013.

N°Forage	RS (mg/l)	Codage I(5230)
11	3130	0
200	5400	1
300	4300	0

B – Variographie d'Indicatrices

La construction et l'ajustement des variogrammes ont été effectués à l'aide du logiciel Variowin 2. 21

- Nord

Le variogramme horizontal d'indicatrice (Fig.6) a été ajusté par un modèle sphérique a porté $a=2040m$, palier $C=0.01$ (unité)² et d'un effet de pépité $C_0 = 0.0037$ (unité)²

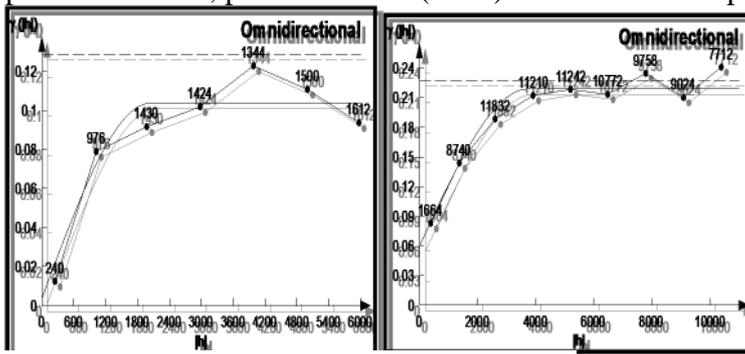


Fig. 6 : Le variogramme horizontal moyen d'indicatrice I (5230 mg/l) au Nord Direction : $0^{\circ}\pm 90^{\circ}$

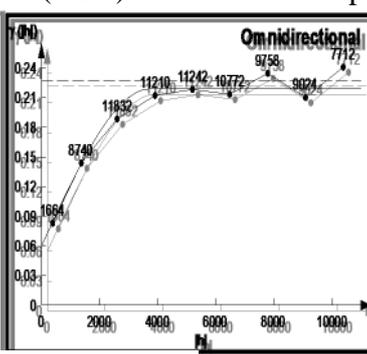


Fig. 7 : Le variogramme horizontal moyen d'indicatrice I (5230 mg/l) au centre Direction : $0^{\circ}\pm 90^{\circ}$

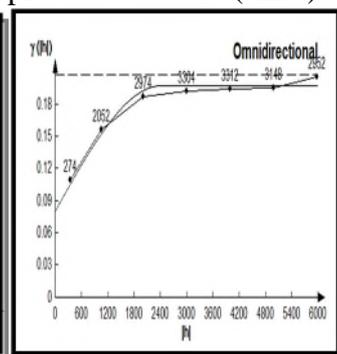


Fig. 8 : Le variogramme horizontal moyen d'indicatrice I (5230 mg/l) au sud Direction : $0^{\circ}\pm 90^{\circ}$

porté $a=3740$ m, palier $C=0.16$ (unité)² et

- Sud

Le variogramme horizontal d'indicatrice (Fig.8) a été ajusté par un modèle sphérique a porté $a=2400m$, palier $C=0.117$ (unité)² et d'un effet de pépité $C_0=0.081$ (unité)²

Cartographie automatique des résultats obtenus

Les résultats de krigeage sont donnés pour chaque maille en deux dimensions par les coordonnées et la probabilité I (5230mg/l) krigée de la salinité. (Fig.9) Cette cartographie en *Classed Map* présente un modèle numérique pour la concentration de 5230 mg/l, C'est-à-dire la probabilité d'avoir cette teneur de chaque nœud de maille $500*500$ m de la nappe du Complexe Terminal à Oued Righ.

La cartographie automatique a permis de mettre en évidence que la zone central est caractérisée une forte probabilité d'avoir des teneurs $\geq 5230mg/l$ dont la classe de probabilité krigée de (0,75 à 1), soit (75% à 100%) sont 696 blocs, soit 51.70% par rapport le total des blocs de la zone central.

Nous constatons que la partie septentrionale et méridionale est plus ou moins sévère en teneur de salinité dont la probabilité d'avoir I(5230) mg/l variée entre de 0 à 0,5 qui représente 447 blocs soit 83.4 % de la totalité des blocs pour la zone nord et 881 blocs soit 73.3% pour la zone sud.

D'une façon générale, la partie septentrionale montre la faible probabilité de I (5230) avec une homogénéité remarquable

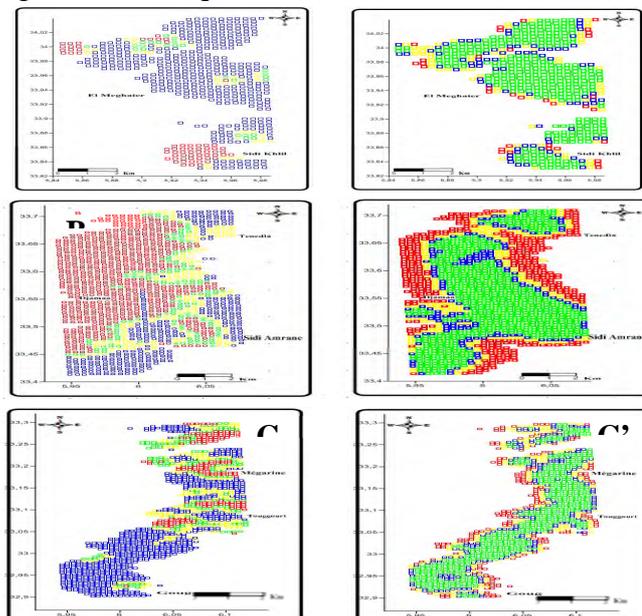


Fig.9 : Carte des indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration de la salinité $\geq 5230mg/l$ (A, B, C) et Cartes des variances de krigeage des eaux du Complexe Terminal de la vallée de l'Oued Righ (A', B', C') en 2013

Conclusion

Le traitement statistique a été effectué pour déterminer les paramètres de position centrale et des paramètres de la dispersion. Le calcul de la matrice de corrélation a été effectué sur l'ensemble des données des échantillons du Complexe Terminal de l'Oued Righ On constate que la conductivité (CE) est corrélée positivement à Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}

Les cartes des indices (probabilité) krigées pour une concentration de la salinité ≥ 5230 mg/l offre une meilleure visibilité de répartitions probabilistes de la salinité au sud de la nappe CT de l'Oued Righ. Elle représente un modèle numérique qui peut aider à la décision pour :

-le choix d'implantation de nouveaux puits.

-le choix d'implantation des stations de dessalement pour l'AEP ou l'implantation des forages spécialisés.

Recommandations

Nous recommandons l'exploitation des eaux soit pour l'AEP ou l'irrigation en fonction des cartes réalisés d'une part ainsi que l'élaboration d'un plan d'exploitation rationnelle dans la sélectivité de chaque zone doit tenir compte ces caractéristiques physico-chimiques.

Nous recommandons aussi l'intrication des techniques de simulation géostatistique tel que la méthode SGS lors de l'exploitation des eaux.

Nous constatons que les variances (Fig.9) de krigeage de (0 à 0.07) (unité)² sont que la majorité des valeurs dans les blocs krigées ce qui indique que la densité des données utilisées dans cette étude est suffisante à cet effet les erreurs sur l'estimation seront faibles ; au nord: 351 blocs, soit 65.70%, au centre : 643 blocs, soit 47.9%, et au sud :609 blocs, soit 50.7% .

Les variances qui dépassent 0.14 (unité)² sont localisées au bordure de la zone d'étude ou dans des zones à faible densité des données, donc l'estimation obtenue et alors prise avec prudence.

Bibliographie

1. A. Journel, G. Huijbregts, "Mining geostatistics. Academic" Press, London, U. K, 1978, p. 600.
2. B.M. Davis, "Indicator kriging as applied to an alluvial go Id deposit", In : Geostatistics for Natural Resources Characterisation. Part I, G. Verly et al. (EDS), D. Reidel Publishing Company, 1984, pp. 337-348.
3. BOURHAN A; 2010 - Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude, Géosciences Réunion, BRGM, Univ. Avignon; 108p.
4. CASTAGNY G., 1967. Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris. France 661p.
5. Cressie, "Statistics for spatial data", Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, New York, 1991, p. 900.
6. B. Walter, "L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique", science du sol, Vol. 31,4, 1993, pp. 215-231.
7. G. Matheron, "La théorie des variables régionalisées et ses applications", Les cahiers de CMM5, Paris ENSMP, p. 212.
8. GUETTICHE S., et BENABDASADOK D., 2005, Contribution à l'étude de la possibilité de réutilisation des eaux de la nappe phréatique pour l'irrigation dans la région de l'Oued Righ, Mémoire d'Ingénieur, Université de Mentouri-Constantine. pp 110-115
9. KLOPMANN W., BOURHANE A.,
ASFIRANE F.; 2011 - Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau « emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques », BRGM, France; 38 p.
10. M.E.P. Bierkens, P.A. Burrough, "The indicator approach to categorical data". I. Theory. 1. Soil Sci., 44, 1993 a, pp. 361-368.
11. N. M. Johnson, S.J. Dreiss, "Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics", Water Resources Research, 25 (12), 1989, pp. 2501-2510.