

## Apport de la géostatistique non-paramétrique à la cartographie des concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud (Sud algérien).

KECHICHED Rabah<sup>(1)</sup>, DJEGHOUBBI Rabah<sup>(1)</sup>, FOUFOU Atif<sup>(2)</sup>, NEZLI Imed Eddine<sup>(1)</sup> & HADDANE Abdenour<sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers, Ouargla 30 000 Algérie.

<sup>(2)</sup> Université ZIANE Achour Djelfa, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Djelfa.  
kechiched.ra@univ-ouargla.dz

**Résumé** — Cette étude propose l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique (krigeage d'indicatrices), pour la cartographie de la répartition des concentrations du fluor, dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) à Hassi Messaoud. La méthode est basée sur le codage binaire (0,1) des concentrations du fluor dans les forages d'eau. Le codage s'effectue en fonction d'une concentration limite (*cut-off* = 2 mg/l). En effet, les concentrations  $\geq 2$  mg/l sont codées par la probabilité (1), les concentrations  $< 2$  mg/l sont codées par la probabilité (0). Le variogramme moyen d'indicatrices a été calculé sur les valeurs codées. Il a été modélisé par un schéma de régionalisation exponentiel à palier, portée et à effet de pépite. Le krigeage d'indicatrices a permis d'estimer les probabilités des concentrations du fluor de  $\geq 2$  mg/l dans la nappe en utilisant un maillage (200 x 200) m. La cartographie des résultats a été effectuée par maille. Elle montre que la probabilité d'avoir une concentration en fluor  $\geq 2$  mg/l dans les eaux diminue graduellement du N-E au S-O. Les variances de krigeage ont été également cartographiées. Ces résultats peuvent être utilisés pour le choix d'implantation des futurs forages en fonction de ces probabilités krigées.

**Mots clés** — Nappe ; krigeage d'indicatrice ; variogramme ; complexe terminal ; fluor.

### I. INTRODUCTION

La ville de Hassi Messaoud a connu un développement rapide de l'habitation qui ne cesse pas à augmenter surtout auprès les entreprises. L'eau, facteur clé pour toute utilisation domestique ou industrielle. Il devient un enjeu primordial dans le volet quantité que qualité. La ville de Hassi Messaoud s'approvisionne des puits de la nappe du Complexe Terminal (CT). Ces eaux qui ne sont pas renouvelables nécessitent une exploitation sélective en fonction de sa qualité d'une façon rationnelle. Le fluor, un des éléments contrôlant la potabilité des eaux. Les normes algériennes fixent une concentration maximale à 2mg/l. Pour cela la connaissance de sa répartition spatiale dans les eaux de la nappe est nécessaire, surtout, pour implanter des futurs forages d'eau et de leur exploitation. La zone d'étude est localisée à la ville de Hassi Messaoud qui se situe à environ 850 km Sud-est d'Alger, à 86 km au sud-est d'Ouargla, à 172 km au sud de Touggourt et à 350 km de la frontière tunisienne (Fig. 1).

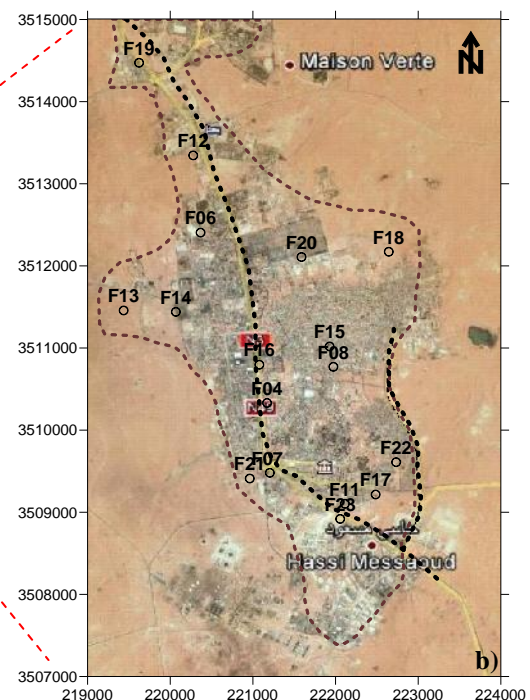
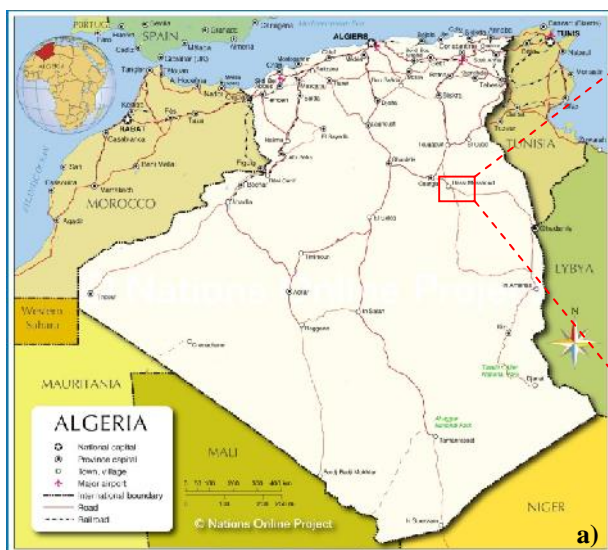


Fig. 1 : Localisation de la zone d'étude :

- a) Situation géographique de la ville de Hassi Messaoud ([http://www.nationsonline.org/oneworld/map/algeria\\_map.htm](http://www.nationsonline.org/oneworld/map/algeria_map.htm))  
b) Vue satellitaire de la ville de Hassi Messaoud (Google earth, 2012)

F12  
○ Forage d'eau échantillonné

--- Limite fictive de la ville de Hassi Messaoud

## II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

### A. Géologie :

La région de Hassi Messaoud se présente sous forme d'un dôme. Elle représente le résultat d'une histoire paléotectonique assez compliquée. Il s'agit d'un prolongement de la dorsale d'Amguid El Biod à plus de 800 km de long. Sa structure fait partie d'un ensemble formant la province triasique Nord orientale. La série stratigraphique de la région de Hassi Messaoud repose sur le socle à environ 4393 m d'épaisseur. Cette série est incomplète, elle est marquée par l'absence du Silurien, Dévonien, Carbonifère et Permien. [1]

### B. Hydrogéologie

La région de Hassi Messaoud est, comme le Sahara algérien septentrional, caractérisée par la présence de deux principaux aquifères à savoir (Fig. 2) :

- La Nappe du Complexe Terminal (CT) contenue dans les sables du Mio-pliocène est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Éocène, du Sénonien et du Turonien.
- La nappe du Continental Intercalaire (C.I) : elle se présente comme un aquifère multicouche de l'Albien, Barrémien et Néocomien.

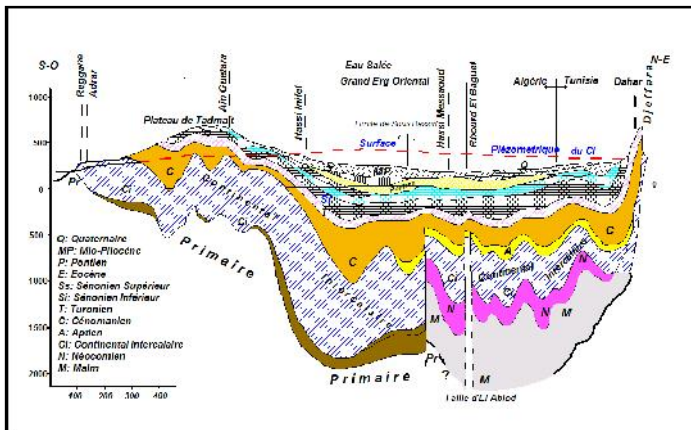


Fig. 2: Coupe Hydrogéologique du système aquifère CI et CT du Sahara septentrional [2].

La nappe du Complexe Terminal de région de Hassi Messaoud se caractérise par des épaisseurs qui varient de 150 à 230 m en moyenne. La carte piézométrique montre que les courbes iso-pièzes sont légèrement sinueuses témoignent d'un gradient hydraulique élevé. Ceci est dû à un cône de dépression liée à un excès de pompage. Un sens d'écoulement régional des eaux souterraines NE-SO. Il est à noter que cette nappe est captive dans cette région.

## III. MATERIEL, OBJECTIVE ET METHODES

### A. Échantillonnage

La nappe du complexe terminal (CT) au niveau de la ville de Hassi Messaoud a été reconnue à l'aide des forages d'eau. Au total Seize (16) forages ont fait l'objet d'un échantillonnage en Mai 2013. Ces échantillons ont été analysés sur le fluor et les paramètres physicochimiques au

niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Algérienne des eaux (ADE) d'Ouargla, selon les techniques standards [3].

### B. Définition du variable régionalisée retenue

La variable régionalisée choisie est le fluor (F). Ce choix est dicté par son importance pour la caractérisation des eaux. Le fluor (F) est un élément caractérisé par une grande réactivité. Le nombre atomique est de 9 et son poids moléculaire est de 19 g/mol. Il se présente en général sous forme de fluorure inorganique et il se trouve aussi, à libre en solution, lié par des liaisons de coordination à des cations en solution [4]. La concentration élevée de cet élément influe négativement sur la qualité des eaux et à leur potabilité due à ses effets nocifs pour la santé. La norme algérienne maximale pour le fluor est fixée à 2 mg/l.

### C. Objective et méthodes

L'objective de cette étude se focalise sur l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique, pour la cartographie des concentrations du fluor au sein de la nappe du Complexe Terminal, au niveau de la ville de Hassi Messaoud. L'utilisation du krigeage d'indicateurs est favorisée par rapport le krigeage ordinaire ou d'autres méthodes déterministes tel que : la méthode d'inverse des distances et la triangulation linéaire simple. Ceci est à cause la non-stationnarité des données d'une part et à l'effet hydrodynamique des eaux d'autre part. La méthode de krigeage d'indicateurs utilisée dans ce travail repose, sur le codage binaire (0,1) des concentrations du fluor des points de mesures par rapport un seuil limite (*cut-off*). Dans notre cas la norme algérienne maximale de 2 mg/l a été utilisée. Les concentrations  $\geq 2$  mg/l sont codées par la probabilité (1), les concentrations  $< 2$  mg/l sont codées par la probabilité (0). L'étude géostatistique non-paramétrique (variographie et krigeage d'indicateurs) est ramenée sur ce codage.

### - La géostatistique

La géostatistique a été définie par Matheron (1971) en tant que l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels [5].

### - 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. 3) se caractérise par une fonction notée  $\gamma(x, h)$  appelée variogramme [6].

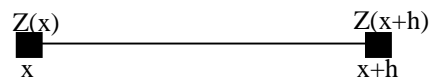


Fig. 3 : Représentation des points de mesure de la variable.

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



# Le Séminaire International sur L'Hydrogéologie et l'Environnement

5 - 7 Novembre 2013, Ouargla (Algérie)



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

En général, le variogramme  $\gamma(x, h)$  (ou semi-variogramme) est estimé par la formule suivante:

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

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. 4).

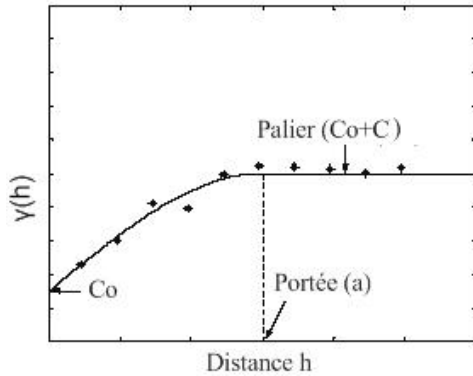


Fig. 4 : Représentation graphique du variogramme

### - Le krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices a été initié par Journel (1983) [7]. Le développement mathématique a été fait par plusieurs auteurs [8][9][10][11]. Le krigeage d'indicatrices consiste à effectuer l'analyse spatiale non pas directement de la propriété étudiée (concentrations du fluor dans les forages d'eau), mais des différentes fonctions dites «indicatrices» issues d'un codage binaire de cette propriété [12]. 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 :

$$F(x, c) = P(Z(x) \leq c) = E[I(x, c)] \text{ Où } I(x, c) = 1 \text{ si } Z(x) \leq c, 0 \text{ si } Z(x) > c$$

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.

## IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### A. Codage des concentrations

La concentration limite (*cut-off*) du fluor choisie est de 2 mg/l (normes algériennes), en effet, pour estimer  $I(2)$ ; qui la concentration maximale du fluor en eau, servant de l'information disponible il suffit d'effectuer un codage binaire ( $P = 0$  si  $Z(F) \leq 2$  mg/l,  $P = 1$  si  $Z(F) > 2$  mg/l) (Tableau. 1); de calculer et modéliser le variogramme des indicatrices  $I(2)$  en fin effectuer le krigeage.

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

N°Forage	F (mg/l)	Codage I(2)
4	1,63	0
6	2,34	1
7	1,57	0
8	2,71	1
11	2,93	1
12	2,28	1
13	2,25	1
14	1,6	0
15	2,46	1
16	1,73	0
17	2,12	1
18	2,26	1
19	2,1	1
20	2,13	1
21	1,97	0
22	1,86	0

### B - Variographie d'indicatrices

Les variogrammes ont été construits et ajustés à l'aide du logiciel *Variowin2. 21*. Le variogramme de surface a été établi dans le plan horizontal, il montre une anisotropie dont le grand axe est orienté NW-SE tandis que, le petit axe a une direction SW-NE. (Fig. 5). Le variogramme horizontal moyen des d'indicatrices de I (2 mg/l) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée  $a = 2592$  (m), d'un effet de pépité  $C_0 = 0.012$  (mg/l<sup>2</sup>), et d'un palier  $C = 0.261$  (mg/l<sup>2</sup>). (Fig. 6)

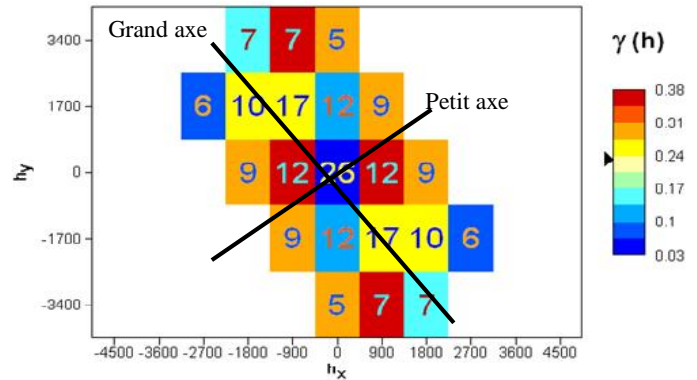


Fig. 5 : Le variogramme de surface d'indicatrice du fluor I(2 mg/l)

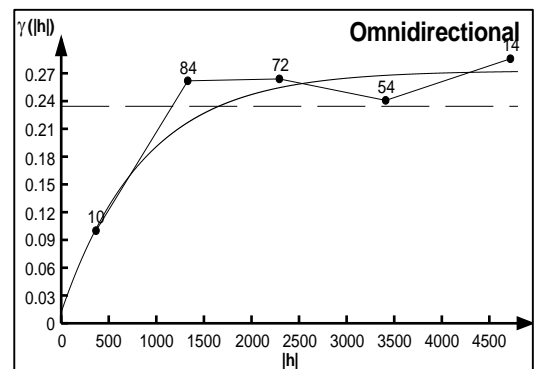


Fig. 6 : Le variogramme horizontal moyen d'indicatrice du fluor I(2 mg/l)

### C. Krigeage d'indicatrices et discussions

Les résultats de l'étude variographique ont été utilisés pour l'élaboration du plan de krigeage d'indicatrices. Une discrétisation de la nappe en maillage de 200\*200 m a été faite.

La cartographie des résultats de krigeage a été effectuée par classe à l'aide logiciel *Surfer, 9 du golden software* (Fig.7). Cette cartographie d'indicatrices présente un modèle numérique qui montre la probabilité de la concentration de 2 mg/l en chaque nœud de maille à deux (2) dimensions.

Qualitativement, on constate que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau dont la probabilité de concentration du fluor égale ou supérieure à 2 mg/l est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). La partie Sud Ouest, au niveau des forages F14, F04 et F21, est caractérisée par des eaux dont la probabilité d'avoir cette concentration varie de 0 à 0.25 (soit en pourcentage 0 à 25 %), c'est la zone dont l'eau présente une faible concentration du fluor.

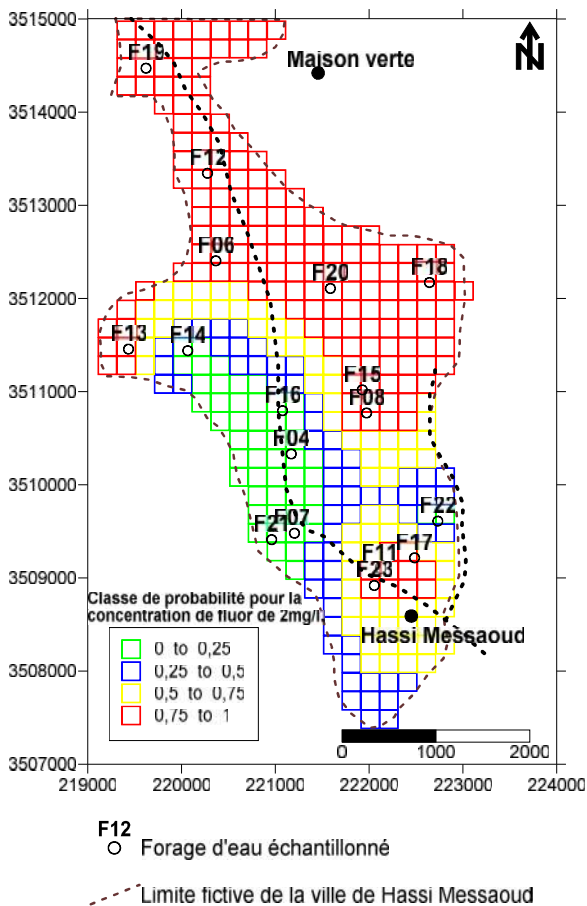


Fig. 7 : Carte des d'indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration du fluor supérieure ou égale 2mg/l. (Mai, 2013)

La carte obtenue représente un modèle probabiliste de la répartition du fluor dans la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud. Elle aide à la prise de décision quant à l'implantation et/ou l'exploitation des eaux en question.

La variance de krigeage augmente au fur et à mesure de l'éloignement aux observations (forages) induisant une erreur qui doit être prise en considération lors l'implantation des nouveaux forages pour réduire la variance et par conséquent, la diminution de l'erreur sur l'estimation.

### V. CONCLUSION

Cette étude représente une contribution à la cartographie géostatistique d'indicatrices des éléments, en particulier le fluor, au sein de la nappe du Complexe Terminal de Hassi Messaoud. La méthode utilisée repose sur la méthode géostatistique non-paramétrique, qui consiste à choisir une concentration limite (*cut-off*), un codage binaire (0,1) des observations en fonction du (*cut-off*), puis, la construction et l'ajustement du variogramme d'indicatrices et l'établissement du plan de krigeage d'indicatrices. La cartographie des résultats obtenus représente un modèle numérique de la probabilité d'avoir la concentration du fluor de 2 mg/l (concentration maximal de fluor à la norme algérienne). Cette cartographie a montré que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau avec une forte probabilité d'avoir une concentration de fluor égale ou supérieur à 2 mg/l. Elle est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). Cette probabilité diminue graduellement avec une direction NE-SW. Cette étude présente des perspectives pour implanter sélectivement les futurs forages d'eau et de leur exploitation en fonction de ces cartes. Le krigeage d'autres éléments est recommandé.

### REFERENCES

- [1] BEICIP. FRANLAB, "Zone périphérique du champ de Hassi Messaoud, réservoir cambro-ordovicien", *Rapport Interne CRD Sonatrach*, 1979, p.21.
- [2] UNESCO, "Projet Reg 100 - Étude des ressources en eau du Sahara septentrional", *Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris*, 1972.
- [3] J. Rodier, "L'analyse de l'eau, 7ème éd", 1984, p.1353.
- [4] K. H.Wedepohl, "Hand-book of Geochemistry." *Springer-Verlage, Berlin, Heidelberg*, New York, vol.II-4: 1974, p.9K-1
- [5] G. Matheron, "La théorie des variables régionalisées et ces applications", *Les cahiers de CMM5*, Paris ENSMP, p. 212.
- [6] A. Journel, G. Huijbregts, "Mining geostatistics. Academic" *Press, London*, U. K, 1978, p. 600.
- [7] A.G. Journel, "Nonparametric estimation of spatial distributions". *Math. Geol.*, 15, 1983, pp. 445-468.
- [8] B.M. Davis, "Indicator kriging as applied to an alluvial gold deposit", In : *Geostatistics for Natural Resources Characterisation*. Part I., G. Verly et al. (EDS), *D. Reidel Publishing Company*, 1984, pp. 337-348.
- [9] N. M. Johnson, S.J. Dreiss, "Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics", *Water Resources Research*, 25 (12), 1989, pp. 2501-2510.
- [10] Cressie, "Statistics for spatial data", *Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics*, New York, 1991, p. 900.
- [11] M.EP. Bierkens, P.A. Burrough, "The indicator approach to categorical data". I. Theory. 1. *Soil Sci.*, 44, 1993 a, pp. 361-368.
- [12] C. 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.