

# APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE).

Ahcène SEMAR \* et Mohamed MESBAH \*\*

## RÉSUMÉ

Le domaine nord tellien de l'Algérie est caractérisé par une forte densité de la population. Les caractéristiques géomorphologiques et géologiques y sont par ailleurs complexes. Les ressources en eau souterraine exploitée sont essentiellement localisées au niveau des vallées intra montagneuses. Ces aquifères sont constitués de formations alluvionnaires très hétérogènes sur lesquelles les oueds sont installés.

La partie aval de la Soummam, qui fait l'objet de notre étude, est la zone la plus exploitée. C'est une plaine à vocation essentiellement agricole. La qualité des eaux souterraines connaît une dégradation alarmante induite par plusieurs facteurs, parmi lesquels nous pouvons citer : le rejet non contrôlé des eaux usées des agglomérations urbaines, l'utilisation abusive en agriculture des engrais et produits phytosanitaires et la dégradation des nappes côtières par les eaux marines due aux pompages excessifs.

Afin de préserver la qualité des eaux souterraines, une étude de cartographie hydrochimique thématique basée sur une approche géostatistique a été entreprise. Les données hydrochimiques ont porté sur la conductivité électrique (CE) et les ions majeurs. La carte de la conductivité électrique (CE) a permis d'identifier les zones fortement minéralisées et sujettes à l'influence de l'intrusion marine. L'analyse spatiale des teneurs en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) a précisé l'ampleur de la pollution d'origine essentiellement agricole.

**Mots clés** - Cartographie thématique - Géostatistique - Hydrochimie - Vallée de la Soummam.

\* Enseignant-chercheur, chargé de cours au Laboratoire de Géologie Appliquée, Département des Sciences du Sol, Institut National Agronomique (INA), Avenue Pasteur, Belfort, El Harrach, 16200, Alger, Algérie. E-mail : [ahcene\\_semar@yahoo.fr](mailto:ahcene_semar@yahoo.fr) et [a.semar@ina.dz](mailto:a.semar@ina.dz)

\*\* Enseignant-chercheur, Professeur et Directeur de Recherche, à la Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire (FSTGAT), Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, El Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie. E-mail : [mohamed\\_mesbah@hotmail.com](mailto:mohamed_mesbah@hotmail.com)

- Manuscrit déposé le 30 Septembre 2007, accepté après révision le 31 Mai 2008.

## CONTRIBUTION OF THE AUTOMATIC CARTOGRAPHY TO THE ASSESSMENT GROUND-WATER QUALITY OF THE SOUMMAM VALLEY (ALGERIA) USING GEOSTATISTICAL METHODS.

### ABSTRACT

The northern tellian domain in Algeria is characterized by a relatively high density of population. The geomorphologic and geological conditions are complex. The exploited ground water resources are essentially located in the valleys surrounded by mountains like the Soummam valley. The lithology of aquifers is very heterogeneous alluvial. The aquifers follow the valleys topography till reaching the seashore.

The studied area is the down stream part of the Soummam valley. This region is defined mainly by its agricultural activity. The ground water resources present a degradation of its quality caused by the leaching of pollutants from pesticides and fertilizers into the aquifers and the intrusion sea water due to the excessive ground water pumping. In addition, leachates from agriculture, industrial waste, and the municipal solid waste have also polluted surface and ground water.

Thematic geochemical cartography using geostatistical approaches was used in order to evaluate the groundwater resources of the Soummam valley and for its protection and management. Measurements and physicochemical analysis of ground water were related respectively to electric conductivity (EC) and the major ions. The thematic cartography of electric conductivity (EC) may help us to know the oversaturated zone and especially the front of the intrusion of sea water. The nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) cartography specifies the behaviour of the pollution.

**Keywords** - Thematic cartography - Geostatistical - Hydrochemical - The Soummam valley.

### I - INTRODUCTION

La zone tellienne, comme la Kabylie, constitue l'une des régions les plus arrosées d'Algérie. Les caractéristiques géomorphologiques représentées par des piémonts de fortes pentes facilitent le ruissellement des eaux. Les formations géologiques y sont essentiellement constituées de sédiments peu perméables. Les quelques réservoirs hydrogéologiques existants jouent le rôle de drain. À l'échelle locale ou régionale, les ressources en eau mobilisables dans ces réservoirs souterrains sont limitées car l'essentiel des potentialités hydriques rejoignent la mer par ruissellement.

Dans cette région, la population est élevée ce qui augmente d'une part, la demande en eau et d'autre part, accroît les rejets sans traitement des eaux usées au niveau des oueds, ce qui entraîne une dégradation de la ressource. Le développement de l'industrie durant ces dernières années

ne fait qu'aggraver la situation par les nombreux rejets non contrôlés.

Les cultures maraîchères sont très largement développées au niveau de la vallée. L'utilisation abusive des engrais chimiques à base d'azote, ainsi que les produits phytosanitaires contribuent, sans aucun doute, à la pollution des eaux souterraines des nappes alluviales de la Soummam.

Afin de satisfaire la demande en eau, due à la croissance démographique ainsi qu'au développement industriel et agricole, de nombreux forages ont été réalisés dans la région. Les forages côtiers sont soumis à des pompages excessifs ce qui a entraîné des intrusions marines. De telles intrusions sont une source d'altération des eaux souterraines des nappes côtières. Les pompages intensifs abaissent le niveau de la nappe ce qui entraîne le déplacement des eaux marines vers des terres.

APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ  
DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE)

La protection des eaux souterraines est une question de plus en plus préoccupante, tant au niveau de l'exploitation de la ressource que des impacts sur la santé de la population.

L'objectif que nous nous sommes fixé est l'établissement de cartes thématiques avec une approche géostatistique de deux grandeurs hydrochimiques : la conductivité électrique (CE) et les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), ce qui permettra une meilleure appréciation de la qualité de la ressource en eau. Actuellement, les eaux provenant de quelques forages côtiers présentent des valeurs élevées en CE dues à l'intrusion des eaux marines dans la nappe côtière. La cartographie de la répartition des nitrates précisera les zones sujettes à une pollution dont l'origine (agricole, industrielle ou celles des agglomérations urbaines) sera précisée, ainsi que la cartographie de la conductivité électrique pour délimiter l'intrusion marine.

L'interprétation de ces cartes thématiques permettra l'identification des zones soumises à la dégradation ainsi que la prise de décision quant à la protection de la qualité des eaux souterraines destinées à l'AEP. La cartographie de ces deux propriétés hydrochimiques se fera par interpolation au niveau des nœuds d'une grille régulière qui couvre la zone d'étude. Les valeurs ainsi interpolées seront ensuite représentées sous forme de cartes thématiques facilement utilisables par les organismes concernés. Cette cartographie thématique sera appréhendée à travers une approche géostatistique.

## II – CADRE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Le domaine d'étude porte sur la partie aval du bassin versant de la Soummam. Ce grand bassin est compris entre la longitude  $3^{\circ}40' - 5^{\circ}45'$  et la latitude  $35^{\circ}30' - 36^{\circ}45'$ . Du point de vue topographique la basse vallée de la Soummam (BVS) est délimitée à l'ouest par Sidi Aïch, à

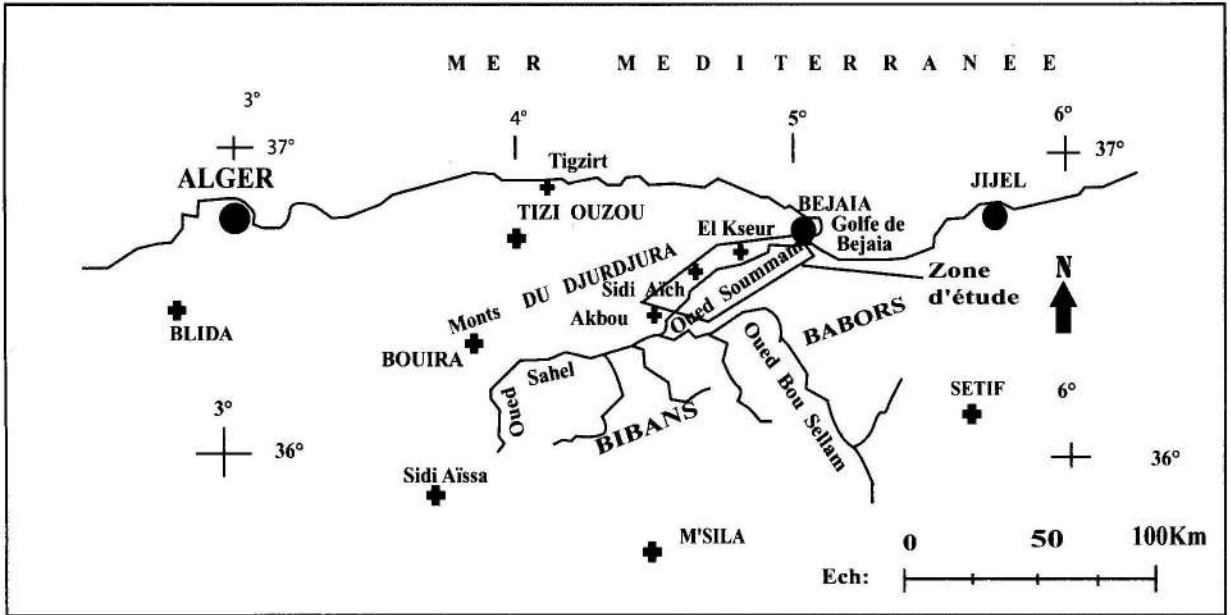
l'est par la mer Méditerranée (le golfe de Béjaïa), au nord par la partie orientale des monts du Djurdjura (mont de Gouraya) et au sud par les chaînons des Babors et des Bibans (fig. 1).

Le bassin versant de la Soummam se présente sous une forme allongée dont la vallée est étirée suivant un axe longitudinal d'environ 30 km. Sa superficie est de 808 km<sup>2</sup>.

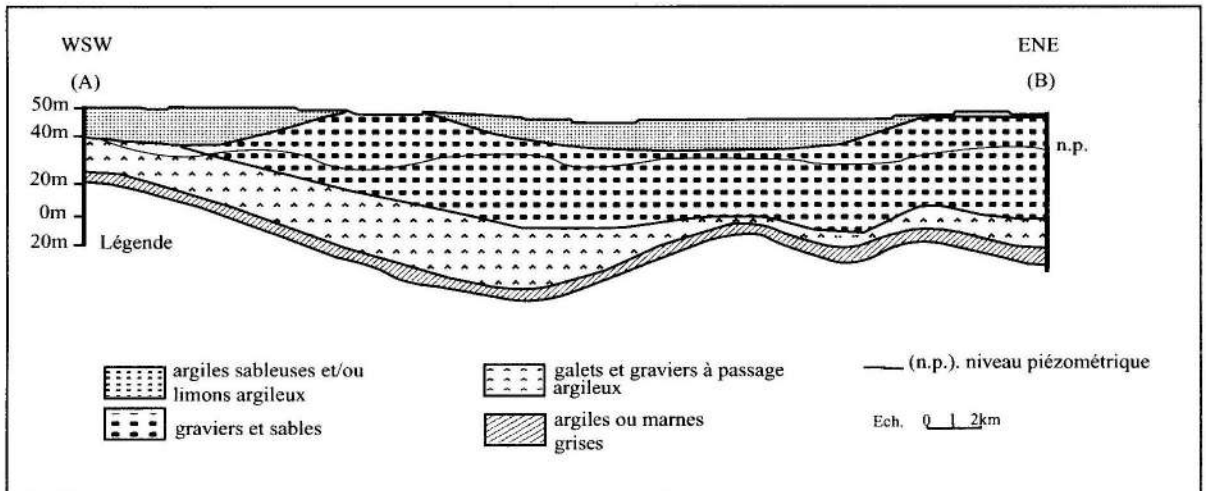
La plaine alluviale du bassin versant de la Soummam est une zone d'accumulation des sédiments miocènes, pliocènes et quaternaires. C'est une zone délimitée au nord par le Tell septentrional comprenant les massifs anciens et les unités allochtones représentées par les flyschs crétacés et tertiaires. Au sud, le Tell méridional est constitué des chaînons des Bibans et des Babors. La vallée de la Soummam est caractérisée par une tectonique complexe. Elle constitue une zone de transition entre le domaine interne et externe. Elle fait partie du Tell septentrional, structuré lors de l'orogénèse alpine (Hassissène, 1989).

La nature et la géométrie du remplissage sont mises en évidence par la prospection géophysique (CGG, 1970) complétée par des sondages mécaniques effectués dans la plaine alluviale. Ils ont montré la présence, sous les alluvions du lit actuel de l'oued, d'une formation grossière constituée de galets, de graviers et de sables, attribuée au Miocène. Ces deux formations sont séparées par un niveau argileux discontinu, ce qui justifie par endroit une relation hydraulique (Clinckx, 1973) et elles constituent la nappe alluviale de la basse vallée de la Soummam (fig. 2).

Le remplissage alluvionnaire est hétérogène. Il est formé de galets, de graviers, de sables et d'intercalations de niveaux argileux. D'amont en aval, il existe un granoclassement avec prédominance d'éléments grossiers au sud d'El Kseur. Les éléments fins sont au contraire bien représentés dans la partie aval.



**Fig. 1- Situation géographique de la zone d'étude**  
**Geographic localization map of the studied area**



**Fig. 2 – Coupe hydrogéologique**  
**Hydrogeological cross section**

APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE)

La nappe alluviale est limitée par un seuil hydrogéologique localisé au niveau de Sidi Aïch. De Sidi Aïch à Oued Amizour, la formation sablo-argileuse est prédominante, la nappe est libre. De la région de Oued Amizour à l'embouchure, ce sont des limons argileux qui dominent, définissant une nappe semi captive (Clinckx, 1973).

D'après l'étude géophysique réalisée par la CGG en 1970 et l'interprétation des sondages mécaniques profonds, l'épaisseur de l'aquifère est variable et il repose sur un substratum marneux imperméable attribué au crétacé. L'épaisseur maximale de l'aquifère qui est de 70m se situe au niveau de la zone comprise entre El Kseur et Oued Ghir (tabl. I).

L'écoulement des eaux souterraines est globalement d'orientation O-E, de la région de Sidi Aïch à l'embouchure. La profondeur du

niveau piézométrique de la nappe alluviale de la basse Soummam varie de 10m à 13m. De la zone aval de la région d'El Kseur jusqu'à Oued Ghir, de nombreux forages en exploitation ont entraîné une baisse du niveau piézométrique (tabl. II).

### III – L'APPROCHE PRÉCONISÉE

Nous avons sélectionné 60 points répartis entre Sidi Aïch et l'embouchure, afin d'étudier le comportement chimique des eaux souterraines. Le choix du réseau de maillage est justifié par l'utilisation des points d'eau (eau potable, industrie et irrigation) et par souci de couvrir l'ensemble de la région. Les prélèvements d'eaux ont été effectués durant le mois d'octobre 2003, période correspondant à la fin de la saison sèche et au début de la saison humide (fig.3).

**Tableau I** - Epaisseurs du remplissage alluvial selon la direction d'écoulement des eaux souterraines.

*Alluvial thickness in Soummam valley along the ground water flow direction*

Forages	Zone amont Il Maten – El Kseur	El Kseur – Oued Ghir	Zone aval Oued Ghir - Béjaïa
Epaisseur (m)	35 – 40	70	50 - 60

**Tableau II** - Profondeur du niveau des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam d'amont en aval (octobre 2003).

*Water Depth in Soummam valley (October 2003)*

Points d'eau	Zone amont Il Maten	Zone aval Il Maten	Zone amont El Kseur	Zone aval El Kseur	Oued Ghir	Zone amont Béjaïa	Zone aval Béjaïa
Profondeur (m)	8.7	6.2	7.0	10.4	13.1	1.4	1.6
Distance à la mer (km)	34.0	31.0	24.5	21.5	9.5	4.2	1.0

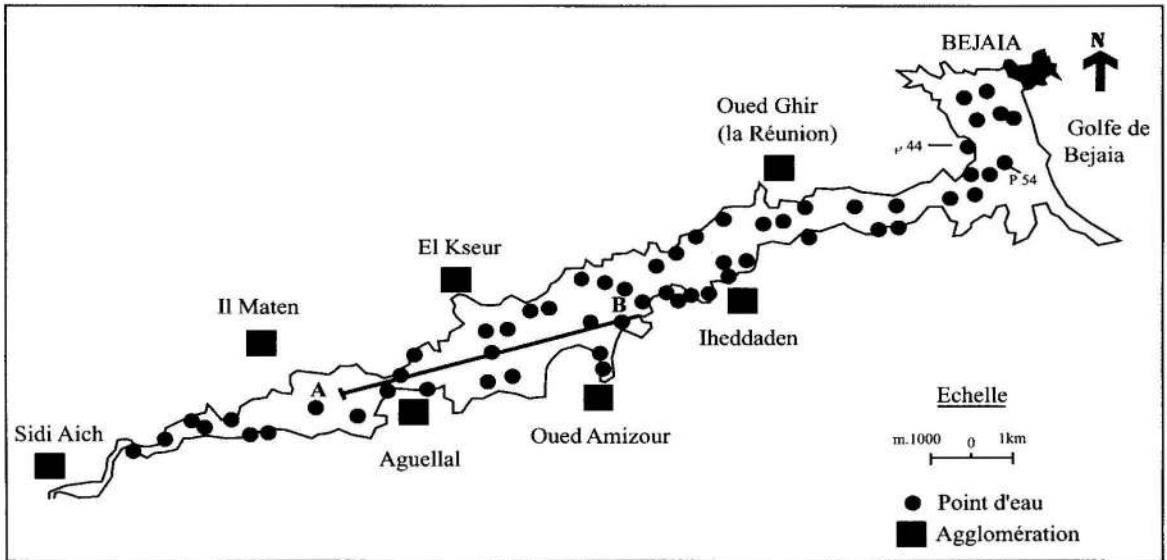


Fig. 3 - Carte de situation des points d'eau et de la coupe hydrogéologique AB.

**Areal distribution of water wells and AB hydrogeological map.**

Les analyses ont été réalisées au laboratoire de chimie des eaux et des sols (département sciences du sol de l'Institut National Agronomique d'El Harrach, Alger, Algérie). Nous avons d'une part procédé à l'analyse des principaux ions majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ) et d'autre part à la mesure de la conductivité électrique (CE). Les procédés d'analyses sont : la spectrométrie et le titrage. Vu l'objectif de notre étude, nous nous attachons tout particulièrement à la conductivité électrique mesurée en laboratoire (exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à  $25^\circ\text{C}$ ) et aux nitrates ( $\text{NO}_3^-$  exprimés en  $\text{mg}/\text{l}$ ) déterminés par colorimétrie (Rodier, 1978).

### III - 1. Notions de qualité de l'eau

La conductivité électrique (CE) permet d'évaluer de façon globale la teneur en sels dissous dans l'eau et d'estimer la minéralisation. Une conductivité électrique supérieure à  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$

est l'indice d'une forte minéralisation (Rodier, 1978).

Les nitrates sont absents dans les formations géologiques. Leur présence est donc due à l'action anthropique. Les nitrates sont indicateurs d'une pollution récente par des matières organiques, essentiellement d'origine agricole liée à leur épandage, ou par l'utilisation en excès d'engrais chimiques. Les nitrates provenant de l'azote organique et de l'oxydation de l'azote inorganique ne sont pas absorbés par le sol et peuvent alors migrer dans l'eau souterraine et rejoindre les forages de captages (Bantan *et al.*, 1998). La teneur limite préconisée par l'OMS est fixée à  $44\text{mg}/\text{l}$ , les normes européennes ont retenu comme limite acceptable  $50\text{mg}/\text{l}$ .

Les teneurs élevées en nitrates sont essentiellement liées au développement des pratiques agricoles modernes, mais aussi aux rejets non

contrôlés des eaux usées des collectivités locales et de certaines industries.

### III - 2. Notions de géostatistique

Les méthodes géostatistiques considèrent l'existence de variables régionalisées dont la définition a été énoncée par Matheron en 1965 : «la géostatistique est l'application de la théorie des variables régionalisées à l'estimation des gisements miniers (avec tous les tours de main que cela implique). Plus généralement, nous dirons d'un phénomène qui se déploie dans l'espace et y manifeste une certaine structure, qu'il est régionalisé ». Il s'agit d'une variable caractérisant un phénomène se déployant dans l'espace et/ou dans le temps et y manifestant une certaine structure. La fonction aléatoire peut, en particulier, être une variable régionalisée si elle présente une structure spatiale (Journel, 1977), c'est-à-dire une dépendance de la valeur prise entre deux points distincts.

La théorie de la variable régionalisée est appliquée aux paramètres hydrodynamiques (Troisi et al., 2000; El Houcyne El Idrysy et Florimond De Smedt, 2007) ainsi qu'au domaine de la contamination de la ressource en eau souterraine (D'Agostino et al., 1998); (Rautman et Istok, contamination : 1, 1996) et (Istok et Rautman, contamination : 2, 1996). Elle fournit deux outils pour l'analyse de la variabilité spatiale des propriétés hydrochimiques des aquifères :

- un résumé synthétique de la variabilité spatiale des propriétés hydrochimiques sous forme d'un variogramme;

- une technique de prédiction : le krigeage, prenant en compte l'information du variogramme et permettant l'estimation, avec une précision connue, des propriétés d'un aquifère en des lieux non échantillonnés.

La méthode de krigeage recherche un estimateur non biaisé de la variable. En théorie, cette méthode est optimale pour la précision obtenue. Le krigeage contrairement à d'autres méthodes permet de calculer l'erreur d'estimation de la variable étudiée. Les conditions indispensables à l'utilisation du krigeage est que la moyenne et la variance soient stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de la position des points dans l'espace de la variable étudiée, mais de la distance entre les points (Delhomme, 1976). Le variogramme représente la variance totale déduite de la covariance et ce, en fonction de la distance entre les points. Le semi-variogramme est calculé à l'aide de l'équation suivante (1) :

$$\tilde{\alpha}(h) = 1/2 N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

-  $\tilde{\alpha}(h)$  est la semi-variance ou variogramme;

-  $x_i$  sont les points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en  $x_i$  et  $x_i+h$ ;

-  $h$  est la distance entre deux points de mesure de la variable  $Z$  étudiée;

-  $N(h)$  est le nombre de couples de points distants de  $h$ .

Si le phénomène étudié est anisotrope, il y a lieu de déterminer son comportement dans les directions d'anisotropie.

L'analyse géostatistique est réalisée par le programme informatique GEOEAS établie en 1988 par Englund et Sparks. La détermination des variogrammes directionnels, à partir de variogrammes surfaciques, est réalisée par le programme VARIOWIN établie en 1996 par Pannatier.

## IV – RÉSULTATS ET COMMENTAIRES

### IV – 1. La conductivité électrique

Le tableau III montre une grande variabilité de la conductivité électrique (CE). Elle oscille entre 500 et 3800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Elle présente une moyenne arithmétique de 1620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Le coefficient de variation est de l'ordre 49.3%. Selon le test de normalité de Kolmogorov – Smirnov, la C.E. suit une loi gaussienne.

**Tableau III** – Paramètres statistiques de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Statistic parameters of electrical conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Paramètres statistiques de la CE	
Taille de l'échantillon	60
Valeur minimale	500
Valeur maximale	3800
Moyenne	1620
Écart type	800
Coefficient de variation %	49.27

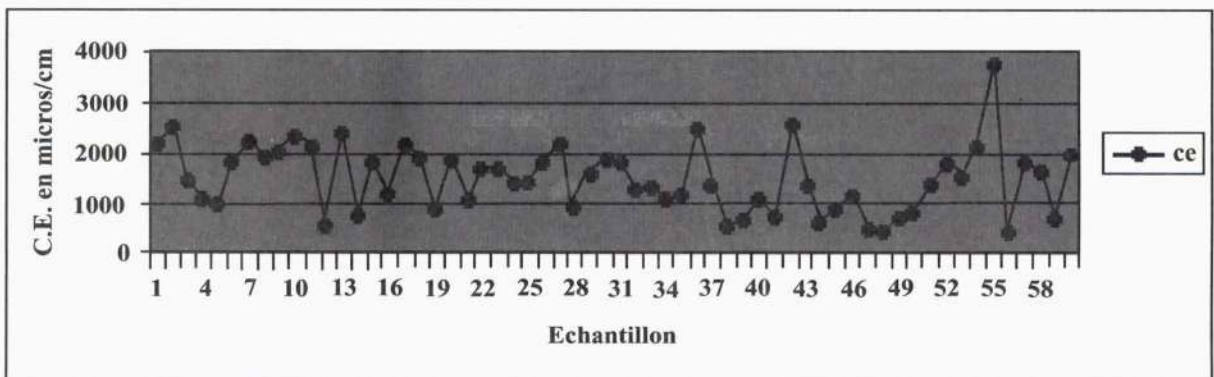
La variabilité dans l'espace de la CE des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam est liée aux faciès des formations géologiques et aux conditions anthropiques. La valeur de

500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  correspond au puits P44 situé en bordure de la vallée dans des formations crétacées, la valeur de 3800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  est mesurée au niveau du puits P54. Ce dernier est localisé au niveau de la plaine à proximité de la mer (fig.3). Dans l'ensemble la CE varie entre 1000 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (fig. 4).

L'analyse statistique des paramètres hydro-chimiques des eaux souterraines (ions majeurs et la CE) a permis l'établissement d'une matrice de corrélation (tabl. IV). Elle montre des relations significatives toutes positives au seuil de probabilité  $\alpha=0.05$  entre la CE et les ions majeurs d'une part et les cations et les anions d'autre part.

Le variogramme de surface (Pannatier, 1996) permet d'identifier l'existence de directions anisotropes. Les valeurs de  $\gamma(h)$  les plus faibles correspondent aux variances minimales, donc à la direction d'isotropie où la portée est maximale. L'analyse du variogramme de surface (a) de la CE (fig. 5) met en évidence plusieurs directions variographiques où nous n'avons retenu que celles qui présentent des portées maximales et minimales.

La première direction principale est de  $35^\circ$ , elle correspond à l'axe de la vallée c'est-à-dire à la direction moyenne de l'écoulement de la nappe. La seconde direction, perpendiculaire à la première, est de  $125^\circ$ , elle correspond à une variabilité plus



**Fig. 4** - Distribution de la conductivité électrique dans les eaux souterraines de la BVS ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

*Distribution of electrical conductivity in the ground water of the Soummam valley ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )*



APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE)

importante de la CE et elle traduit les bordures de la vallée.

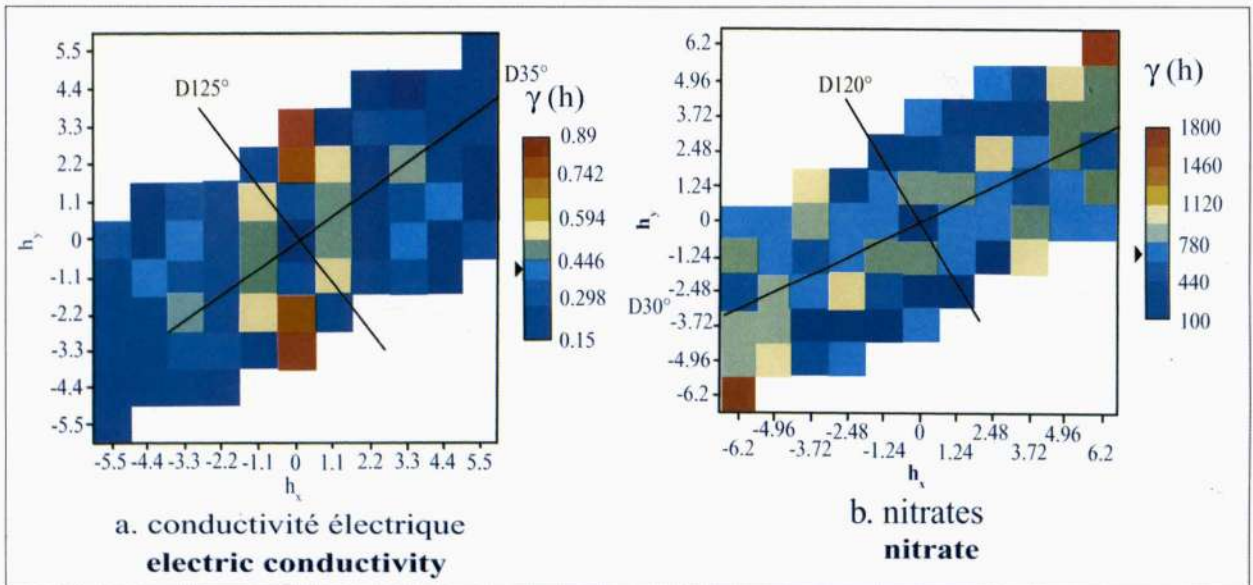
L'adéquation du modèle théorique aux variogrammes expérimentaux (a) de la figure 6, a permis de retenir un modèle de type exponentiel qui a donné l'IGF (Indicative Goodness of Fit) le plus faible. L'IGF est le critère de validation du modèle.

Son équation est de la forme  $\tilde{\alpha}(h) = 0.4 [1 - e^{-h/0.38}]$  avec un rapport d'anisotropie égal à 3.22. Les premiers points du modèle suggèrent un effet de pépite différent de zéro. Ce qui indique la présence d'une micro régionalisation ou des erreurs de mesures de la CE. Néanmoins, le meilleur IGF dans le programme VARIOWIN (Pannatier, 1996), est celui qui prend en considération un effet de pépite nul. La portée évaluée à 1.15km de la CE

**Tableau IV - Matrice de corrélation des paramètres hydrochimiques (ions majeurs et CE)**  
**Interelemental correlation matrix of hydrochemical data**

	CE	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
CE	1							
Ca <sup>++</sup>	<b>0.86</b>	1						
Mg <sup>++</sup>	<b>0.92</b>	<b>0.78</b>	1					
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	<b>0.84</b>	<b>0.63</b>	<b>0.76</b>	1				
Cl <sup>-</sup>	<b>0.90</b>	<b>0.74</b>	<b>0.83</b>	<b>0.92</b>	1			
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	<b>0.79</b>	<b>0.65</b>	<b>0.68</b>	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.35</b>	<b>0.38</b>	<b>0.39</b>	<b>0.29</b>	0.23	0.19	1	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.03	0.01	0.02	-0.13	-0.03	-0.18	0.21	1

**NB :** En caractères gras sont exprimés les valeurs significatives au seuil  $\alpha = 0.05$



**Fig. 5 - Variogrammes de surface de la conductivité électrique (a) et des nitrates (b) des eaux souterraines**  
**Area variograms of electrical conductivity (a) and nitrate (b) in the groundwater of the Soummam valley**

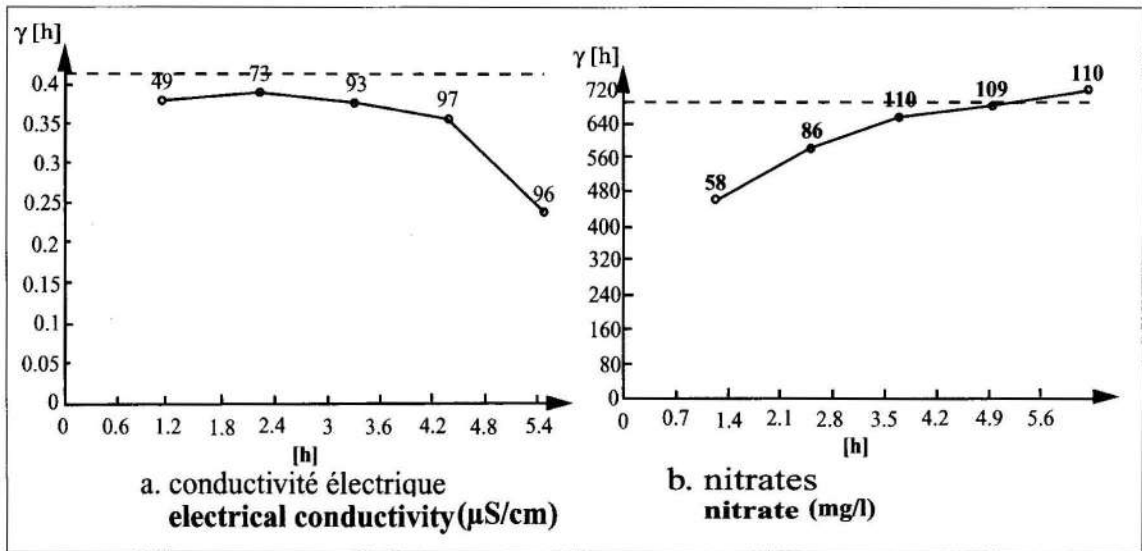


Fig. 6 - Variogrammes expérimentaux de la conductivité électrique (a) et des nitrates (b)

*Experimental variograms of electrical conductivity (a) and nitrate (b)*

montre que les valeurs, au delà de cette distance, sont indépendantes.

La carte krigée de la CE (fig. 7), réalisée par la méthode de voisinage glissant, montre que les valeurs inférieures à 1000 µS/cm se situent au sud d'Il Maten alors que les valeurs de 2000 µS/cm se trouvent au nord d'Iheddaden et au sud d'Il Maten.

Les conductivités électriques les plus élevées, dépassant les 2000 µS/cm pour atteindre parfois les 3000 µS/cm, témoignent d'une forte minéralisation. Cette dernière se situe au niveau de l'embouchure. Cette forte conductivité électrique est due à l'intrusion marine liée aux pompes excessifs. Le faciès de ces eaux est de type chloruré sodique.

Les valeurs de CE les plus représentatives au niveau de la basse vallée de la Soummam oscillent entre 1000 et 2000 µS/cm.

#### IV - 2. Les nitrates

La teneur en nitrates des eaux souterraines de la basse vallée de la Soummam varie de 0 à 126 mg/l. La moyenne arithmétique de ces teneurs

en nitrates est de 24.41 mg/l. Le coefficient de variation (109.40%) élevé indique une distribution n'obéissant pas à une loi normale : elle est de type dissymétrique gauche, c'est-à-dire une distribution dont les valeurs sont inférieures à la moyenne (tabl. V). Le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov à une loi normale est rejeté au seuil de probabilité 0,05. Il en est de même quand on fait l'hypothèse d'une distribution log normale. Il ne semble donc pas y avoir de transformation simple permettant de rendre normale la distribution des nitrates.

Tableau V - Paramètres statistiques des nitrates (mg/l)

*Statistic parameters of nitrate (mg/l)*

Paramètres statistiques des nitrates	
Taille de l'échantillon	60
Valeur minimale	0.00
Valeur maximale	124
Moyenne	24.41
Écart type	26.72
Coefficient de variation %	109.40

APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE)

Le diagramme de la figure 8 indique une variabilité des teneurs en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) des eaux de la basse vallée de la Soummam. La classe dominante en nitrates est comprise entre 0 et 50 mg/l.

Dans la région d'étude, nous observons plusieurs points d'eau dont les teneurs en nitrates sont supérieures à 50 mg/l, ce qui témoigne d'une pollution réelle de ces eaux souterraines.

L'interprétation du variogramme de surface (b) de la figure 5 permet de retenir deux directions d'anisotropie. La première direction de  $30^\circ$  s'apparente à l'axe de la vallée, siège des écoulements superficiels et souterrains. La seconde direction de  $120^\circ$  traduit une variabilité plus importante des teneurs en nitrates qui correspond aux bordures de la vallée. Ces observations supposent une mobilité des nitrates dans le sens de l'écoulement des eaux sans pour autant

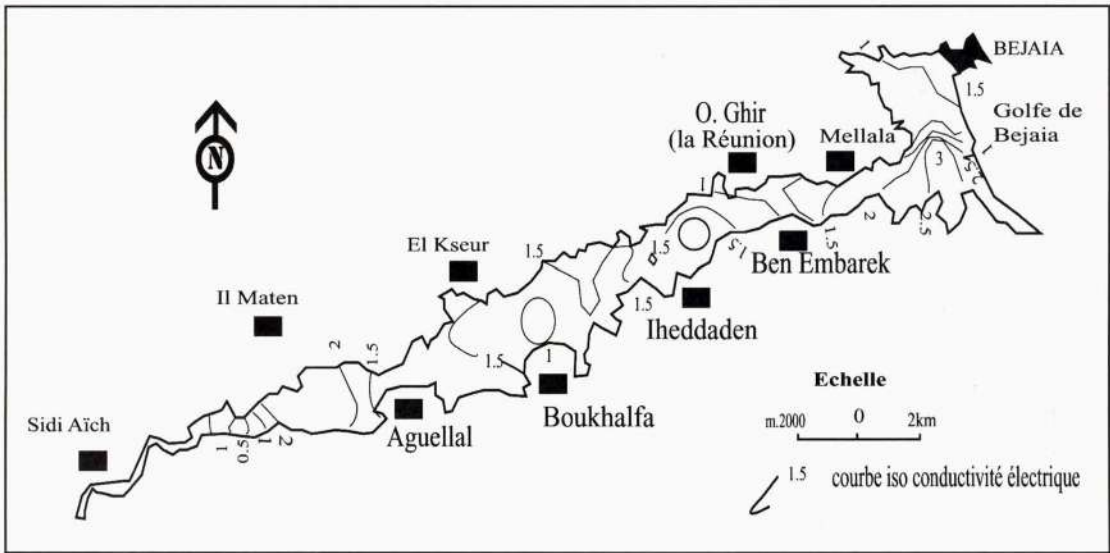


Fig. 7 - Carte krigée de la conductivité électrique dans les eaux souterraines de la BVS ( $10^3$  à S/cm)  
*Kriging map of electrical conductivity in the ground water of the Soummam valley ( $10^3$  à S/cm)*

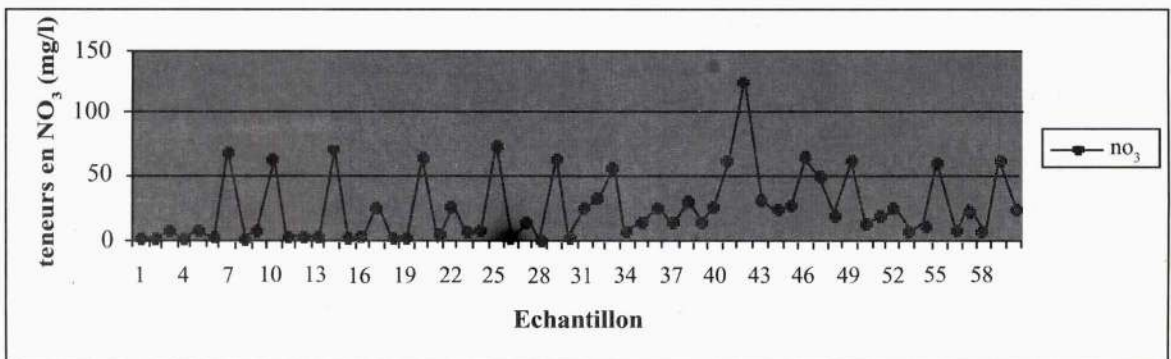


Fig. 8 - Distribution des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la BVS (mg/l)  
*Distribution of nitrate concentration in the ground water of the Soummam valley (mg/l)*

montrer une grande variabilité de leur teneur, contrairement aux observations faites en direction des bordures de la vallée où les teneurs sont certes plus élevées mais différentes les unes des autres.

Le modèle du variogramme théorique ajusté au variogramme expérimental (b) de la figure 6 est de type exponentiel. Sa fonction est  $\hat{\alpha}(h) = 665 [1 - e^{-h/0.71}]$  avec un rapport d'anisotropie de 7.70. L'effet de pépite est de  $70 \text{ (mg/l)}^2$  correspondant à environ 10% du palier. L'analyse de la variation des teneurs en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) montre qu'elle est structurée sur une distance de 2.14 km (correspondant à la portée); au-delà de cette distance, les valeurs des teneurs en nitrates sont indépendantes.

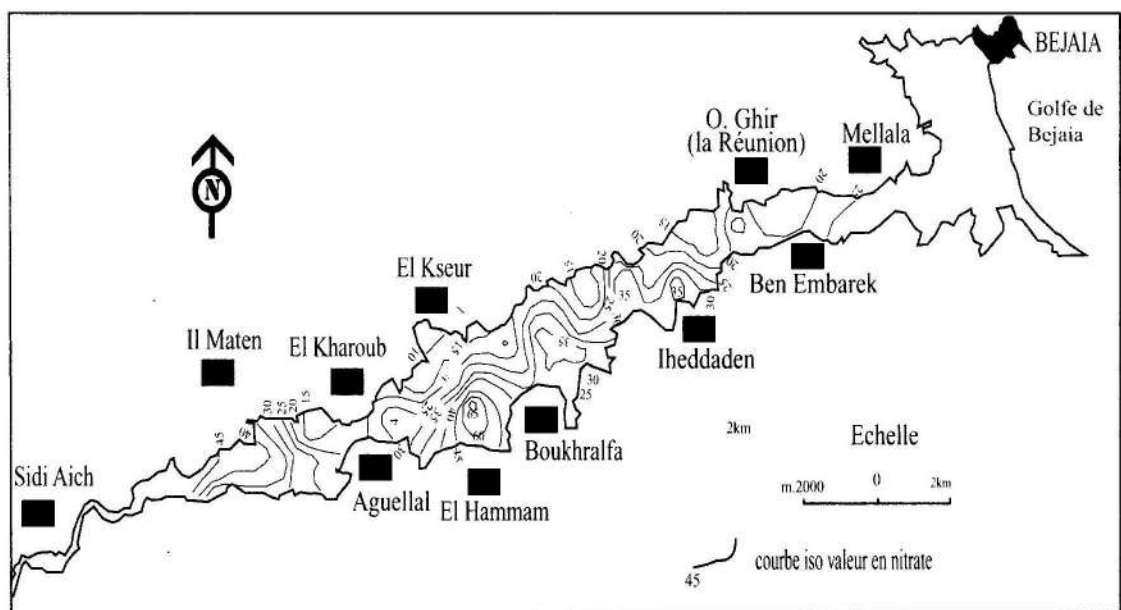
La carte krigée des teneurs en nitrates (fig. 9), réalisée par la méthode de voisinage glissant, montre des concentrations faibles, inférieures à 20 mg/l, localisées au sud d'El Kharoub, au sud et à l'est d'El Kseur et au sud-ouest de Oued Ghir (ex. la Réunion).

Au sud de Mellaha, et ce jusqu'à l'embouchure, les nitrates sont absents dans les eaux souterraines. Il y a lieu de préciser qu'au niveau de cette zone, le toit de la nappe captive dépasse les 20 m de profondeur. La partie aval de la basse vallée de la Soummam a perdu sa vocation agricole du fait de l'urbanisation des terres au profit de l'extension des villes et du développement de l'industrie, en particulier l'activité portuaire.

Les concentrations en nitrates dépassant les 45 mg/l s'observent au sud d'El Maten et au nord d'El Hammam. Le gradient de concentration en nitrates est important au niveau de la localité d'El Hammam et sur la rive droite de l'oued Soummam.

## V - CONCLUSION

Les résultats obtenus par cette étude permettent de constater que la CE et les teneurs en nitrates des eaux souterraines de la basse vallée de l'oued Soummam sont influencés



**Fig. 9 - Carte krigée des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines de la BVS (mg/l)**  
**Kriging map of nitrate in the ground water of the Soummam valley (mg/l)**

APPORT DE LA CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE PAR APPROCHE GÉOSTATISTIQUE À L'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DE LA VALLÉE DE LA SOUMMAM (ALGÉRIE)

par la nature géologique des formations et par l'activité de l'homme. Au niveau de l'embouchure, la CE est influencée par l'intrusion marine.

L'analyse statistique des données de la CE et des nitrates donne des résultats contrastés avec une large gamme de variation en particulier pour les teneurs en nitrates. La CE est contrôlée par tous les autres éléments chimiques (éléments majeurs). Le faciès chimique dominant est le type chloruré sodique.

L'interprétation des variogrammes de la CE et des nitrates a mis en évidence une structuration des données selon un même modèle de type exponentiel avec des rapports d'anisotropie différents et nettement plus marqués pour les données des nitrates.

La portée est plus importante pour les nitrates que la CE, alors que l'effet de pépité est mieux marqué pour les nitrates que la CE. La structuration des teneurs en nitrates selon le modèle retenu suppose une présence significative de ces ions dans les eaux souterraines.

Les directions d'isotropie de la CE et des nitrates correspondent à l'axe de la vallée alors que les directions d'anisotropie sont celles des rives de l'oued Soummam.

La cartographie de la CE par une approche géostatistique a permis de mettre en évidence une anomalie au niveau de l'embouchure de la vallée de la Soummam que nous avons attribuée au phénomène d'intrusion saline due aux pompes excessifs.

La carte des teneurs en nitrates montre des concentrations anormales au sud d'Il Maten et au nord d'El Hammam dues à l'activité humaine (urbanisation, activité industrielle et agricole).

## BIBLIOGRAPHIE

- BANTAN, O., LUMONY, M. ET BANGROY. 1998.** Hydrogéologie : multi-sciences environnementales des eaux souterraines : *Collection presses de l'université de Québec* ; 414 p.
- COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (CGG). 1970.** Etude hydrogéologique par prospection électrique et sismique de la vallée de la Soummam. *Rapport DEMRH*; 136 p.
- CLINCKX, C. 1973.** Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam (Sidi Aïch – Bejaïa). *Rapport DEMRH*; 43 p.
- D'AGOSTINO, V., GREENE, E.A., PASSARELLA, G. AND VURRO, M. 1998.** Spatial and temporal study of nitrate concentration in ground-water by means of co regionalisation. *Environmental geology*, vol. 36, *Springer – Verlag*; pp: 285-295.
- DELHOMME, J.P. 1976.** Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau (variabilité spatiale des grandeurs hydroclimatiques et hydrogéologiques et précision de leur connaissance). *Thèse de Docteur Ingénieur. ENSMP, CIG*; 130 p.
- EL HOUCYNE EL IDRYSY AND FLORIMOND D. S. 2007.** A comparative study of hydraulic conductivity estimations using geostatistics. *Environmental geology*, vol.15, *Springer-Verlag*; pp. 459-470.
- ENGLUND, E. AND SPARKS, A. 1988.** [GEOEAS]: Geostatistical Environmental Assessment Software. *Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and development U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada*; 128 p.
- HASSISSÈNE, M. 1989.** Etude géologique des djebels Gouraya et Arbalou. *Thèse de Magister IST-USTHB*; 95 p.
- ISTOK, J.D. AND RAUTMAN, C.A. 1996.** Probabilistic assessment of groundwater: contamination 2. Results of case study. *Ground water*; vol. 34, n°6, pp: 1050-1064.

- JOURNEL, A.G. 1977.** Cours de géostatistique minière. *Centre de Géostatistique, ENSMP*; tome 1, 388 p.
- MATHERON, G. 1965.** Les variables régionalisées et leur estimation. *Thèse, Masson et Cie, éditions, Paris.*
- PANNATIER, Y. 1996.** [VARIOWIN]: Software for Spatial Data Analysis in 2D, *Springer-Verlag, New York*; 91 p.
- RAUTMAN, C.A. AND ISTOK, J.D. 1996.** Probabilistic assessment of ground water: contamination 1. Geostatistical framework. *Ground-water*; Vol. 34, n°5, pp. 899-908.
- RODIER, J. 1978.** L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduelles, eaux de mer. *Collection Dunod Technique*; 1136 p.
- TROISI, S., FALICO, C., STRAFACE, S. AND MIGLIARI, E. 2000.** Application of kriging with external drift to estimates hydraulic conductivity from electrical-resistivity in unconsolidated deposits near Montalto Uffugo, Italy. *Environmental geology*, vol.8, Springer-Verlag; pp: 356-367.