

# **APPROCHE GEOSTATISTIQUE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HETEROGENE. EXEMPLE DE LA PLAINE DE LA SEYBOUSE - ALGERIE**

**Ahmed Chérif TOUBAL\***

## **RÉSUMÉ**

L'étude portant sur la variabilité spatiale de la transmissivité est conduite selon la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1971). La démarche porte sur la quantification des lois spatiales de ce paramètre hydrodynamique et l'estimation première de ses valeurs moyennes par la technique du krigeage ordinaire. Chaque valeur estimée est assortie de la variance minimale calculée (ou variance de krigeage) et d'un intervalle de confiance à un seuil de risque donné. L'évaluation de la transmissivité est ensuite affinée grâce à la Géostatistique multivariable (cokrigeage, méthode régressive) qui permet l'implication de procédés géophysiques fiables et peu onéreux. Les résultats acquis laissent entrevoir des perspectives prometteuses pour la recherche hydrogéologique régionale.

**Mots clés :** Aquifères alluvionnaires - Milieu hétérogène - Plaine de la Seybouse - Krigeage ordinaire - Méthode régressive - Cokrigeage - Transmissivité - Résistance transversale - Potentialités aquifères.

## **GEOSTATISTICAL APPROACH OF HYDRODYNAMICS PARAMETERS IN HETEROGENEOUS POROUS MEDIA. APPLICATION TO THE SEYBOUSE BASIN - ALGERIA**

### **ABSTRACT**

The spatial variability of the transmissivity is studied by a geostatistical approach. The way consist, at first, to identify the spatial laws of this hydraulic parameter and to determine the average values by ordinary kriging. The transmissivity evaluation is then improved using the multivariable Geostatistic (cokriging, regressive method) under cover of accurate and cheap geophysical technics. The results can be used both as tools in regional groundwater investigations and as tools of solving problems of models.

**Key words :** Alluvial aquifers - Heterogeneous medium - Seybouse basin - Ordinary kriging - Regressive method - Cokriging - Transmissivity - Transverse resistance - Aquifer potentialities.

\*F.S.T.G.A.T., U.S.T.H.B., BP 32, El Alia, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie

- *Manuscrit déposé le 16 Novembre 2002, accepté après révision le 17 Septembre 2003.*

## I - L'HETEROGENEITE DU MILIEU OU L'IMPERATIF D'UNE APPROCHE PROBABILISTE

L'étude géologique révèle la nature complexe des matériaux comblant la plaine d'Annaba-centre (fig.3d). On y reconnaît, des niveaux discontinus de graviers et sables d'âge plio-quadernaire, séparés parfois par de faibles épaisseurs d'argile lenticulaire. Ces formations qui reposent sur un substratum argileux d'âge mio-pliocène, contiennent une nappe captive (Toubal, 1998). Les graviers couvrent une superficie de plus de 600 Km<sup>2</sup> avec une épaisseur variant de quelques mètres en bordure de la plaine à 80 mètres en son centre. Exploités par une centaine de forages, ils constituent de par leurs caractéristiques hydrodynamiques un réservoir économiquement intéressant.

L'extrême hétérogénéité du milieu induit une distribution chaotique des propriétés hydrodynamiques du milieu, justifiant à cet égard l'approche probabiliste qui suit.

## II - RECONNAISSANCE OPTIMALE DES TRANSMISSIVITES

### 1 - Le krigeage ordinaire

En géostatistique linéaire, la valeur estimée d'une variable régionalisée est donnée par une moyenne pondérée de valeurs mesurées, selon la formule (1) (Delhomme, 1978 et 1979):

$$Z_0^* = Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_0^i Z_i \quad (1)$$

$Z_0^*$  est l'estimation de la valeur exacte  $Z_0$  au point  $x_0$ . Le problème consiste à trouver les poids  $\lambda^i$  qui donneront la meilleure estimation possible. Le krigeage simple est un estimateur linéaire qui satisfait aux conditions:

- de non-biais: en moyenne l'erreur est nulle:

$$E[Z_0^* - Z_0] = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \lambda_0^i = 1 \quad (2) \text{ et } (3)$$

- d'optimalité: l'erreur quadratique moyenne est minimale :

$$E\left[(Z_0^* - Z_0)^2\right] \text{ min} \quad (4)$$

Les conditions (2) et (4) permettent de calculer les poids  $\lambda^i$ , et une variance d'estimation à l'aide du variogramme  $\gamma(h)$  qui, s'écrit:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (5)$$

Dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne des erreurs d'estimation, l'estimateur de  $Z_0$  s'écrit alors:

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_0^i Z_i \pm 2\sigma_K, \quad \sigma_K \text{ étant l'écart-type}$$

d'estimation:

$$\sigma_K = \sqrt{\text{var}(Z_0^* - Z_0)} = \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_0^i \gamma(x_i - x_0) + \mu \right]^{1/2} \quad (6)$$

D'un point de vue pratique, la reconnaissance optimale du champ des transmissivité requiert les étapes successives suivantes (Darrichau-Beucher, 1981) :

\* Transformation logarithmique des transmissivités, en vertu d'une corrélation plus forte de  $Z = \text{Log}T$ .

\* Estimation du variogramme expérimental à partir d'un échantillonnage discret du paramètre étudié.

\* Ajustement d'une fonction théorique au variogramme brut. Le modèle ajusté doit assurer

que la variance des estimés  $\left( \sum_{i=1}^n \lambda_0^i Z_i \right)$  soit

positive. Les variogrammes les plus fréquemment utilisés sont les modèles linéaires en  $h^2$ , sphériques, exponentiels et gaussiens.

APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HÉTÉROGÈNE.  
EXEMPLE DE LA PLAINE DE SEYBOUSE - ALGÉRIE

\* Contrôle par "validation croisée" de la pertinence des modèles retenus. On supprime l'une après l'autre les valeurs mesurées  $Z_i$  et on calcule au point correspondant la valeur estimée  $z_i^*$  à partir des autres données. On peut alors déterminer l'erreur de krigeage  $e_i = Z_i^* - Z_i$ ; Les erreurs  $e_i$  sont ensuite comparées aux écarts-types d'estimation théoriques  $\sigma_k$ .

Un ajustement correct doit se traduire par:

- une erreur moyenne voisine de 0 :

$$e_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i^* - Z_i) = 0 \quad (7)$$

- une erreur réduite (en valeur absolue) inférieure à 2 :

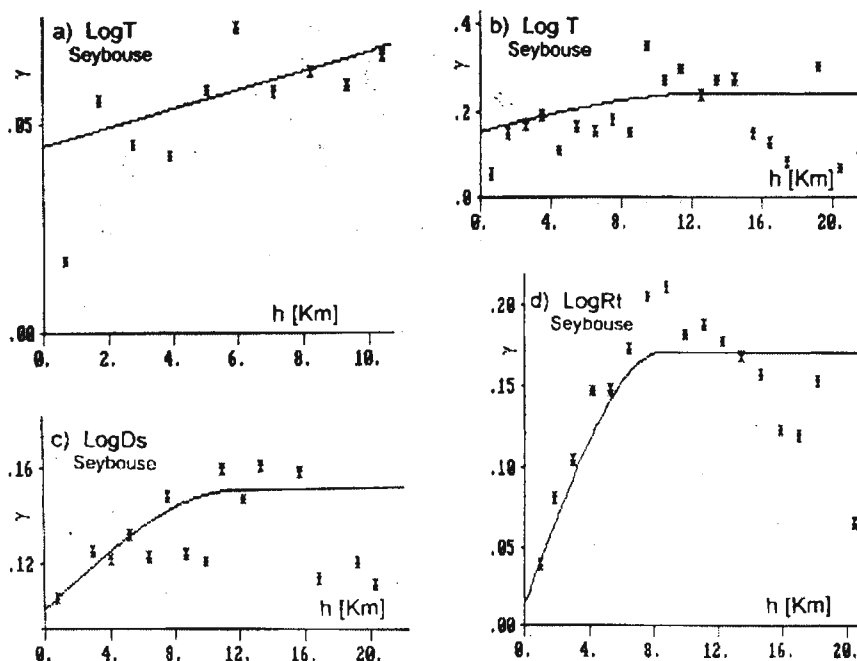
$$\left| e_r = \frac{Z_i^* - Z_i}{\sigma_{k_i}} \right| \leq 2; \forall i \quad (8)$$

- une erreur quadratique réduite proche de 1 :

$$e_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{\sigma_{k_i}^2} = 1 \quad (9)$$

Des variogrammes expérimentaux ont été calculés et ajustés avec des modèles théoriques (fig. 1). A l'exception de la courbe (fig. 1a), Ils peuvent être décrits par un modèle sphérique avec croissance linéaire au voisinage de l'origine et stabilisation à un palier, au-delà d'une distance qui varie de 8 Km pour la résistance transversale (fig. 1d) à un peu plus de 18 Km en ce qui concerne la transmissivité (fig. 1a, b). On notera dans le comportement du graphe de  $2\gamma(h)$  les particularités suivantes:

- La présence d'oscillations et d'effets de trou traduisent la présence de zones à fortes valeurs juxtaposées à des zones à faibles valeurs (fig. 1a, b, c et d). Ce phénomène se manifeste essentiellement au niveau du fossé d'effondrement de Ben-Ahmed où les variations de faciès sont fréquentes.



**Fig. 1 - Variogrammes expérimentaux et modèles associés**  
**Experimental variograms and associated models**

**Tableau 1 - Variogrammes théoriques et résultats de la validation croisée**  
**Theoretic variograms and cross validation results**

Domaine	Modèles théoriques						Validation croisée		
	Var.	N	Equations	pépité	palier	portée	e <sub>m</sub>	e <sub>q</sub>	e <sub>rm</sub>
Plaine de la Seybouse	LogT	42	$\gamma(h) = 0.045 \text{ Lin}(20) + 0.045$	0.045	0.09	20	0.015	1.008	0.060
	LogT	47	$\gamma(h) = 0.087 \text{ Sph}(13) + 0.154$	0.154	0.241	13.1	0.045	1.06	0.084
	LogDs	70	$\gamma(h) = 0.05 \text{ Sph}(12) + 0.1$	0.1	0.15	12	0.006	1.07	0.056
	LogRt	127	$\gamma(h) = 0.157 \text{ Sph}(8.5) + 0.014$	0.014	0.271	8.52	0.011	1.024	0.022

(e<sub>m</sub> = moyenne des écarts; e<sub>q</sub> = erreur quadratique réduite moyenne; e<sub>rm</sub> = moyenne des écarts réduits).

- Les effets de pépité, particulièrement évidents pour la transmissivité (fig. 1a, b), peuvent être attribués à des erreurs de mesure, ou bien au fait que le pas d'échantillonnage a été trop lâche pour mettre en évidence une croissance rapide du variogramme correspondant à une microrégionalisation. Ces effets sont en revanche moins importants pour la résistance transversale qui bénéficie d'un réseau de mesures, compatible avec l'échelle de travail (fig. 1d).

Le tableau 1 regroupe les modèles théoriques considérés comme cohérents avec les données. Les tests de validation croisée montrent que les modèles structuraux adoptés se concilient bien avec les variogrammes expérimentaux.

L'identification structurale des variables étant ainsi achevée, on peut à présent, passer à la phase relative au "krigeage" proprement dit.

#### \* Cartographie des Transmissivités

- Les estimations LogT\* sont estimées sur des cases carrées ayant une superficie de 1 Km<sup>2</sup>. La technique adoptée est celle du krigeage ordinaire, avec un "voisinage glissant". Le rayon de recherche est fixé à la moitié de la distance d'autocorrélation, pouvant balayer au minimum 8 points avoisinants. Un tel choix permet d'assurer les conditions d'une stationnarité locale et de se maintenir dans une zone d'extension limitée, où les incertitudes sur le variogramme sont encore petites (De Marsily, et Ahmed, 1987).

- Les calculs du krigeage correspondant à la variable  $Z = \text{LogT}$  aboutissent à une estimation  $Z_0^*$ , un écart-type  $\sigma_k$ , et donc un intervalle de confiance  $Z_0^* \pm 2\sigma_k$  relatifs à cette variable. Le retour à la valeur estimée nécessite une transformation inverse qui s'écrit:  $T = 10^{Z_0^*}$ . Cette estimation médiane de T est assortie d'une spécification de l'intervalle de confiance sous la forme d'un coefficient multiplicateur K égal à  $10^{2\sigma_k}$ , soit:

$$10^{Z_0^*} / 10^{2\sigma_k} < T < 10^{Z_0^*} \times 10^{2\sigma_k} \quad (10)$$

#### 2- Krigeage associé à une régression linéaire

La méthode est appliquée dès lors qu'on aie pu dégager des relations linéaires évidentes entre la transmissivité et la résistance transversale (fig.2 et 3ab). La qualité de cette liaison est mesurée par la variance résiduelle :

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [\text{Log}T_i - (a\text{Log}Rt_i + b)]^2 = 0.02 \quad (11)$$

dans laquelle n exprime le nombre de couples disponibles (n = 32 pour la plaine de la Seybouse). Les calculs aboutissent à des valeurs relativement basses.

En estimant LogT<sub>i</sub> à partir de LogRt<sub>j</sub>, pour les m-n points où seule est disponible une valeur

APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HÉTÉROGÈNE.  
EXEMPLE DE LA PLAINE DE SEYBOUSE - ALGÉRIE

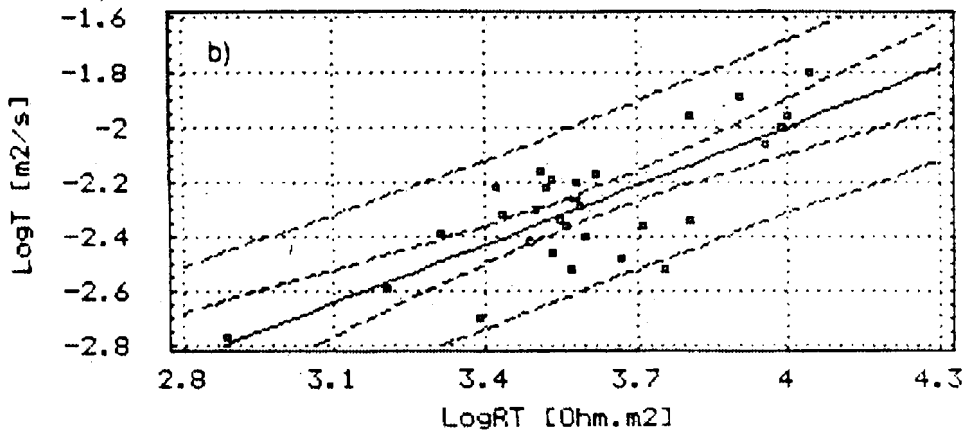


Fig. 2 - Droite d'ajustement par régression linéaire

*Linear regressif adjusment*

$$\text{LogT} = 0.719 \text{ LogRT} - 4.875 \quad (\text{LogT} = 0.719 \text{ LogRT} - 4.875)$$

de résistance transversale, on commet donc une erreur de prédiction dont la variance est calculée par l'expression suivante [4]:

$$\sigma_j^2 = \sigma_\varepsilon^2 \left[ 1 + \frac{1}{n} + \frac{[\text{LogRt}_j - \overline{\text{LogRt}}]^2}{\sum_{i=1}^n [\text{LogRt}_i - \overline{\text{LogRt}}]^2} \right] \quad (12)$$

$$j = n+1 \dots, m = 33, \dots, 127$$

Dans le cas d'une distribution gaussienne du logarithme des variables, la précision de la reconstitution peut être approximativement fournie par l'intervalle à 95%, soit:

$$(a \cdot \text{LogRt}_j + b) - 2\sigma_j \leq (\text{LogT}_j)_{\text{vrai}} \leq (a \cdot \text{LogRt}_j + b) + 2\sigma_j \quad (13)$$

En repassant des logarithmes aux valeurs de transmissivités, cet intervalle de confiance se met sous la forme d'un coefficient multiplicateur  $K$  égal à  $10^{\sigma_j}$  affectant la valeur estimée

$$T_j = 10^{\text{LogT}_j}$$

Les valeurs obtenues par essais de pompage ( $T_j$ ) sont considérées comme étant sûres ( $K = 1$ ).

Les données obtenues sont donc de deux types:

- données certaines mesurées par pompages d'essai,
- données incertaines, transformées à partir des valeurs de la résistance transversale, avec une incertitude caractérisée par la variance de l'erreur de transformation. L'ensemble des données (certaines et incertaines) ont été utilisées avec le système des équations du krigage modifié pour estimer la transmissivité selon un maillage identique au précédent.

### 3 - Le cokrigage

Le cokrigage permet, lui, d'estimer une variable régionalisée en utilisant en même temps les mesures de plusieurs variables. La méthode utilise le minimum d'hypothèses et incorpore directement la variabilité spatiale de toutes les variables ainsi que leurs corrélations. Dans le cas où l'on dispose de  $K$  variables, l'estimation pour la  $i^{\text{ème}}$  variable s'écrit (Armstrong, 1984 et Myers, 1984b):

$$Z_r^*(x_0) = \sum_{p=1}^K \sum_{i=1}^{n_p} \lambda_i^p Z_p(x_i) \quad (14)$$

**Tableau II - Variogrammes croisés et résultats de la validation**  
**Cross variograms and validation results.**

Domaine.	Equations	$e_m$	$e_q$	$e_{rm}$
Plaine de la Seybouse	$\gamma^{ZX} = 0.058 \text{ Sph}(11.4)$	0.047	0.98	0.089
	$\gamma^{ZY} = 0.07 \text{ Sph}(7.4) + 0.05$	0.0096	0.80	0.011

( $Z=\text{Log}T$ ,  $X=\text{Log}RT$ ,  $Y=\text{Log}Ds$ )

Une analyse rapide de l'ensemble des données disponibles au niveau de la plaine de la Seybouse, (fig. 3a, b et c) suggère que l'on utilise conjointement la résistance transversale et le débit spécifique pour estimer la transmissivité. On rappelle que l'on dispose, dans la région, de 47 valeurs de la transmissivité mesurées par pompages d'essai et de 127 valeurs de la résistance transversale, avec 32 points de mesure communs. En plus de 70 valeurs de débit spécifique, il y a 35 points pour lesquels la transmissivité et le débit spécifique sont mesurés simultanément. L'application du cokrigage nécessite par ailleurs la connaissance des variogrammes croisés (Tableau II).

Les tests de la validation croisée confirment la validité des modèles de variogrammes. Les résultats de l'estimation, exprimés sous forme de représentations cartographiques continues (fig. 6a) permettent, grâce à l'apport de variables supplémentaires, d'appréhender avec plus de réalisme la variabilité spatiale de la transmissivité (Boufassa et Armstrong, 1989).

### III - COMPARAISON DES RESULTATS

#### 1 - Krigage ordinaire

La carte krigée relative à la plaine d'Annaba (fig.4a) est peu nuancée. On y distingue néanmoins une zone de bonnes transmissivités le long vallée de la Seybouse englobant partiellement la butte gréseuse de Daroussa. La carte en isovalues du coefficient de précision (fig. 4b) indique les bornes

de l'intervalle de confiance à 95% des valeurs naturelles de la transmissivité. Ces valeurs décroissent jusqu'à atteindre la valeur de 1.5 dans les zones bien reconnues. Ils dépassent, en revanche, la valeur 3 sur les limites méridionales et occidentales de la plaine, là où l'on ne dispose d'aucun pompage d'essai. Les estimations les plus sûres se situent au niveau de la plaine de la Seybouse.

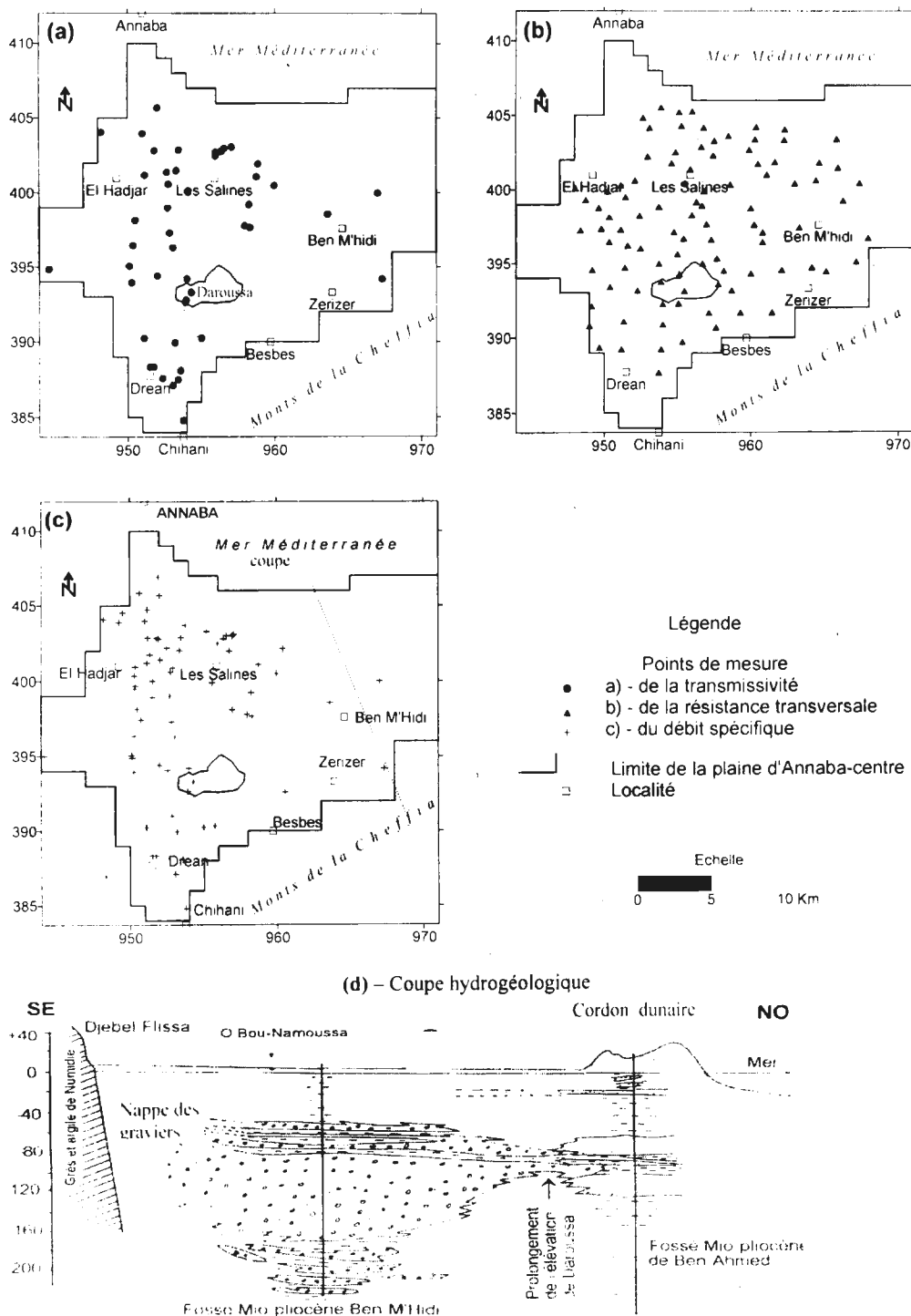
#### 2 - Méthode régressive

La carte des transmissivités (fig.5a) paraît ici plus nuancée, avec des valeurs fluctuant dans une gamme plus large ( $0.8 \cdot 10^{-3}$  à  $8.510^{-3}$   $m^2/s$  contre  $4.310^{-3}$  à  $8.3 \cdot 10^{-3}$   $m^2/s$  pour le krigage ordinaire). On notera l'apparition d'une anomalie à fortes valeurs ( $8 \cdot 10^{-3}$   $m^2/s$ ) au sud-ouest des Salines tandis que toute la partie orientale du domaine, à l'est de l'oued Bou-Alallah, est caractérisée par des valeurs plus basses ( $2$  à  $4 \cdot 10^{-3}$   $m^2/s$ ).

Dans ce dernier secteur, les courbes en isovalues s'infléchissent le long des oueds Bou-Alallah et Bou-Namoussa, matérialisant ainsi de probables chenaux à alluvionnement plus grossier.

La carte de répartition du coefficient d'incertitude K (fig. 5b) montre pour la méthode régressive des valeurs légèrement supérieures à celles du krigage ordinaire. Cette différence pourrait être due aux erreurs de transformation associées à la régression linéaire. La précision de l'estimation demeure malgré tout satisfaisante

APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HÉTÉROGÈNE.  
EXEMPLE DE LA PLAINE DE SEYBOUSE - ALGÉRIE



**Fig. 3 – Positionnement des variables mesurées (a, b et c) et coupe interprétative à travers le bassin la Seybouse (d).**

**Location of measured variables (a, b and c) and interpretative cross section Through the Seybouse basin.**

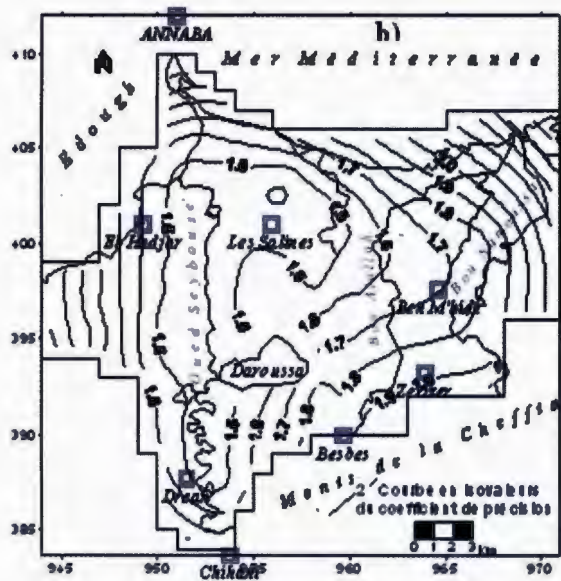
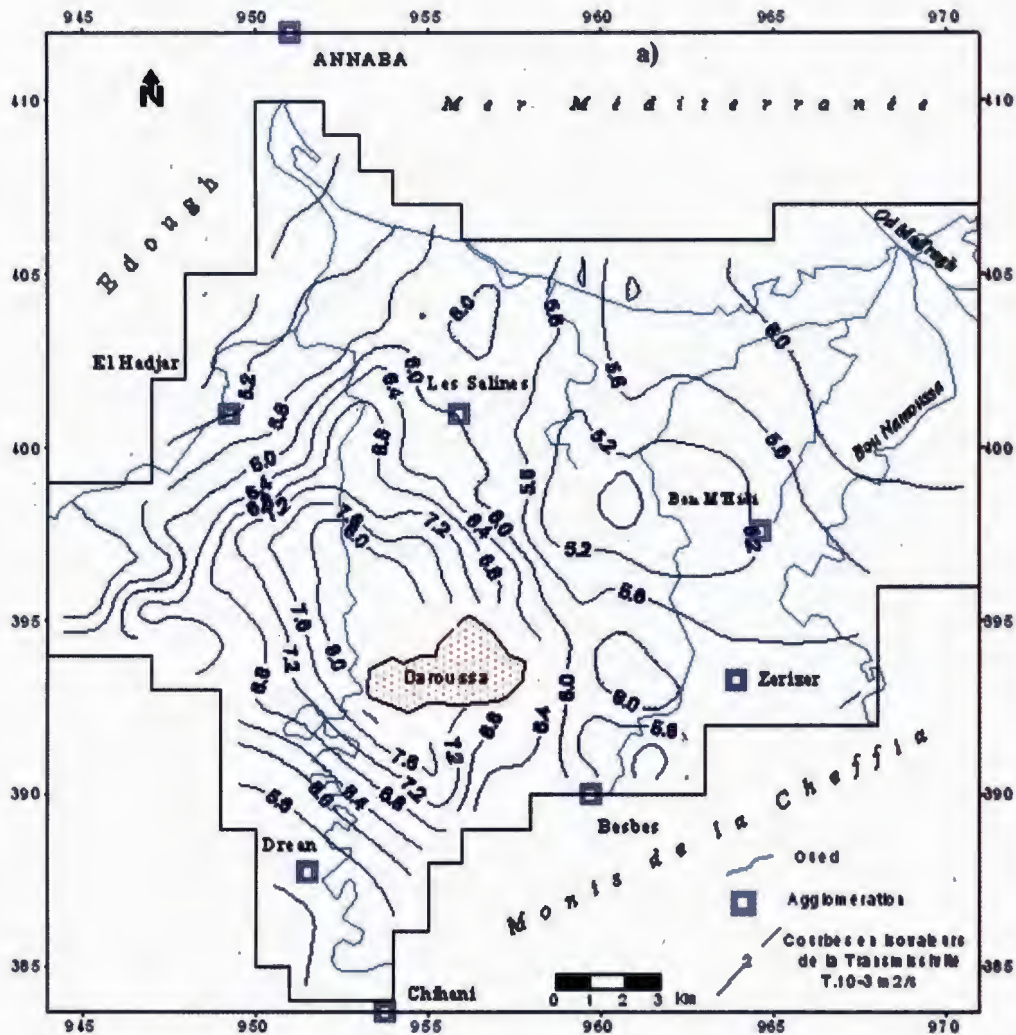


Fig. 4 - Carte des transmissivités (a) et du coefficient d'incertitude (b). Krigeage ordinaire

**Transmissivity (a) and uncertainty coefficient (b) maps. Ordinary kriging**



APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HÉTÉROGÈNE.  
EXEMPLE DE LA PLAINE DE SEYBOUSE - ALGÉRIE

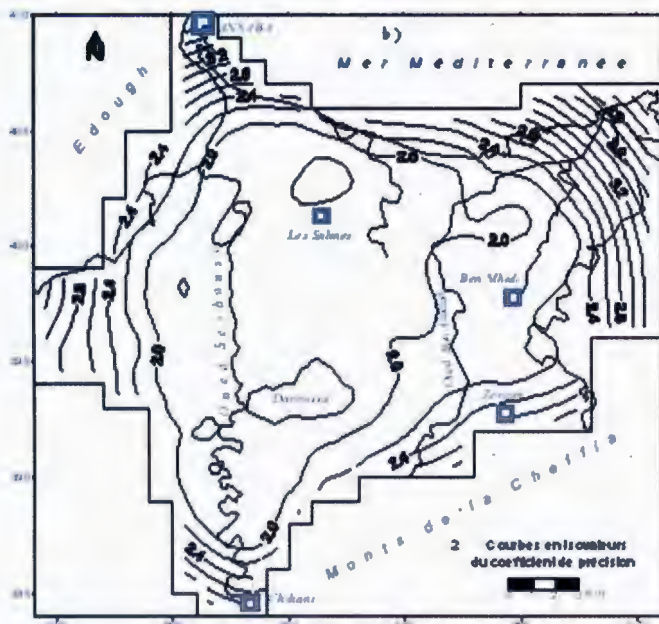
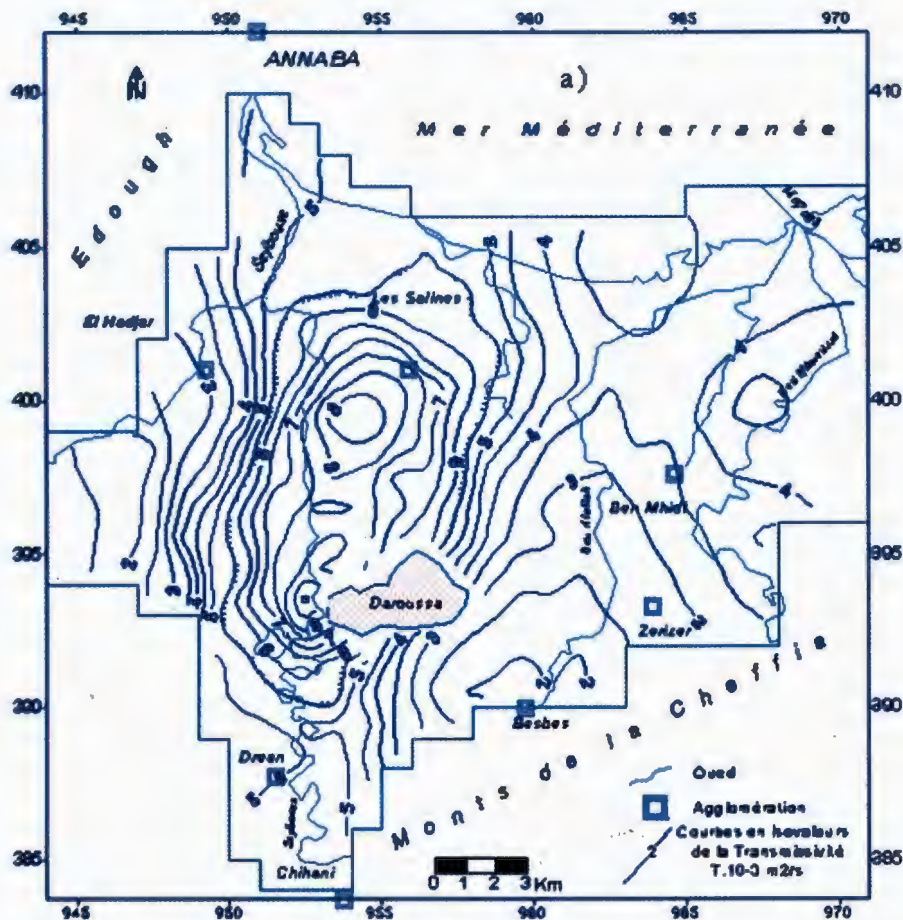


Fig. 5 - Carte des transmissivités (a)  
et du coefficient d'incertitude (b).  
Méthode régressive.

**Transmissivity (a) and uncertainty  
coefficient (b) maps. Regressive method.**

sur la plus grande partie de la plaine, avec des valeurs de  $K$  inférieures à 2.5.

### 3 - Le cokrigeage

*La carte en courbes isovaleurs*, (fig. 6a) se révèle nettement plus différenciée que les précédentes. Les valeurs de transmissivité plus élevées, s'échelonnent dans l'intervalle de  $1.2 \cdot 10^{-3}$  à  $10.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . La carte montre trois secteurs distincts qui coïncident avec des zones de subsidence bien précises.

- Le secteur occidental qui englobe la vallée de l'oued Seybouse, concorde avec l'axe du bassin d'effondrement de Ben-Ahmed. Il se caractérise par les valeurs de transmissivité les plus élevées ( $710^{-3}$  à  $10,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Dans ce secteur fortement subsident, l'oued Seybouse a creusé de véritables canyons dans les argiles de la plaine. Ces canyons ont été, par la suite, remblayés de dépôts grossiers à forte perméabilité. Erosion et sédimentation ont, au cours du quaternaire, abouti à la formation d'un paléo-chenal allongé, à écoulement préférentiel.

- Le secteur central correspond au haut fond qui sépare le fossé d'effondrement de Ben Ahmed à l'ouest, du fossé d'effondrement de Ben M'Hidi à l'est. Ce horst qui est représenté à l'affleurement par la butte numidienne de Daroussa tend à s'envoyer sous les sédiments à mesure que l'on se rapproche de la mer. Dans ce secteur, partiellement épargné par les phases d'érosion et de comblement, les forages ont une productivité relativement faible. Les transmissivités y sont moins élevées, notamment à l'ouest de Ben-M'Hidi où elles ne dépassent guère la valeur de  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Mais les valeurs s'accroissent graduellement vers le nord-est, parallèlement à l'épaississement des sédiments.

- Le secteur oriental, enfin, correspond au fossé d'effondrement de Ben-M'Hidi dont l'axe est orienté selon la direction NE-SW. Les apports

détritiques grossiers sont ici de nouveau abondants mais leur perméabilité moins importante, ce qui contribue à accroître de façon modérée la transmissivité du système aquifère.

On remarquera en conclusion, que la structure des nappes profondes est assez bien rendue et les nombreuses anomalies concentriques prouvent bien l'existence de poches graveleuses très perméables au sein d'un encaissant plus stérile. Cette structure particulière du réservoir expliquerait les oscillations et effets de trous affectant les variogrammes expérimentaux (fig. 1b).

*La carte de répartition du coefficient d'incertitude* (fig. 6b) montre que, hormis le secteur nord-oriental de la plaine ainsi que les zones méridionales de Chihani, Besbes et Zérizer, partout ailleurs l'estimation de la transmissivité a été faite avec rigueur.

### IV - CONCLUSION

La géostatistique, utilisée ici sous différentes formes, s'avère un outil intéressant pour décrire la variabilité spatiale des transmissivités. En se basant sur des considérations purement méthodologiques on relèvera que le cokrigeage s'avère préférable aux autres méthodes. La méthode exploite un minimum d'hypothèses et à l'inverse de la méthode régressive, insère directement les variabilités spatiales de toutes les variables ainsi que leurs variabilités croisées. L'inadéquation des modèles structuraux peut, bien sûr, altérer les performances de la méthode, mais la validation croisée permet de choisir la combinaison des variables qui fournit les meilleurs résultats. De plus, l'interpolation se fait par voisinage glissant, incorporant en même temps plusieurs valeurs de toutes les variables dans un certain voisinage du point à estimer, ce qui n'est pas le cas pour la méthode régressive qui transforme la valeur de la transmissivité à partir

APPROCHE GÉOSTATISTIQUE DES PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES EN MILIEU POREUX HÉTÉROGÈNE.  
EXEMPLE DE LA PLAINE DE SEYBOUSE - ALGÉRIE

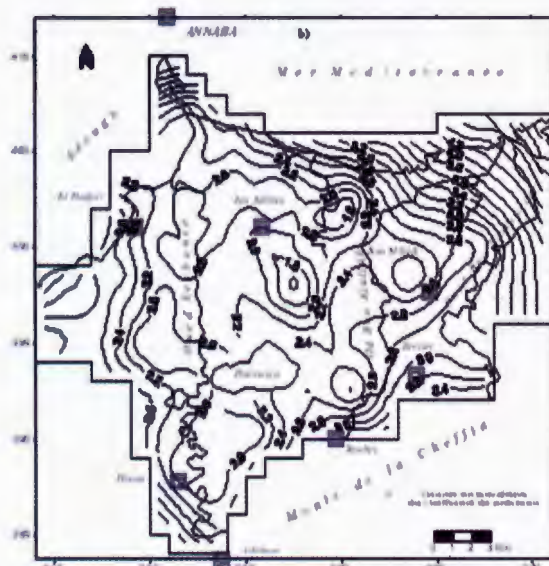
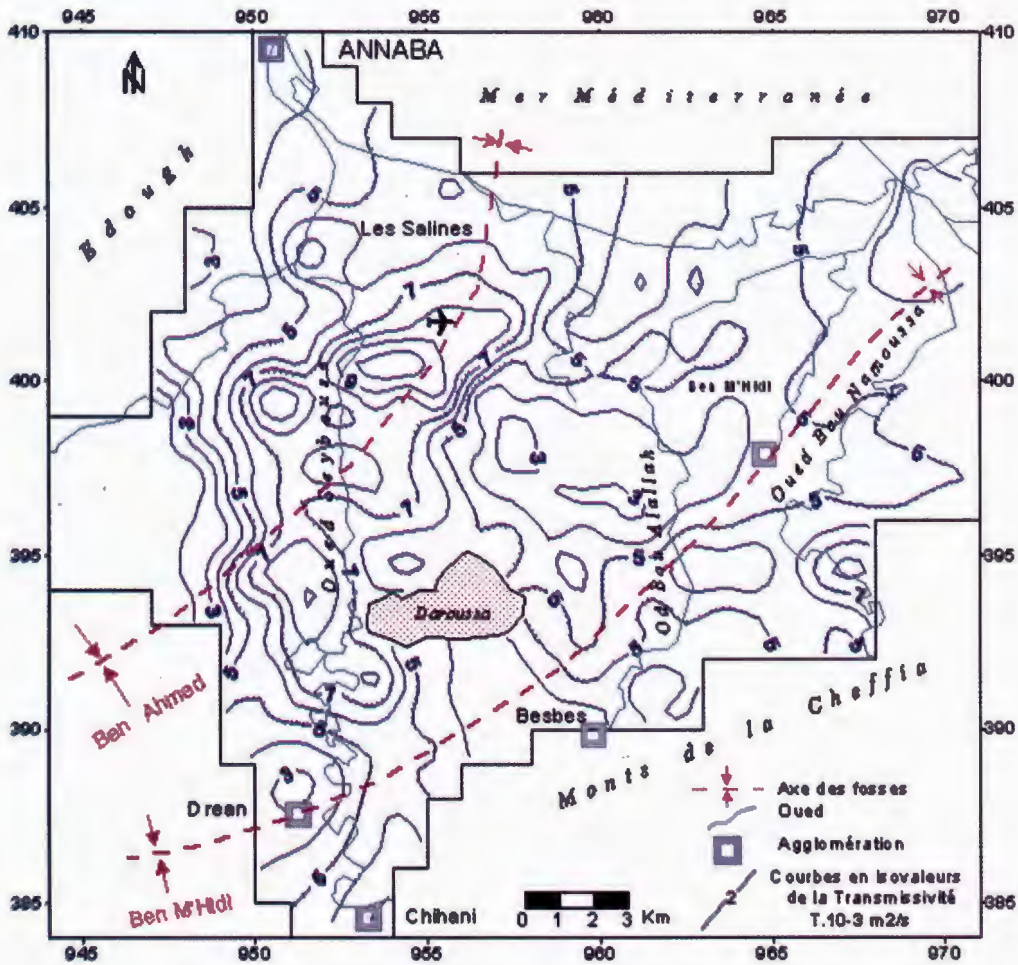


Fig. 6 - Carte des transmissivités (a) et du coefficient d'incertitude (b). Méthode du Cokrigage  
**Transmissivity map (a) and uncertainty coefficient map (b). Cokriging method**

d'une seule valeur de la variable explicative. Le cokrigage qui intègre des informations diversement réparties et de natures différentes, offrirait en définitive les estimations les plus nuancées. A cet égard, les cartes obtenues pourraient aider à mieux circonscrire les zones d'intérêt immédiat.

Dans un cadre plus global, l'estimation par cokrigage apparaît encore plus séduisante, car elle facilite le travail de modélisation (et donc de gestion des aquifères), en permettant une évaluation de la confiance à accorder aux résultats.

### BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG, M., 1984.** Improving the estimation and modelling of the variogram. In G. Verly et al. (Eds.), *Geostatistics for Natural Res*, 36, 50-62.
- BOUFASSA, A. AND ARMSTRONG, M., 1989.** Comparison between different kriging estimators. *Math. Geol.*, vol. 21 n°3, April 1989, 331-345. [D-2441].
- DARRICAU-BEUCHER, H., 1981.** Approche géostatistique du passage des données de terrain aux paramètres des modèles en hydrogéologie. Thèse de Doct-Ing. en Sciences et Techniques Minières, *ENSMP*, 118 p.
- DELHOMME, J. P., 1978.** Kriging in the hydrosociences. *Advances in Water Resources*, vol. 1, n° 5, pp. 251-266.
- DELHOMME, J. P., 1979.** Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: a geostatistical approach. *Water Res.*, 15, 269-280.
- MARSILY G. DE. AND AHMED, S., 1987.** Application of kriging techniques in ground water hydrology, *Jour. Geol. Soc. India*, vol. 29 (1), 51-82.
- MATHERON, G., 1971.** Théorie des Variables Régionalisées et ses Applications. Les cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, fasc. 5, *ENSMP* édit., 212 p.
- MYERS, D. E., 1984B.** Co-Kriging - New Developments, G. Verly et al. Eds., *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, part 1, 205-305.
- TOUBAL, A. C., 1998.** Apports de la Géophysique à l'étude des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain. Exemple des plaines d'Annaba de la Mitidja et de la Baie d'Alger. *Thèse Doct. ès Sciences, I.S.T.-U.S.T.H.B.*, 1998, 226 p.
- TOUBAL, A. C., 2002.** Implication de la géophysique dans l'identification hydrodynamique des réservoirs aquifères. Exemple du massif dunaire de Bouteldja (Annaba). *Colloque National de Géologie de Gisement - Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie - Boumerdès*, 20-21 Janvier 2002, communication, 1 p.
- TOUBAL, A. C., 2002.** De l'approche probabiliste des paramètres hydrodynamiques en milieu hétérogène. 1<sup>ère</sup> Conférence sur la Géologie, l'Exploration géophysique et le réservoir Engineering. *SONATRACH/I.A.P.* 18-20 Mars 2002, communication 1 p.