

## Utilisation des méthodes géostatistiques et des réseaux neuronaux pour aider à la simulation des écoulements souterrains. Cas de la nappe côtière de la fosse Ben Ahmed (Algérie)

Samir Hani<sup>1</sup>, Nabil Bougherira<sup>1</sup>, Noureddine Guezgouz<sup>2</sup>, Azzedine Hani<sup>1</sup>, Larbi Djabri<sup>1</sup> and Hicham Chaffai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Ressources en Eau et Développement Durable (REDD), Département de Géologie, Faculté des Sciences de la Terre, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie

<sup>2</sup>Faculté des sciences de la nature et de la vie. Université Mohamed Cherif Messadia, Souk-Abras, Algérie

### Résumé

Cet article a pour objectif d'aider les concepteurs des modèles numériques des écoulements souterrains à réaliser le calage plus facilement en contraignant les caractéristiques physiques des aquifères à rester à l'intérieur de la fourchette d'erreur donnée par des approches probabilistes.

Dans cette recherche, des méthodes telles que le krigeage, le cokrigeage et les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés pour cartographier les transmissivités de l'aquifère à partir de paramètres facilement accessibles (débit spécifique et résistance transversale).

La méthode est validée par la calibration du modèle numérique dont la réponse est la plus représentative du comportement de l'aquifère observé sur terrain.

**Mots clés :** transmissivité, débit spécifique, résistance transversale, krigeage, cokrigeage, réseaux de neurones artificiels, modélisation numérique..

## Use of geostatistical methods and neural networks to help simulate underground flows. groundwater flow. The case of the Ben Ahmed coastal aquifer (Algeria)

### Abstract

The aim of this paper is to help designers of numerical groundwater flow models to perform calibration more easily by constraining the physical characteristics of aquifers to remain within the error range given by probabilistic approaches.

In this research, methods such as kriging, cokriging and artificial neural networks were used to map aquifer transmissivities from readily available parameters (specific flow and transverse resistance).

The method is validated by calibrating the numerical model whose response is most representative of the aquifer's behavior observed in the field.

**Key Words:** transmissivity, specific flow, transverse resistance, kriging, cokriging, artificial neural networks, numerical modeling..

<sup>1</sup> Corresponding author: [haniazzedine@yahoo.fr](mailto:haniazzedine@yahoo.fr)

## 1. INTRODUCTION

Les modèles numériques sont des moyens de plus en plus utilisés par les chercheurs et les gestionnaires aussi bien pour les études des conditions dynamiques des nappes que pour la gestion des ressources en eaux (Hill and Tiedeman 2007). Ils permettent, en effet, de mieux prendre en compte l'hétérogénéité des aquifères, de présenter avec cohérence leur comportement et donc d'aboutir à une stratégie de gestion de la ressource en eaux basée sur des critères économiques et techniques.

En contrepartie, la qualité et la densité des mesures sont devenues l'objet d'une exigence accrue. Cette dernière se manifeste surtout au cours de la phase d'identification du système, lorsque l'on cherche à valider la forme du modèle et à adopter par tâtonnements successifs les paramètres structuraux optimaux. La méthode consiste à procéder par « essais et erreurs » jusqu'à obtenir un modèle qui donne la réponse la plus voisine possible du comportement observé pris comme référence. L'opération est fastidieuse et s'appuie parfois sur des raisonnements empiriques qui nécessitent de nombreux contrôles par recoupement. Dans cette étude de nouveaux résultats sont obtenus en associant à la démarche déterministe du modèle une approche probabiliste permettant de tester avec plus d'objectivité la conformité du modèle.

## 2. MATERIELS ET METHODE

Il s'agit d'estimer la transmissivité en n'importe quel point de l'espace, à partir de variables faciles à acquérir, et avec une précision optimale. L'hétérogénéité du milieu et la distribution chaotique des propriétés hydrodynamique de l'aquifère incitent à adopter une approche probabiliste (Figure 1).

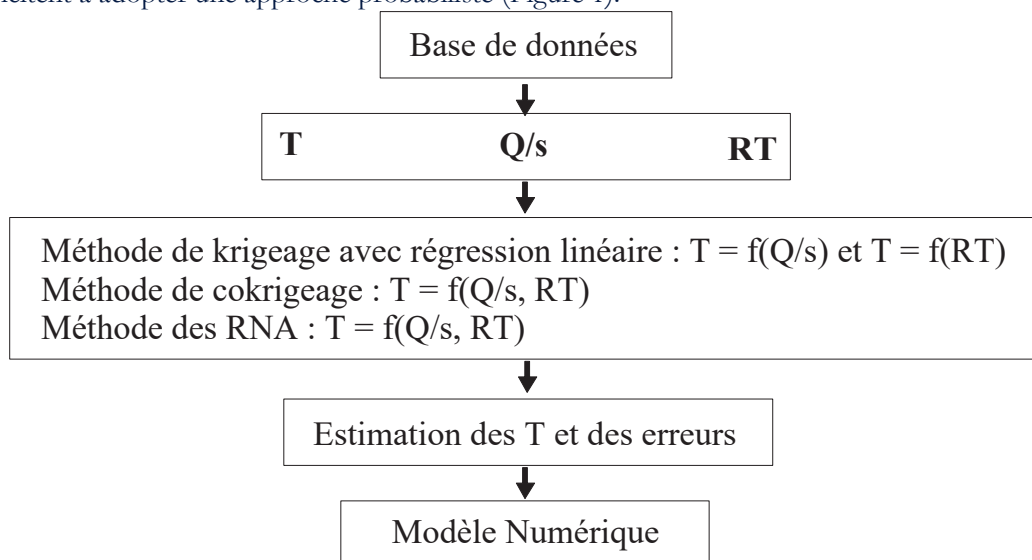


Figure 1. La méthodologie.

Le système aquifère du bassin d'effondrement de Ben Ahmed, situé au Nord-Est de l'Algérie est constitué par des formations mio-plio-quadernaires représentées, de haut en bas, par une couche de limons et des sables formant une nappe superficielle, une couche semi-perméable et d'une épaisse couche de graviers et de graviers constituant le principal aquifère. L'hétérogénéité du milieu aquifère et la distribution chaotique des propriétés hydrodynamique de l'aquifère incitent à adopter une approche probabiliste. L'idée est de faciliter le calage des modèles numériques en évitant les essais arbitraires, lors du calage, en contraignant la variation des perméabilités à rester à l'intérieur de la fourchette donnée par la méthode du krigeage.

## 3 RESULTATS

### 3.1- Application de la régression

Des relations linéaires significatives entre la transmissivité d'une part et le débit spécifique et la résistance transversale d'autre part ont été obtenues dans le système aquifère d'Annaba.

Les figures 2a-c montrent le positionnement des variables et le nombre de mesures ayant servi aux calculs.

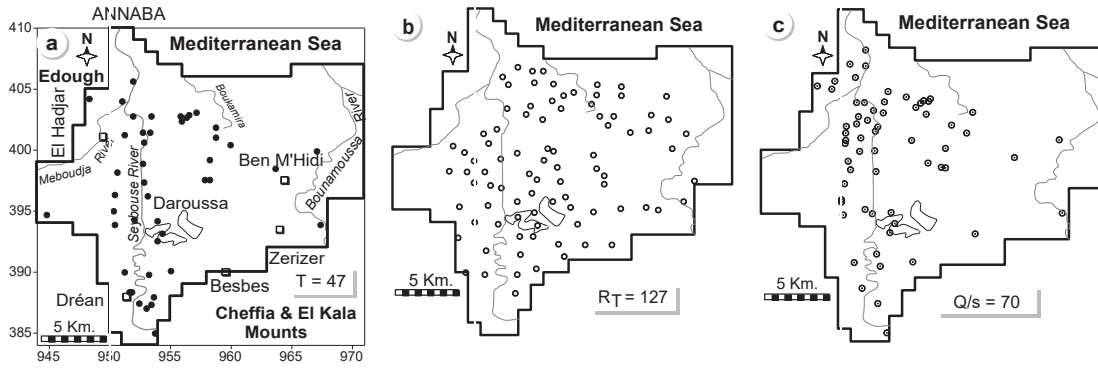


Figure 2. Localisation des points de mesure.

a) de T, b) de  $R_T$  et c) de  $Q/s$  dans la plaine d'Annaba.

Les traitements statistiques montrent un bon ajustement à une loi log normale allure unimodale. Avec un coefficient de corrélation,  $r$ , égal à 0.8, la variable  $\text{Log}T$  s'avère bien corrélée avec les variables  $\text{Log}R_T$  et  $\text{Log}Q/s$  (figure 3a-b).

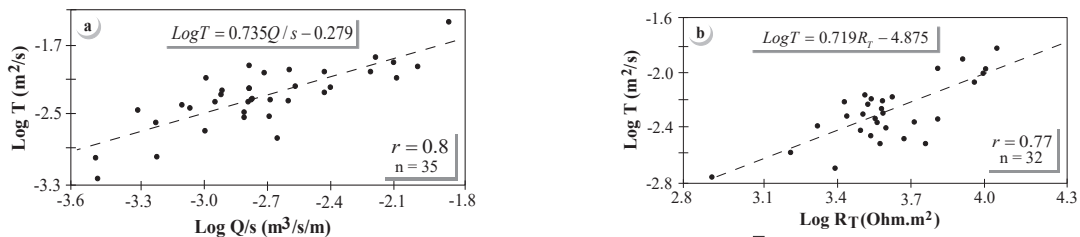


Figure 3 a-b. Régression et coefficient de corrélation

- La présence d'oscillations et d'effets de trou sur les variogrammes des figures 4a, b, c traduit la présence de zones à fortes valeurs juxtaposées à des zones à faibles valeurs (Fosse Ben Ahmed où les variations de faciès sont fréquentes).
- Les effets de pépite, surtout pour  $T$ , est dû à des erreurs de mesures, ou au pas d'échantillonnage trop lâche pour mettre en évidence une croissance rapide du variogramme correspondant à une microrégionalisation.

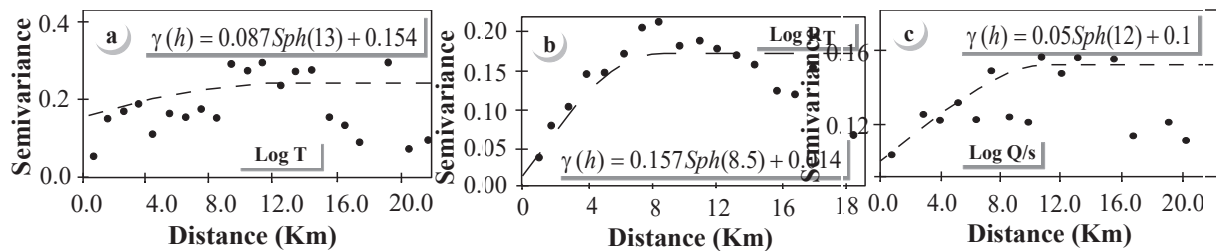


Figure 4a, b, c : Variogrammes expérimentaux et théoriques.

### 3.2- Krigeage associé à une régression linéaire

La carte de transmissivité paraît peu nuancée, avec des valeurs fluctuant entre  $8.10^{-4}$  et  $8.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  avec une anomalie à fortes valeurs au sud-ouest des Salines (Figure 5a).

La précision de l'estimation est satisfaisante sur la plus grande partie de la plaine, avec des valeurs de  $E$  inférieures à 2.5 (Figure 5b).

La méthode régressive offre un modèle cartographique riche avec une bonne précision de l'estimation.

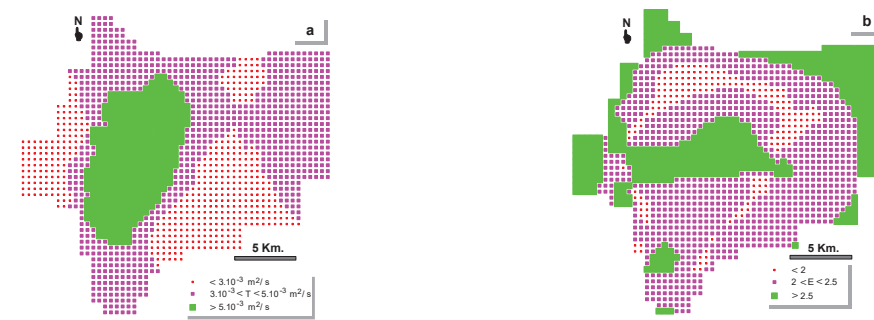


Figure 5a-b. Carte d'égaux valeurs de transmissivité (a) et du coefficient d'incertitude E (b).  
Application de la méthode régressive.

### 3.3- Application du cokrigage :

L'estimation des transmissivités est réalisée sur des mailles carrées de tailles uniformes (500 m par 500 m). Les résultats de l'estimation, exprimés sous forme de représentations cartographiques permettent grâce à l'apport de variables supplémentaire, d'appréhender avec plus de réalisme la variabilité spatiale de la transmissivité.

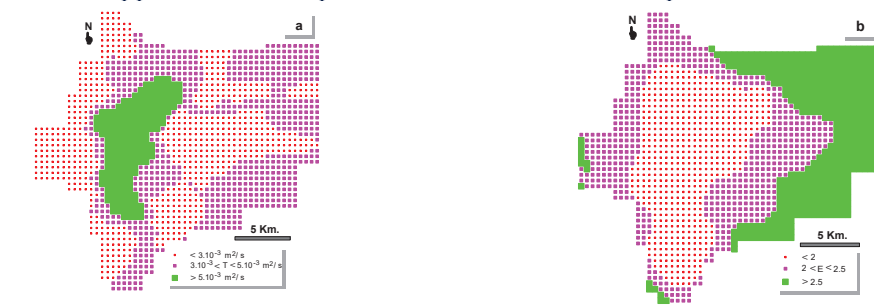


Fig. 6a-b : Carte d'égaux valeurs de transmissivité.  
Application de la méthode du cokrigage.

La carte en courbes isovaleurs établie (Fig. 6a), se révèle nettement plus différenciée que la précédente. Les valeurs de transmissivités plus élevées, s'échelonnent de  $1.2 \cdot 10^{-3}$  à  $1.06 \cdot 10^{-2}$  m²/s.

La carte de répartition des erreurs (Fig. 6b) montre que, hormis le secteur nord-est de la plaine ainsi que les secteurs situés au Sud, partout ailleurs l'estimation du T a été faite avec rigueur.

### 3.4- Krigeage associés aux réseaux de neurones artificiels

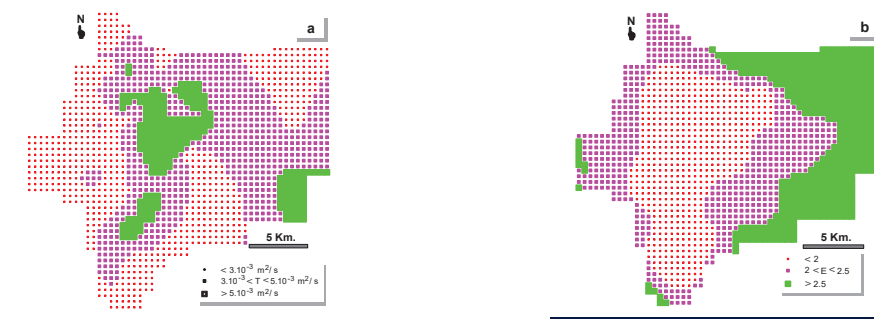


Figure 7a-b. : Carte d'égaux valeurs de transmissivité.

Application de la méthode des réseaux de neurones.

Les plus fortes valeurs de transmissivité se situent le long de la vallée de la Seybouse et coïncident avec l'axe de la fosse de Ben-Ahmed (figure 7a). La représentation cartographique des variances de krigeage (figure 7b) montre que l'estimation de la transmissivité est d'autant plus précise que la densité des points de mesure est forte.

### 3.5- Simulation numérique des écoulements souterrains

Le code Modflow (Harbaugh AW, 2005) est utilisé en régime permanent sur l'état piézométrique relevé en avril 2000 (Fig. 8). La carte de transmissivité déduite du calage du modèle numérique (Figure 9), présente une grande analogie avec la distribution générée par la méthode de krigeage associée aux réseaux neuronaux.

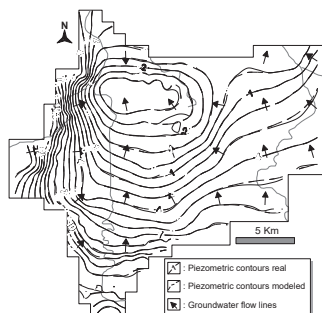


Figure 8. Comparaison entre piézométrie calculée et mesurée en régime permanent.

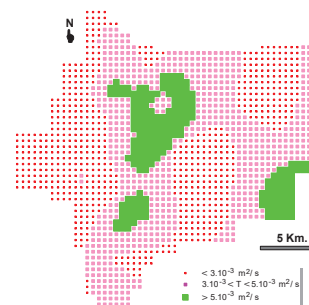


Figure 9. Carte d'égal valeurs de transmissivité. Application du modèle.

En se basant sur des considérations purement méthodologiques, on notera que la carte obtenue à partir des réseaux de neurones artificiels et à un degré moindre celle du cokrigeage, permettant d'associer plusieurs variables d'origine différente dans l'estimation, s'avèrent préférables à la régression. Les deux méthodes exploitent un minimum d'hypothèses et à l'inverse de la méthode régressive, insèrent directement les variabilités spatiales de toutes les variables. En plus, l'utilisation des résultats de ces deux approches (ANN et cokrigeage) permet de minimiser les écarts entre les réponses mesurées et les réponses simulées et donc d'éviter les simulations redondantes durant la phase du calage du modèle.

Tableau 1. Statistiques des résultats obtenus par différentes méthodes.

Méthodes	Valeurs estimées					Données de pompage				
	Min.	Max.	Moy.	E-T.1	C.V.	Min.	Max.	Moy.	E-T.2	C.V.
Régression	-3.089	-2.066	-2.451	0.1960	8	0.117	0.331	0.174	0.0433	24.8
Cokrigeage	-2.913	-1.975	-2.326	0.1668	7.1	0.102	0.363	0.202	0.0521	25.2
ANN	-2.870	-1.906	-2.312	0.1655	7.3	0.100	0.345	0.213	0.0512	25.3
Modél. Num	-2.780	-1.912	-2.298	0.1567	7.2	0.111	0.334	0.209	0.0544	25.5

## CONCLUSION

Les résultats obtenus sous forme de cartes des moyennes des transmissivités et de leur variance ont servis de champs d'entrée lors du calage du modèle numérique des écoulements souterrains et pour éviter les simulations redondantes. En effet par cette approche, on cherche à minimiser l'écart entre la piézométrie calculée par le modèle et la piézométrie mesurée en contraignant les paramètres structuraux à rester dans les limites fixées par l'approche probabiliste.

Les réseaux de neurones associés au krigeage et, à un degré moindre, le cokrigeage donnent les meilleurs résultats en fournissant des valeurs moyennes par maille les plus proches des résultats de la simulation numérique. Les deux méthodes exploitent un minimum d'hypothèses et à l'inverse de la méthode régressive, insèrent directement les variabilités spatiales de toutes les variables.

## Références

- [1] Hill MC, Tiedeman CR (2007) Effective groundwater model calibration, with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. Wiley, New York
- [2] Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the ground-water flow process. U.S. Geological Survey, Reston, Techniques and Methods 6-A16