

Utilisation du SIG pour la modélisation de la variabilité spatiale des valeurs de la transmissivité

*Hassane Jarar Oulidi**, *Lahcen Benaabidate***, *Alan Fryar****
*Anasse Benslimane **

Parmi les informations à valeurs ajoutées utilisées par un Système d'Information Géographique (SIG), on s'intéresse à la valorisation d'une variable aux nœuds d'une grille régulière à partir d'un ensemble de données échantillonnées, par exemple, l'interpolation des valeurs de la transmissivité de l'Infracénomanien dans le bassin crétacé d'Errachidia (Maroc). Dans cette optique on précise la méthodologie conduisant à la modélisation spatiale, parallèlement avec la méthodologie suivie classiquement pour l'intégration des données vectorielles qui est bien connue des utilisateurs de Système d'Information Géographique (SIG). En s'appuyant sur cette similitude, le but de cet article est de participer à une meilleure compréhension de la modélisation spatiale et de rendre cette technologie plus courante au sein d'un SIG.

Situation de la zone d'étude

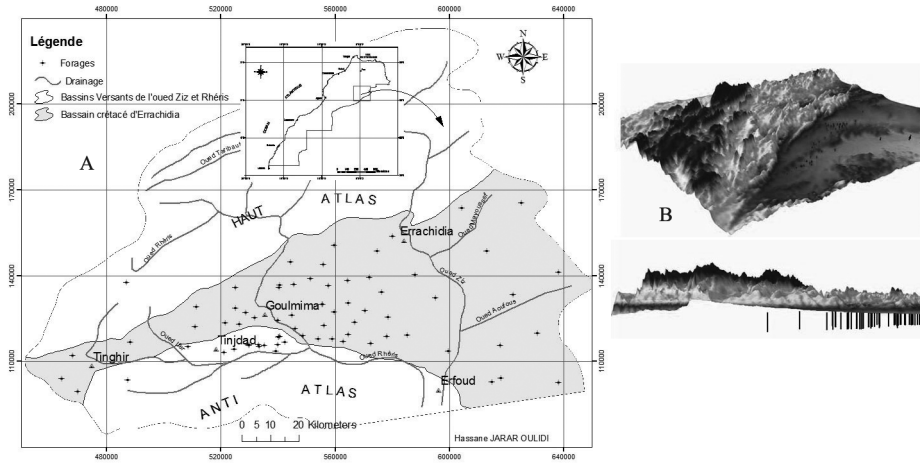
Le secteur d'étude se situe dans le Sud-est marocain (fig. 1), soit approximativement entre 5°49' et 3°42' degrés de longitude Ouest et entre 31°18' et le 32°45' degrés de latitude Nord. Cette zone est drainée par les hauts et moyens Ziz et Rhéris. Les bassins hydrologiques de ces deux oueds sont limités au Nord par la plaine de la Haut Moulouya et au Sud par la plaine de Tafilalet (Anti-Atlas).

* UFR Géologie Appliquée aux Recherches Hydrogéologiques, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc

** Laboratoire des Géoressources et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques Fés-Saïss, Fès, Maroc

*** Department of Geological Sciences, University of Kentucky, 101 Slone Building, Lexington, KY 40506-0053, États-Unis

Figure 1 : Répartition géographique des 74 sondages dans le bassin crétacé d'Errachidia.



A- Cadre géographique et situation des forages en 2D

B- Situation des forages en 3D

Aperçu hydrogéologique de la zone d'étude

Le bassin crétacé d'Errachidia se présente sous forme d'une gouttière synclinale dissymétrique qui s'approfondit vers le Nord. La lithologie de ce secteur permet de distinguer trois formations perméables formant les trois aquifères superposés et susceptibles d'être exploités à une profondeur moyenne ne dépassant guère les 100 m (El Ouali, 1999). Ces aquifères sont (fig. 2) :

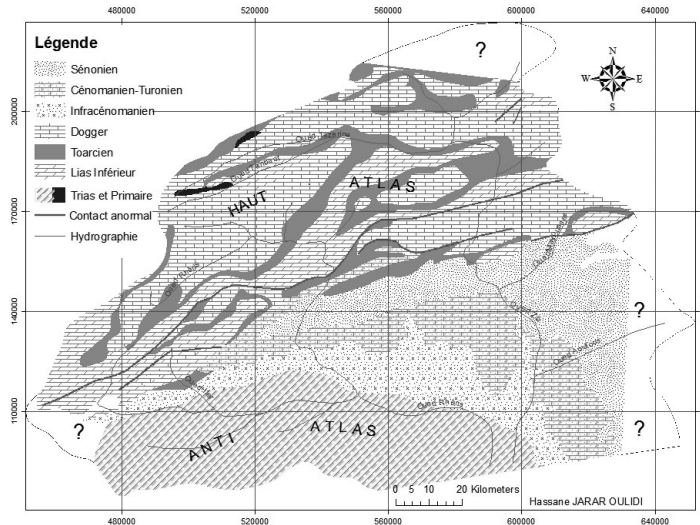
- le Sénonien lorsqu'il se présente sous un faciès gréseux,
- les calcaires du Turonien,
- les grès de l'Infracénomanien.

Modélisation géostatistique des valeurs de la transmissivité

Méthodologie du travail

Les données sont issues de plusieurs campagnes hydrogéologiques effectuées pendant une durée de 20 ans par l'agence hydraulique d'Errachidia. Pour accroître la masse des données disponibles, d'autres indications ont été tirées de plusieurs travaux de thèse (El Ouali, 1999). Au total, les informations sur plus de 74 forages ont été introduites dans une base de données spatiale (Géodatabase) contenant tous les paramètres hydrogéologiques qui caractérisent l'aquifère infracénomanien dans le bassin

Figure. 2: Carte géologique des bassins de l'oued Ziz et de l'oued Rhéris (Haut-Atlas central et bassin crétacé d'Errachidia)



crétacé d'Errachidia d'une plate-forme SIG (Jarar Oulidi, 2005); ensuite nous avons établi un modèle géostatistique pour les champs de la transmissivité en passant par les étapes suivantes (El Morajani, 2003) (fig. 3):

- Exploration des données,
- Construction d'un variogramme expérimental,
- Élaboration d'un modèle structural synthétique,
- Validation croisée du modèle,
- Cartographie par le krigeage ordinaire,
- Simulations conditionnelles.

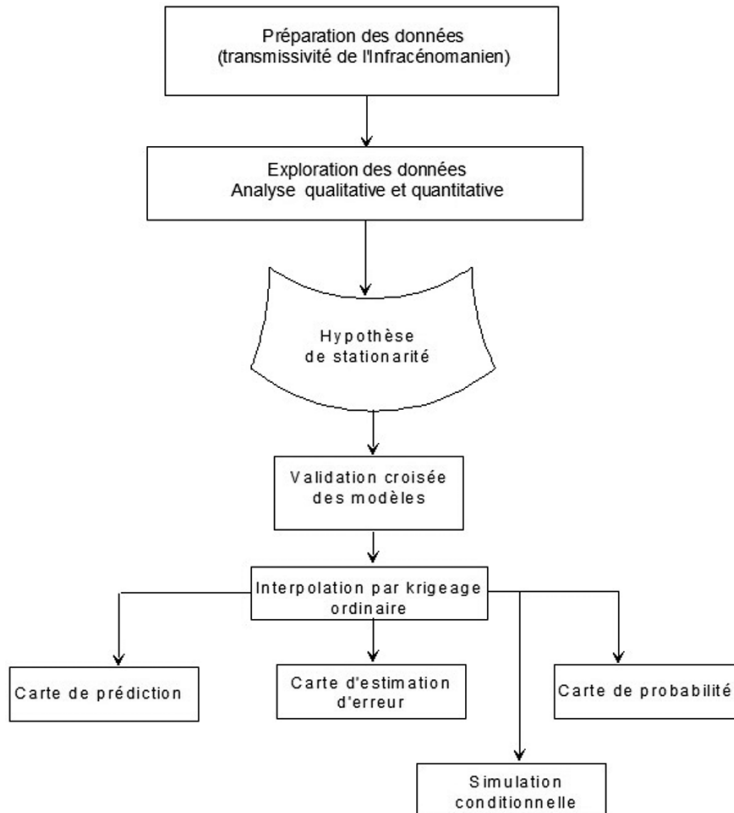
Exploration des données

Cette analyse exploratoire des données consiste à identifier l'hétérogénéité de la régionalisation spatiale des valeurs de la transmissivité (El Morjani, 2003).

À partir des cartes d'échantillonnage, nous avons procédé à une visualisation des transmissivités. Si une anomalie se présente au niveau des données de base, dans ce cas une vérification ou une correction des données de base s'avère très nécessaire (fig. 4 A).

L'outil d'analyse de tendance (fig. 4 B) fournit une perspective tridimensionnelle des données. D'après l'analyse approfondie de ce diagramme,

Figure. 3 : Approche géostatistique pour la modélisation des valeurs de la transmissivité (El Morajani, 2003, modifiée)



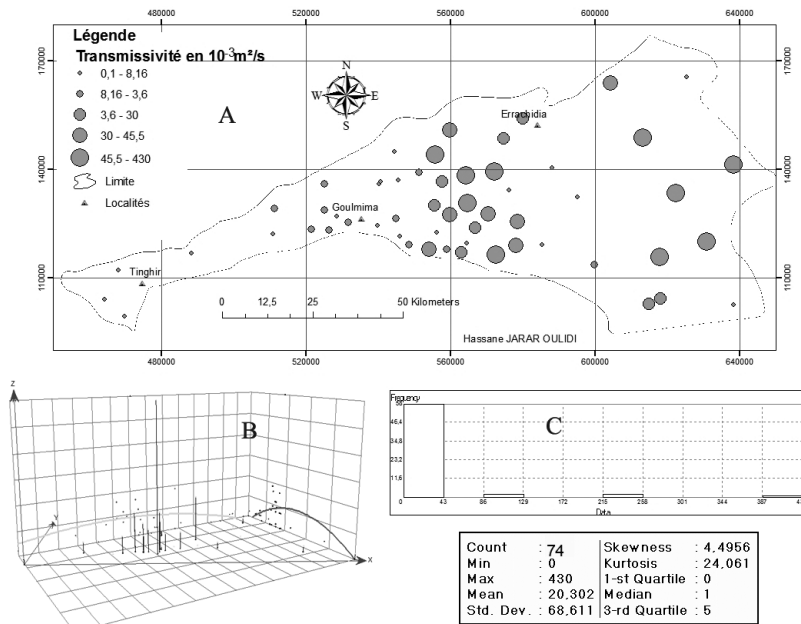
on peut dire qu'il existe deux types de pseudo tendances; l'une d'une direction Est-Ouest et l'autre d'une direction généralement Nord-Sud.

Le coefficient de kurtosis ($k=24.06$) est largement supérieur à 0 ce qui implique que la distribution atteint un niveau maximum.

Le coefficient de skewness d'une valeur de 4,49 permet d'indiquer que cette distribution n'est pas symétrique, elle est déplacée vers la gauche.

L'histogramme des données de la transmissivité présente une queue vers les fortes valeurs et une forme dissymétrique. L'ensemble des valeurs dans la figure 4C constitue, au sens statistique, une seule population à distribution normale et centrée sur la valeur $20.3.10^{-3}m^2/s$.

Figure 4: Analyse exploratoire des données des champs de la transmissivité



A- Carte de la transmissivité mesurée (en $10^{-3} m^2/s$)
 B- Analyse de la tendance des données de la transmissivité
 C- Histogramme de fréquences des transmissivités

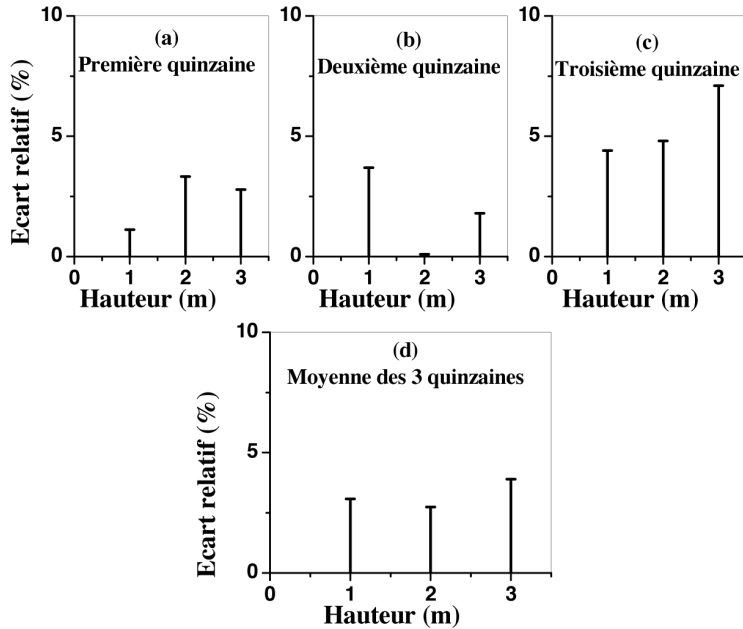
Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental est la clé de voûte de l'analyse géostatistique. Il permet de mettre en lumière les corrélations spatiales existant entre les variables (Chiles, 2004). C'est donc un outil efficace pour détecter d'éventuelles anisotropies de la continuité spatiale. Dans une régionalisation, l'anisotropie est mise en évidence par une direction privilégiée le long de laquelle les valeurs se modifient lentement, tandis qu'elles varient beaucoup plus vite dans la direction perpendiculaire (El Morjani, 2003).

Dans ce cas, les valeurs de la surface variographique ainsi que le semi-variogramme de la transmissivité (fig. 5) n'ont pas permis de mettre en évidence la structure anisotropique de cette variable. Ce calcul a été justifié par la figure 5 qui ne montre pas une grande différence de valeur entre les variances des zones d'influence correspondant aux directions 0, 45, 90 et 135 degrés.

Pour pouvoir créer une représentation numérique de ces variables de la transmissivité dans le bassin crétacé d'Errachidia, nous avons modélisé leur variogramme expérimental.

Figure 5: Semi-variogramme et la surface variographique des valeurs de la transmissivité.



Élaboration d'un modèle structural synthétique

L'intérêt de la modélisation d'un variogramme expérimental est essentiellement pratique: il s'agit de passer d'une fonction définie par des points à une fonction continue dans l'espace et possédant une expression mathématique. Pour modéliser le variogramme expérimental nous avons tout d'abord ajusté le modèle théorique sur le modèle expérimental, ensuite nous avons réglé les paramètres déterminant le modèle (la portée, le palier et effet de pépité).

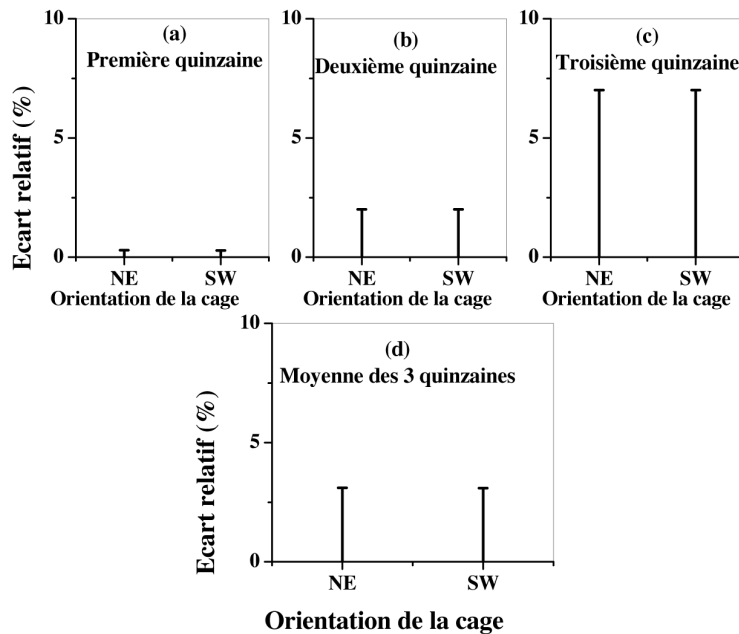
Le modèle Sphérique (fig. 6) semble être le meilleur ajustement pour les transmissivités de l'Infracénomanien. Le variogramme expérimental des transmissivités varie d'une manière graduelle au voisinage de l'origine. Un faible effet de pépité est mis en évidence à l'origine.

Les modèles ainsi déterminés sont par la suite contrôlés par une validation croisée.

Validation croisée de modèle retenu

Une fois le modèle de variogramme est choisi, la procédure de validation croisée permet de comparer l'impact de ce modèle sur les résultats de l'estimation

Figure 6 : Ajustement d'un modèle théorique sur le modèle expérimental.



Cinq critères statistiques sont utilisés par le logiciel ArcGis pour juger la qualité de l'estimation résultant du modèle utilisé (ESRI 2003) :

(1) Root-mean-square prediction errors :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2}{n}$$

(2) Average kriging standard error :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\sigma}(s_i))}{n}$$

(3) Mean standardized prediction errors :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n}$$

(4) Root-mean-square standardized prediction errors :

$$\frac{\sum_{i=1}^n [(\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)]^2}{n}$$

(5) Mean prediction errors :

$$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))}{n}$$

$\hat{Z}(s_i)$: La valeur que nous essayons de prédire pour un endroit

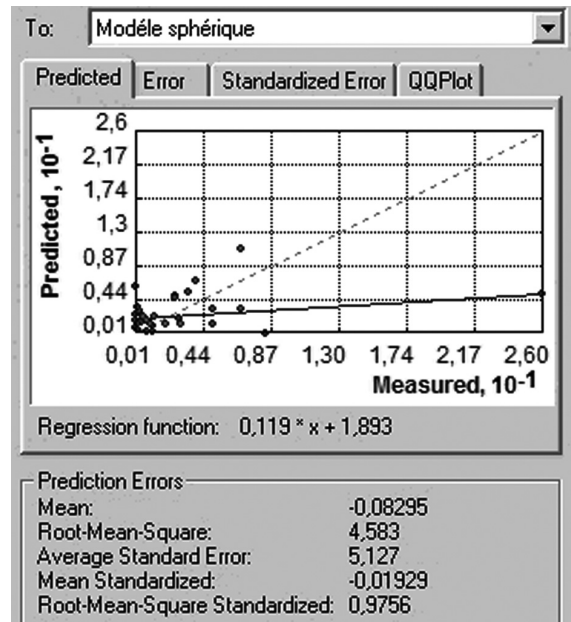
$Z(s_i)$: La valeur observée à l'endroit

$\hat{\sigma}(s_i)$: L'erreur standard de prédiction

n : Le nombre de points mesurés entourant la zone de prédiction

Le modèle est considéré comme valable si le Mean et le Mean Standardized sont proches de zéro, le Root Mean Square Standardized tend vers 1 et Root Mean Square est proche à l'Average Standard Error. En fonction des résultats, nous avons modifié les paramètres du modèle, puis testé le modèle par une nouvelle validation croisée jusqu'à l'obtention des valeurs optimales. Les valeurs numériques retenues de ces paramètres statistiques sont résumées dans la figure 7.

Figure 7: Validation croisée de modèle sphérique



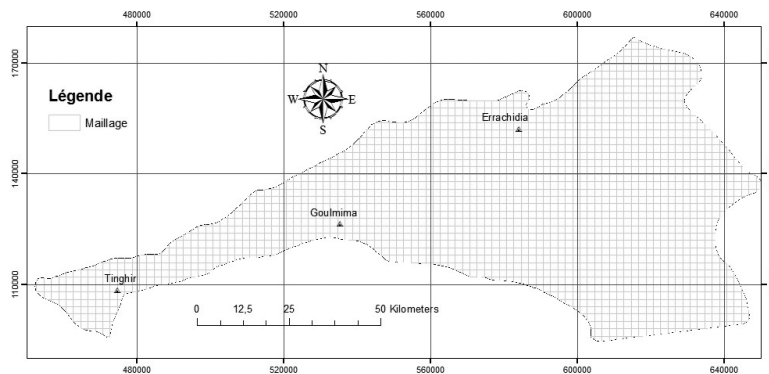
Cette approche nous a permis de valider notre modèle de variogramme par rapport au variogramme expérimental et de les incorporer dans l'interpolation par krigeage sur une grille régulière (fig. 8) pour l'estimation des variables de la transmissivité.

Cartographie par krigeage

Dans le but de reproduire au mieux la variabilité spatiale des valeurs de la transmissivité par la méthode de krigeage (c'est-à-dire de prendre en compte le variogramme validé), une grille régulière (fig. 8) est requise pour le bassin crétacé d'Errachidia.

Cette technique permet de fournir un meilleur estimateur linéaire (Delhomme, 1978), sans biais et de variance d'estimation minimale. Autrement dit, c'est un interpolateur exact au sens où, pour tout point échantillonné, la valeur estimée correspond exactement à celle mesurée. De plus, cette technique fournit une indication sur l'erreur associée à chaque valeur estimée et permet d'établir, conjointement à la carte des valeurs, celle des erreurs d'estimation ainsi que des cartes de probabilités (El Morjani, 2003) (fig. 9, 10 et 11).

Figure 8: Carte montrant le maillage utilisé pour la cartographie des valeurs de la transmissivité



La figure 9 montre la répartition spatiale des transmissivités (en $10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$) de l'aquifère de l'Infracénomanien déduite des valeurs estimées par krigeage. Cette carte montre que les fortes transmissivités s'alignent globalement selon une direction Nord-Sud. Les secteurs les plus transmissifs ($T > 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$) sont localisés le long de l'oued Ziz. Les plus faibles valeurs ($T < 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$) se situent au niveau des zones orientales du bassin et au centre de la nappe.

La carte de l'estimation d'erreur montre que l'erreur de l'estimation est assez faible au centre de la nappe. Ceci est en rapport avec le nombre élevé des valeurs observées existant le long de cette zone. L'erreur devient au contraire moins faible à proximité des limites de la nappe, en raison du faible nombre d'ouvrages testés en ces endroits.

Figure 9: Carte des valeurs estimées de la transmissivité par la méthode d'interpolation de krigeage ordinaire (en $10^{-2}m^2/s$)

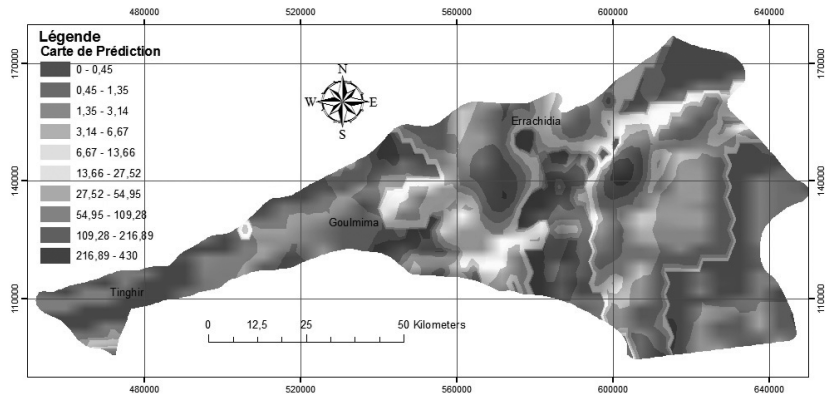


Figure 10: Carte de probabilité des valeurs de la transmissivité

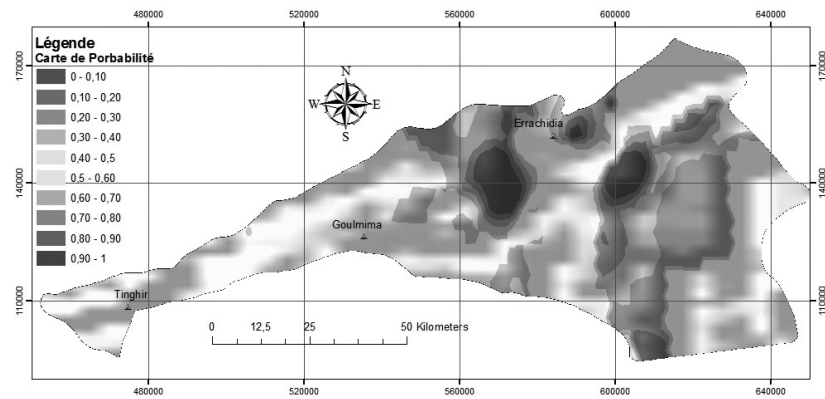
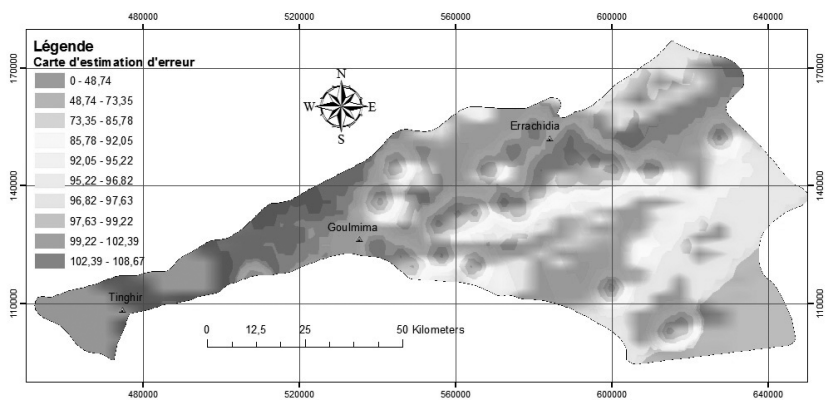


Figure 11: Carte de distribution des erreurs d'estimation



Simulations conditionnelles

En hydrogéologie, la méthode de la simulation conditionnelle permet d'obtenir des réalisations du champ de transmissivité comportant le même variogramme que les valeurs observées (Capilla *et al.* 1997). Cette réalisation permet de fournir une valeur de transmissivité pour chacun des éléments de la grille.

L'estimation et la simulation ont donc des objectifs différents. La première a pour but d'estimer en chaque point la valeur Z de la variable aussi proche que possible de la réalité, alors que la simulation a pour objectif d'identifier la dispersion dans l'espace des caractéristiques des variables étudiés (Dagan, 1985).

Pour cette étude, nous avons construit 70 simulations de valeurs de la transmissivité de l'Infracénomanien stockées dans une base des données géographiques. Ces simulations sont produites par une extension d'une plate-forme ArcGis. La figure 12 montre les 4 simulations choisies, extraites de cette base de données, ce sont des représentations numériques des valeurs de la transmissivité qui permettent de visualiser les fluctuations et les variations de ce descripteur au point considéré (El Morjani, 2003).

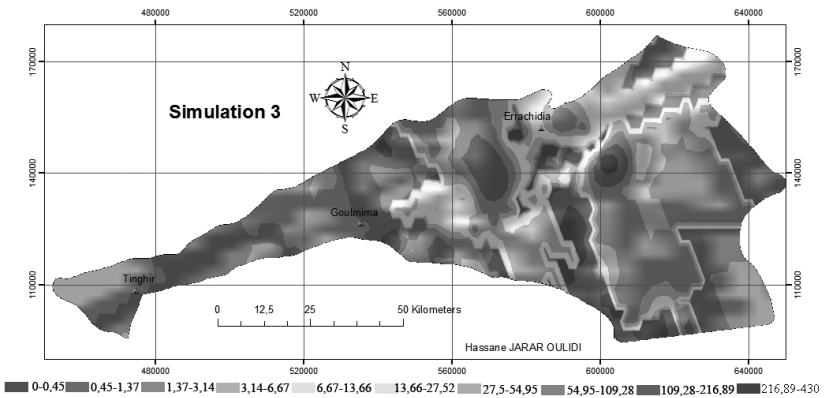
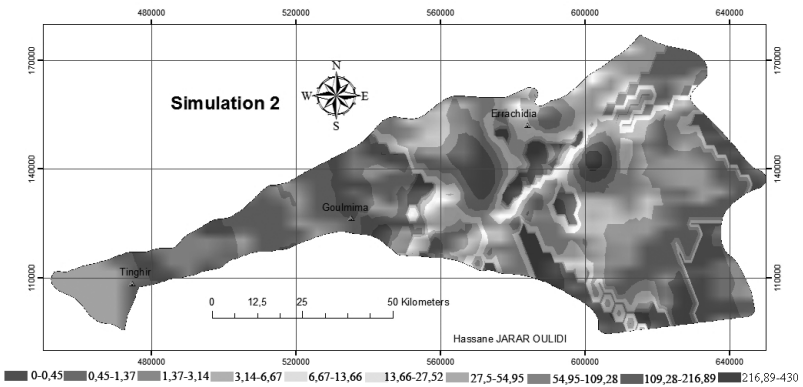
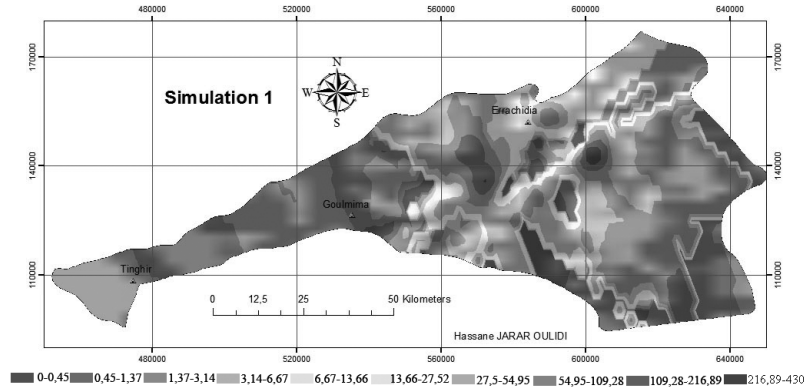
Conclusion

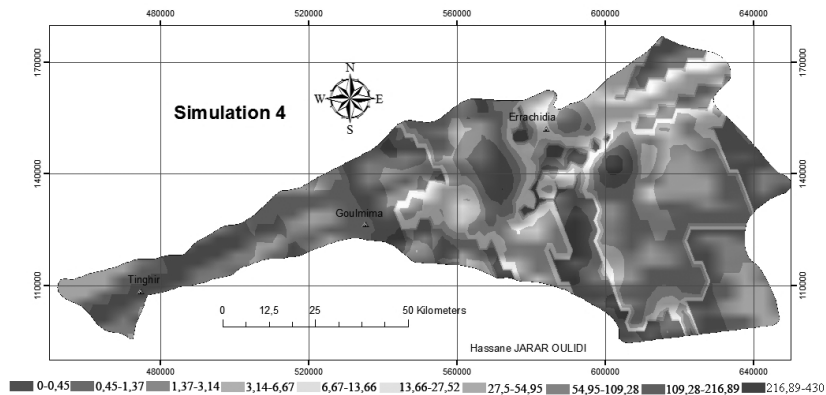
Ce travail sur la modélisation géostatistique des champs de la transmissivité rentre dans le cadre d'une éventuelle actualisation du modèle mathématique de la nappe déjà élaboré du bassin crétacé d'Errachidia.

Cependant, la combinaison du SIG et la géostatistique ont été utilisées, comme outil, pour modéliser les valeurs de transmissivité de l'aquifère Infracénomanien du bassin crétacé du Sud-Est marocain. Cette nouvelle méthodologie probabiliste a permis de produire des cartes plus fiables d'estimation de la transmissivité. Cette estimation a été réalisée par la méthode optimale de krigeage, laquelle a mis en évidence une indication sur l'erreur relative à chaque valeur estimée. Cet outil a permis aussi de quantifier l'incertitude due à l'interpolation.

La carte de la transmissivité de l'aquifère Infracénomanien ainsi obtenue constitue, certes, un outil de décision important et nécessaire notamment pour l'aménagement et la gestion des ressources en eau en l'occurrence le choix des implantations les plus favorables des futurs ouvrages d'exploitation (puits, forages...), et ce pour satisfaire les besoins de plus en plus croissants de la région en eau potable et agricole.

Figure 12: Extrait des 70 Simulations conditionnelles des valeurs de la transmissivité (en $10^{-2}m^2/s$)





Bibliographie

CAPILLA J.E., GÓMEZ-HERNÁNDEZ J.J., SAHUQUILLO A., 1997. Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data: 2. Demonstration on a synthetic aquifer. *Journal of Hydrology*, n°. 203, p. 175-188.

CHILÈS J.-P., 2004. *La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications*, thèse doct. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 71 p.

CHILÈS J.-P., DELFINER P., 1999. *Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty*. John Wiley and Sons, inc, New York, 695 p.

DAGAN G., 1985. Stochastic modelling of groundwater by unconditional and conditional probabilities: the inverse problem. *Water Resources Research*, vol. 21, n° 1, p. 65-72.

DELHOMME J.-P., 1978. Kriging in the hydrosciences. *Advances in Water Resources*, vol. 1, n° 5, p. 251-266.

EL OUALI A., 1999 : *Modalité d'alimentation et échanges entre aquifères de piement en conditions climatiques arides. Cas des systèmes aquifères du Haut-Atlas/bassin crétacé d'Errachidia (Maroc)*. Th. Doc. Univ. Mohamed V. Rabat.

EL MORJANI Z., 2003. *Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc)*. Th. Doct. Univ. Genève Institut Forel. Département de Minéralogie, 99 p.

ESRI (Environmental Systems Research Institute), 2004. *ArcGIS 9: Using ArcGis Geostatistical Analyst*. Environmental Systems Institute.

JARAR OULIDI H., BENSLIMANE A., BENAABIDATE L, EL JAAFARI S., 2005. Application of GIS, Geostatistics and Remote Sensing Methods in Évaluation of Groundwater Potentiality of Errachidia's Cretaceous Basin, Morocco. *Proceeding d'un Workshop International « Information Spatiale et Développement Durable »*. École Mohammadia d'Ingénieur (EMI), Rabat 14th, 15th and 16th November 2005, pp 79-80