

Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la piézométrie à l'aide de l'extension Geostatistical Analyst d'ArcGIS

Cas du système aquifère phréatique de Sfax (Tunisie)

IBTISSEM TRIKI, IMEN HENTATI, NADIA TRABELSI, MONCEF ZAIRI

LABORATOIRE EAU ENERGIE ENVIRONNEMENT,
ECOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE SFAX,
BP 1173 SFAX 3038 – TUNISIE

TRIKI_IBTISSEM@YAHOO.FR

Face à la demande accrue du public d'avoir une information détaillée et fiable sur l'évolution de la ressource en eau souterraine, la modélisation spatiale constitue un élément fondamental de la chaîne d'outils de gestion de la ressource en eau. Cette étude se propose de tester trois méthodes d'interpolation spatiale, déterministes et stochastiques, disponibles dans l'extension *Geostatistical Analyst d'ArcGis*, dans le but de déterminer la méthode d'interpolation spatiale qui fournit une représentation satisfaisante du modèle piézométrique du système aquifère phréatique de Sfax (Sud-Est de la Tunisie).

Les estimations montrant des différences significatives selon les méthodes utilisées, il est intéressant d'évaluer les cartes

piézométriques obtenues en comparant leurs qualités prédictives par validation croisée. Les résultats indiquent la supériorité de la technique du krigeage universel par rapport aux estimations déterministes, avec une diminution de l'écart type des erreurs d'estimation allant jusqu'à 25 %.

Introduction

Le couplage des techniques de modélisation spatiale à celles des SIG a beaucoup évolué ces dernières années, grâce aux progrès de l'informatique. D'une part, les logiciels de traitement géostatistique se sont enrichis d'outils simplifiés de représentation géographique, voire, plus récemment, de fonctions d'import/export pour communiquer avec des logiciels SIG ;

d'autre part, les logiciels SIG ont intégré des outils de modélisation spatiale à travers des extensions spécialisées. Ainsi les modules TIN et GRID d'*Arc/Info*, commercialisés au début des années 1990, sont venus rejoindre les applications de la gamme *ArcGIS* avec les extensions *Spatial Analyst*, *3D Analyst*, plus récemment complétées par *Geostatistical Analyst* (Thomas 2003). L'extension *Geostatistical Analyst* (GA) propose une large gamme de fonctions de modélisation spatiale plus ou moins sophistiquées susceptibles de répondre aux besoins d'interpolation de valeurs à partir de données de différents types (Johnston *et al.* 2001).

Les applications d'interpolation sont de plus en plus nombreuses, et ce dans des domaines variés,

notamment en hydrogéologie où l'information disponible se résume souvent à des données directes, obtenues *in situ* à partir de sondages, et à des données indirectes, de type géophysique ou autre, qui ne renseignent pas directement sur les propriétés mais présentent certaines corrélations avec elles (Gomez et Garcia, 1998). Le choix d'une technique appropriée dépend de nombreuses considérations, et son application nécessite une bonne dose d'expérience et d'expertise (Martin *et al.* 1989 ; Rogers 2003). Après une brève description des différentes techniques d'interpolation, le but de cet article est d'en tester trois, afin de déterminer quelle méthode il convient d'utiliser pour obtenir une cartographie piézométrique fiable et plus représentative du système aquifère phréatique de Sfax.

Aperçu des méthodes d'interpolation

La modélisation de surface est un processus mathématique par lequel une surface continue est interpolée à partir d'un jeu de données (x, y, z) distribuées aléatoirement. Le résultat de cette interpolation fournit une donnée structurée appelée « grille ». La précision de la grille obtenue dépend des données de départ (nombre, répartition...) mais également de l'algorithme de calcul des points de la grille (Maron et Rihouey, 2002). Les méthodes d'interpolation sont nombreuses et d'une complexité, comme d'une efficacité, très variable (Drapeau, 2000). La sélection de l'une ou l'autre est logiquement conditionnée par la représentativité espérée des résultats que l'on recherche et des objectifs que l'on se fixe (Renard et Comby, 2006). Deux approches de méth-

odes d'interpolation, l'une déterministe et l'autre probabiliste, sont envisageables et peuvent être adaptées au problème à traiter (El morjani, 2003).

Les méthodes déterministes

Les méthodes d'interpolation dites déterministes sont fondées sur des fonctions mathématiques qui expriment soit un facteur de pondération des valeurs d'entraînement (pondération inverse de la distance), soit une surface de tendance (polynômes, splines), voire une combinaison des deux (Rogers, 2003). La méthode dite de « *pondération inverse de la distance* » (*Inverse Distance Weighting, IDW*) calcule, pour chaque point à estimer, la moyenne des valeurs expérimentales de ses voisins, en privilégiant les points les plus proches ; les facteurs de pondération sont donc calculés proportionnellement à l'inverse de la distance : $1 \div d$. Cette méthode permet d'obtenir des grilles très rapidement, mais crée des zones circulaires autour des valeurs observées (effet « *œil de boeuf* »). Cet artefact peut être lissé en jouant sur la puissance et le voisinage (El morjani, 2003).

Les méthodes polynomiales constituent des surfaces polynomiales d'un ordre donné reliant les points d'entraînement, avec, dans *Geostatistical Analyst*, la possibilité de régler le degré de localité (une surface polynomiale par mesure dans un voisinage donné) et de globalité (une seule surface polynomiale pour toute la zone d'étude exprimant la tendance de premier ordre). De la même manière, la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (*Radial Basis Function, RBF*) permet d'interpoler ou à partir de

données réparties aléatoirement. Ce type d'interpolation est rendu plus flexible que l'interpolation polynomiale grâce à un paramètre de tension qui contrôle le comportement de la fonction d'interpolation et le paramètre de lissage (Drapeau, 2000).

Ces techniques déterministes présentent néanmoins des défauts : elles ignorent la structure spatiale de la variable et produisent, du coup, des surfaces interpolées très lisses ; des situations locales très spécifiques peuvent alors être omises (zones de fortes ou de très faibles valeurs). Enfin, aucun critère statistique pour juger la précision de ces cartes n'est formulé. Si l'on veut optimiser la précision des estimations, il faudra utiliser d'autres outils qui feront appel à des modèles probabilistes (Despaigne, 2006).

Les méthodes probabilistes

La géostatistique se réfère aux méthodes d'analyse probabiliste pour étudier des phénomènes corrélés dans l'espace appelés « *phénomènes régionalisés* ». Les méthodes géostatistiques d'estimation sont fondées sur la modélisation de la structure spatiale à partir des données expérimentales ; les paramètres de l'estimation dépendent de la variabilité spatiale et la précision de l'estimation est indiquée par la variance d'estimation (De Fouquet, 1994).

Il existe toute une série des méthodes d'interpolation géostatistiques qui peuvent être réalisées en mode uni-varié (krigeage) ou multi-varié (co-krigeage) (Rogers, 2003). Ces méthodes sont applicables aussi bien aux variables qui indiquent une certaine homogénéité des

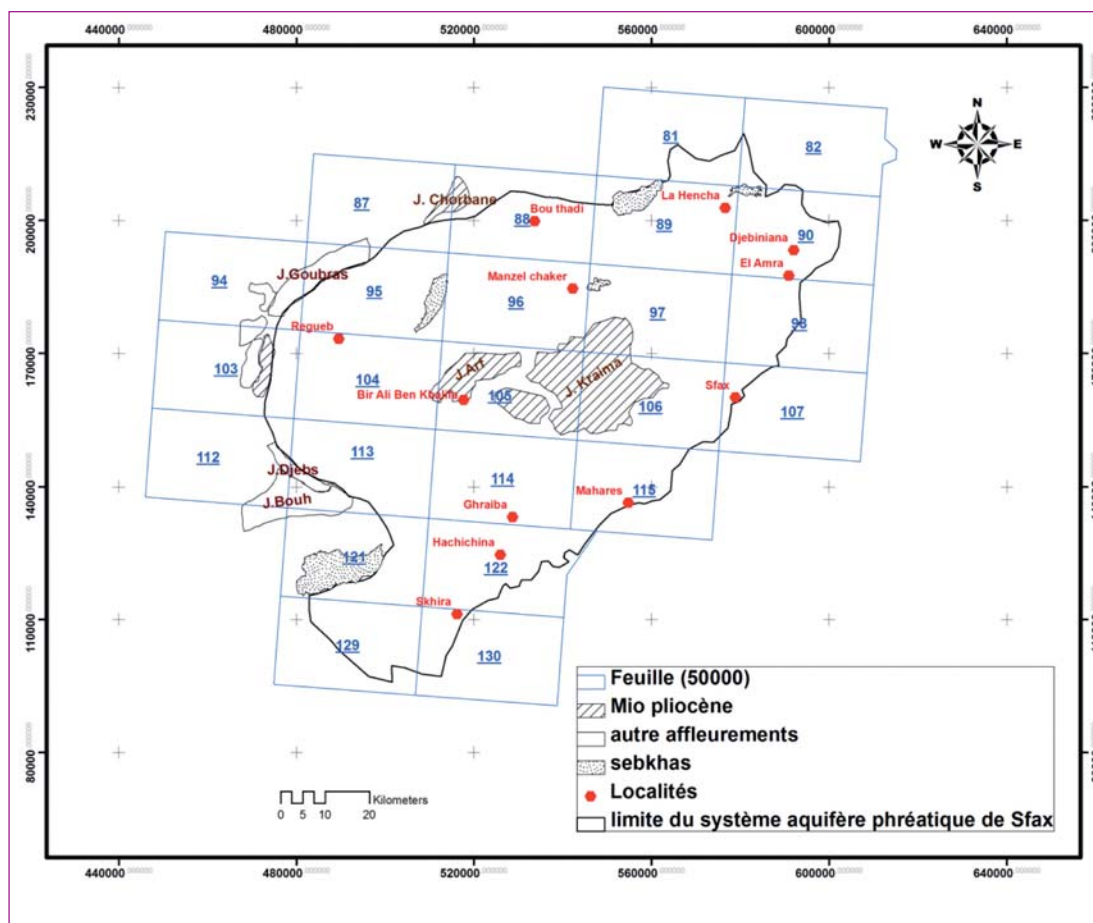


Figure 1 : Carte de localisation géographique de la zone d'étude.

caractéristiques dans l'espace (variables stationnaires) qu'aux variables dont la structure spatiale présente des tendances bien marquées dans certaines directions (variable non stationnaires) (Martin *et al.*, 1989).

L'interpolation des mesures de piézométrie est très souvent réalisée à l'aide du krigeage universel (Aboufirassi et marino, 1983 ; Ahmed *et al.*, 2007 ; Kumar, 2007 ; Amleto *et al.*, 1987 ; Kumar et Ahmed 2003) et le krigeage intrinsèque d'ordre K (Martin *et al.*, 1989). Plusieurs auteurs (Kumar, 2007 ; Sun *et al.*, 2009) ont également présenté des études comparatives sur l'efficacité des méthodes d'interpolation déterministes et probabilistes. Cependant, il semblerait que, pour des aquifères non confinés, le krigeage avec un modèle numérique de terrain en dérive externe

soit le plus adapté (Desbarats *et al.*, 2002).

Matériels et méthode

Présentation de la zone d'étude et des données utilisés

La zone d'étude se situe, en coordonnées Lambert, dans une surface définie entre [472770, 602501] en **x** et [219646, 95927] en **y**. L'aquifère phréatique de la région couvre un assemblage de vingt-quatre cartes à l'échelle 1:50 000 avec une superficie de 8 500 km², et s'étend depuis la plaine de Mahdia au Nord jusqu'à la plaine de Ségui au Sud (fig. 1). Il est limité au Nord-Ouest par les dômes de Bouthadi-Chorbane et d'El Jem, au Sud-Ouest par la dorsale tunisienne et à l'Est par la mer Méditerranée. Cet aquifère, considéré parmi les plus grands

bassins hydrogéologiques en Tunisie, présente des ressources de plus en plus limitées à cause de la pluviométrie déficitaire et de l'augmentation des prélèvements. Les niveaux de la nappe font l'objet d'un suivi mensuel grâce au réseau piézométrique régional. Ce réseau, géré par l'arrondissement des ressources en eau de Sfax, dispose de quatre-vingt-onze piézomètres dans la zone d'étude, dont la plupart sont en fonctionnement depuis 2003. On représente, sur la figure 3a, la localisation de ces piézomètres.

Méthodologie

La disponibilité d'un nombre croissant de données hydrogéologiques, combinée à la diversité des formats dans lesquels on les trouve (*raster* et *vecteur*), rend leur traitement de plus en plus diffi-

cile avec les méthodes conventionnelles. L'utilisation des logiciels SIG est essentielle au projet de cartographie hydrogéologique régionale (Boisvert *et al.*, 2008). *ArcGis* comprend une suite d'applications intégrées : *ArcMap*, *ArcCatalog* et *Arctoolbox*. À l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données, le géotraitement et la cartographie. Les méthodes de cartographie utilisées dans ce travail sont celles proposées par l'extension *Geostatistical Analyst* d'*ArcGIS 9*.

La figure 2 décrit la procédure d'élaboration d'une carte piézométrique régionale. Elle est divisée en plusieurs étapes : la collecte et l'intégration des données existantes, l'exploration des données, le choix des méthodes d'interpolation spatiale et finalement la comparaison des résultats cartographiques obtenues par validation croisée.

Collecte et structuration des données

La présente étude est constituée par une base de données descriptive et une base de données cartographique. Cette dernière présente un fond vectoriel qui définit les limites des objets spatiaux à travers leurs constitutions élémentaires, à savoir les points, les lignes et les polygones (carte topographique, couverture géologique, localités, piézomètres, dépressions endoréiques et limite de la nappe). Les données relatives aux piézomètres forment la majeure partie de la composante sémantique ; chacun des piézomètres est décrit par un enregistrement au niveau de la table attributaire

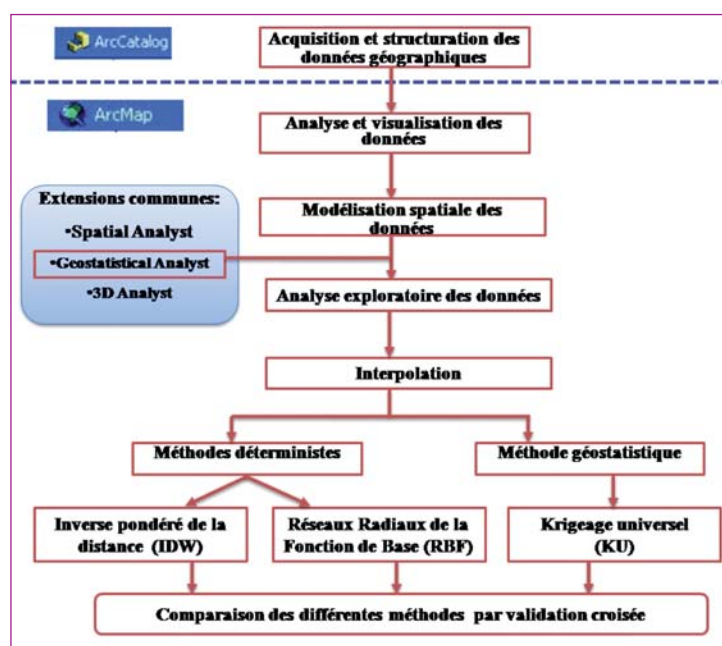


Figure 2 : Schéma général présentant la démarche de l'étude.

contenant les coordonnées, l'altitude nivelée, la profondeur de la nappe par rapport au sol, la cote piézométrique, la profondeur totale de l'ouvrage, sa date de réalisation, ainsi que l'organisme chargé de la surveillance de ce piézomètre. La carte géologique et les sebkhas sont utilisées pour l'interprétation de la carte piézométrique. Le module *ArcCatalog* facilite la gestion et la manipulation de données à référence spatiale : il fournit une fenêtre de catalogue utilisée pour organiser et gérer les différents types d'informations géographiques pour *ArcGIS Desktop*. Toutefois, avant d'ajouter les thèmes concernés sur *ArcMap*, la référence spatiale des différentes couches utilisées au sein du même projet a été définie sur l'interface d'*ArcCatalog*.

Analyse exploratoire des données piézométriques

Avant traitement, il est nécessaire de faire une exploration détaillée

des données existantes pour conduire à une interpolation qui soit la plus représentative du phénomène étudié (Thomas, 2003). L'extension GA possède un module d'analyse exploratoire des données spatiales (*ESDA*) qui permet de visualiser et d'analyser les données selon des techniques statistiques. Ce module offre une large gamme de possibilités permettant la détection de tendances ou de dérives dans les données, le repérage des valeurs anormales et l'étude des corrélations spatiales de ces données (Johnston *et al.*, 2001). Il est ici rappelé que la variable d'intérêt étudiée est la cote piézométrique du système aquifère phréatique de Sfax, issue d'une campagne de mesure effectuée en mars 2006 sur l'ensemble des piézomètres.

La carte d'implantation de ces données, tracée avec des symboles proportionnels à la valeur piézométrique, montre que ces dernières possèdent une certaine continuité spatiale (auto-

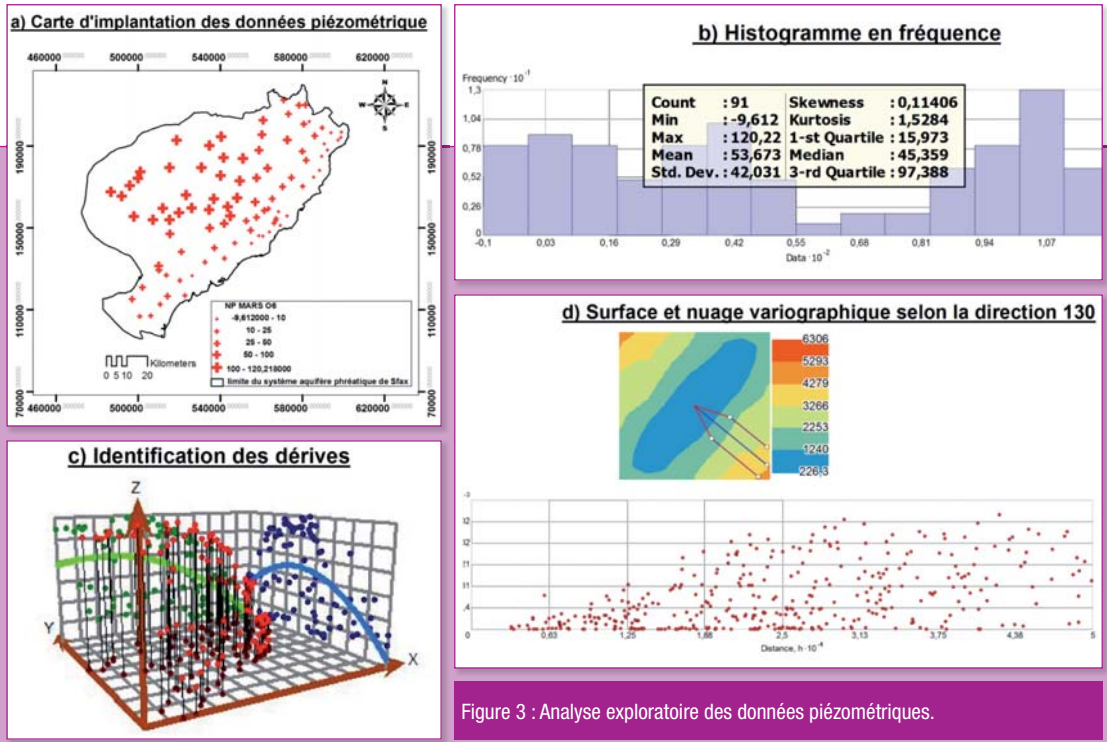


Figure 3 : Analyse exploratoire des données piézométriques.

corrélation). En outre, les valeurs faibles se situent plutôt à proximité de la côte et les valeurs fortes au centre de la plaine (fig. 3a).

La distribution des données, illustrée par l'histogramme de la figure 3b, montre un aspect plus ou moins chauté, certaines valeurs apparaissant avec une fréquence élevée : cette série statistique est donc plurimodale. De plus, le coefficient d'obliquité, qui qualifie la répartition plus ou moins étalée des valeurs de la série à droite ou à gauche de l'histogramme, indique une dissymétrie avec un étalement vers les fortes valeurs (droite de l'histogramme) et la valeur de Kurtosis égale à 1,52 montre également une asymétrie dans la distribution des données.

Par ailleurs, l'outil d'analyse de tendance permet d'identifier la présence d'une dérive qui est considérée comme la tendance moyenne de la variable (Cardenas, 2004). La figure 3c révèle la présence d'une dérive évaluée par un polynôme d'ordre deux qui suppose que notre jeu de données n'est pas stationnaire.

En outre, le nuage variographique, qui est un outil d'exploration et de description de la variabilité spatiale, permet de représenter, pour chaque point du nuage, la différence au carré entre les mesures obtenues à deux endroits différents. Les valeurs élevées du nuage variographique à petite distance mettent souvent en évidence des échantillons anormaux (Thomas, 2003). La surface variographique est une autre représentation du variogramme expérimental qui renseigne sur la valeur moyenne de ce dernier pour une direction et une distance donnée ; ce mode de représentation se justifie pour identifier les anisotropies (Johnston *et al.*, 2001). L'ampleur de la variabilité est représentée par les couleurs : les faibles valeurs sont en bleu et les valeurs élevées en rouge. Lorsque la variabilité est identique dans toutes les directions, il s'agit d'un modèle isotrope (Cardenas, 2004).

Si l'on examine la surface variographique obtenue à partir des données piézométriques (fig. 3d), on observe un comporte-

ment anisotrope marqué aux grandes distances, avec une forte variabilité dans la direction 130° qui correspond, à peu près, à la direction principale de l'écoulement. Le nuage variographique le long de cet axe croît plus vite qu'une parabole et montre la présence d'une forte dérive liée au gradient piézométrique très régulier.

Résultat et validation

On cherche à interpoler les valeurs mesurées aux nœuds d'une grille régulière de 500 m de côté. Trois techniques d'interpolation sont effectuées : la méthode IDW, la méthode RBF et le krigeage universel. Dans le but de retenir la carte qui paraît la plus représentative de la réalité, notre choix doit être fondé sur des critères objectifs. Pour cela, il faut comparer les modèles utilisées par validation croisée.

Interpolation piézométrique à l'aide des méthodes déterministes

Deux types d'interpolation déterministe ont été réalisés :

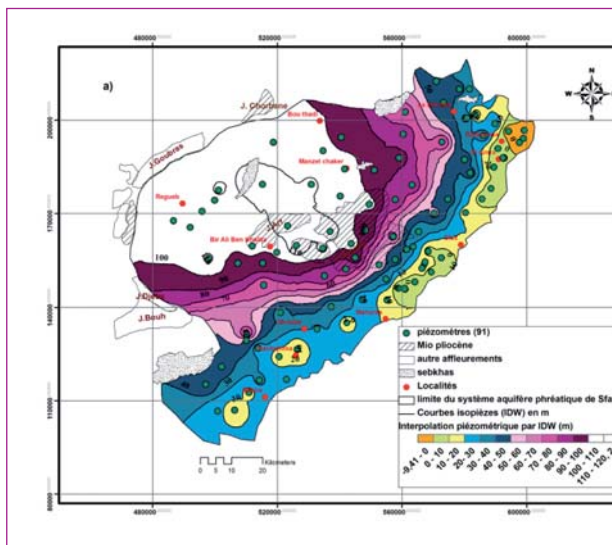


Figure 4a : Carte piézométrique obtenue par la méthode de « pondération inverse de distance ».

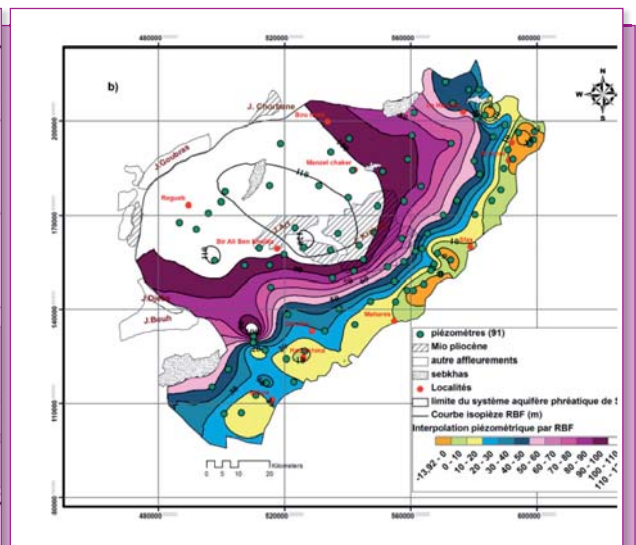


Figure 4b : Carte piézométrique obtenue par la méthode des « réseaux radiaux de la fonction de base ».

la méthode de « pondération inverse de distance » (IDW) et la méthode des « réseaux radiaux de la fonction de base » (RBF). En comparant les tracés des isopièzes obtenus par les deux méthodes (fig. 4a et 4b) la constatation qui s'impose est que les tracés sont différents pour les deux méthodes. Toutefois, les courbes obtenues par la méthode RBF sont plus lissées que celles obtenues par la méthode IDW, qui présente des contours à forte tendance concentrique autour des données. Ainsi, la forme des isopièzes obtenus reflète bien le fait que la méthode utilisée dépend grandement de la localisation des données par rapport au nœud considéré.

Interpolation piézométrique à l'aide de la géostatistique

Les outils de l'étude exploratoire montrent que la piézométrie dans la région de Sfax n'est pas une variable stationnaire, ce qui implique que cette variable s'écrit sous la forme $Z(x)=R(x)+d(x)$, avec : $R(x)$ résidu stationnaire ou intrinsèque ; $d(x)$ dérive suppo-

sée déterministe et responsable de la non stationnarité de la variable $Z(x)$.

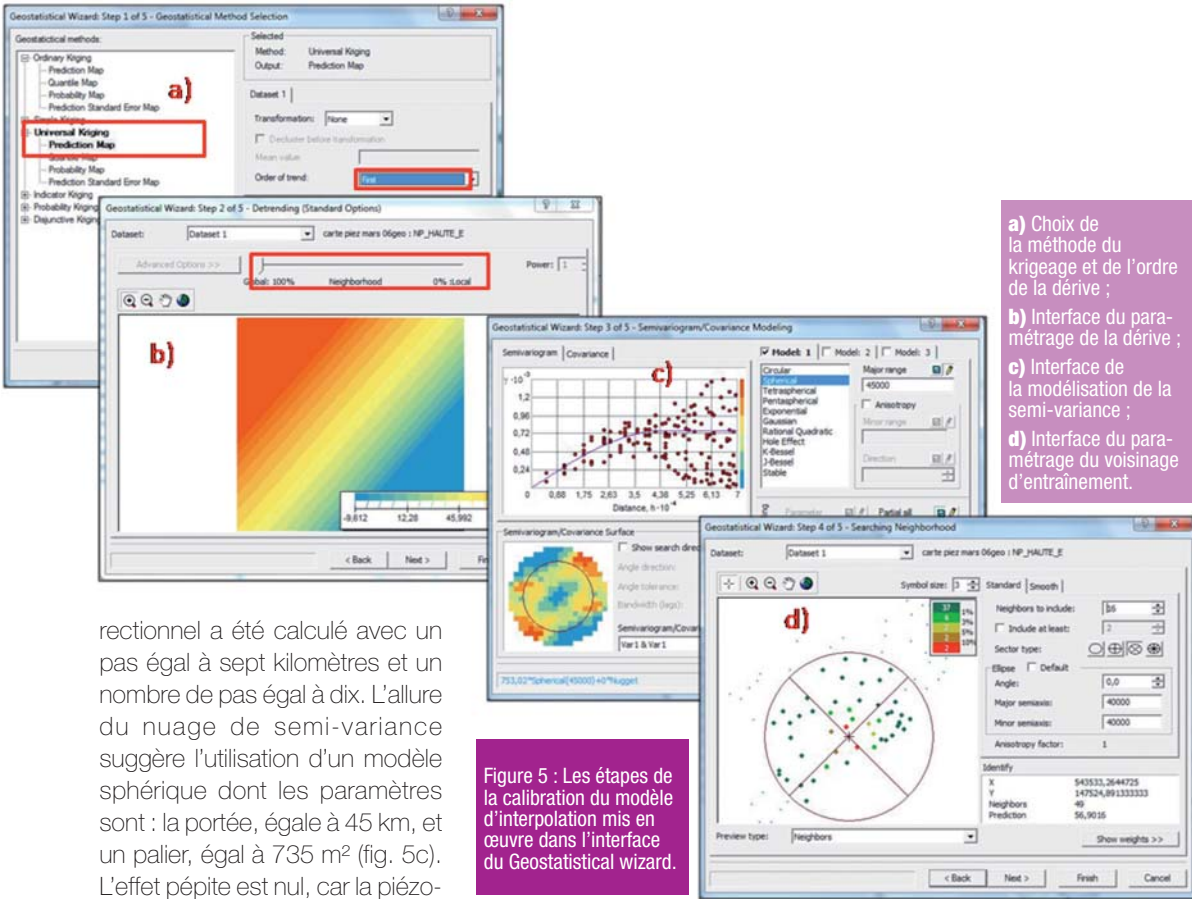
Ainsi, pour cartographier la piézométrie, on est obligé de réaliser la dichotomie afin d'accéder aux résidus (Chiles, 1991). Dans ce cas le krigeage ordinaire n'est pas applicable et c'est le krigeage universel qui est le plus approprié. La calibration du modèle d'interpolation mis en œuvre dans l'interface du *Geostatistical wizard* s'est déroulée en plusieurs étapes.

La première étape consiste à approcher la dérive par une fonction polynomiale dont les paramètres sont estimés grâce aux données. Le choix de l'ordre de la dérive peut se faire en ajustant un polynôme d'ordre un, deux ou trois. Toutefois, il est conseillé de garder le degré de la dérive aussi bas que possible pour simplifier les équations de calcul (Johnston *et al.*, 2001). Nous avons remarqué dans la partie d'exploration des données, et plus particulièrement dans l'outil d'analyse de la dérive, qu'une courbe de degré deux s'adaptait

aux données piézométriques. Cependant, après avoir fait plusieurs essais, nous avons finalement retenu une fonction de degré un pour modéliser cette dérive (fig. 5a).

La deuxième étape consiste à définir l'échelle sur laquelle on adapte la dérive. Si on considère une dérive globale (sur la zone entière), alors on tend vers l'extrême « global » ; si, au contraire, on a une dérive locale qui ne concerne que de petites portions de la zone, on tend vers « local » (Cardenas, 2004). Dans la partie d'exploration des données, et plus particulièrement dans l'outil d'analyse des distributions spatiales, nous avons remarqué que l'influence des fortes valeurs se fait ressentir sur toute la zone d'étude ; nous choisissons alors une dérive globale (fig. 5a).

La troisième étape consiste à élaborer un modèle de semi-variance : en visualisant la surface et le nuage variographique à des pas de distance différents, on identifie un comportement isotrope aux faibles distances. Par la suite, un variogramme omnidi-



- a) Choix de la méthode du krigeage et de l'ordre de la dérive ;
- b) Interface du paramétrage de la dérive ;
- c) Interface de la modélisation de la semi-variance ;
- d) Interface du paramétrage du voisinage d'entraînement.

Figure 5 : Les étapes de la calibration du modèle d'interpolation mis en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard.

rektionnel a été calculé avec un pas égal à sept kilomètres et un nombre de pas égal à dix. L'allure du nuage de semi-variance suggère l'utilisation d'un modèle sphérique dont les paramètres sont : la portée, égale à 45 km, et un palier, égal à 735 m² (fig. 5c). L'effet pépité est nul, car la piézométrie est très régulière même à petite échelle.

En quatrième étape, on définit les paramètres qui régissent le choix du voisinage (le nombre des points échantillons, la limite et la forme du voisinage), le but étant de trier parmi les points échantillons ceux qui auront le plus d'importance dans l'estimation. Le voisinage choisi est de forme circulaire, de rayon quarante kilomètres et seize données par quadrant (fig. 5d).

En cinquième étape, on peut vérifier les choix qui ont été faits dans les étapes précédentes à l'aide de la validation croisée, qui consiste à estimer un point dont on connaît la valeur après l'avoir éliminé des données d'entrée. En faisant cela successivement sur tous les sites de mesure, on obtient le graphe qui représente les résultats d'une validation croisée (les valeurs mesurées en abscisses, les estimations en ordonnées) complétés par une des statistiques d'erreur globale. En principe, on cherchera à faire en sorte que la moyenne de l'erreur et de l'erreur réduite soient très faibles, que l'écart type de l'erreur et la moyenne de

l'écart type de krigeage soient très proches l'un de l'autre, et que l'écart type de l'erreur réduite soit proche de un (Johnston *et al.*, 2001). Il nous est arrivé d'avoir à effectuer plusieurs traitements afin d'obtenir des valeurs optimales d'erreur. Une fois déterminée, l'application du modèle permet de visualiser une carte « krigée » (fig.6a) et une carte de l'écart type de krigeage (fig. 6b). Cette dernière quantifie la dispersion possible de la valeur vraie autour de la valeur estimée. Donc plus l'écart type est faible plus la valeur interpolée est en moyenne conforme à la réalité, et donc plus la carte est précise (Isaaks *et al.*, 1989). La carte d'écart-type de krigeage (fig. 6b) est caractérisée par des valeurs faibles à proximité des points de mesure (1,5 m) et des valeurs de l'ordre de 35 m à la limite Nord-Ouest de la nappe, qui est dépourvue de points de mesure.

Comparaison des différentes méthodes d'estimation

Pour choisir la méthode qui fournit les meilleurs résultats

(c'est à dire une carte piézométrique représentative à partir de quatre-vingt-onze mesures) on compare les résultats de validation croisée illustrés sur les figures 7 et 8.

Le récapitulatif des statistiques de l'erreur d'estimation (fig. 7) montre que le krigeage universel est plus précis et moins biaisé car la moyenne des erreurs est plus proche de zéro et l'écart type des erreurs d'estimation est plus faible avec une diminution de l'ordre de 24 % par rapport à la méthode IDW et 4 % par rapport à la méthode RBF.

Une étude comparative des nuages de corrélations, qui confrontent les valeurs mesurées (en abscisses) et les valeurs estimées (en ordonnées), nous a permis de sélectionner, parmi les trois méthodes d'interpolation utilisées, l'estimateur qui est le plus adapté à notre cas. En effet, plus le nuage est proche de la première bissectrice, meilleur est le résultat. La méthode donnant le résultat optimal est la méthode de krigeage universel, avec un coefficient de

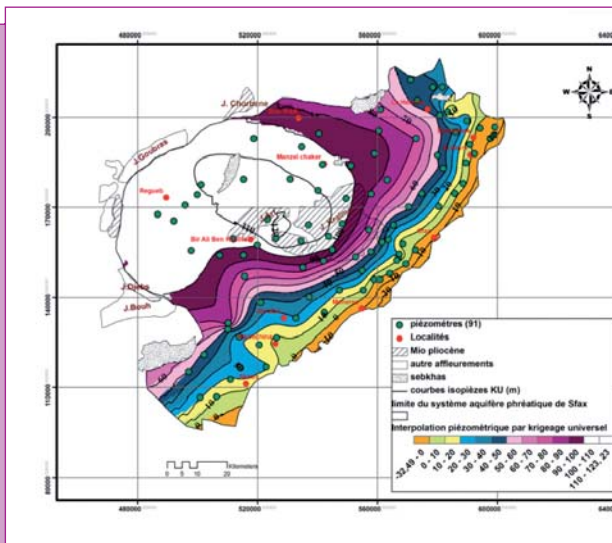


Figure 6a : Carte piézométrique obtenue par Krigeage universel.

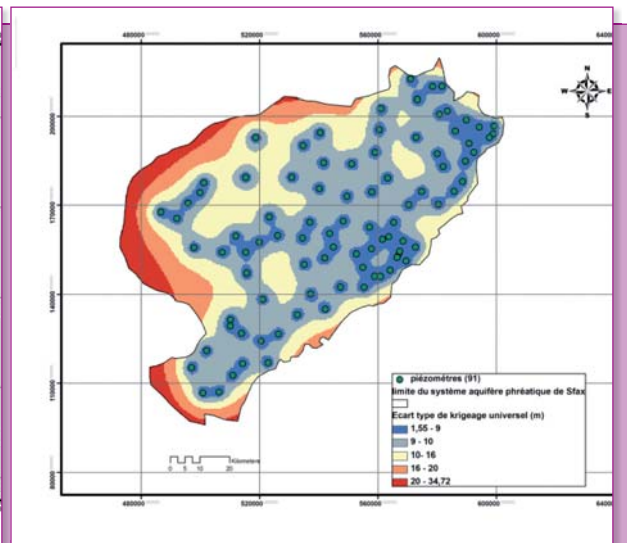


Figure 6b : Carte des écarts types d'estimation.

corrélations de l'ordre de 0,94 ; la méthode RBF donne un résultat proche avec un coefficient de l'ordre de 0,92 ; la méthode IDW obtient un nuage de corrélations plus éloigné de la première bissectrice ($r^2 \sim 0,87$).

Par ailleurs, la superposition des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées, pour les trois méthodes, montre que le nuage pour la méthode de

krigeage universel est légèrement mieux groupé autour de la droite $y = x$ avec un coefficient de l'ordre de 0,927 contre 0,13 pour la méthode RBF et 0,28 pour la méthode IDW (fig. 8).

En conclusion, la méthode de krigeage universel s'est révélée plus représentative que les deux autres méthodes ; parmi celles-ci, la méthode RBF donne un résultat sensiblement meilleur que la méthode IDW.

Conclusion

Les fonctionnalités d'interpolation de l'extension *Geostatistical analyst* offrent de nombreuses possibilités pour l'interpolation d'une situation piézométrique. L'usage conjoint de méthodes géostatistiques et de modèles déterministes montre que l'interpolation géostatistique permet de produire une carte plus réal-

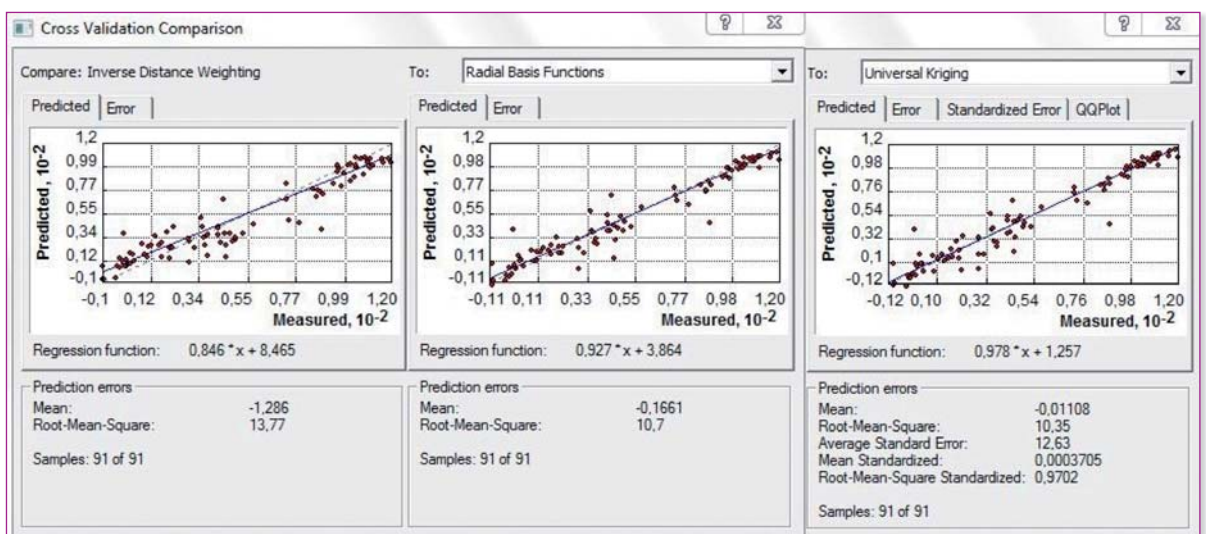


Figure 7 : Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisée. En haut : graphe des observations et des prédictions ; en bas : affichage des statistiques d'erreur.

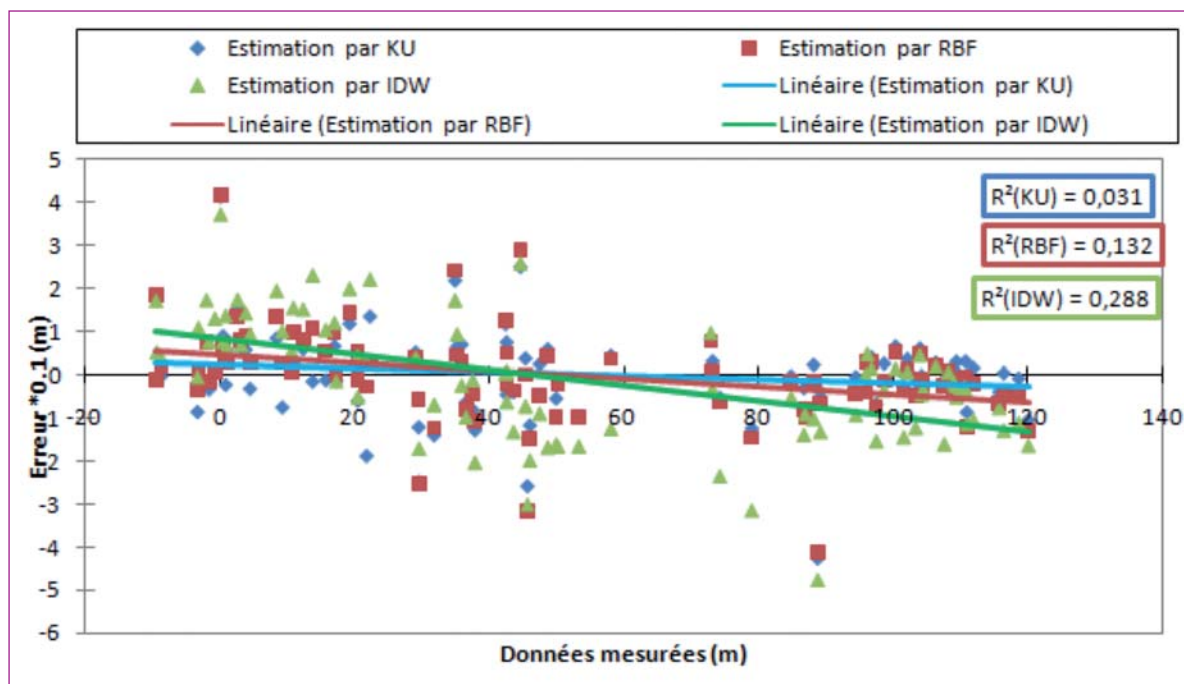


Figure 8 : Superposition des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées, pour la méthode IDW, RBF et le KU.

iste que celle obtenue par les méthodes d'interpolation déterministes seules. Parce que le krigeage prend en compte la présence de dérives systématiques dues à des gradients hydrauliques, la carte qui en résulte respecte bien le comportement spatial de la piézométrie.

De plus, l'approche géostatistique permet de quantifier l'incertitude associée à la carte et de définir les zones sous-échantillonnées. Toutefois, dans les régions éloignées des points d'observation (limite NW de l'aquifère), on remarque que toute tentative de caractérisation de l'écoulement souterrain est

difficile. Ceci montre les limites de l'interpolation géostatistique lorsqu'on passe en extrapolation. Ainsi, l'ajout des données auxiliaires, que l'on pourrait prendre en compte comme une dérive externe, devrait permettre d'améliorer encore la précision des résultats, surtout dans les zones dépourvues de mesure. |

Références bibliographiques

- Aboufirassi M., Marino M.A. (1993) : *Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Morocco*. mathematical Geology, Vol. 15, n° 4.
- Ahmed S., Jayakumar R., and Salih A. (2007) : *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers: Sustainable management and Optimal monitoring Network Design*. Capital Publishing Company, ISBN-81-85589-256, 113 p.
- Amleto A., Pucci J.R., Jo Ann E. (1987) : *Applications of Universal Kriging to an Aquifer Study in New Jersey*. Groundwater, Vol. 25, n°6, Novembre – Décembre 1987.
- Boisvert E., Bolduc A., Bourque É., Fagnan N., Fortier R., Girard F., Larose-Charrette D., Lefebvre R., martel R., michaud Y., Paradis D., Parent m. (2008) : *Guide méthodologique pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires de surface*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec, ISBN : 978-2-550-51189-2 (pdf), 167 p.
- Cardenas G. (2004) : Utilisation du module « *Geostatistical Analyst* » d'ArcView dans le cadre de la qualité de l'air. Étude n°10 – Assistance en modélisation, INERIS DRC-04-55278-2 IEN-GCa-04.0095.
- Chiles J.P. (1991) : Application du krigeage avec dérive externe à l'implantation d'un réseau de surveillance piézométrique. *Science de la terre*, n°30, p. 131 - 147.
- De Fouquet C. (1994) : Contribution de la géostatistique au traitement de l'information environnementale et géographique. École des mines de Paris, Centre de géostatistique, rapport 00316, 7 p.
- Despaigne W. (2006) : méthodes géostatistiques pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. mémoire de master à l'Université de Bretagne Sud, Institut Universitaire Professionnalisé Informatique et Statistique (France).
- Desbarats A.J., Logan C.E., Hinton M.J. et Sharpe D.R. (2002) : *On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model*. Journal of Hydrology 255, p. 25-38.
- Drapeau L. (2000) : Statistiques et Interpolations dans les SIG. *Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the management of mediterranean Fisheries*. Informations et Études – COPEMED, juin 2000.
- 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). Thèse de la faculté des sciences de l'université de Genève n° 3370, 283 p.
- Gomez-Hernandez J., Garcia M. (1998) : Analyse bibliographique des méthodes géostatistiques adaptées à la caractérisation des aquifères. ANDRA - DS/HG, B RP OFSS 98-001/A, 245 p.
- Isaaks E.H. and Srivastava R.M. (1989) : *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, Oxford University Press, 561 p.
- Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N. (2001) : *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI Inc. Redlands, California.
- Kumar D., Ahmed S. (2003) : *Seasonal behaviour of spatial variability of groundwater level in a granitic aquifer in monsoon climate*. Current Science, vol. 84. 2, p. 25.
- Kumar V. (2007) : *Optimal contour mapping of groundwater levels using universal kriging – a case study*. Hydrological Sciences Journal, 52:5, p. 1038 - 1050.
- Martin J.C., Schwartz J., Seguin J.J., Thiery D., Sauty J.P. (1989) : Quelques applications de la géostatistique à l'hydrogéologie. BRGM, R30 177, EAU 4S 89.
- Maron P., Rihouey D. (2002) : Optimisation de données bathymétriques à l'aide de « SURFER » : application à l'historique des plages d'Anglet. VIe Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Anglet, France, 15 - 17 mai 2002.
- Renard F., Comby J. (2006) : Évaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du Grand Lyon. La Houille blanche, 6, 73-78.
- Rogers C. (2003) : Interpolation des températures moyennes mensuelles en France métropolitaine avec l'extension *Geostatistical Analyst* d'ArcGIS 8. Actes de la conférence Francophone ESRI.
- Sun Y., Kang S., Li F., Zhang L. (2009) : *Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the minqin oasis of northwest China*. Environmental modelling and Software 24 (10), p. 1163 – 1170.
- Thomas D. (2003) : Analyse Spatiale avec ArcGIS : méthodes et outils. Actes de la conférence francophone ESRI.