

COUPLAGE DE L'ACP ET DE LA GEOSTATISTIQUE DANS L'EVALUATION SPATIALE DE LA QUALITE DES EAUX DE LA NAPPE ALLUVIALE DES PLAINES DU CHELIFF

A. Douaoui , N. Bettahar , E. Benbouali

Centre Universitaire de Chlef – Tel : 03 72 17 29 Fax : 03 72 17 88

RESUME

De nos jours, le problème des ressources en eau mobilisables ne se pose pas uniquement en terme de quantité disponible, la qualité de ces eaux commence à poser de sérieux problèmes. En effet, l'explosion démographique et particulièrement urbaine en parallèle avec le développement socio-économique impose la nécessité de la prise en charge du problème de la qualité des eaux.

La mise en évidence de la répartition spatiale de la qualité des eaux de la nappe alluviale du miopliocène nécessite l'emploi de méthodes cartographiques appropriées.

L'outil d'analyse cartographique employé dans ce cas est une combinaison entre l'analyse en composantes principales et la géostatistique pour permettre l'analyse et l'interpolation de plusieurs éléments chimiques. Ce travail constitue une contribution dans l'évaluation de la qualité hydrochimique des eaux de la nappe alluviale des plaines du Chélif, ainsi que la détermination des zones homogènes représentant les différents niveaux de la qualité des eaux.

Cette méthode consiste à cartographier les valeurs des coordonnées des individus sur les différents axes pris en considération. Elle permet de dégager un fond régional des mesures, c'est à dire la tendance en grand de la parcelle d'étude. Les valeurs des coordonnées de l'ACP ainsi calculés sont considérées comme étant des variables régionalisées dont va essayer d'établir leur carte.

Selon les résultats obtenus par l'ACP sur les 92 points d'eau pris en compte, l'axe 1 représente 47.38 % de l'inertie totale. La cartographie de cette axe représente la combinaison linéaire des variables qui sont bien corrélées à l'axe 1. Ces variables sont par ordre décroissant : le Mg, Cl, Na, SO₄ et le Ca. Les bicarbonates et les nitrates ne sont pas corrélés à cet axe.

Les différentes zones homogènes selon les niveaux de la qualité des eaux de la nappe alluviale des plaines du Chélif montre que les zones les plus dégradées se localisent dans la région d'El Attaf et que la partie ouest est plus dégradée que la partie est.

Mots clés : nappe, hydrochimie, ACP, géostatistique.

INTRODUCTION

De nos jours, le problème des ressources en eau mobilisables ne se pose pas uniquement en terme de quantité disponible, la qualité de ces eaux commence à poser de sérieux problèmes. En effet, l'explosion démographique et particulièrement urbaine en parallèle avec le développement socio-économique impose la nécessité de la prise en charge du problème de la qualité des eaux.

Ce travail constitue une contribution dans la caractérisation de la qualité hydrochimique des eaux de la nappe alluviale des plaines du Chélif, ainsi que la détermination des zones homogènes représentant les différents niveaux de la qualité des eaux.

Pour cela, l'approche géostatistique multiparamétrique regroupant l'ensemble des variables d'étude prises simultanément et tenant compte de l'autocorrélation entre les coordonnées des individus déterminés par l'ACP a été appliquée.

MATERIEL ET METHODES

Plan d'échantillonnage

La région d'étude s'étend de Djendel à Boukadir. Les échantillons analysés sont prélevés de puits et de forages localisés le long de l'oued chélif et captant les nappes du mioplioquaternaire. Les points d'eau analysés correspondent à la campagne juillet 97 et sont au nombre de 92 (fig. 1)

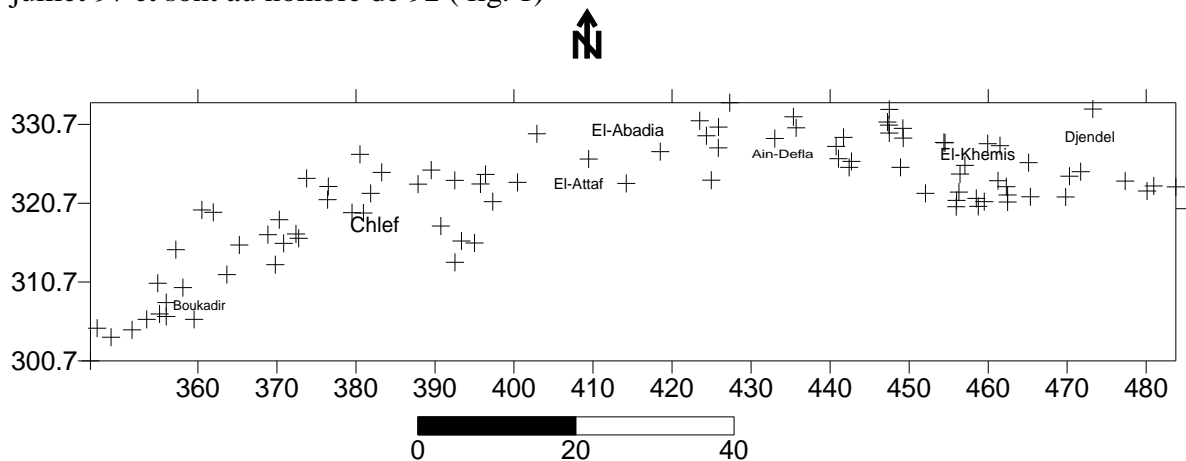


Figure 1 : plan d'échantillonnage

Analyse en composantes principales

L'analyse en composante principale (A.C.P.) est une méthode statistique ancienne, selon [1]Philippeau (1986), c'est K. Pearson en 1901 qui trouve les idées essentielles et à H. Hotteling en 1933 que revient la première publication sur ce sujet, et c'est seulement depuis 1980 avec l'apparition des micro informatiques que l'A.C.P. est de plus en plus fréquemment utilisée.

L'A.C.P. est une méthode statistique descriptive (c'est un terme qui désigne l'ensembles des méthodes de cueillette, de classement de synthèse et de présentation de données). Son objectif est de présenter, sous une forme graphique le maximum de l'information.

Krigeage

Le krigeage est une technique d'estimation d'un phénomène connu en un certain nombre de points qui a l'avantage, parmi d'autres techniques d'interpolation, d'utiliser la structure spatiale de la variable pour l'estimation ([2] Matheron, 1965 ; [3] Steven et Graham, 1996). Il existe plusieurs types :

Krigeage simple en covariance

C'est le cas où la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2, c'est à dire que :

- l'espérance mathématique existe et est constante

$$E (Z (x)) = m$$

- la covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'interdistance h

$$C (h) = E (Z (x), Z (x + h)) - m^2$$

Notons que dans ce cas où la condition de la variance finie est posée n'est que rarement vérifiée en réalité, d'autres hypothèses sont à envisager.

Krigeage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque

Cette hypothèse est moins forte que la première. Elle considère que ce sont les accroissements $[Z (x) - Z (x + h)]$ qui sont stationnaires d'ordre 2 ([4]Laborde, 1989)

- la moyenne est constante

$$E (Z(x) - Z(x + h)) = m (x) - m (x + h) = 0$$

Les accroissements sont nuls en moyenne et $Z (x)$ est stationnaire en moyenne. La variance est constante pour une distance h

$$\text{VAR} [z (x) - Z (x + h)] = 2 \gamma (h)$$

Krigeage universel

Certaines propriétés du milieu naturel peuvent présenter un gradient se traduisant par une tendance. C'est le cas lorsque ni la variance ni la covariance ne peuvent être définies.

L'espérance mathématique n'est donc plus constante et elle est fonction de la position des points d'appui de x ; on aura donc :

$$E (Z (x)) = m (x)$$

$$\text{et } E (Z (x) - Z (x + h)) \neq 0$$

Dans ce cas, l'estimation du variogramme par l'équation habituelle n'est plus valable et devient ([5]Journal, 1977 ; [6]Webster, 1985).

$$\gamma_{\text{réel}}(h) = \gamma_{\text{estimé}}(h) - 1/2[m(x) - m(x+h)]^2$$

Dans ce type de krigeage, il faut donc estimer simultanément le variogramme brut et la dérive que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement.

RESULTAT ET INTERPRETATION

Statistiques élémentaires

Le calcul de la moyenne de l'ensemble des 92 points (Tab. 1) montre que la qualité des eaux de la nappes est généralement médiocre.

En effet, les teneurs en Sodium, Chlore et Nitrate dépassent largement les niveaux des normes internationales (O.M.S). Les autres éléments tels que le Ca et le SO₄ ont des teneurs qui sont juste à la limite des normes tolérées.

La valeur moyenne de TH atteint 79,27°F classant ainsi cette eau dans la catégorie des eaux très dures à l'utilisation domestique (mauvaise), la minéralisation avec une moyenne de 1708,82 mg/l dépasse de loin la limite fixée par l'O.M.S. qui est de 1000 mg/l.

Tableau 1: Statistiques élémentaires.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃
Moy.	183,47	89,37	269,79	6,21	548,80	390,24	253,34	64,5
Min.	48	18	35	0,00	41	25	99	2
Max.	612	335	1250	44	2475	2150	632	185
C.V.	59	65	76	120	79	86	36	65

Les coefficients de variations de différents éléments présentent des valeurs assez élevées à très élevées, excepté pour les bicarbonates qui sont de 36%.

Les C.V. obtenus indiquent une variabilité spatiale élevée sur l'ensemble de la nappe, les valeurs maximales de différents teneurs dépassent toutes les normes internationales tolérables.

Les résultats obtenus par l'ACP ont montré l'existence de cinq différents groupes représentant les niveaux de la qualité des eaux de la nappe. Ces groupes sont qualifiés respectivement de 1 à 5 par des eaux de qualité bonne, assez bonne, moyenne, mauvaise et très mauvaise.

Dans ce sens, et pour mettre en évidence la répartition spatiale des différentes zones en fonction de l'ensemble des 08 éléments, la combinaison entre l'ACP est l'approche géostatistique a été retenue.

Projection des individus dans le plan principal

Le premier axe représente à lui seul 47,38% de l'information contenu dans le tableau des données initiales. Il est à remarquer aussi que cette valeur est plus que trois fois supérieure à celle de la deuxième composante principale qui est seulement de 14.81%.

La projection des 92 individus sur le plan principal formé par l'axe 1 et l'axe 2 (Fig. 2), montre une distribution des échantillons qui se fait principalement en fonction de l'axe 1.

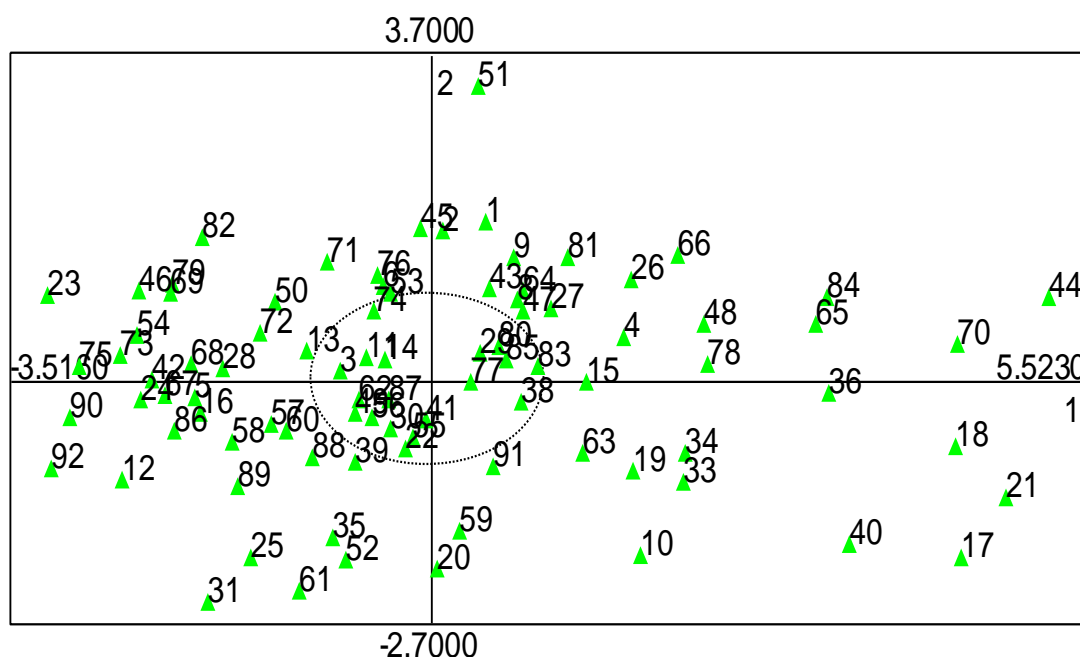


Figure 2 : plan principal des individus.

Cette répartition a permis de distinguer cinq (05) groupes:

Le premier groupe avec 23 individus est constitué par les points d'eau suivants:

5, 12, 16, 23, 24, 25, 28, 31, 42, 46, 54, 58, 67, 68, 69, 73, 75, 79, 82, 86, 89, 90, 92.

Le deuxième groupe formé de 27 individus est constitué par les points d'eau suivants:

3, 6, 11, 13, 14, 22, 30, 35, 39, 41, 45, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 71, 72, 74, 76, 87, 88.

Le troisième groupe comprenant 19 individus est constitué par les points d'eau suivants:

1, 2, 8, 9, 20, 27, 29, 38, 43, 47, 51, 59, 64, 77, 80, 81, 83, 85, 95.

Le quatrième groupe avec ses 11 individus est constitué par les points d'eau suivants:

4, 10, 15, 19, 26, 33, 34, 48, 63, 66, 78.

Le cinquième groupe contenant 09 individus est constitué par les points d'eau suivants:

17, 18, 21, 36, 40, 44, 65, 70, 84.

Le tableau 2 représente les moyennes des 05 groupes pour les 08 éléments chimiques. Il apparaît alors que la qualité des eaux de la nappe se détériore dans le sens croissant des groupes ce qui veut dire que le groupe 01 renferme les points d'eau ayant une meilleure qualité et le groupe 05 renferme les points d'eau ayant les plus mauvaises qualités.

Tableau 2: les moyennes des variables intragroupes.

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃
G1	89,96	37,26	98,83	3,74	187,22	105,39	209,7	60,91
G2	150,56	68,3	210,04	4,56	391,93	307,85	232,15	64,41
G3	200,32	93,16	269,37	6,32	579,89	374,58	316,84	58,42
G4	210,73	119,27	408,91	7,36	748,57	610,36	259,21	65,55
G5	321,67	173,89	495	8,44	1066,47	809,44	281,89	84,67

Pour le calcium la teneur du premier groupe et du deuxième ne dépasse pas la valeur critique de 200 mg/l fixée par l'O.M.S. alors que pour les trois autres groupes elle est de plus en plus croissante et atteint 321,67 pour le groupe 05.

Le cas du magnésium est différent de celui du Calcium puisque c'est au niveau du cinquième groupe que la teneur moyenne (173,89 mg/l) devienne critique par rapport à la norme fixée par l'O.M.S. (150 mg/l).

Le cas de sodium est plus préoccupant en dépassant la norme de 200 mg/l fixée par l'O.M.S à partir du deuxième groupe.

Pour le potassium, il n'y a aucun problème, la valeur moyenne la plus élevée enregistrée dans le groupe 05 est de 8,44 mg/l, et ne dépasse pas le pourcentage fixé par DCE et RF (12mg/l).

Le chlore se comporte comme le sodium et ses valeurs moyennes deviennent critiques et dépassent la norme fixée par l'O.M.S. (250mg/l) à partir du deuxième groupe.

Les sulfates dépassent la valeur de 400mg/l fixée par l'O.M.S. seulement au niveau du quatrième groupe.

Enfin, les nitrates présentent les valeurs moyennes les plus préoccupantes pour l'ensemble des cinq (05) groupes. En effet, déjà à partir des premiers groupes, la valeur moyenne des nitrates a atteint 60,91 mg/l dépassant largement la norme fixée par l'O.M.S. qui est de 50 mg/l.

ETABLISSEMENT DE LA CARTE PAR LA GEOSTATISTIQUE MULTIPARAMETRIQUE

L'approche statistique multiparamétrique utilisée dans le chapitre précédant s'avère être insuffisante pour la mise en évidence le plus réellement possible de l'évolution spatiale de la qualité des eaux de la nappe.

C'est ainsi que nous avons tenté d'appliquer une approche géostatistique multiparamétrique regroupant l'ensemble des variables d'étude prises simultanément et tenant compte de l'autocorrélation entre les coordonnées des individus déterminées par l'ACP.

Cette méthode consiste à cartographier les valeurs des coordonnées des individus sur les différents axes pris en considération. Elle permet de dégager un fond régional des mesures, c'est à dire la tendance en grand de la parcelle d'étude. Peu de travaux ont été effectués par cette méthode. On retient le travail de [6]Webster (1985) qui a utilisé cette méthode pour exprimer la périodicité des propriétés physico-chimiques sur des sols à relief Gilgai et celui de [7]Voltz (1986) qui a aussi utilisé cette méthode pour les paramètres hydrodynamiques.

Le calcul des valeurs des coordonnées des individus sur les axes principaux, pour des variables centrées réduites, se fait de la façon suivante (tab.3).

Exemple pour l'individu :

Tableau 3 : exemple de calcul des valeurs des coordonnées des individus

Variables initiales	Variables centrée et réduite	Vecteur propre
Ca	$(144 - 183.47)/108.95 = -0.36$	0.1313
Mg	$(97 - 89.37)/58.47 = 0.13$	-0.1556
.	.	.
.	.	.
.	.	.
NO3	$(47 - 64.5)/41.67 = 0.42$	-0.5335

La coordonnée sur l'axe choisie (1) est égale à :
 $(0.13) \cdot (-0.36) + (-0.156) \cdot 0.13 + \dots + (-0.53) \cdot (0.42) = \mathbf{0.21}$

Les valeurs des coordonnées ainsi calculées sont considérées comme étant des variables régionalisées dont on va essayer d'établir la carte.

La cartographie multiparamétrique par krigeage va se faire par l'interpolation des coordonnées de l'axe1 qui représente à lui seul 47.38 % de l'inertie totale. La cartographie de cette axe représente la combinaison linéaire des variables qui sont bien corrélées à l'axe 1. Ces variables sont par ordre décroissant : le Mg, Cl, Na, SO₄ et le Ca. Les bicarbonates et les nitrates ne sont pas corrélés à cet axe.

La figure 3 représente la carte des zones homogènes correspondants aux différents groupes. L'ordre croissant des groupes (1 à 5) correspond respectivement à l'intensité croissante du gris. Le groupe 1 est donc représenté par la couleur blanche et le groupe 5 par la couleur la plus foncée.

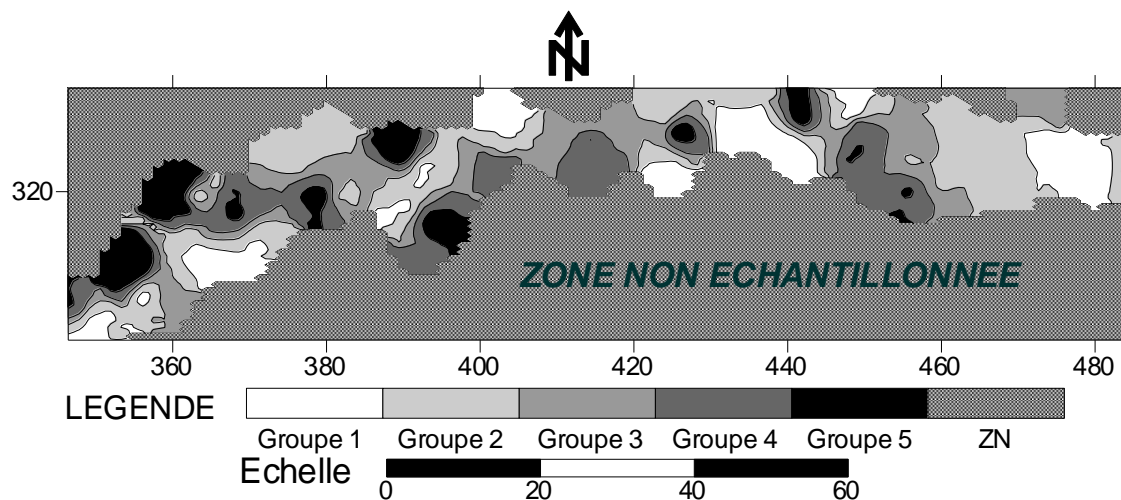


Figure 3 : Carte des zones homogènes

C'est ainsi qu'il apparaît que les régions les plus polluées se localisent le plus dans la partie ouest de la zone et particulièrement au nord de Chlef et Boukadir.

Le premier groupe est considéré comme étant celui qui renferme les points d'eau ayant une eau d'assez bonne qualité. La valeur moyenne des nitrates dépasse la norme de 50mg/l mais elle reste tolérable du moment qu'elle ne dépasse pas les 75

mg/l et dans la majorité des cas elle est inférieure à cette norme. La qualité des eaux du deuxième groupe est naturellement moins bonne. Dans ce cas, les normes fixées par l'O.M.S. sont dépassées pour le Na, le Cl, et les nitrates compliquant d'avantage le classement de cette eau. On se référant alors à la minéralisation de cette eau qui à une valeur de 1429,80 mg/l dépassant largement les normes des 1000 mg/l fixée par l'O.M.S., on peut dire que cette eau est de mauvaise qualité vis-à-vis de la consommation humaine.

Les trois autres groupes, comme il a été déjà dit, présentent une eau avec une qualité à la consommation de plus en plus mauvaise avec des minéralisations dépassant de loin la norme de 1000mg/l.

Le troisième groupe comprend seulement 03 éléments dont les teneurs moyennes ne sont pas critiques à savoir le Mg, le K et les sulfates.

Les deux derniers groupes (4 et 5) sont particulièrement vulnérables et présentent des teneurs moyennes dépassants de très loin les normes excepté pour le potassium.

Le cinquième groupe quant à lui est particulièrement vulnérable d'autant plus que la valeur moyenne des nitrates dépasse même la limite de la valeur tolérable pour les adultes fixée à 75 mg/l et qui est dans ce cas égale en moyenne à 84,76 mg/l. En aucun cas, l'eau de ce dernier groupe ne devrait être consommée.

Enfin, il faut savoir que sur un total de 92 points d'eau il y en a 28 qui ont des teneurs en nitrates dépassant la norme requise pour une bonne qualité, mais ne dépassant pas la valeur très critique tolérable pour les adultes.

CONCLUSION

Il en ressort de toute cette analyse que la nappe alluviale du Chellif dans la zone d'étude est formée essentiellement par 05 groupes. Ces derniers présentent des teneurs de plus en plus élevées respectivement du groupe 01 jusqu'au cinquième groupe se traduisant ainsi par une diminution de la qualité des eaux. Et par conséquent de la potabilité à la consommation de celles-ci dans le même sens d'évolution des groupes.

REFERENCES

- [1] **G. PHILIPPEAU.**, Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ? Service des Etudes Statistiques, ITCF, (1986) .
- [2] **G. MATHERON.**, Les valeurs régionalisées et leurs estimation. *Masson, Paris* 305p,(1965)
- [3] **STEVEN F. C., GRAHAM E. F.**, Transition probability-Based Indicator Geostatistics. *Mathematical geology*. Vol. 28. N°4, (1996)
- [4] **J. P. LABORDE.**, Méthodes d'interpolation, Géostatistique et cartographie automatique a l'usage des géographes et de quelques autres ; stage DEA, Nice, 21p, (1989).
- [5] **A.G. JOURNEL.**, Géostatistique minière.. Centre de géostatistique Ecole des mines,Fontainebleu , 737p, (1977).
- [6] **WEBSTER R.**, Quantitative spatial analysis of soil in the field. *In advances in Soil Science*, Vol. 3, Springer-Verlag, New york Inc. 56p, (1985).
- [7] **VOLTZ M.**, Variabilité spatiale des propriétés physiques en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Thèse de docteur ingénieur, ENSAM, 198p, (1986).