

## **Application de l'analyse en composantes principales à l'étude de la pollution nitrique des eaux souterraines de la zone littorale Sidi Abed-Ouled Ghanem (Province d'El Jadida, Maroc)**

### **[ Application of Principal Component Analysis to the study of nitrate pollution of groundwater of the littoral zone Sidi Abed-Ouled Ghanem (Province of El Jadida, Morocco) ]**

*Sara Mountadar<sup>1</sup>, Abdelkader Hayani<sup>1</sup>, Abdelkader Younsi<sup>2</sup>, and Soufiane Tahiri<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement (LEE), Faculté des Sciences d'El Jadida, Université Chouaïb Doukkali, B.P. 20, El Jadida 24000, Maroc

<sup>2</sup>Laboratoire de l'Eau et d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences d'El Jadida, Université Chouaïb Doukkali, B.P. 20, El Jadida 24000, Maroc

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** In this work, we will study the nitrate pollution level in the groundwater of the coastal area between Sidi Abed and Ouled Ghanem (Province of El Jadida, Morocco). This area is characterized by the dominance of vegetable market gardening and cattle breeding. The aim of this study is to identify the main factors contributing in nitrate pollution. It was based on piezo-metric data, Lambert coordinate and the results of physicochemical analyzes of the water from 73 wells. The principal components analysis (PCA) was applied to all data collected. Firstly, the descriptive statistics shows that the well depth varies between 1 and 75 m with 16.5 m as average. Nitrate levels vary between 25.7 mg/l and 161.5 mg/l with 89 mg/l as average. Secondly, the results of the PCA revealed the impact of the depth, correlated with the geographic location, on the quality of 89% of the wells. However, 11% of the wells remain indifferent to this parameter. In this case, we can say that nitrate pollution is mainly due to the geological nature of the region allowing greater infiltration of nitrates.

**KEYWORDS:** Contamination, Hydrochemistry, Well, Nitrates, Statistical analysis.

**RESUME:** Dans ce travail, nous étudierons le niveau de la pollution nitrique des eaux souterraines de la zone littorale située entre Sidi Abed et Ouled Ghanem (Province d'El Jadida, Maroc). Cette zone est caractérisée par la dominance des cultures maraîchères et de l'élevage des bovins. L'objectif de cette étude est d'identifier les principaux facteurs contribuant à cette pollution nitrique. Elle s'est reposée sur les relevés piézométriques, les coordonnées de Lambert ainsi que les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux de 73 puits. L'analyse des composantes principales (ACP) a été appliquée sur l'ensemble des données regroupées. Dans un premier temps, les statistiques descriptives ont montrés que la profondeur des puits varie entre 1 et 75 m, avec une moyenne de 16,5 m. Les teneurs en nitrates quant à elles varient entre 25,7 mg/l et 161,5 mg/l, avec une moyenne de 89 mg/l. En deuxième lieu, l'interprétation des résultats de l'ACP a révélé l'impact qu'a la profondeur, en corrélation avec la position géographique, sur la qualité des eaux de 89% des puits. Cependant, 11% des puits restent indifférent à ce paramètre. Dans ce cas, on peut dire que la pollution nitrique est essentiellement due à la nature géologique de la zone permettant une infiltration plus importante des nitrates.

**MOTS-CLEFS:** Contamination, Hydrochimie, Puits, Nitrates, Analyse statistique.

## **1 INTRODUCTION**

La pollution des eaux souterraines est devenue une préoccupation grandissante partout au monde [1]. Très solubles dans l'eau, les nitrates sont une des principales causes de dégradation de la qualité des eaux souterraines et principalement des nappes phréatiques [2]. Les nitrates proviennent essentiellement de pollutions diffuses agricoles. L'essentiel de cette pollution est dû à la différence entre les apports en nitrates sous forme d'engrais et ce qui est réellement consommé par les plantes. Ces contaminants en excès sur les sols peuvent être entraînés par les pluies chaque année un peu plus en profondeur. Une grande concentration en nitrates dans les eaux peut avoir des effets significatifs sur la santé des humains ainsi que sur son environnement [3]. Par ailleurs, ils contribuent avec les phosphates à modifier l'équilibre biologique des eaux de surface en provoquant des phénomènes d'eutrophisation, voire de dystrophisation.

Au Maroc, l'évolution des activités agricoles a conduit à une utilisation excessive des engrais azotés ainsi qu'à un pompage croissant des eaux souterraines. Cette surexploitation affecte cette ressource en eau qui devient de moins en moins abondante et polluée. De nombreuses études ont été effectuées à ce sujet au Maroc visant l'évaluation de la qualité de ses nappes [4], [5], [6], [7], [8]. Pourtant, il semble que l'on ne doit pas s'arrêter à l'identification des polluants des eaux souterraines, mais chercher aussi à identifier les éléments contribuant à cette pollution.

Le but de cette étude est d'évaluer la teneur en nitrates des eaux de puits se trouvant sur la zone littorale située entre Sidi Abed et Ouled Ghanem (Province d'El Jadida, Maroc). Un diagnostic statistique de l'ensemble des données analytiques sera effectué en ayant recours à l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cela permettra de mettre en évidence les causes majeures de la pollution des nappes phréatiques de la zone étudiée.

## **2 MATÉRIELS ET MÉTHODES**

### **2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

La région étudiée fait partie du bassin Sahel - Doukkala qui appartient à la Méséta du Maroc occidental, compris entre la latitude 33°50'N et 32°10' N et la longitude 8°60'W et 8°30'W. Le secteur étudié est délimité à l'Ouest et au Nord par l'Océan Atlantique, au Nord-est par la localité Sidi Abed et par Jamaat Oulad Ghanem au Sud-ouest. Elle s'étend sur une longueur de 30 km et une largeur de 4 km par rapport à la mer, soit une superficie de 120 km<sup>2</sup> environ.

Le climat de la zone est semi-aride avec un été chaud et sec (Mai - Novembre) et un hiver humide et tempéré (Novembre - Avril). Durant la période 2005-2010, la moyenne annuelle des précipitations dans la province d'El Jadida est de 401,62 mm. Les mois les plus pluvieux sont Novembre, Décembre et Janvier alors que les mois Juin, Juillet et Août sont secs [9]. La Figure 1, présentant l'état de la qualité des ressources en eau au Maroc [10], montre que la qualité des eaux de la zone d'étude choisie est dégradée par rapport aux autres régions.

La géologie du Sahel fait partie de la grande unité géologique nommée Méséta Marocaine occidentale (Figure 2-a). Celle-ci comporte des séries sédimentaires sub-tubulaires d'âge mésozoïque et cénozoïque reposant sur des terrains paléozoïques plissés lors de l'orogénèse hercynienne [11], [12]. Du point de vue hydrogéologique, on dénombre deux unités dans la zone étudiée (Figure 2-b). L'unité 1 qui est composée d'une nappe située dans le crétacé supérieur, elle est alimentée à partir des infiltrations de surface. Elle se propage dans les marnes calcaire souvent karsifiées et fissurées. L'unité 2, située au sud d'El Jadida, est constituée d'une nappe perchée dans les calcarénites plio-quadernaire et dans les calcaires du crétacé inférieur [13], [14].

Les activités anthropiques sur la bande côtière sont caractérisées par une dominance de la culture maraîchère, surtout des primeurs, qui se fait en partie sous serre. Son irrigation se fait par pompage des eaux de la nappe phréatique. La pomme de terre et la tomate y sont les principales cultures. Par ailleurs, les oignons et les cucurbitacées sont cultivés en bour. On trouve aussi l'élevage qui se base principalement sur les bovins [9]. Toutes ces activités exigent de plus en plus d'eau, ce qui pousse les agriculteurs et les éleveurs à creuser d'avantage de puits où les pompages sont intensifs.

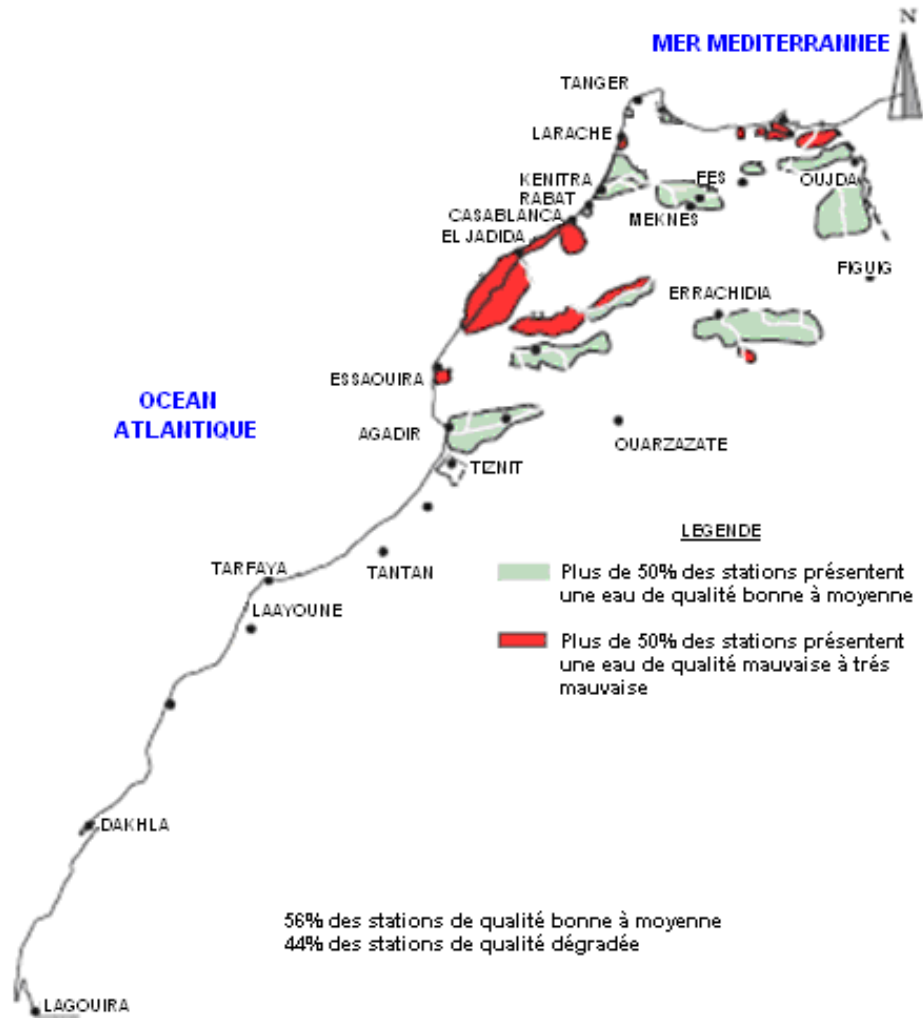


Fig. 1. Etat de la qualité des ressources en eau au Maroc [10]



Quant à l'analyse physico-chimique, elle s'est basée sur des prélèvements effectués sur 73 puits. Plusieurs campagnes périodiques d'échantillonnage ont été réalisées de Septembre 2011 jusqu'à Décembre 2013, selon un temps de pas semestriel. Tous les échantillons des eaux souterraines ont été prélevés directement des puits choisis et pris dans des flacons en polyéthylène d'une capacité de 250 ml, remplis à refus et conservés à basse température dans une glacière in situ puis au réfrigérateur du laboratoire. Les ions  $\text{NO}_3^-$  ont été dosés par colorimétrie, selon la norme AFNOR NTF 906-012.

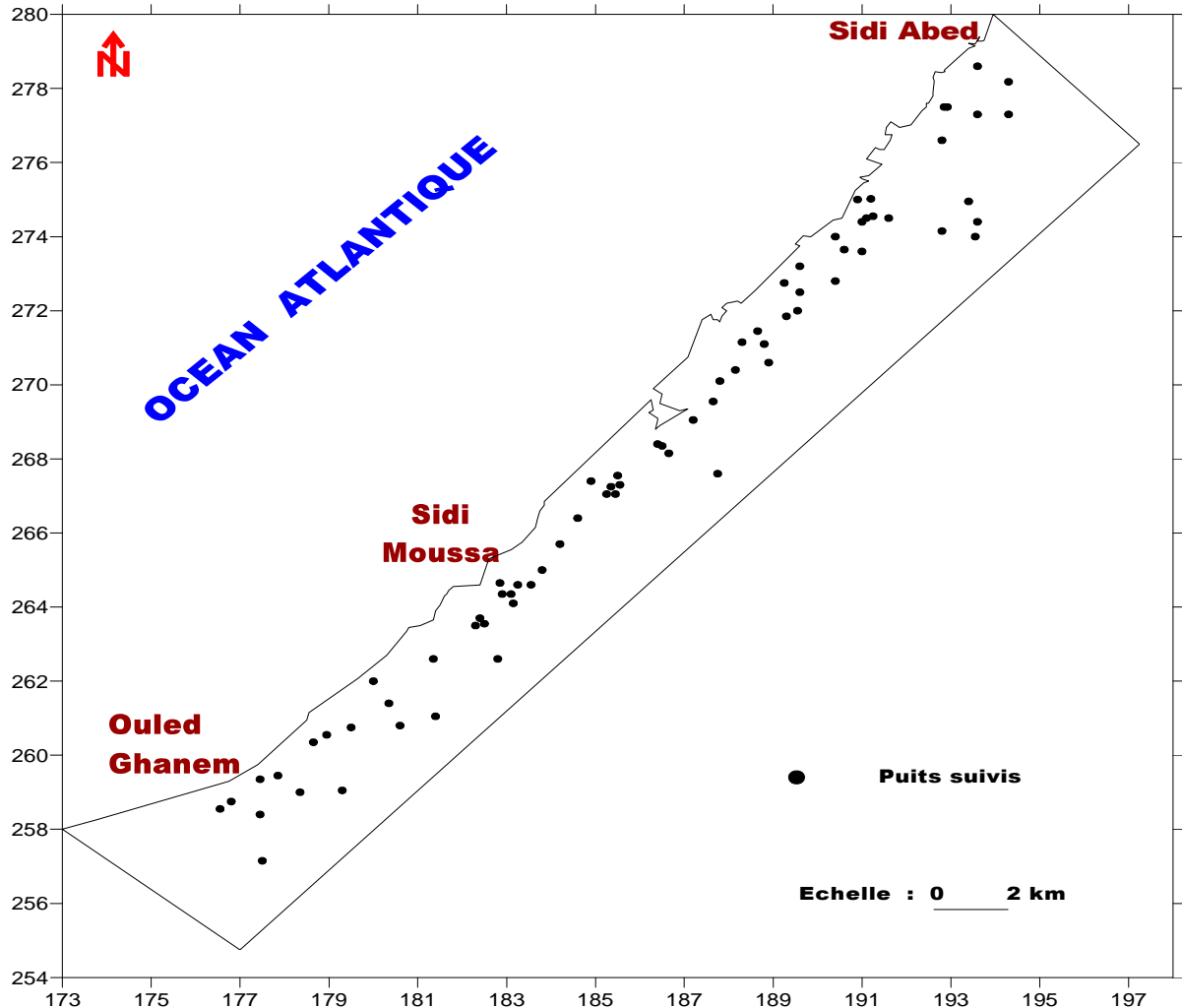


Fig. 3. Carte de distribution des puits de la zone d'étude.

### 2.3 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES

Les résultats de l'analyse physico-chimique ainsi que de l'étude piézométrique ont été traités en utilisant l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette analyse fut introduite en 1901 par K. Pearson et développée par H. Hotelling en 1933 [17]. Elle a pour objectif de résumer de grands ensembles de données quantitatives. Ces données sont rangées dans un tableau comportant un grand nombre d'individus et/ou un grand nombre de variables et la simple lecture de ce tableau ne permet pas de saisir l'essentiel des informations qu'il contient. Cette analyse permet de synthétiser les données en construisant un petit nombre de variables nouvelles, les composantes principales. L'essentiel du tableau de données peut alors être saisi rapidement, à l'aide des représentations graphiques établies à partir de ces composantes principales [18]. L'ACP contient ici 73 descripteurs (puits) et 5 variables qui sont : les coordonnées de Lambert X et Y, l'altitude Z, la profondeur P et la quantité des ions  $\text{NO}_3^-$ . Elle a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT. Cette étude nous permettra de déceler les principales causes de la pollution des eaux souterraines par les nitrates.

### 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les puits et les variables qui leur sont associées (coordonnées X et Y, altitude Z, profondeur et teneur en nitrates) sont rapportés dans le Tableau 1. Une première lecture des résultats de l'analyse en composantes principales ACP (Tableau 2) indique que la concentration moyenne en nitrates est d'environ 89 mg/l. Cette teneur atteint un maximum de 161,5 mg/l qui réfère au puits 24 possédant une faible profondeur et un minimum de 25,7 mg/l qui réfère au puits 69 possédant une grande profondeur. Ces données prouvent l'existence d'une pollution nitrique dans la zone côtière faisant l'objet de cette étude. D'après l'OMS, cette teneur ne doit pas dépasser 50 mg/l d'eau. Pourtant, on trouve que parmi les 73 puits suivis, seul huit puits ne dépassent pas cette norme, soit 11% des puits. Dans la région étudiée, seule les activités agricoles et l'élevage sont présents. Ils sont ainsi à l'origine de la pollution nitrique des eaux souterraines.

Cette analyse a permis par la suite d'extraire deux principaux facteurs, F1 et F2, dont le pourcentage cumulé de variance atteint 88.43% (Figure 4). Ces deux axes factoriels retenus pour cette analyse statistique permettront d'obtenir les informations recherchées. L'interprétation des résultats débute par l'analyse des cercles de corrélations. On remarque que Z et P sont liés positivement à l'axe F1, tandis que  $\text{NO}_3^-$  y est lié négativement (Figure 5). En termes de corrélation entre les variables, on a le coefficient de corrélation entre Z et P est positif alors que les coefficients entre Z et  $\text{NO}_3^-$ , et entre P et  $\text{NO}_3^-$  sont négatifs (Tableau 3). Ainsi, l'axe F1 oppose la quantité de  $\text{NO}_3^-$  présente dans les puits à leurs profondeurs. Dans ce qui suit, seule la relation entre les teneurs en nitrates et la profondeur sera mise en évidence. Ce choix est justifié par le fait que Z et P sont corrélés et donc les mêmes résultats d'analyse seront obtenus pour les deux variables.

En passant à l'analyse de la configuration des individus, on constate qu'il existe deux principales classes (Figure 6). La première classe est composée de deux groupes de puits. Le premier groupe se trouve à gauche de l'axe F1. Il se caractérise par une quantité élevée en  $\text{NO}_3^-$  et une profondeur inférieure à la moyenne. Le deuxième groupe quant à lui se trouve à droite de l'axe F1. Il se caractérise par une faible quantité en  $\text{NO}_3^-$  et une profondeur supérieure à la moyenne. On peut en conclure que cette classe nous démontre que plus les puits sont profonds plus leur pollution en  $\text{NO}_3^-$  diminue. Ainsi, la profondeur constitue un paramètre significatif de la pollution de 89% des puits suivis.

Tableau 1. Ensemble des données relatives à la position, l'altitude, la profondeur et la teneur en nitrates des puits de la zone d'étude.

Puits N°	X (Km)	Y (Km)	Z (Km)	P (m)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)
1	193,6	278,6	20	10	120,25
2	193,4	274,95	64	50	90,75
3	193,55	274,08	70	45	105,5
4	193,6	274,4	70	45	75,75
5	192,8	274,15	73	56	57,5
6	191,6	274,5	20	12	130,5
7	191,01	274,4	15	6	125,75
8	190,9	275,04	15	4	133,25
9	191,1	274,5	18	6	112,25
10	191,25	274,55	18	6	91,75
11	192,85	277,5	30	10	83,75
12	192,92	277,5	40	35	91,5
13	193,6	277,3	50	35	105,5
14	194,3	277,3	54	33	95,75
15	194,3	278,18	60	45	65,75
16	192,8	276,6	40	10	102,25
17	191,2	275,02	30	10	120,75
18	190,4	274,03	20	8	110,5
19	189,6	273,2	21	10	104,5
20	190,6	273,65	7	10	90,75
21	191,04	273,61	50	5	131,5
22	190,4	272,8	40	5	125,5
23	189,25	272,75	15	12	110,75
24	189,6	272,5	6	3	161,5
25	189,55	272,02	30	3	66,75
27	188,65	271,45	7	3	64,75
28	188,8	271,1	10	10	61,5
29	188,9	270,6	30	20	70,23
30	188,3	271,15	6	4	81,75
31	188,15	270,4	15	4	51,5
32	187,8	270,1	15	10	44,5
33	187,65	269,55	20	12	59,75
34	187,2	269,05	25	12	87,75
35	186,4	268,4	10	7	86,75
36	186,5	268,35	23	15	82,25
37	186,65	268,15	30	20	83,75
38	187,75	267,6	10	11	90,5
39	185,5	267,55	7	8	109,75
40	185,55	267,3	22	15	75,75
41	185,35	267,25	7	10	66,5
42	184,9	267,4	3	5	125,5
43	185,25	267,05	7	10	84,75
44	185,45	267,05	25	20	62,75
45	184,6	266,4	5	7	72,75
46	184,2	265,7	6	8	78,5
47	183,8	265,01	7	6	110,5
48	183,15	264,1	70	45	33,5
49	182,85	264,65	3	1	78,75
50	183,25	264,6	5	2	89
51	183,55	264,6	15	10	72,25
52	182,9	264,35	5	8	95,25
53	183,1	264,35	10	5	105,5
54	182,5	263,55	10	7	89,25
55	182,4	263,7	3	5	95,75
56	182,3	263,5	5	5	84
57	182,8	262,6	90	75	38,75
58	181,35	262,6	5	4	95,5
59	181,4	261,05	70	54	26,25
60	180,01	262,01	4	5	110,75
61	180,6	260,8	85	71	30,25
62	180,35	261,4	20	14	88,5
63	179,5	260,75	10	6	107,75
64	178,95	260,55	7	6	115,25
65	179,3	259,05	70	54	28,75
66	178,65	260,35	5	6	155,5
67	177,85	259,45	4	3	114,5
68	178,35	259,01	32	22	31,5
69	177,5	257,15	77	62	25,75
70	177,45	259,35	3	4	135,5
71	176,8	258,75	10	9	120,25
72	176,55	258,55	5	6	110,75
73	177,45	258,4	30	25	83,5

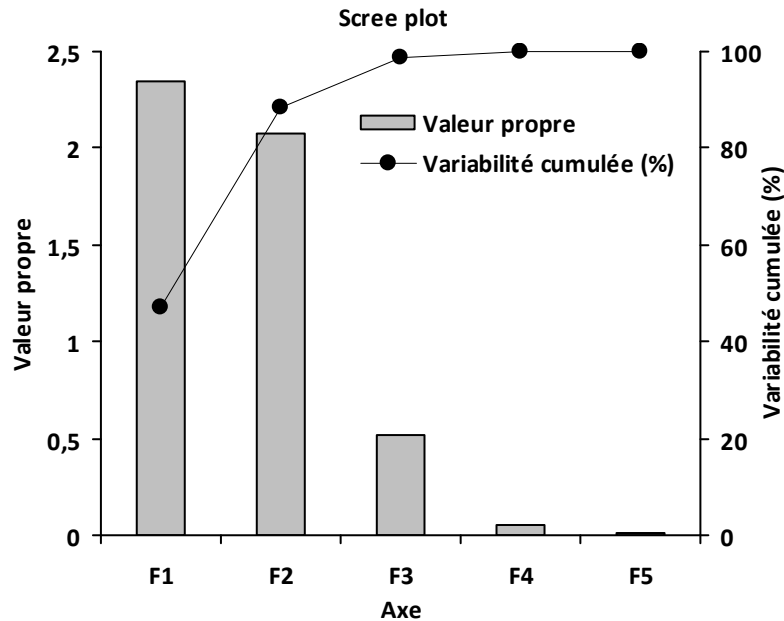


Fig. 4. Valeurs propres et variabilité cumulée (%).

Pourtant, la deuxième classe contredit cette conclusion. Cette dernière est constituée de huit puits ayant de grandes quantités en  $\text{NO}_3^-$  quoique leurs profondeurs est supérieure à la moyenne. En se référant à la carte représentant l'emplacement de ces puits, on constate qu'ils se situent tous dans une même zone. D'après les données hydrogéologiques citées auparavant, ces puits se trouvent dans l'unité 1 possédant des caractéristiques hydrogéologiques différentes de l'unité 2 où se trouve le reste des puits étudiés. D'après une étude antérieure [19] dans l'unité 1, les eaux circulent dans les calcaires marneux du Cénomaniens. L'aquifère cénomaniens est formé par une alternance de niveaux calcaires et de niveaux marneux formant un système aquifère multicouche. De plus, les calcaires cénomaniens présentent une karstification importante et profonde avec de nombreuses structures typiques qui favorisent une recharge saisonnière importante par infiltration rapide des eaux de pluie. Cette particularité que possède cette zone facilite la lixiviation des nitrates issus des apports excessifs en engrais azotés et des eaux d'irrigation utilisés pour les cultures pratiquées dans la région.

Tableau 2. Statistiques descriptives.

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
X (Km)	73	0	73	176,550	194,300	186,202	5,161
Y (Km)	73	0	73	257,150	278,600	268,230	6,009
Z (Km)	73	0	73	3,000	90,000	25,055	23,655
P (m)	73	0	73	1,000	75,000	16,548	18,049
$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	73	0	73	25,750	161,500	88,986	30,155

Tableau 3. Matrice de corrélation (pearson n)

Variables	X (Km)	Y(Km)	Z(Km)	P(m)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)
X (Km)	1	0,988	0,228	0,044	0,146
Y (Km)	0,988	1	0,143	-0,045	0,223
Z (Km)	0,228	0,143	1	0,925	-0,485
P (m)	0,044	-0,045	0,925	1	-0,572
$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	0,146	0,223	-0,485	-0,572	1

Quant à l'axe F2, il est lié positivement aux coordonnées X et Y et aux teneurs en nitrates. On constate donc qu'il y a un lien direct entre les coordonnées des puits et leur pollution en  $\text{NO}_3^-$ . En effet le logiciel SURFER a permis d'observer que plus



on s'éloigne de la mer plus la profondeur des puits augmente (Figure 7). L'analyse faite précédemment a montré que pour 89% des puits, plus la profondeur augmente plus la pollution diminue. Dès lors, plus on s'éloigne de la mer plus la pollution en  $\text{NO}_3^-$  diminue. Cette remarque semble évidente quand on a recours à la carte d'iso-nitrates obtenue à l'aide du logiciel SURFER (Figure 8). Il en ressort également que la pollution n'est pas uniforme sur toute la zone. En effet l'unité géologique 1 présente une distribution spatiale en nitrates différente de l'unité géologique 2 et ceci est en accord avec les résultats obtenus par l'ACP. Ainsi pour chaque classe identifiée par l'ACP on devra avoir une évolution différente des teneurs en nitrates en fonction de la profondeur. La Figure 9 montre que la vitesse d'infiltration des nitrates est plus importante pour les puits de la classe 2 et ceci est en accord avec la nature géologique de l'unité 1 où l'infiltration est plus facile. En effet, les résultats montrent qu'à égal profondeur les teneurs en nitrates des eaux souterraines de la classe 2 sont plus importantes comparativement à la classe 1. Par conséquent les deux unités géologiques considérées n'ont pas la même perméabilité et ceci est en accord avec leurs caractéristiques hydrogéologiques.

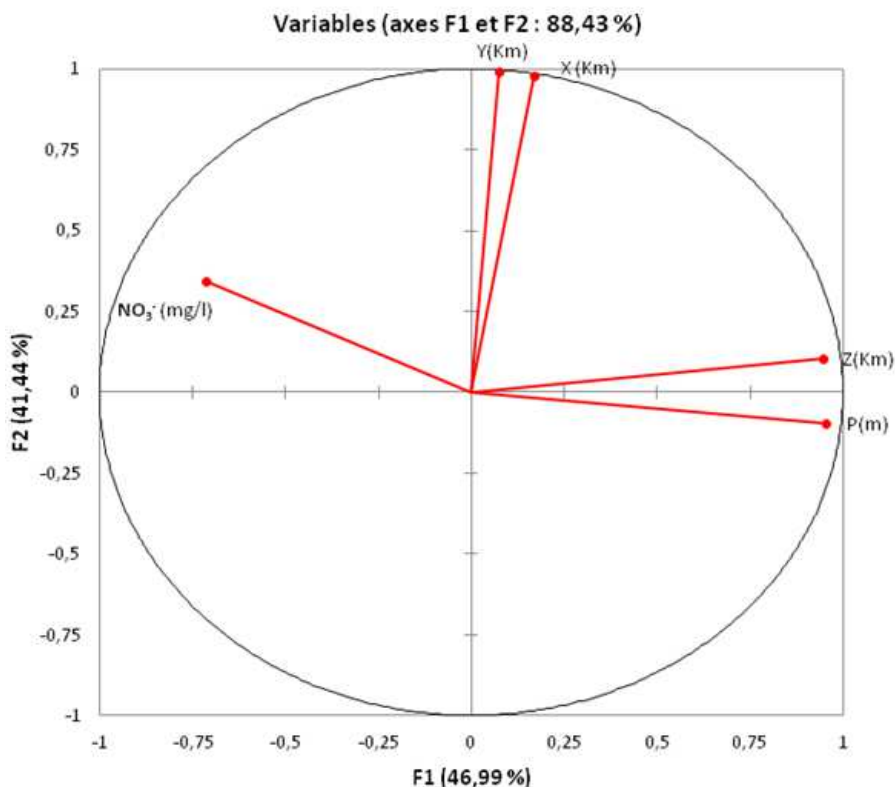
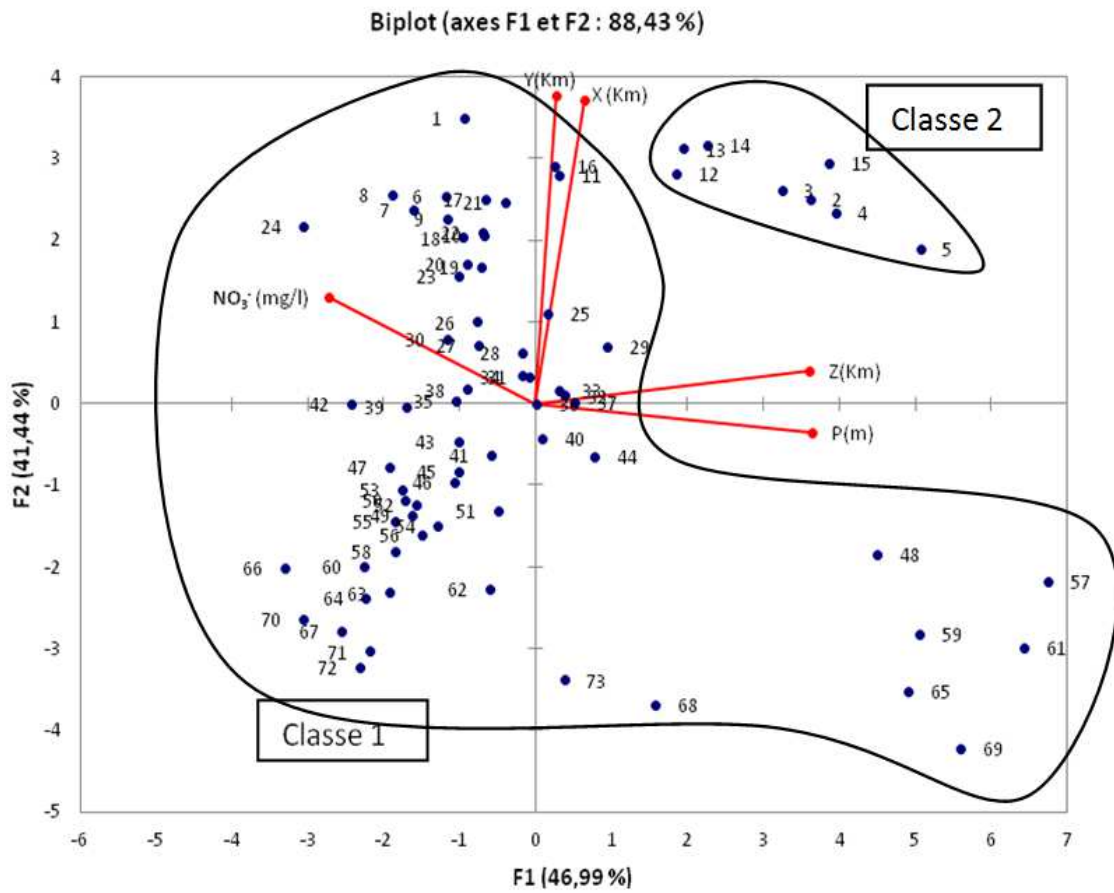


Fig. 5. Cercle de corrélation d'axes F1 et F2.





**Fig. 6. Représentation des individus (axes F1 et F2)**

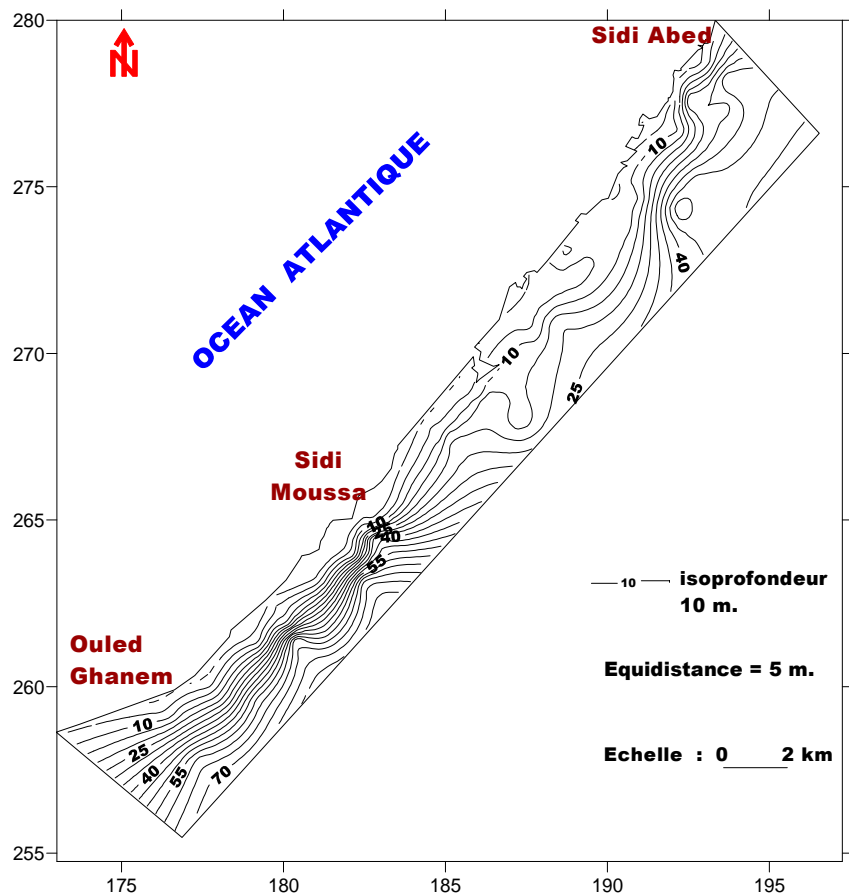


Fig. 7. Carte de distribution spatiale de la profondeur des eaux souterraines de la région Sidi Abed- Ouled Ghanem.

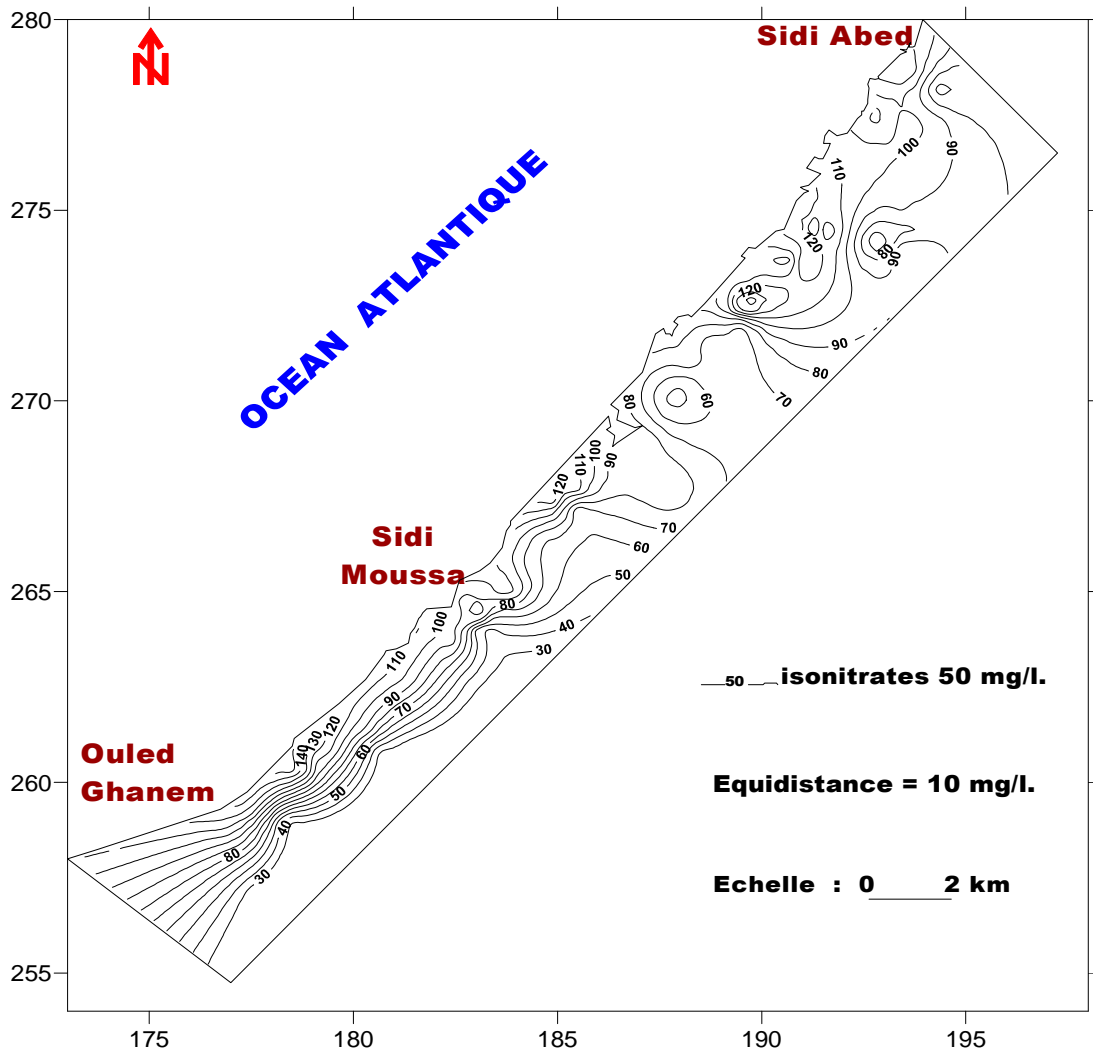


Fig. 8. Carte de distribution spatiale des nitrates dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

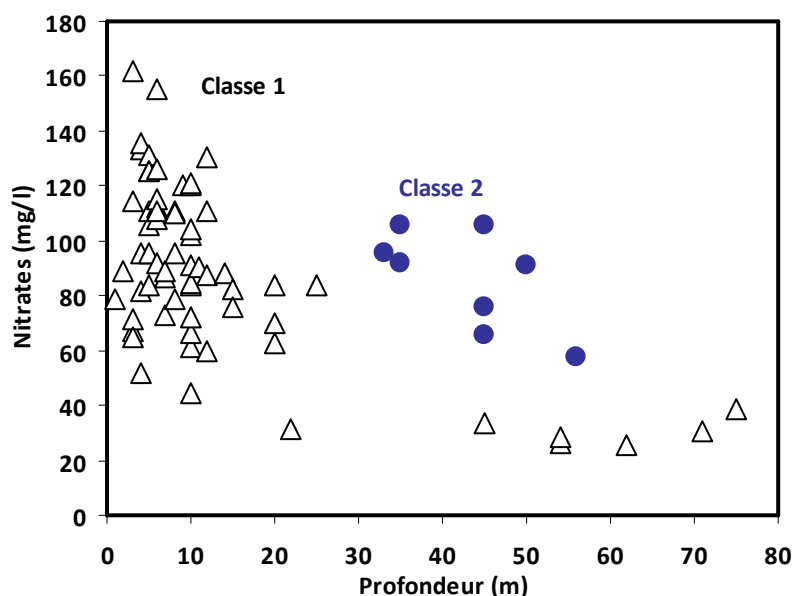


Fig. 9. Evolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs des puits (Classes 1 et 2)

#### 4 CONCLUSION

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la zone littorale située entre Sidi Abed et Ouled Ghanem a mis en évidence une pollution nitrique. Les résultats obtenus ont révélé une concentration moyenne en nitrates d'environ 89 mg/l. Parmi les 73 puits étudiés, seul huit puits ne dépassent pas la norme fixée par l'OMS, soit 11% des puits mis à l'étude.

Les données relatives à la zone d'étude ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales ACP pour la mise en évidence des éventuelles corrélations entre les différents paramètres et la classification des 73 puits en groupes selon le degré de contamination en nitrates. L'interprétation des résultats de l'analyse ACP a mis en évidence l'impact qu'a la profondeur, en corrélation avec la position géographique, sur la qualité des eaux de 89% des puits. 11% des puits restent indifférent à ce paramètre puisque la pollution nitrique dans ce cas est essentiellement due à la nature géologique de la zone permettant une infiltration plus importante des nitrates.

Le diagnostic de l'état des lieux, des eaux souterraines de la zone littorale située entre Sidi Abed et Ouled Ghanem, montre la nécessité de la prise des mesures préventives urgentes pour le développement des stratégies ayant pour buts principaux, d'une part, la limitation de la vitesse de contamination des ressources en eaux par les nitrates et, d'autre part, la mise en place des unités pour l'épuration des eaux souterraines.

#### REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé avec le soutien du programme de la bourse d'excellence de recherche attribuée par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique CNRST - Maroc.

#### REFERENCES

- [1] Canter L.W., *Nitrates in Groundwater*, New York: CRC Press, 1996.
- [2] Keeney D.R., "Sources of nitrate to ground water", *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, vol. 16, pp. 257-304, 1986.
- [3] Nollé L.M.L. and De Gelder L.S.P., *Handbook of water analysis*, New York: CRC Press, 2000.
- [4] I.I. Alami, M. Zerouali, M. Addou, A. Mokhtari and A. Soulaymani, "Evaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone côtière du Gharb (M'nasra) au Maroc entre 1993 et 2003", *Afrique Science*, vol. 03, no. 3, pp. 378-390, 2007.

- [5] N. Aghzar, H. Berdai, A. Bellouti and B. Soudi, "Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc)", *Revue des sciences de l'eau*, vol. 15, no. 2, pp. 459-492, 2002.
- [6] N. Laftouhi, M. Vanclooster, M. Jalal, O. Witam, M. Aboufirassi, M. Bahir, and E. Persoons, "Groundwater nitrate pollution in the Essaouira Bassin (Morocco)", *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 335, pp. 307-317, 2003.
- [7] Z. Saâdi, A. Maslouhi, M. Zérouali and J. P. Gaudet, "Analyse et modélisation des variations saisonnières des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines de la nappe Mnasra, Maroc", *Sciences de la terre et des planètes*, vol. 329, pp. 579-585, 1999.
- [8] D. Smahi, O. El Hammoumi and A. Fekri, "Assessment of the Impact of the Landfill on Groundwater Quality: A Case Study of the Mediouna Site, Casablanca, Morocco", *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 5, pp. 440-445, 2013.
- [9] Annuaire statistique régional Doukkala-Abda, 2012.  
[Online] Available : [http://www.hcp.ma/region-drda/Telechargements\\_r6.html](http://www.hcp.ma/region-drda/Telechargements_r6.html)
- [10] Secrétariat d'Etat auprès de ministère de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, chargé de l'eau et de l'environnement, département de l'eau, Rapport : Etat de la qualité des ressources en eau au Maroc, 2007-2008.  
[Online] Available : <http://www.water.gov.ma/userfiles/file/depliant%20français.pdf>
- [11] M. Gigout, "Etude géologique sur la méséta Marocaine occidentale", 1951.
- [12] Ouadia, M., Les formations plio-quaternaire dans le domaine mésétien occidental du Maroc, 1998.
- [13] K. Aboumaria, Les formations quaternaires du Sahel des Doukkala (Méséta occidentale marocaine) : mise en place et évolution post-sédimentaire, Université Mohammed V, Faculté des sciences, Rabat, 1993.
- [14] A. Chtaini, Etude hydrogéologique du Sahel des Doukkala (Maroc). Applied geology. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, French, 1987.
- [15] M. Akkil, "Les dépôts quaternaires littoraux entre Casablanca et Cap Beddouza (Méséta cotière marocaine)- Etude morphologiques et sédimentologique". Thèse doc. ES. Sc., fac. Sci., Rabat, 415p, 1990.
- [16] M. Ferre, Notice explicative de la carte géologique de la Méséta entre Settat et Mazagan (Doukkala et Chaouia occidentale). Not. Mém. Serv-géol., Maroc, 1965.
- [17] E. Cahuzac and C. Bontemps, *Stata par la pratique : statistiques, graphiques et éléments de programmation*. Stata Press, 2008.
- [18] Casin Ph., *Analyse des données et des panels de données*, De Boeck, 1999.
- [19] El Achhab A., Etude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine des Doukkala, 1993.
- [20] E.K. Ahoussi, N. Soro, A.M. Kouassi, G. Soro, Y.B. Koffi and S.P. Zade, "Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  et  $\text{Pb}^{2+}$ ) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol.4, no.5 , pp. 1753-1765, 2010.
- [21] H.F. Pop, J.W. Einax and C. Sârbu, "Classical and fuzzy principal component analysis of some environmental samples concerning the pollution with heavy metals" *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 97, pp. 25-32, 2009.
- [22] J.P. Faillat, "Origine des nitrates dans les nappes de fissures de la zone tropicale humide- Exemple de la Côte d'Ivoire", *Journal of Hydrology*, vol. 113, pp. 231-264, 1990.
- [23] R. L. Olsen, R. W. Chappel and J. C. Loftis, "Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis- literature review and Illinois River watershed case study", *Water research*, vol.46, pp. 3110-3122, 2012.
- [24] A. Dupuy, R. Moumtaz and O. Banton, "Contamination nitrée des eaux souterraines d'un bassin versant agricole hétérogène 2. Evolution des concentrations dans la nappe", *Revue des sciences de l'eau*, vol. 10, pp. 185-198, 1997.