



**APPLICATION DE LA METHODE SOM DES RESEAUX DE NEURONES  
ARTIFICIELS POUR LA CLASSIFICATION DE LA QUALITE  
ENVIRONNEMENTALE DES SYSTEMES LACUSTRES DANS LE MOYEN  
ATLAS MAROCAIN : CAS DES LACS IFRAH, IFFER ET AFOURGAGH**

**APPLICATION OF THE SELF ORGANIZING MAP METHOD FOR THE  
CLASSIFICATION OF THE ENVIRONMENTAL QUALITY OF THE LAKE SYSTEMS  
IN THE MOROCCAN MIDDLE ATLAS: LAKES CASES OF IFRAH, IFFER AND  
AFOURGAGH**

***OUSMANA H.<sup>1</sup>, EL HMAIDI A.<sup>1</sup>, BERRADA M.<sup>3</sup>,  
DAMNATI B.<sup>2</sup> & ETEBAAI I.<sup>2</sup>***

- <sup>1</sup>. Université Moulay Ismaïl, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Equipe Sciences de l'Eau et Ingénierie de l'Environnement, B.P. 11201, Zitoune, Meknès, Maroc, *habiba.ousmana@gmail.com, elhmaidi@yahoo.fr*,
- <sup>2</sup>. Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire Environnement, Océanologie et Ressources Naturelles, B.P. 416, Tanger, Maroc, *b\_damnati@yahoo.fr*,
- <sup>3</sup>. Université Moulay Ismail, ENSAM de Meknès, Laboratoire de Modélisation Mathématique et Informatique (LM2I), Matjane II, Meknès, B.P. 15290, AL Mansour, 50000, Meknès, Maroc,

*m.berrada@ensam-umi.ac.ma*

**RESUME**

Les cartes topologiques auto-organisatrices de Kohonen (Self Organising Maps: SOM) et d'autres méthodes de l'intelligence artificielle sont des outils efficaces pour modéliser et résoudre des problèmes environnementaux. Dans cette étude, nous avons proposé une approche de classification basée sur un réseau de neurones artificiels du type carte topologique auto-organisatrice (SOM) afin de mettre en évidence la classification des paramètres physico-chimique saisonnière des eaux de systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh.

La classification par carte auto-organisatrice a permis de définir quatre classes d'échantillons. Les classes 1 et 2 sont significativement caractérisées par des concentrations élevées en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$  (mg/l)), sodium ( $\text{Na}^+$  (mg/l)), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$  (mg/l)), (TDS (mg/l)) et en matière en suspension (MES (mg/l)). La classe 3 montre des concentrations élevées en calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  (mg/l)), potassium ( $\text{K}^+$  (mg/l)), en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$  (mg/l)) et en nitrates ( $\text{NO}_3^-$  (mg/l)). La classe 4 est caractérisée par des valeurs faibles de tous les paramètres sauf la Charge Dissoute Totale et la conductivité électrique (CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )) qui sont relativement élevées par rapport aux autres groupes.

Les résultats obtenus montrent que la classification par des cartes topologique auto-organisatrices de Kohonen (SOM) est un outil excellent et fondamentalla compréhension et la visualisation de la distribution spatiale et temporelle de la qualité physico-chimique des eaux des trois lacs étudiés du Moyen Atlas.

**Mots clés :** Classification, cartes topologiques auto-organisatrice, SOM, paramètres physico-chimiques, systèmes lacustres, Moyen Atlas, classification.

## ABSTRACT

Self-Organising Maps (SOM) and other methods of computational intelligence are effective tools to model and solve environmental problems. In this study, we proposed a classification approach based on self-organizing maps to highlight the seasonal classification of physicochemical parameters of the waters of lakes systems in the Moroccan Middle Atlas: Ifrah, Iffer and Afourgagh lakes.

The self-organizing map's results define four clusters of samples. The cluster I and II samples were significantly characterized by high concentrations of bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$  (mg/l)), Sodium ( $\text{Na}^+$  (mg/l)), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$  (mg/l)), (TDS (mg/l)) and the suspended solids (MES (mg/l)). In the other side, those of cluster III have high concentrations of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$  (mg/l)), Potassium ( $\text{K}^+$  (mg/l)), Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$  (mg/l)) and Nitrates ( $\text{NO}_3^-$  (mg/l)). Indeed, the samples of cluster IV are characterized by low values of all parameters except the Total Dissolved load and the electrical conductivity (EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )) are high compared to other groups. The results show that the classification by self-organizing Kohonen maps (SOM) is an excellent and fundamental tool for understanding and visualizing spatial and temporal distribution of the samples of the three lakes of the Middle Atlas.

**Keywords:** Classification, self-organizing maps, SOM, physico-chemical parameters, lake systems, Middle Atlas, clustering.

## INTRODUCTION

Le bassin versant des lacs Iffer, Ifrah et Affourgah est l'un des principaux bassins hydrographiques au Maroc. C'est un bassin très individualisé qui présente des contrastes climatiques, lithologiques et topographiques. D'où son intérêt dans l'étude des phénomènes des actions anthropiques et leurs conséquences sur la qualité des eaux (Etebaai, 2009).

Les cartes auto-organisatrices (SOM) sont des techniques de réseau neuronal artificiel basées sur des algorithmes d'apprentissage non supervisé (Kohonen, 2001). En raison de leurs capacités de classification ainsi que de leur performance de visualisation, elles ont été utilisées avec succès dans les domaines de l'environnement (sol, air, eau, etc.). Alvarez-Guerra et *al.* (2011) ont développé une méthodologie basée sur la technique de SOM pour l'intégration et la classification de données sur plusieurs polluants mesurés aux stations de surveillances en fonction de leurs indications sur la qualité de l'air en Espagne. Tsakovski et *al.* (2009) ont utilisé SOM pour révéler les principaux facteurs contrôlant la qualité de l'eau de ruissellement à Gdansk (Pologne). Berrada et *al.*, 2014 ont utilisé SOM et une classification hiérarchique ascendante (SOM-HCA) afin de détecter les variations saisonnières des concentrations en métaux lourds dans les sédiments superficiels du barrage Sidi Chahed (Maroc).

L'objectif de cette étude est d'exploiter les données relatives aux paramètres physico-chimiques des eaux lacustres par l'approche statistique (SOM) pour visualiser et comprendre la distribution spatiale et temporelle des échantillons d'eau et de leurs paramètres physico-chimiques au niveau des trois systèmes lacustres étudiés. La classification hiérarchique par SOM (SOM-CHA) est utilisée pour mettre en évidence les différentes classes et détecter les variations spatiales et temporelles des paramètres physico-chimiques des eaux des lacs Iffer, Ifrah et Afourgagh.

## PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Les sites retenus dans le cadre de ce travail sont les lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh, localisés au nord du Moyen Atlas central marocain dans le causse du Moyen Atlas tabulaire, à environ 180 km, à vol d'oiseau, de côte atlantique à l'Ouest et méditerranéenne au Nord (Fig.1).

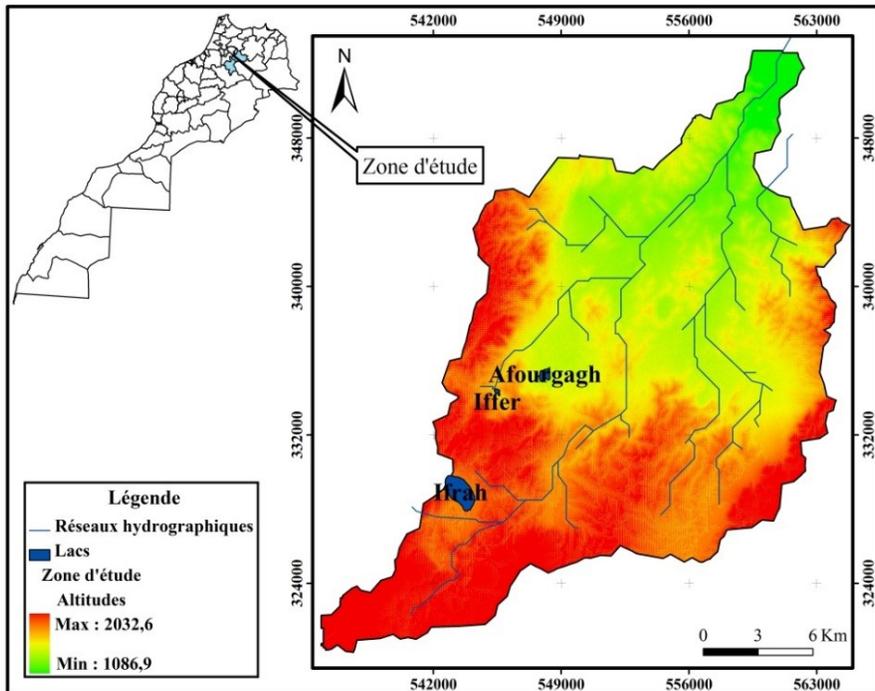


**Figure 1 :** Localisation des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh (Source : Google Earth Septembre, 2014).

*Le lac Dayet Ifrah* est situé au Nord du Moyen Atlas Central, à une distance d'environ 30 km de la ville d'Ifrane. C'est l'un des plus grands lacs de la région, avec une superficie estimée à 250 ha qui connaît d'importantes fluctuations selon les années et les saisons. Il est essentiellement alimenté par la nappe phréatique, les eaux de ruissellement et la fonte des neiges (Damnati et al., 2012).

*Le lac Dayet Afourgagh* est permanent, eutrophe, alcalin et peu profond. Sa superficie est de 24 ha (Morgan, 1982). Actuellement, la zone humide occupe une superficie de 12 ha, variable selon les années et les saisons. Il est essentiellement alimenté par la fonte des neiges et les eaux de ruissellement.

Le lac *Dayet Iffer* est pratiquement le plus petit lac naturel du Moyen Atlas avec une superficie de 5 à 7 ha seulement. Il est d'origine karstique, aux eaux stagnantes, eutrophe, relativement profond d'environ 7 m, de forme circulaire et aux bords pentus. Son niveau est variable en fonction des saisons et de la pluviosité annuelle (Hinaje *et al.*, 2002).



**Figure 2 :** Situation et MNT de la zone d'étude.

## MATERIEL ET METHODES

### Base de données

La base de données utilisées, dans le cadre de ce travail, est constituée de 14 paramètres physico – chimiques réalisés sur 66 échantillons des eaux des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh (Etebaai, 2009). Les paramètres utilisés sont: pH, les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), les Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), le Calcium( $\text{Ca}^{2+}$ ), le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le Sodium ( $\text{Na}^+$ ), le Potassium ( $\text{k}^+$ ), la Conductivité Electrique (C.E), la

Matière en suspension (MSE), l'Oxygène dissous ( $O_2$ ), la Charge Totale Dissoute (TDS), la Température (T), les Nitrates ( $NO_3^-$ ) et les Sulfates ( $SO_4^{2-}$ ).

### Cartes auto-organisatrices (SOM)

La carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM) est un outil puissant pour le partitionnement des données (Kohonen, 1998). SOM possède la propriété de préserver la topologie des données ainsi que la relation de distance entre elles (Fig.3). Les cartes SOM sont des méthodes de réseaux de neurones artificiels à apprentissage non supervisé qui constituent une classe importante des réseaux de neurones (Cottrell et al., 2003). Ces réseaux sont composés d'une grille de  $d$  neurones (ou nœuds, ou unités) auxquels seront présentés les échantillons (les vecteurs d'entrées) (Vesanto et al., 2000). Le choix du paramètre  $d$  (la dimension de la carte) se fait a priori. Chaque neurone de la grille est relié aux vecteurs d'entrées par l'intermédiaire de  $d$  synapses et  $d$  vecteurs poids  $w$ . Le vecteur  $w$  est appelé vecteur prototype ou référent et représente le neurone de la carte dans l'espace des données. Le plus proche des référents pour une donnée est appelé le BMU (the Best Matching Unit). Pour valider la classification SOM, les deux critères : erreur topologique (TE) et erreur de quantification (QE) sont généralement utilisés.

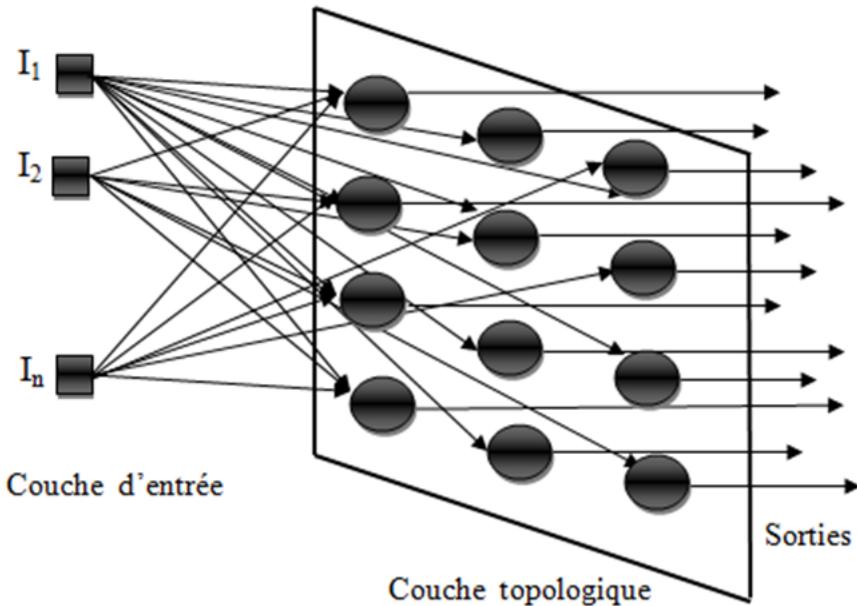
Erreur de Quantification  $Q_e$  : Cet indice mesure la distance moyenne entre chaque donnée et son BMU (Kohonen, 2001). Plus la valeur de  $Q_e$  est petite, plus la qualité de l'algorithme SOM est meilleur. Son expression est donnée par

$$Q_e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|x^{(k)} - w(x^{(k)})\|^2$$

où  $N$  est le nombre des données,  $x^{(k)}$  est le  $k$ -ième individu et  $w(x^{(k)})$  est le BMU de l'individu  $x^{(k)}$ .

Erreur de Topologique  $T_e$  : Ce critère décrit la façon dont la SOM préserve la topologie de l'ensemble des données étudiées (Cabanes et al., 2011). Elle mesure la proportion des données ayant les deux premiers BMU non adjacents. Contrairement à l'erreur de Quantification,  $T_e$  prend en compte la structure de la carte SOM (Uriarte et al., 2005).

l'ensemble des voisins du prototype le plus proche de



**Figure 3 :** Structure d'une carte topologique.

La carte topologique présente divers avantages par rapport aux méthodes linéaires et de classification habituellement utilisées pour extraire des groupes d'échantillons recueillis, comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP), l'Analyse des Correspondances (AC) et la classification hiérarchique (CH). Leurs limitations sont bien connues. Par exemple, pour chacune d'elle, une forte distorsion est observée lorsqu'il y a des relations non-linéaires entre les variables (Giraudel et Lek, 2001).

### **Classification hiérarchique par SOM (SOM-CHA)**

Comme les autres méthodes d'analyse des données, dont elle fait partie, la classification SOM-CHA a pour but d'obtenir une représentation schématique simple. Elle consiste à calculer une matrice exprimant les distances mutuelles entre les points à classer, qui sont les nœuds de la carte, puis, en se basant sur cette matrice, à regrouper entre eux les points les plus proches. Cette méthode

permet la construction d'un arbre hiérarchique, qui révèle plusieurs partitions possibles, où chaque point est attribué à l'un des groupes d'une partition donnée. Le choix de la meilleure partition s'effectue une fois la classification hiérarchique terminée.

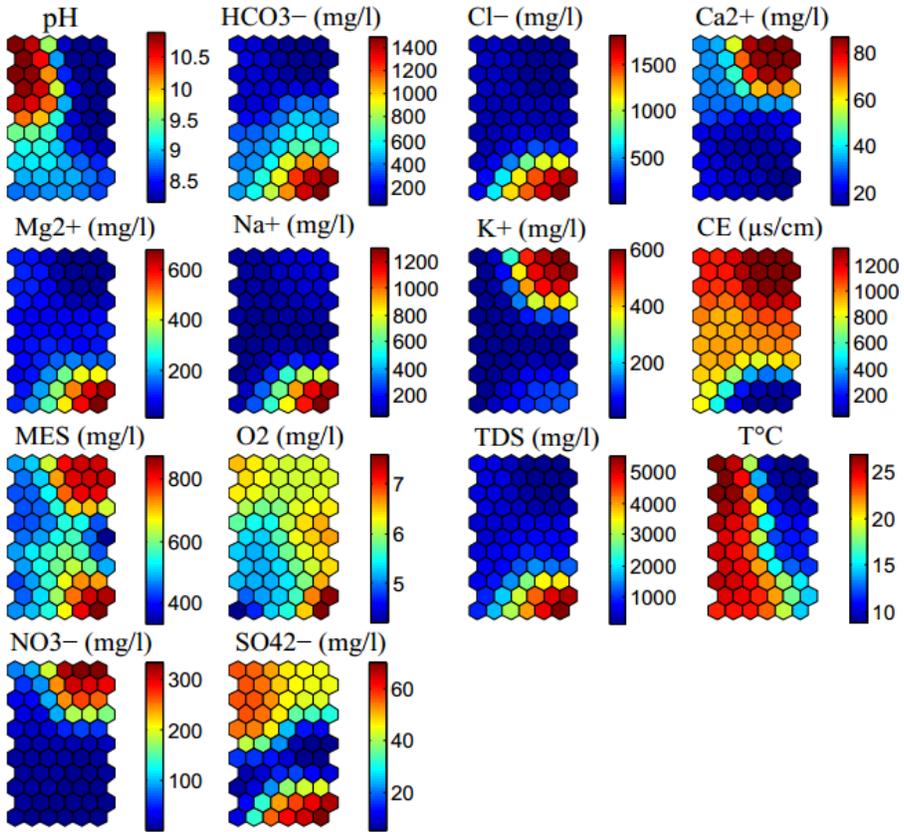
## RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Classification des échantillons des eaux lacustres par SOM

Le principe de l'algorithme des SOM consiste à effectuer une classification non linéaire des bases de données complexes en identifiant des groupes semblables. Dans le cadre de ce travail, la couche d'entrée est constituée des vecteurs représentant les individus dont chacun contient 14 composants représentant les 14 paramètres physico-chimiques des eaux des lacs étudiés. La couche de sortie est composée de 66 neurones (11 lignes  $\times$  6 colonnes). Cette taille a été choisie pour la carte de sortie car elle minimise les deux critères d'erreurs (QE=0,1496 et TE=0,00).

Les plans de composants SOM de l'ensemble des données permettent de distinguer deux types de couleurs, les cellules rouges foncées représentent des valeurs élevées, alors que les cellules bleues représentent des valeurs faibles (Fig.4). Les modes de couleurs identiques entre les variables correspondent à une corrélation positive; qu'on peut observer entre les variables Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et Charge Totale Dissoute (TDS). En revanche, la Charge Totale Dissoute (TDS) et le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le Potassium ( $\text{K}^+$ ) et le Sodium ( $\text{Na}^+$ ), PH et Bicarbonates, Chlorures, Magnésium, Sodium, Charge Totale Dissoute, Calcium, Potassium, Sodium, Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) montrent une corrélation négative. Les autres variables, en particulier T ( $^\circ\text{C}$ ), Matière en Suspension (MES), Oxygène dissous ( $\text{O}_2$ ) et Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ne montrent ni corrélations positives, ni négatives et varient indépendamment des autres (Fig. 4).

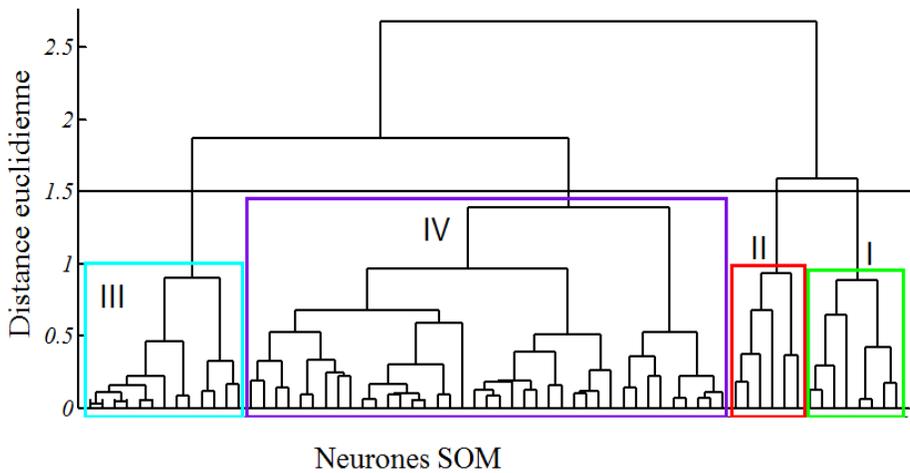
*Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualité environnementale des systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*



**Figure 4 :** Gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques sur la carte de Kohonen.

### **Classification hiérarchique SOM-CHA**

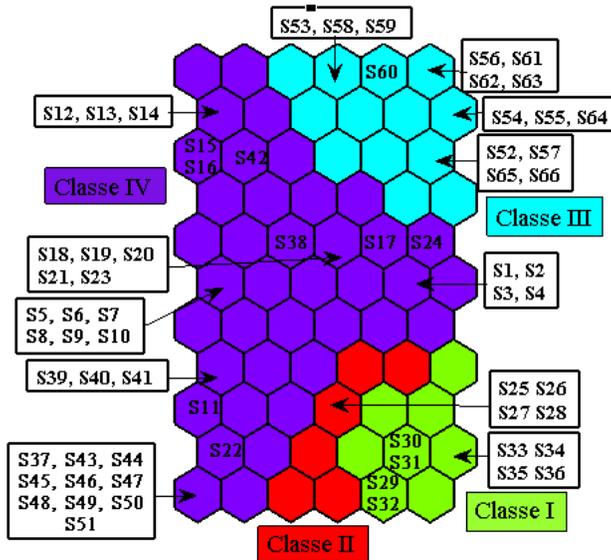
Une fois la carte de Kohonen est obtenue, on utilise une classification hiérarchique basée sur la méthode de Ward (Ward, 1963) et la distance euclidienne. La classification hiérarchique par SOM permet de regrouper les cellules de la carte SOM en groupes de paramètres physico-chimiques des eaux des trois lacs étudiés. Le dendrogramme obtenu par SOM-CHA, suggère que les 66 neurones doivent être regroupés en 4 classes (Fig. 5).



**Figure 5 :** Arbre de classification des paramètres physico-chimiques des eaux lacustres du Moyen Atlas obtenu avec la méthode des cartes topologiques (SOM).

La première classe contient 8 échantillons et représente 12,12% de l'ensemble des données, elle regroupe les eaux dont la concentration en éléments chimiques respectivement de  $\text{HCO}_3^-$  (1491,03 mg/l),  $\text{Cl}^-$  (1709,97 mg/l) et  $\text{Na}^+$  (1259,56 mg/l), une charge totale dissoute (5334,63 mg/l) élevée et une conductivité électrique faible (32,62  $\mu\text{s/cm}$ ). La deuxième classe comprend le plus faible nombre d'échantillons (4) et représente 6,06 % de la base de données totale. Elle est caractérisée principalement par des concentrations en éléments chimiques élevées ( $\text{HCO}_3^-$  (814,34 mg/l),  $\text{Cl}^-$  (1354,75 mg/l) et  $\text{Na}^+$  (564,95 mg/l)), une charge totale dissoute (3193 mg/l) et par une conductivité électrique très faible (18,22  $\mu\text{s/cm}$ ). La troisième classe contient 15 échantillons et représente 22,73 % de l'ensemble de la base de données totale. Elle est caractérisée essentiellement par des concentrations en éléments chimiques assez faibles ( $\text{HCO}_3^-$  (45,39 mg/l),  $\text{Cl}^-$  (15,64 mg/l) et  $\text{Na}^+$  (137,12 mg/l)), une charge totale dissoute faible (153,43 mg/l) et conductivité électrique très élevée (1332,22  $\mu\text{s/cm}$ ). Finalement, la quatrième classe comprend le plus grand nombre avec 39 échantillons qui représentent 59,06 % de la base de données. Elle est caractérisée par des concentrations en éléments chimiques assez faibles ( $\text{HCO}_3^-$  (45,39 mg/l),  $\text{Cl}^-$  (15,64 mg/l) et  $\text{Na}^+$  (137,12 mg/l)), une charge totale dissoute faible (153,43 mg/l), et une conductivité électrique très élevées (1332,22  $\mu\text{s/cm}$ ) (Tab.1 et Fig.6, 7,8et 9).

*Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualité environnementale des systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*

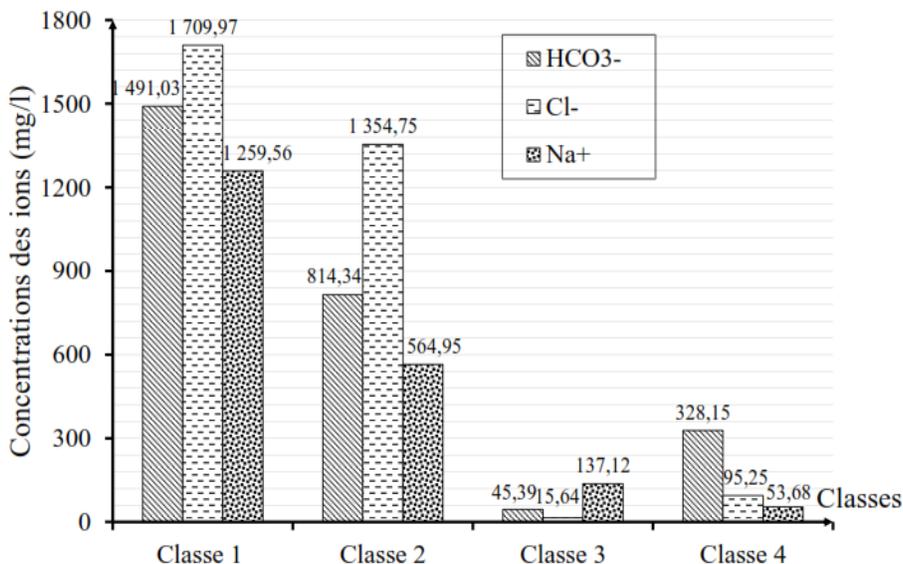


**Figure 6 :** Répartition des échantillons sur la carte de Kohonen à partir des variables physico-chimiques des eaux des lacs étudiés.

	Base de données totales			Classe I			Classe II		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
<b>pH</b>	7,7	9	10	8,4	8,4	8,5	8,8	8,9	9,1
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	42,09	434,31	1647	1545,3	1593	1647	805,9	1101,6	1397,5
<b>Cl<sup>-</sup></b>	8,77	349,22	2022,7	1951,5	1995,7	2022,7	1280,2	1389,4	1554
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	12,47	37,61	88,26	12,47	13,4	14,07	16,98	18,35	20,53
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	15,05	161	772,5	707,3	747	772,5	280,4	433,6	587,7
<b>Na<sup>+</sup></b>	27,54	249,8	1505,9	1394,1	1455,4	1505,9	550,79	814,3	1096,7
<b>K<sup>+</sup></b>	6,41	158,2	721	137,7	140	142,1	75,29	99,35	121,5
<b>CE</b>	7,44	906,76	1371,1	38,8	42,18	49,7	7,44	20,64	62,1
<b>MES</b>	154	598,89	1650	630	969	1650	490	662,25	980
<b>O<sub>2</sub></b>	1,94	5,98	8,87	8,71	8,8	8,87	4,69	5,18	5,57
<b>TDS</b>	149,97	1272,1	6085	5924	6022	6085	3148	3920,1	4776
<b>T</b>	8,6	18,4	27,2	10,3	10,4	10,8	23,6	24,2	24,8
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,13	84,44	392,2	8,27	8,27	8,27	0,13	2,86	8,27
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	2,16	37,22	81,33	74,02	77,16	81,33	43,33	60,21	69,59

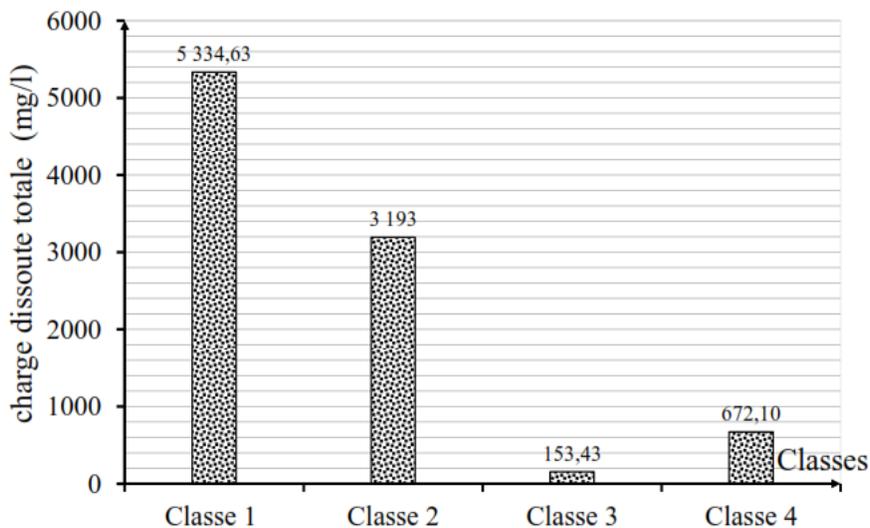
**Tableau 1** : Grandeurs statistiques de base (Min, moyenne, maximum) pour les paramètres physico-chimiques, respectivement pour toute la base de données et pour les différentes classes.

	Classe III			Classe IV		
	<i>Min</i>	<i>Moy</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Moy</i>	<i>Max</i>
pH	8,1	8,2	8,2	7,7	9,5	10
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	42,09	45,39	46,22	43,55	328,15	664,1
Cl <sup>-</sup>	8,77	15,64	19,56	78,77	95,25	136,55
Ca <sup>2+</sup>	86,04	86,84	88,26	13,74	25,11	33,46
Mg <sup>2+</sup>	15,05	15,56	16,24	56,61	100,9	123,5
Na <sup>+</sup>	57,6	137,13	178,27	27,54	53,68	76,24
K <sup>+</sup>	500	573,8	721	6,41	12,43	17,97
CE	1246,9	1332,2	1371,1	732	1013,6	1264
MES	808	829,53	843	154	459,23	774
O <sub>2</sub>	6,05	6,17	6,34	1,94	5,79	7,55
TDS	149,97	153,43	157,01	357	672,1	876
T	8,6	9,02	9,75	9,1	21,6	27,2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	209,9	302,6	392,2	1,17	25,05	181
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	43,57	45,1	46,94	2,16	25,38	57,3

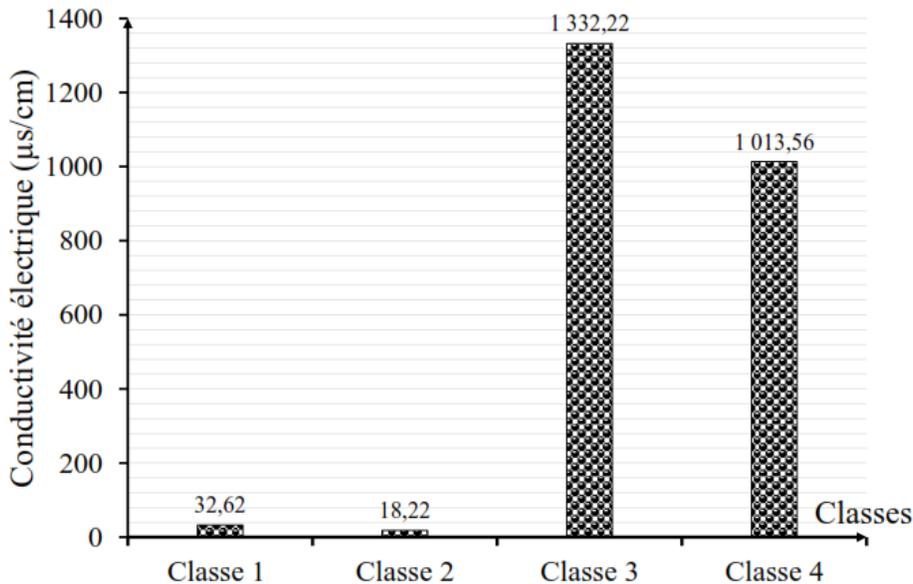


**Figure 7** : Variation des éléments chimiques des eaux lacustres étudiées dans le Moyen Atlas.

*Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualité environnementale des systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*



**Figure 8 :** Variation de la charge dissoute totale des eaux lacustres étudiées dans le Moyen Atlas.

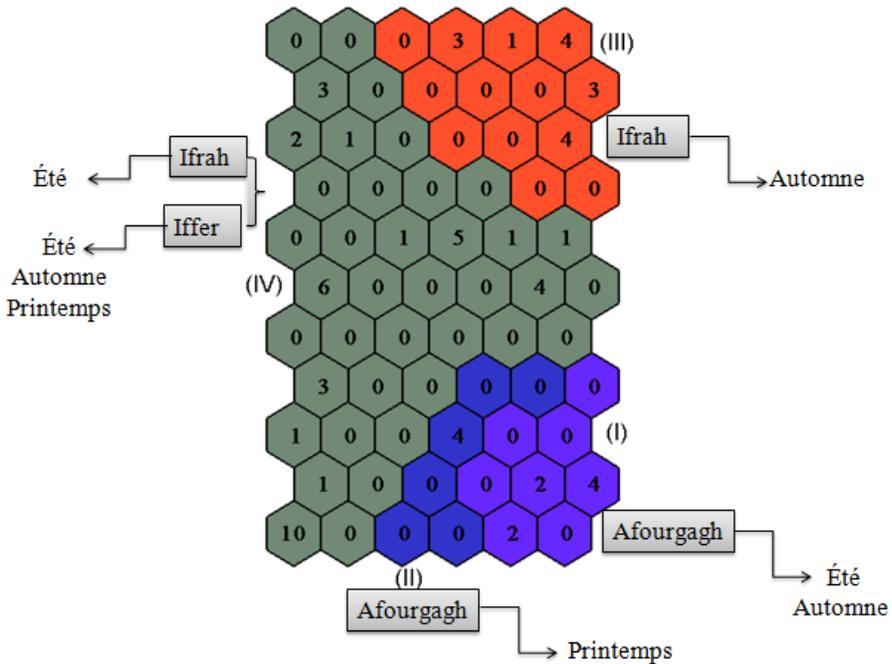


**Figure 9 :** Variation de conductivité électrique des eaux lacustres étudiées dans le Moyen Atlas.

## **DISCUSSION**

Pour mettre en évidence les variations spatiales et saisonnières, les 4 classes obtenues ont été représentées en fonction de l'appartenance des échantillons aux différents lacs étudiés et aux quatre saisons (Fig. 10). Ainsi, la classe I regroupe la plupart des échantillons d'été et d'automne du lac Afourgagh. Elle est caractérisée par des concentrations élevées en éléments chimiques, des teneurs élevées de la charge dissoute totale et des valeurs assez faibles de la conductivité électrique. La classe II contient les échantillons du printemps du lac Afourgagh. Elle est caractérisée principalement par des teneurs assez élevées en éléments chimiques et en charge dissoute totale et par des valeurs très faibles de la conductivité électrique. La classe III regroupe les échantillons d'automne du lac Ifrah. Elle est caractérisée essentiellement par des concentrations en éléments chimiques assez faibles, une charge dissoute totale faible et par des valeurs très élevées de la conductivité électrique. La classe IV est composée des échantillons d'été du lac Ifrah et de la majorité des échantillons d'été, d'automne et de printemps du lac Iffer. Elle montre des valeurs très élevées de la conductivité électrique et des concentrations très faibles en éléments chimiques (Fig.10). Cet enrichissement aurait probablement une triple origine, d'une part la nature géologique des terrains traversés, la différence d'altitude et d'autre part les rejets domestiques des communes avoisinantes.

*Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualité environnementale des systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*



**Figure 10 :** Distribution spatiale et temporelle des échantillons d'eau et de leurs paramètres physico-chimiques au niveau des trois lacs étudiés du Moyen Atlas.

## CONCLUSION

L'analyse statistique basée sur l'approche de la carte auto-organisatrice (SOM) de Kohonen a été appliquée sur une base de données, constituée de 14 paramètres physico-chimiques réalisés sur 66 échantillons des eaux des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh entre février et novembre de l'année 2006. Elle a mis en exergue les différentes corrélations positives et négatives entre les différents paramètres physico-chimiques étudiés.

La classification hiérarchique de la carte SOM (SOM-HC) a détecté des variations spatiales d'un lac à l'autre et saisonnières en identifiant le comportement physico-chimique des eaux lacustres du Moyen Atlas. Cette différenciation serait probablement en relation avec la nature géologique des terrains traversés, la différence d'altitude et les rejets domestiques des communes avoisinantes.

## REFERENCES

- Alvarez-Guerra E., Molina A., Viguri J. R. and Alvarez-Guerra M., 2011. A SOM-based methodology for classifying air quality monitoring stations. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30(3), 424-438.
- Beatriz H., Rafael P., Marisol V., Enrique B., Jose Manuel F., Luis F., 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Wat. Res.* 34(3), 807-816.
- Berrada M, El Hmairi A., Monyr N., Abrid D., Abdallaoui A., Essahlaoui A., El Ouali A., 2014. Self-organizing map for the detection of seasonal variations in Sidi Chahed dam sediments. *Hydrological Sciences journal*, 15p. DOI:10.1080/02626667.2014.964717.
- Cottrell M., Ibbou S., Letrémy P., Rousset P., 2003. Cartes auto-organisées pour l'analyse exploratoire de données et la visualisation. *Journal de la société française de statistique*, tome 144, n°4, 67-106.
- Cabanes G., Bennani Y., 2011. Apprendre les contraintes topologiques dans les cartes auto-organisatrices. In EGC, 137-148.
- Damnati B., Etebaai I., Reddad H., Benhardouz H., Benhardouz O., Miche H., Taieb M., 2012. Recent environmental changes and human impact since mid-20th century in Mediterranean lakes: Ifrah, Iffer and Afourgagh, Middle Atlas Morocco. *Quaternary International*, 262, 44-55.
- Etebaai I., 2009. L'environnement actuel et le fonctionnement hydro-climatique de quelques systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, 344p.
- Giraudel J.L. et Lek S., 2001. A comparison of self-organizing map algorithm and some conventional statistical methods for ecological community ordination. *Ecological Modelling*, 146 (1), 329-339.
- Hinaje S. et Ait Brahim L., 2002. Les Bassins Lacustres du Moyen Atlas (Maroc) : Un exemple d'Activité Tectonique Polyphasée Associée à des Structures d'Effondrement. *Com Inst Geol e M*, 89, 283-294.
- Kohonen T., 1998. The Self-Organizing Maps. *Neurocomputing*, 21, 1-6.
- Kohonen T., 2001. Self-organizing maps. 3<sup>rd</sup> ed. Springer, Berlin.
- Morgan N. C., 1982. An ecological survey of standing waters in North West Africa: III. Site descriptions for Morocco. *Biological Conservation*, 24 (3), 161-182.

*Application de la méthode SOM des réseaux de neurones artificiels pour la classification de la qualité environnementale des systèmes lacustres dans le Moyen Atlas marocain : Cas des lacs Ifrah, Iffer et Afourgagh*

- Tsakovski S., Tobiszewski M., Simeonov V., Polkowska Z. and Namiesnik J., 2009. Chemical composition of water from roofs in Gdansk, Poland. *Environmental Pollution*, 158 (1), 84-91.
- Uriarte E. A., Martín F.D., 2005. Topology preservation in SOM. *International journal of applied mathematics and computer sciences*, 1(1), 19-22.
- Vesanto J., Alhoneimi E., 2000. Clustering of the Self Organizing Map. *IEEE Trans, Neural Networks*, 11 (3), 586-600.
- Ward, J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58(301), 236–24